



**Atena**  
Editora

Ano 2020

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
Marcelo Henrique Granza  
(Organizadores)

**Engenharia Elétrica  
e de Computação:  
Atividades Relacionadas com  
o Setor Científico e Tecnológico**

**2**

A black and white photograph of a hand holding a square microchip. The chip has a grid of pins around its perimeter and several smaller components on its surface. The background is a blurred workshop or laboratory setting with various electronic components and tools.

**Atena**  
Editora

Ano 2020

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
Marcelo Henrique Granza  
(Organizadores)

**Engenharia Elétrica  
e de Computação:  
Atividades Relacionadas com  
o Setor Científico e Tecnológico**

**2**

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof<sup>a</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof<sup>a</sup> Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Prof<sup>a</sup> Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof<sup>a</sup> Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>a</sup> Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof<sup>a</sup> Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA  
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis  
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR  
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	<p>Engenharia elétrica e de computação [recurso eletrônico] : atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann, Marcelo Henrique Granza. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF            Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader            Modo de acesso: World Wide Web            Inclui bibliografia            ISBN 978-65-5706-168-8            DOI 10.22533/at.ed.688200707</p> <p>1. Ciência da computação – Pesquisa – Brasil. 2. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Granza, Marcelo Henrique.</p> <p style="text-align: right;">CDD 623.3</p>
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica e da computação é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura!

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
Marcelo Henrique Granza

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PARADOXOS, RISCOS E REQUISITOS DA NOVA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA	
Vitor Silva Duarte	
Mario Jorge Daher	
Alex Nunes de Almeida ( <i>in memoriam</i> )	
Maria Aparecida Martinez	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007071</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
ANÁLISE DO IMPACTO DE GERAÇÕES RENOVÁVEIS SOBRE A MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO POR MEIO DE REGIÕES DE SEGURANÇA	
Paulo Andrade Novaes	
Antonio Carlos Zambroni de Souza	
Fábio da Costa Medeiros	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007072</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>28</b>
APLICAÇÃO DE MODELO MULTIOBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OBRAS DE CONEXÃO DA REDE	
Paulo Sérgio Zanin Júnior	
Lina Paola Garcés Negrete	
Gelson Antônio Andrêa Brigatto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007073</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>43</b>
COMPLEXIDADES DA OPERAÇÃO DO SIN E SEUS IMPACTOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	
Vinicius Ragazi David	
Daniela Souza	
Leonardo Calabro	
João Carlos Mello	
Xisto Vieira Filho	
Edmundo P. Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007074</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>61</b>
ESTRATÉGIAS DE O&M UTILIZADAS NA GESTÃO DE DESEMPENHO DOS PARQUES EÓLICAS, EM TEMPO REAL, PÓS OPERAÇÃO E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO NO CURTO E MÉDIO PRAZO, MOSTRANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE BIGDATA, BUSINESS INTELLIGENCE E MACHINE LEARNING	
Flávio Martins ribeiro	
Marcus Antonius Queiroz da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007075</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>72</b>
IMPACT OF HOURLY PRICES ON FUTURE WIND FARM CONTRACTS IN BRAZIL	
João Carlos De Oliveira Mello	
Cláudio Ferreira	
Lucas Soares	
André Castro	
Daniela Souza	
Evelina Neves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007076</b>	

<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>83</b>
DESAFIOS ENCONTRADOS NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NO COMPLEXO TERMELÉTRICO JORGE LACERDA	
Liliana Dutra dos Santos	
Rofferson Rosa Izidoro	
Daniel José Schmitz de Aguiar	
Fábio Silveira Costa	
Juceli Locks Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007077</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>96</b>
AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS DINÂMICOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO PARA ESTRUTURAS DE SUBESTAÇÕES	
Rafael Faria da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007078</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>108</b>
ESTUDO E SIMULAÇÃO DE PROTEÇÃO DE ZONA MORTA EM SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Rodrigo Niederauer da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6882007079</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>121</b>
ELETROENCEFALÓGRAFO DE BAIXO CUSTO: CONCEITOS E PROJETO	
Vitor Nestro Rauffmann	
Pedro Bertemes Filho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070710</b>	
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>135</b>
FONTES DE CORRENTE EM TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA MULTIFREQUENCIAL: ESTADO DA ARTE	
Lucas Cordeiro Butzke	
Pedro Bertemes Filho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070711</b>	
<b>CAPÍTULO 12 .....</b>	<b>148</b>
TEORIA E ESTUDOS DE APLICAÇÕES DA TRANSFORMADA FRACIONAL DE FOURIER	
Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento	
Adailton Braga Júnior	
Beatriz Cristina Reis Cordeiro	
Marcelo Luiz de Carvalho Ribeiro	
Pierre Teixeira Rodrigues	
Petrus Luiz Luna Pequeno	
Antônio Carlos Duarte Ricciotti	
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070712</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>166</b>
RELÉ INTELIGENTE BASEADO NA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE 4 VALORES MULTIFUNCIONAL - RI LPA4V	
<a href="#">Viviane Barrozo da Silva</a> <a href="#">Ghendy Cardoso Júnior</a> <a href="#">Antonio Carlos Duarte Ricciotti</a> <a href="#">Pierre Teixeira Rodrigues</a> <a href="#">Marcelo Luiz De Carvalho Ribeiro</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070713</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>179</b>
OPEN SOURCE MODULAR DIDACTIC PLATFORM FOR POWER ELECTRONICS TEACHING	
<a href="#">Lucas Koleff</a> <a href="#">Gustavo Soares Valentim</a> <a href="#">Luciana da Costa Marques</a> <a href="#">Victor Praxedes Rael</a> <a href="#">Adrian D'Lucas Cardoso Gonçalves</a> <a href="#">Wilson Komatsu</a> <a href="#">Lourenço Matakas Junior</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070714</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>204</b>
AUTOMAÇÃO DA CABINE DE LIMPEZA DE IMPRESSÃO 3D BINDER JETTING	
<a href="#">João Batista Machado Silva</a> <a href="#">Leonardo Bevilaqua dos Santos</a> <a href="#">Lucas Leandro Gomes</a> <a href="#">Mariana Silva do Nascimento Gonçalves</a> <a href="#">Vinícius de Moares Barboza</a> <a href="#">Rogério Luis Spagnolo da Silva</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070715</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>218</b>
USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA OBTENÇÃO DE UM SENSOR AR/COMBUSTÍVEL VIRTUAL APLICADO A UM MOTOR MONOCILÍNDRICO	
<a href="#">Leonardo Faure Nardini Paschoa</a> <a href="#">Sergio Ribeiro Augusto</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070716</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>229</b>
INVESTIGAÇÃO DOS MÉTODOS NORMATIVOS PARA O CÁLCULO E ESTIMAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	
<a href="#">Daniel Carrijo Polonio Araujo</a> <a href="#">Gabriel De Souza Pereira Gomes</a> <a href="#">Mateus Batista De Moraes</a> <a href="#">Rafael Prux Fehlberg</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070717</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>242</b>
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM A UTILIZAÇÃO DE MANTA TÉRMICA: ESTUDO DE CASO DE UMA INJETORA DE PEÇAS PLÁSTICAS	
<a href="#">Ivo Carlos Guarato Júnior</a> <a href="#">Lúcio Rogério Júnior</a> <a href="#">Antônio Manoel Batista da Silva</a> <a href="#">Guilherme Henrique Alves</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.68820070718</b>	

<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>254</b>
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA PARA PESQUISA DE PRODUTOS DE SUPERMERCADO <a href="#">Marcelo Garcia Palma</a> DOI 10.22533/at.ed.68820070719	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>271</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>272</b>

## PARADOXOS, RISCOS E REQUISITOS DA NOVA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

### Vitor Silva Duarte

Operador Nacional do Sistema Elétrico

Rio de Janeiro – RJ

<http://lattes.cnpq.br/8688701762929070>

### Mario Jorge Daher

Operador Nacional do Sistema Elétrico

Rio de Janeiro - RJ

### Alex Nunes de Almeida (*in memoriam*)

Operador Nacional do Sistema Elétrico

Rio de Janeiro - RJ

### Maria Aparecida Martinez

Operador Nacional do Sistema Elétrico

Rio de Janeiro - RJ

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho é apresentar uma “radiografia” da nova Matriz de Energia Elétrica, agora com a presença crescente das novas renováveis, juntamente com a inflexibilidade significativa da geração a fio d’água das grandes usinas da Amazônia, trazendo as razões pelas quais as avaliações de médio prazo, embora de forma consistente com o Equilíbrio Estrutural postulado pelo Conselho Nacional de Política Energética – CNPE (Resolução CNPE 01/2004) e pelo modelo

mercantil vigente (100% da carga estimada de cada distribuidora deve estar contratada no horizonte de cinco anos), apresentam resultados de desempenho muitas vezes preocupantes e porque não dizer paradoxais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Matriz de Energia Elétrica Brasileira, Grau de regularização, Sazonalidade, Oferta Térmica, Geração Compulsória

### PARADOXES, RISKS AND REQUIREMENTS OF THE NEW BRAZILIAN ELECTRIC MATRIX

**ABSTRACT:** This paper presents an overview of the new Brazilian Electric Matrix, considering the increase in new renewables with the significant inflexibility of the large run-of-river power plants in the Amazon. In addition, this paper explains why the medium-term energy evaluations doesn’t always perform well, despite being consistent with the Structural Balance postulated by the National Energy Policy Council - CNPE (Resolution CNPE 01/2004) and the current commercial model (100% of the estimated load of each distributor must be covered in a five-year contract). This behavior is worrying and paradoxical.

**KEYWORDS:** Brazilian Electric Matrix, River Regularization, Seasonality, Thermal Plants, Inflexibility

## 1 | INTRODUÇÃO

A hidroeletricidade era a única opção energética que o Brasil dispunha em meados da Década de 60, no século passado, para fazer frente ao seu desenvolvimento econômico-social. O Consórcio CANAMBRA – Canadá, América e Brasil, permitiu, não só dar início ao pioneiro processo detalhado de inventário do Potencial Hidroelétrico Brasileiro, como trouxe a experiência do uso de ferramentas matemáticas de simulação da operação de sistemas hidrotérmicos. Também, nessa época, o Setor Elétrico Brasileiro aprendeu os primeiros passos no processo sistematizado de estudos de planejamento da expansão.

Durante muitos anos, a Matriz de Energia Elétrica Brasileira teve a predominância da hidroeletricidade, com a participação modesta de fontes térmicas, como carvão nacional, usinas a óleo, nucleares e, mais recentemente as usinas a gás natural. Enfrentamos, na forma de vanguarda, os impactos ambientais advindos com a construção de grandes reservatórios de regularização, idealizados para mitigar o significativo fenômeno da volatilidade e da sazonalidade das nossas aflúncias. Construimos uma das maiores capacidades de armazenamento de energia primária no Mundo (cerca de 290 GWmês), mas tivemos que ceder ao agora protagonismo das Novas Renováveis, como as usinas eólicas e as usinas fotovoltaicas.

Essas novas fontes, pela sua natureza de grande imprevisibilidade, variabilidade e intermitência inter e intra-day na produção, demandam do planejamento e da programação da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN grandes desafios no sentido de garantir a qualidade, a confiabilidade e a economicidade do suprimento de energia elétrica ao consumidor final. Além disso, as condicionantes ambientais existentes nas duas últimas décadas praticamente inviabilizaram a construção de novos aproveitamentos com reservatórios de regularização com capacidade de armazenamento relevantes, fazendo com que praticamente toda a expansão hidroelétrica se desse através de usinas a fio d'água, muitas delas com elevada potência instalada mas com disponibilidade caracterizada por acentuada sazonalidade, ou seja, grandes diferenças de produção entre as estações secas e chuvosas, por conta dos regimes hidrológicos dos rios em que essas usinas foram construídas. Esse é o caso das usinas da Amazônia, como a UHE Belo Monte e as UHEs Santo Antônio e Jirau.

Nesse trabalho, os autores apresentam uma “radiografia” da nova Matriz de Energia Elétrica, agora com a presença crescente das novas renováveis, juntamente com a inflexibilidade significativa da geração a fio d'água das grandes usinas da Amazônia. Agora podemos dizer que nossa Matriz passou de Hidrotérmica para Termorenovável.

No trabalho são apresentadas as razões pelas quais a expansão da nossa Matriz, embora de forma consistente com o Equilíbrio Estrutural postulado pelo Conselho Nacional de Política Energética – CNPE (Resolução CNPE 01/2004) e pelo modelo

mercantil vigente (100% da carga estimada de cada distribuidora deve estar contratada no horizonte de cinco anos), apresenta resultados de avaliação de desempenho muitas vezes preocupantes e porque não dizer paradoxais, como custos marginais de operação elevados, riscos de déficit próximos a zero mas acentuados destques no curto prazo dos reservatórios ao final de cada estação seca, ficando evidente uma dependência, cada vez maior, das estações chuvosas subsequentes, ou seja, uma Matriz que mostra que embora o Equilíbrio Estrutural seja uma condição necessária atendida, pode não ser suficiente para o Equilíbrio Conjuntural. Também são apresentadas as visões dos autores quanto aos requisitos de planejamento da operação que devem ser contemplados nos próximos leilões de energia nova e até mesmo na eventual desconstrução/renovação de fontes com custo de operação elevados cujos contratos no CCEAR estão por terminar.

## **2 | CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Neste item serão discutidas características relevantes da matriz de energia elétrica do SIN, destacando-se as principais transformações vivenciadas nos últimos anos. As informações aqui apresentadas foram extraídas de Plano da Operação Energética 2019/2023 – PEN 2019 (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2019).

### **2.1 Expansão da Oferta de Geração Elétrica 2019/2023**

O programa de expansão da oferta de geração adotado pelo ONS no PEN 2019 tem, como referência, os cronogramas de obras definidos pelo MME/CMSE/DMSE para o Programa Mensal de Operação – PMO de maio de 2019, sendo composto de usinas cujas concessões foram obtidas através de leilões de menor preço da energia a ser disponibilizada ao SIN (LEN A-3, LEN A-5, LFA, LER e outros), conforme modelo institucional vigente, cujos cronogramas são acompanhados mensalmente pelo CMSE/DMSE e de usinas cujas concessões são apenas autorizadas, sem processo licitatório, cujos cronogramas são acompanhados apenas pela ANEEL (PCHs, biomassa, eólicas, solares ou outras fontes).

Na configuração adotada em Operador Nacional do Sistema Elétrico (2019), a expansão da oferta 2019/2023 corresponde a 40 leilões de energia, tendo sido outorgados 80.285 MW de capacidade instalada em 1.231 novas usinas, sendo 32 usinas hidroelétricas, 143 PCHs, 96 usinas térmicas convencionais, 115 usinas a biomassa, 702 usinas eólicas e 143 usinas fotovoltaicas. Na Tabela 1 é apresentada a evolução desta matriz, classificada por fonte, desde o início de 2019 até o final de 2023.

TIPO	01/jan/2019		31/dez/2023		Crescimento 2019-2023	
	MW	%	MW	%	MW	%
Hidráulica	109.212	67,6	114.585	64,4	5.373	4,9
Nuclear	1.990	1,2	1.990	1,1	-	-
Gás/GNL	12.821	7,9	17.861	10,0	5.040	39,3
Carvão	2.672	1,7	3.017	1,7	345	12,9
Óleo Combustível/Diesel	4.614	2,9	4.900	2,8	286	6,2
Biomassa	13.353	8,3	13.781	7,7	428	3,2
Biomassa com CVU	779	0,5	1.000	0,6	221	28,4
Eólica	14.305	8,9	17.281	9,7	2.976	20,8
Solar	1.780	1,1	3.626	2,0	1.846	103,7
Total	161.526	100,0	178.041	100,0	16.515	10,2

Tabela 1 - Evolução da matriz de energia elétrica do SIN – 2019/2023

Da tabela anterior, observa-se que a hidroeletricidade continuará como a principal fonte de geração de energia, embora sua participação no total da potência instalada do SIN deva ser reduzida de 67,6% em dezembro de 2018 para 64,4% em dezembro de 2023. A participação das fontes eólica e solar, todavia, aumentarão 20,8% e 103,7%, respectivamente, nos próximos 5 anos. A fonte eólica evolui de 14.305 MW (8,9%) para 17.281 MW (9,7%) e a fonte solar de 1.780 MW (1,1%) para 3.626 MW (2,0%). A fonte termoelétrica registra um pequeno acréscimo no seu percentual de participação.

Este cenário de expansão da matriz de geração de energia elétrica vem exigindo, nos últimos anos e, principalmente, nos próximos, mudanças de paradigma no planejamento e na programação da operação do SIN. Alguns rebatimentos dessa nova configuração são apresentados a seguir.

## 2.2 Redução do grau de regularização (GR)

Embora a hidroeletricidade continue sendo predominante até 2023, o acréscimo desse tipo de fonte se dará por usinas com baixo ou nenhum grau de regularização anual ou plurianual (usinas com pequeno ou nenhum reservatório de regularização). Esse fato se deve ou às restrições de natureza ambiental, com requisitos de ações mitigadoras cada vez mais rigorosos/onerosos, e/ou a própria inviabilidade econômica de formação de reservatórios em regiões como a Amazônia, por exemplo, caracterizada por potenciais hidroelétricos de baixa queda e vazões significativas na estação chuvosa, o que exigiria investimentos antieconômicos para a construção de reservatórios de regularização.

A Figura 1, ilustra a consequência deste fato, quando se compara a evolução da energia armazenada máxima do SIN – EAR<sub>máx</sub> (292.304 MWmês, praticamente constante), com seu grau de regularização, definido como sendo a quantidade de meses de estoque de energia e calculado como a relação entre a EAR<sub>máx</sub> e a carga a ser atendida, esta abatida da geração não despachável pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, tais como a geração térmica inflexível, a geração à biomassa, a geração

das pequenas centrais hidroelétricas – PCHs e a geração das usinas eólicas e solares, por serem fontes cuja representação nos estudos de planejamento da operação se faz através de abatimento sobre a carga projetada.

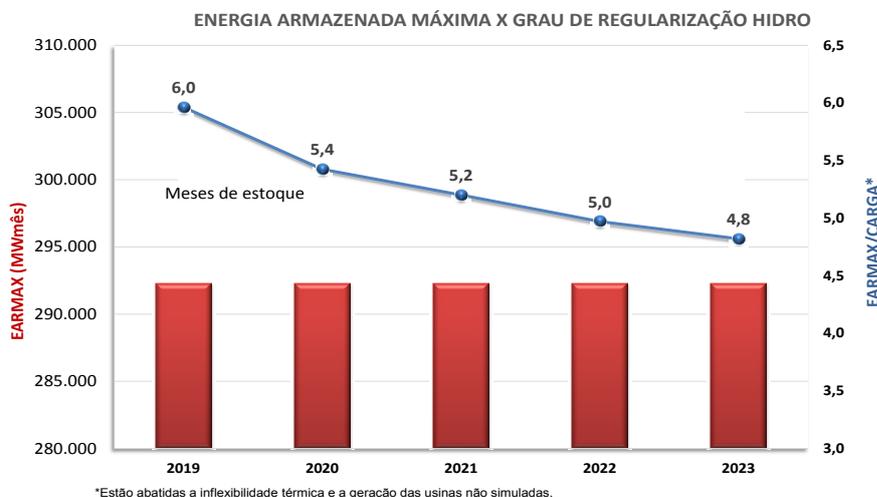


Figura 1 - Evolução da Energia Armazenada Máxima e Grau de Regularização do SIN

Observa-se, da figura anterior, que o grau de regularização do SIN deverá passar de 6 meses de estoque em 2019 para 4,8 meses em 2023, valor este com tendência de redução gradativa para os próximos anos, na medida em que o crescimento da carga não seja acompanhado pela agregação de novas usinas com reservatório de regularização e/ou por montantes equivalentes proporcionados por outras fontes complementares inflexíveis. No passado, a GR do SIN já atingiu valores de até cerca de nove meses.

Cabe comentar que quanto menor o GR de um sistema com acentuada sazonalidade das vazões naturais afluentes aos reservatórios, maior será a dependência de períodos chuvosos subsequentes para o seu reenchimento a cada ciclo hidrológico anual e maior será o seu esvaziamento a cada final de estação seca, aumentando a necessidade de fontes complementares nesses períodos e/ou mecanismos operativos de segurança específicos para a garantia de atendimento ao mercado, impactando diretamente no custo final da energia produzida, em favor da segurança operativa.

A título apenas de exemplo, avaliou-se então qual seria o montante de energia a ser agregado ao SIN no quinquênio 2019-2023 de tal modo que fosse mantido, ao longo dos próximos cinco anos, o mesmo GR de 2019 (6,0 meses). Os montantes necessários estão apresentados na Figura 2, onde se observa que para manutenção deste GR de 6,0 meses, através de uma expansão inflexível (abatida diretamente da carga, por não serem simuladas) seria necessário a instalação de 4,9 GWmed em 2020 a 11,6 GWmed em 2023. Caso o GR (6,0 meses) fosse mantido pelo acréscimo de energia armazenável (barra vermelha do gráfico), seria exigida a instalação de 29,0 GWmed em 2020 (9,9% EARMáx), atingindo o montante de 69,3 GWmed (23,7% EARMáx) em 2023.

Esse exercício serve para ratificar a tese de que as restrições à construção de reservatórios de regularização tornam as fontes complementares cada vez mais importantes para atenuar a redução gradativa do GR do SIN.

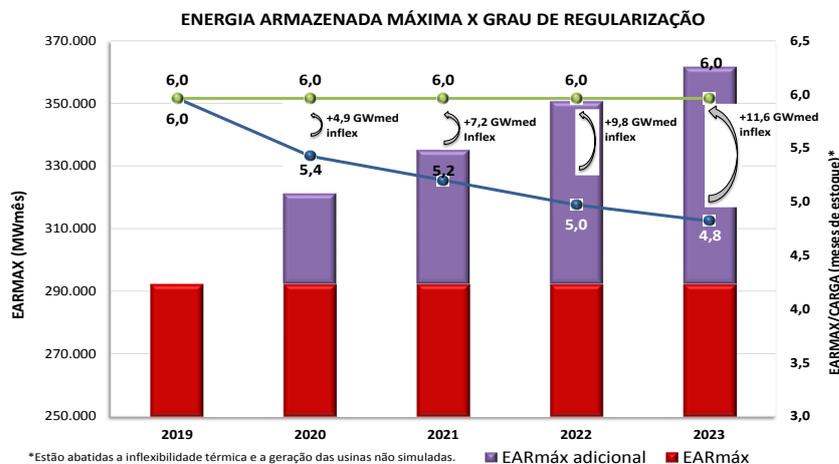


Figura 2 - Expansão Adicional para Manter o GR do SIN de 2019

Não obstante, fato importante é a “inflexibilidade da Amazônia”, ou seja, durante a estação chuvosa as usinas do Madeira, Teles Pires e a UHE Belo Monte terão suas produções compulsoriamente transferidas para os centros de consumo, o que de certa forma permitirá o reenchimento dos reservatórios de regularização do SIN, trazendo assim um efeito de crescimento virtual do GD. Esse efeito poderia elevar o estoque de regularização para cerca de 8 meses em 2023.

### 2.3 Um novo período crítico para o SIN?

O período crítico pode ser definido como “um período que tem início no último estágio (mês) em que o sistema se encontra completamente cheio e tem fim no último estágio (mês) em que o sistema se encontrava vazio ou quase vazio, sem déficit de armazenamento e sem reenchimentos intermediários” (CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Em outras palavras, em uma simulação para cálculo de energia firme de um sistema hidroelétrico, o período crítico é o intervalo de tempo em que o sistema passa da situação de máximo a mínimo armazenamento, sem reenchimentos intermediários, respeitando algumas tolerâncias pré-estabelecidas.

O período crítico atualmente utilizado no setor elétrico no processo de cálculo dos certificados de garantia física de usinas hidroelétricas, pela EPE, compreende o período de junho de 1949 a novembro de 1956 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2004). Este período crítico foi estabelecido na década de 1990, pela área de planejamento da expansão da Eletrobrás, considerando todas as usinas cadastradas à época, inclusive aquelas previstas para o longo prazo, muitas das quais não se viabilizaram, principalmente, por restrições de natureza ambiental.

Anualmente, o Operador avalia o período crítico do SIN e de seus subsistemas. Para a configuração de mais longo prazo analisada pelo ONS, atualmente dezembro de 2023, o período crítico encontrado abrange o horizonte de junho de 1948 a novembro de 1955, como ilustrado na Figura 3. Em ciclos anteriores, o período crítico usual era junho de 1951 a novembro 1955.

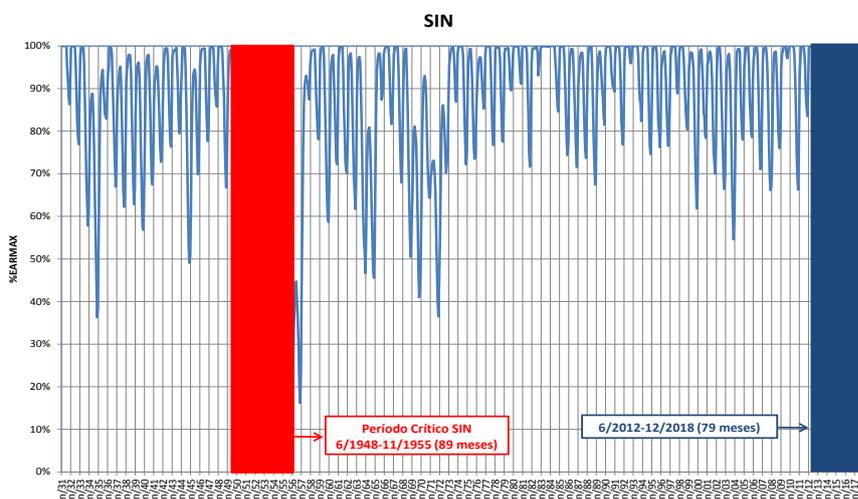


Figura 3 - Evolução da Energia Armazenada do SIN no cálculo do Período Crítico do SIN

Verifica-se, na figura anterior, que nos anos finais do histórico de vazões afluentes há um deplecionamento acentuado do SIN, à similaridade do que ocorre num período crítico histórico, ou seja, tudo indica que o SIN estaria em um novo período crítico face ao longo horizonte de meses (79) a partir do qual saiu do armazenamento máximo e não houve mais reenchimento pleno do armazenamento equivalente do SIN (de junho/2012 a junho/2019).

Notadamente o período crítico do SIN sempre foi influenciado pelo subsistema Sudeste/Centro-Oeste, devido à grande participação que os reservatórios de regularização desse subsistema possuem na capacidade total de armazenamento do SIN, embora algumas outras bacias tenham comportamentos diversos como aquelas localizadas na região Sul do país e, mais recentemente, a bacia do rio São Francisco, no subsistema Nordeste, que vem atravessando uma situação de criticidade hídrica, o que certamente influenciou o deplecionamento observado nos últimos anos das simulações realizadas e apresentadas na figura anterior, explicando, dessa forma, as condições hidroenergéticas reais vivenciadas desde junho de 2012, quando os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste não mais tiveram seus reservatórios equivalentes reenchidos em cada estação chuvosa subsequente. Fica, portanto, a expectativa: estaríamos em um novo Período Crítico nas proporções do “49/56”? Mas certamente essa situação explica os acentuados deplecionamentos verificados entre 2012 a 2019.

## 2.4 Sazonalidade e Complementariedade da Oferta

A expansão da hidroeletricidade na Amazônia, com características de grande capacidade de produção na estação chuvosa, sem reservatório de acumulação, e baixa produção na estação seca, ocasiona uma acentuada sazonalidade da oferta, à semelhança da usina de Tucuruí, em operação, no rio Tocantins.

As usinas do Complexo Madeira, Santo Antão Antônio e Jirau, e as UHE Teles Pires e São Manoel já operam com motorização completa. A UHE Belo Monte teve sua primeira máquina operada em 2016 e previsão de completar sua motorização em 2020. As usinas de Colíder e Sinop, localizadas no rio Teles Pires, têm previsão para completar motorização ainda em 2019, além das usinas futuras previstas nos estudos de longo-prazo do MME/EPE.

Esses projetos estão localizados longe dos grandes centros de carga, exigindo extensos sistemas de transmissão para o transporte de grandes blocos de energia nas estações chuvosas e pequenos montantes durante as estações secas, aumentando, sobremaneira, a complexidade operativa do SIN em termos de segurança eletroenergética.

Conforme análise desenvolvida pelo ONS em estudos específicos da integração dessas usinas da região Norte, observa-se que no segundo semestre de cada ano, quando a geração das usinas a fio d'água da região Amazônica encontra-se em patamares bastante reduzidos, a geração térmica flexível e a geração de usinas não simuladas individualmente (inflexíveis) apresentam-se em patamares mais elevados, compensando, juntamente com o deplecionamento dos reservatórios do SIN, a redução da geração hidráulica. Essa operação confirma o papel importante das fontes alternativas complementares na segurança operativa do SIN.

Cabe destacar que a oferta significativa de energia elétrica de origem hidráulica com perfil altamente sazonal e abundante proveniente das usinas da região Amazônica resulta também em modificações dos perfis atuais da operação do SIN, com uma tendência de se atingir níveis cada vez mais baixos de armazenamento ao final de cada estação seca.

Com relação ao perfil de geração das fontes como biomassa e eólicas, que apresentam maior disponibilidade exatamente nas estações secas do SIN, sendo, portanto, complementares à oferta hídrica, ou seja, fontes que desempenham o papel de verdadeiros “reservatórios virtuais”.

As fontes eólicas, embora sejam tratadas de forma “inflexível”, que, nos modelos de otimização energética, tem sua previsão de geração abatidas diretamente da carga, apresentam características marcantes de variabilidade e intermitência *inter* e *intra-day*, em função do perfil dos ventos, o que traz desafios importantes, em termos operativos, sendo necessário o provisionamento de geração fora da ordem de mérito (Garantia Energética) em “D-1” e/ou reserva operativa suficiente no “Dia D”.

Com relação às fontes a biomassa, embora, em geral, não estejam disponíveis

durante o ano inteiro, ficam sujeitas às safras agrícolas (principalmente bagaço de cana), sendo, no entanto, influenciadas pelas condições climáticas a cada estação. No caso do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, por exemplo, uma usina a biomassa movida a bagaço de cana de açúcar tem disponibilidade de combustível em aproximadamente sete meses do ano, durante o período de safra, de maio a novembro.

Mais recentemente, há a inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, com a evolução da capacidade instalada desta fonte dos atuais 1.780 MW para 3.626 MW em 2023, o que representa uma participação de 2,0% da matriz elétrica. Embora esta fonte seja representada, assim como as eólicas, de forma “inflexível”, abatida diretamente da carga, sua crescente expansão demandará uma representação mais fidedigna com o seu perfil de geração, que possui diferença relevante de valores entre os patamares leve, médio e pesado.

A Figura 4 ilustra a complementaridade anual teórica (em PU) das diversas fontes, ou seja, a diversidade de produção ao longo de um mesmo ano permite mitigar o efeito da sazonalidade da oferta hídrica, compensando a perda gradual de regularização, desde que suas ofertas sejam firmes e em montantes equivalentes à redução da oferta hídrica, ou seja, é extremamente importante a avaliação dessas disponibilidades para efeito de planejamento da operação.

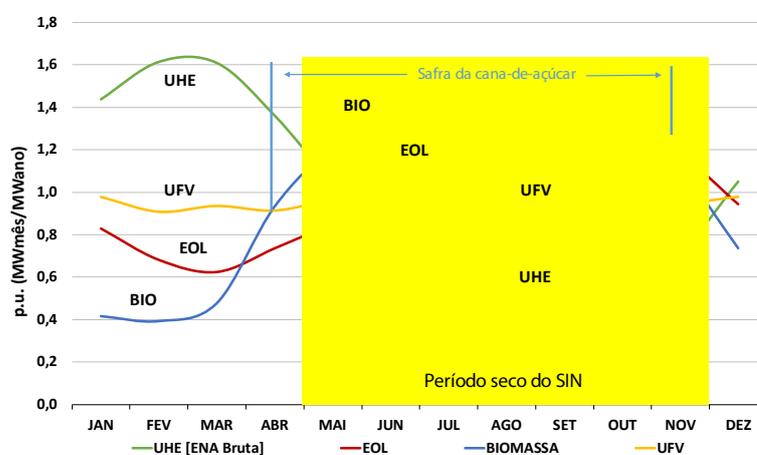


Figura 4 - Complementaridade Anual das Diversas Fontes de Geração

Desta forma, depreende-se que as usinas térmicas convencionais, flexíveis ou não, também desempenham papel importante na segurança operativa do SIN, na medida em que possam ser acionadas para garantir os estoques de segurança durante o período seco. Vale também lembrar que esse período é coincidente com períodos de temperaturas mais altas no hemisfério Norte, o que permite uma complementaridade de oferta de geração com o GNL, e vice-versa.

## 2.5 Custo e relevância da oferta térmica

A necessidade de atendimento a uma carga crescente, associada à redução gradativa do Grau de Regularização SIN e à tendência de oferta hidroelétrica abundante nas estações chuvosas (como, por exemplo, a oferta da Amazônia, com sazonalidade acentuada), obriga a complementação da geração hidroelétrica na estação seca de cada ano, seja por usinas térmicas convencionais e/ou pelas fontes alternativas (eólicas/biomassa/solar). Assim, o parque térmico e as fontes alternativas passam a ter, cada vez mais, o papel de “reservatório virtual” do SIN.

Conforme já mencionado, as usinas termelétricas convencionais, flexíveis ou não, passam a desempenhar um papel importante na segurança do SIN. O montante de geração térmica disponível e seu custo para despacho são fatores determinantes no novo perfil da oferta no SIN. A Figura 5 apresenta a distribuição, por fonte, dos Custos Variáveis Unitários – CVUs do parque termoeletrico previsto para entrar em operação até 2023.

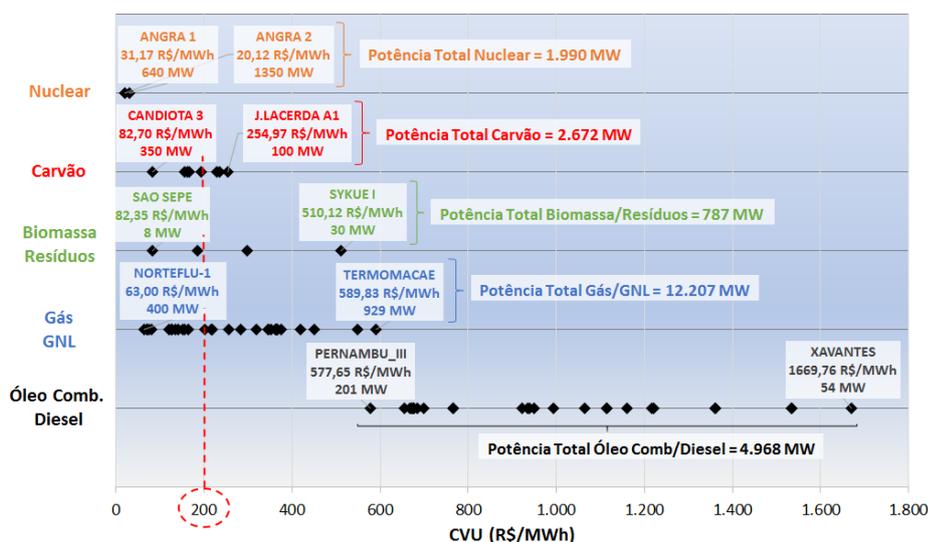


Figura 5 - Distribuição dos Custos Variáveis Unitários por Fonte

Da anterior pode-se observar, além da interseção entre os custos das diversas fontes, uma elevada dispersão - UTEs com custos para despacho variando de 11 (Carvão) e 16 (Biomassa) até 54 (óleo combustível e diesel) vezes superior ao da térmica mais barata (nuclear).

A Figura 6 ilustra que a faixa de CVU em que há o maior incremento de geração térmica está entre 100,00 R\$/MWh e 250,00 R\$/MWh, onde é acrescido um montante de aproximadamente 6.100 MW de potência. Para os CVU mais elevados, na faixa de 800,00 R\$/MWh a 1.700,00 R\$/MWh, não há um incremento de potência significativo, o que acaba colaborando para a volatilidade dos CMOs quando do despacho de geração térmica nessa faixa de disponibilidade, o que inclusive explica a alteração de bandeiras tarifárias entre PMOs ao longo de cada ano.

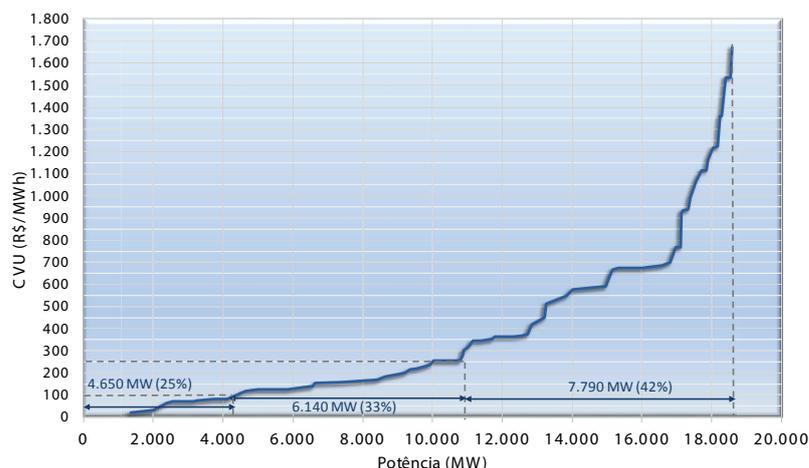


Figura 6 - Potência Térmica do SIN (MWmed) x CVU (R\$/MWh)

A Figura 7, a seguir, ilustra, de forma bastante simplificada a influência dos custos operativos das térmicas (CVU) no processo de otimização. Na realidade pode-se dizer que existem três tipos de térmicas: as inflexíveis, cuja geração é abatida da carga, e as inflexíveis, algumas de CVU competitivos, que são despachadas por ordem de mérito e algumas (cerca de 42% da capacidade instalada) com CVUs bastante elevados (acima de 250 R\$/MWh, por exemplo), que são despachadas por ordem de mérito apenas em cenários hidrológicos desfavoráveis, trazendo sinais econômicos através da Função de Custo Futuro que acabam por induzir a um maior esvaziamento dos reservatórios de regularização.



Figura 7 - Influência dos custos operativos das térmicas (CVU) no processo de otimização

Essa realidade operativa atual do SIN sugere que ações de planejamento possam ser indicadas no sentido de substituir as usinas mais caras por novos empreendimentos de custos operativos mais competitivos e impõe a construção de novas modalidades de

“leilões de substituição” de usinas térmicas que terão seus contratos findos a partir de 2022.

## 2.6 Alocação da geração compulsória de energia na curva de carga do SIN

Nos modelos de otimização, toda geração representada de forma inflexível é abatida da carga global projetada, resultando em uma carga líquida a ser atendida pelas demais fontes flexíveis no processo de otimização.

A Figura 8 apresenta uma estimativa das parcelas inflexíveis (térmica, não simuladas e hidráulica), em percentual da carga global, para os anos de 2019 e 2023. Nesta figura, entende-se por Carga Líquida a Carga Bruta prevista abatida da inflexibilidade térmica, da inflexibilidade hidroelétrica (defluência mínima obrigatória, geração a fio d’água, etc) e da previsão de geração de usinas eólicas, fotovoltaicas e a biomassa. Observa-se que a parcela de geração inflexível corresponde a um valor de 75% da carga global em 2019 e 70% da carga global em 2023, restando, desta forma, apenas 25% e 30%, respectivamente, da projeção global de carga para a operação otimizada entre as UHEs e as UTEs flexíveis, o que pode explicar porque no horizonte de médio prazo do PEN 2019 (2021 a 2023) os riscos de déficit são extremamente baixos, assim como o valor esperado dos custos marginais de operação, indicando assim o Equilíbrio Estrutural

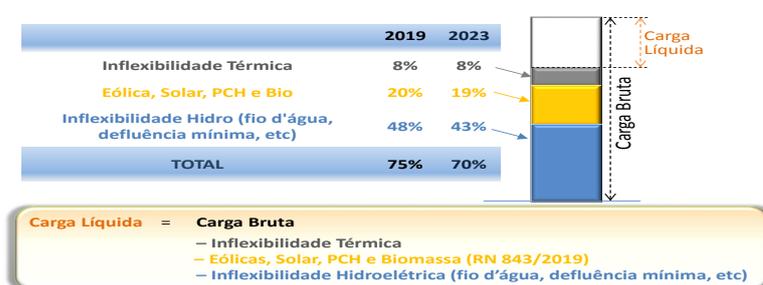


Figura 8 - Carga Global/Carga Líquida do SIN em 2019 e 2023

## 3 | CONCLUSÃO

Em termos de evolução da matriz de energia elétrica, ao se manter a atual tendência da expansão hidroelétrica, calcada em usinas com baixa ou nenhuma regularização plurianual, o papel das termoelétricas flexíveis ou de baixa inflexibilidade, com custos de operação moderados e com menores incertezas de suprimento de combustível (GN/GNL/Carvão) passa a ser fundamental na seleção dos projetos a serem ofertados nos próximos leilões de energia nova. Não obstante, as fontes alternativas complementares na estação seca, como eólicas, fotovoltaicas e biomassa, também apresentam papel importante na segurança operativa do SIN, pois exercem o papel de “reservatórios virtuais” do SIN.

Com o critério econômico usual de mínimo custo total de operação e a disponibilidade significativa de térmica com CVUs mais elevados leva a um atraso no despacho térmico,

submetendo os subsistemas a acentuados deplecionamentos ao final de cada estação seca, gerando CMOs elevados e exigindo atenção do ONS para eventuais ações heterodoxas, o que muitas vezes indica uma situação paradoxal entre o Equilíbrio Estrutural e o Equilíbrio Conjuntural.

A alta parcela de inflexibilidade, que corresponde a um valor de 75% da carga global em 2019 e 70% da carga global em 2023, pode ser um dos motivos para a obtenção de riscos de déficits estruturais bastante reduzidos nas avaliações de médio prazo.

## REFERÊNCIAS

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Referência do Modelo SUISHI**. Rio de Janeiro, 2018

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Portaria 303/2014**. Brasília, DF, 2004

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da Operação Energética 2019/2023 – PEN 2019**. Relatório Técnico ONS DPL-REL-0182/2019. Rio de Janeiro, 2019.

## ANÁLISE DO IMPACTO DE GERAÇÕES RENOVÁVEIS SOBRE A MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO POR MEIO DE REGIÕES DE SEGURANÇA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

### Paulo Andrade Novaes

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Itajubá – MG

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

Recife – PE

<http://lattes.cnpq.br/7903604596906080>

### Antonio Carlos Zambroni de Souza

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Itajubá – MG

<http://lattes.cnpq.br/4860175234818683>

<https://orcid.org/0000-0001-8559-9590>

### Fábio da Costa Medeiros

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

Recife – PE

**RESUMO:** Associado a presença marcante das fontes renováveis na Região Nordeste do Brasil está o problema de estabilidade de tensão da rede. Os recursos de controle destas fontes auxiliam na minimização dos efeitos causados pela instabilidade de tensão na tentativa de aumentar a margem de segurança do sistema. De modo a avaliar as condições de operação segura, para os diferentes cenários eletroenergéticos, se faz uso das regiões

de segurança obtendo-se a sensibilidade dos impactos causados pelos diferentes níveis de geração diante de contingências, proporcionando um mapeamento representativo e seguro do sistema analisado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fontes renováveis, Estabilidade de tensão, Regiões de segurança, Modos de controle, ORGANON.

### ANALYSIS OF THE IMPACT OF RENEWABLE GENERATIONS ON THE VOLTAGE STABILITY MARGIN THROUGH SECURITY REGIONS

**ABSTRACT:** Associated with the relevant presence of renewable sources in the Northeast of Brazil is the problem of voltage stability of grid. The control resources of these sources help to minimize the effects caused by voltage instability in an attempt to increase the safety margin of the system. So to assess the conditions of security operation for the several electroenergetic scenarios, security regions are used getting up the sensitivity impacts caused by different generation levels in contingencies, providing a representative and secure mapping of the analyzed system.

**KEYWORDS:** Renewable sources, Voltage

## 1 | INTRODUÇÃO

A inserção maciça de fontes de geração eólica e fotovoltaica na Região Nordeste do Brasil vem modificando as condições operativas deste sistema face os perfis comportamentais intrínsecos a estas fontes. Atualmente, conforme (6) o Nordeste brasileiro possui uma capacidade instalada de geração eólica de aproximadamente 13 GW o que representa aproximadamente 85% da capacidade total desta fonte em operação no Brasil com um fator de capacidade (FC) atingindo a marca instantânea de 83%. Para a geração fotovoltaica, fonte esta, mais recente a compor os recursos energéticos da rede de transmissão, segundo (7), possui uma capacidade instalada de 1,81 GW e um FC variando ao longo do dia entre 35% a 75%.

Apesar de contribuírem com o aumento da capacidade de geração do ponto de vista energético, estas fontes agregam pouca ou nenhuma inércia ao sistema elétrico brasileiro (SEB). Esta situação é agravada por uma crise hídrica na Região Nordeste, que já perdura pelos últimos sete anos limitando a disponibilidade de geração por meio dos geradores hidrelétricos e adicionalmente o fato que a rede ainda é pouco malhada com longas linhas de transmissão. O efeito disto é refletido na estabilidade do sistema diante de perturbações, resultando em condições de risco para a regulação e controle da estabilidade de tensão que refletem na segurança operacional da rede.

## 2 | PERFIL COMPORTAMENTAL DAS RENOVÁVEIS NA REGIÃO NORDESTE

As fontes eólicas estão associadas às características de variabilidade e intermitência. Intermitência pode ser definida como uma medida, neste caso potência ativa injetada no sistema, que cessa e recomeça por intervalos de tempo, ou seja, não é contínua, enquanto, variabilidade está aqui associada à intensidade ou magnitude dessa medida, em MW, no intervalo monitorado. Este perfil varia de acordo com as condições climáticas e geográficas do local onde os parques estão instalados. Gerações eólicas localizadas nas regiões litorâneas possuem comportamento mais intenso de produção de energia durante o período diurno, enquanto as instaladas em chapadas, interior da região, possuem essa característica evidenciada no período da madrugada e no período noturno. Refere-se como região litorânea a faixa de terra de até 30 km da costa para o continente com elevações não superiores a 100 m. As demais regiões são consideradas como interior. Outra questão é o fator sazonal ao longo do ano, que influencia a produção de energia destas fontes, sendo a produção mais significativa destas no segundo semestre, chamado de período seco (inverno) em relação ao período úmido (verão). Ver Figura 1.

Observam-se no período seco de ambas as regiões que o perfil da geração eólica

segue um comportamento mais definido com uma perspectiva mais previsível quando comparado com o período úmido que por sua vez possui um perfil mais “nervoso” dessa geração e com uma magnitude de geração bem reduzida.

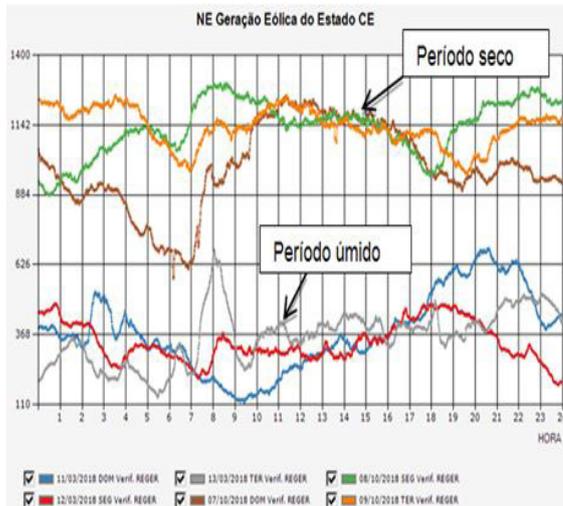


Figura 1 – (a) Ger. Eólica: região litorânea.

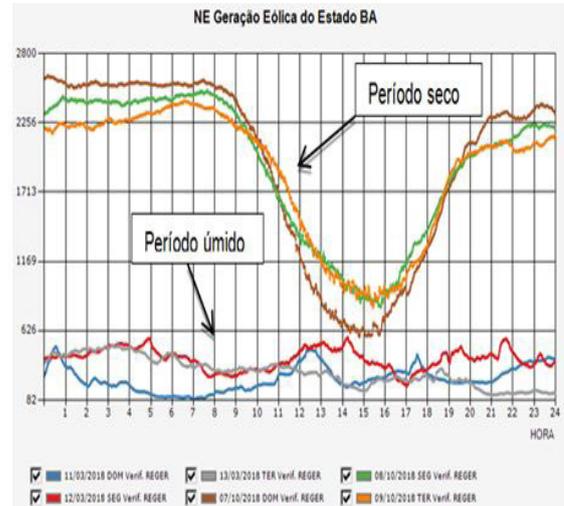


Figura 1 – (b) Ger. Eólica: região de chapada.

Já a energia fotovoltaica possui uma disponibilidade no período diurno em que há irradiação solar, e mais previsível que as eólicas, sendo a sua produção de energia diretamente influenciada por nebulosidades locais quanto a característica de intermitência. Quanto a variabilidade há uma atenção especial para a geração fotovoltaica pois, a variabilidade é bastante significativa tanto no início quanto no final do dia com variações abruptas, podendo trazer dificuldades à operação do sistema. Ver Figura 2. Outra característica importante é que do ponto de vista energético coincide com o pico de demanda da rede, podendo assim, contribuir para uma oferta efetiva de energia no período de maior demanda conforme apresentado em (7).

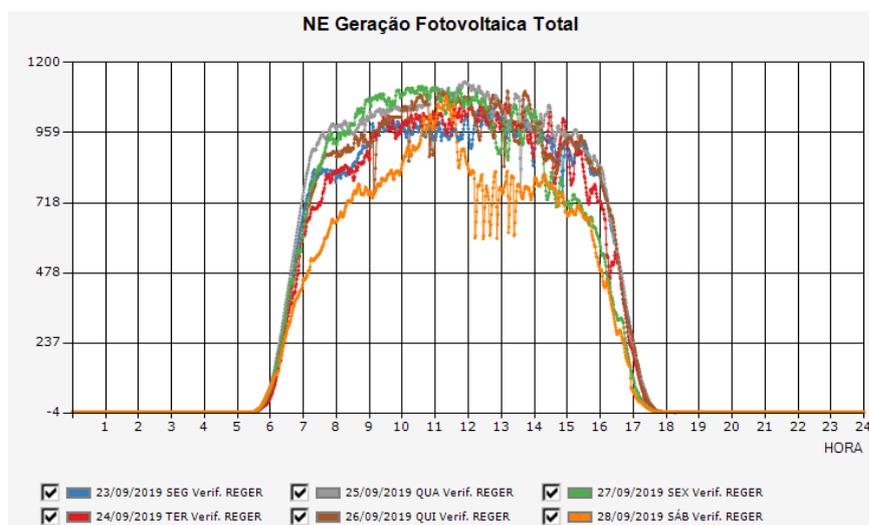


Figura 2 – Ger. Fotovoltaica Nordeste.

Fica evidente que, a inserção das gerações renováveis é um recurso adicional no atendimento à demanda, vista como fonte de energia, porém, como fonte de potência a mesma pode causar dificuldades à operação pelo fato da sua intermitência e variabilidade. Segundo (3), (4) e (12) a presença destas fontes em uma rede de transmissão fraca incorre em sérias preocupações quanto à segurança da estabilidade do sistema. Problemas de instabilidade e colapso de tensão ocorrem normalmente em sistemas de energia que não são capazes de atender a demanda por energia reativa e são muito carregados.

### 3 | RECURSOS DE CONTROLE DE REATIVO DAS RENOVÁVEIS

Conforme (9), dada a necessidade de escoamento desta geração se sabe, que na medida em que se eleva a potência escoada pelo sistema de transmissão além de certo patamar, torna-se exponencialmente crescente a demanda por potência reativa para o controle da tensão até que se atinja uma condição incontrolável, ou seja, de instabilidade de tensão que configura o princípio de um colapso no sistema. Naturalmente as condições mais severas ocorrem com a alta penetração destas fontes para as quais o corte de geração é inevitável. Ações de controle de potência reativa são realizadas através dos próprios aerogeradores e fotovoltaicas ou ainda por equipamentos especialmente instalados para este fim. Se a rede não for capaz de atender ao requisito de energia reativa do parque eólico e/ou fotovoltaicos, a integração da energia destes ao sistema seria limitada. A escassez de reativo devido à operação destas fontes pode levar a um aumento nas perdas globais da rede e conseqüentemente ter efeitos adversos na estabilidade da tensão (5). A capacidade de uma rede de energia para atender aos requisitos de energia reativa é um fator imprescindível que determina a quantidade de energia que pode ser agregada ao sistema.

Devido a isto, é posto perante o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) o desafio de gerenciar as flutuações na tensão do sistema de transmissão para que estas não provoquem danos ao sistema, bem como aos equipamentos (8). Este cenário requereu a atualização e aperfeiçoamento dos requisitos técnicos exigidos para a conexão destas centrais de geração. Quanto a geração eólica, entre os diversos tipos de aerogeradores, predomina os modelos “DFIG – *Double Fed Induction Generator*” e os “*Full Converter*”. Por esta razão a presente análise se restringe a estes aerogeradores que são dominantes no sistema que será apresentado. Quanto a fotovoltaica, esta, se assemelha a tecnologia *Full Converter*, em relação a estratégia de controle de tensão.

Os recursos de controle de reativo destas fontes relacionados ao foco da presente análise são:

Modo de Controle V - Controle de tensão terminal e/ou tensão remota;

Modo de Controle PF - Controle de fator de potência

Modo de Controle-Q - Controle de potência reativa;

Além destes recursos, são exigidos destes geradores, conforme (8), capacidade para suportarem subtensões ou sobretensões perante a ocorrência de curto-circuito na rede (*Low Voltage Ride Through* - LVRT e *High Voltage Ride Through* - HVRT), como também a capacidade de injeção de corrente reativa na rede durante a ocorrência do defeito, dando o suporte de tensão ao sistema durante a perturbação de modo a garantir uma operação com desempenho dentro dos padrões de qualidade exigidos em condições de operação normal e em contingências.

Os modos de controle de potência reativa destinam-se à operação em regime permanente. Estes requisitos permitem que a rede opere em um estado seguro antes de qualquer perturbação. Em caso de perturbação os modos de controle de potência reativa devem ser projetados para suportar as tensões enquanto ações corretivas são postas em prática pelos operadores do sistema. Entretanto, como esses modos de controle não são destinados ao uso em situações como curtos-circuitos, por exemplo, a injeção de corrente reativa é definida separadamente em outros requisitos como mencionado anteriormente. O requisito para modos de controle de potência reativa deve ser definido coerentemente com outros requisitos relacionados a problemas de potência reativa.

A proposta deste trabalho é avaliar o efeito dos modos de controle de tensão terminal (A) e de controle de fator de potência (B) para o controle de reativo pertinente as gerações renováveis na análise de estabilidade de tensão do sistema.

#### 4 | AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA

Para analisar os efeitos destes controles no sistema com gerações renováveis é utilizado o recurso do cálculo de regiões de segurança (RS) através da ferramenta computacional ORGANON (11). Este cálculo se caracteriza em explorar a vizinhança ao redor do ponto de operação do sistema (varredura) para diversas combinações de montantes de geração, que por sua vez são submetidas a uma série de contingências previamente estabelecidas, analisando se há restrições operativas como limite de carregamento e/ou de tensão na rede, limites dinâmicos dentre outros, apresentando de forma gráfica este mapeamento fornecendo uma visão à operação quanto a segurança do sistema. Este tipo de análise trata-se da avaliação dos impactos no sistema, quando da ocorrência das possíveis contingências a que ele está sujeito. Ver Figura 3. Os principais benefícios da avaliação de segurança são: o aumento da confiabilidade operativa e a melhor utilização dos recursos eletroenergéticos disponíveis na rede. O limite da região de segurança é definido como sendo a interseção dos limites de segurança de todas as contingências.

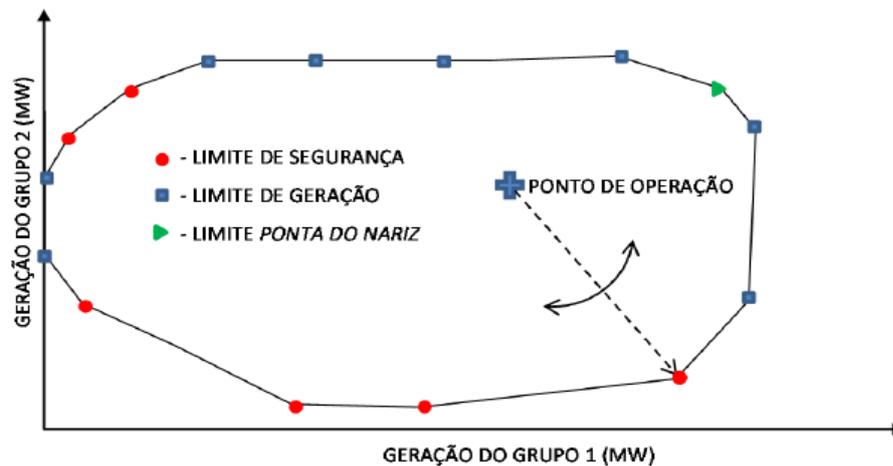


Figura 3 – Varredura em torno do ponto de operação.

De modo a avaliar a rede em que estes geradores estão conectados sob a ótica de estabilidade de tensão, analisou-se as combinações entre a produção de energia das eólicas e/ou fotovoltaicas nos diferentes patamares de carga com o auxílio do ORGANON com intuito de prevenir a operação em condições que remetam as situações de instabilidade.

#### 4.1 Análise de Estabilidade de Tensão

A geração ao ser escoada em sistemas fracos, ou seja, baixa potência de curto-circuito e longas redes de transmissão com compensação reativa insuficiente provoca o aumento das perdas térmicas forçando estes sistemas a operarem no limite, como ocorre em vários pontos da rede na Região Nordeste. Isto é refletido na segurança operacional do sistema. Um aspecto bastante importante da segurança de redes atualmente é aquele associado com a estabilidade de tensão. As situações relatadas conduzem o sistema a um risco operativo de esgotamento da rede ocasionada pela carência dos recursos de suporte de reativo ou da própria rede de transmissão e conseqüentemente ocasiona dificuldades na regulação da tensão acarretando instabilidades ou até mesmo chegar a situações de colapso de tensão. Sistemas como estes possuem em determinados momentos a característica de elevados fluxos, o que conduz a uma aproximação do ponto de máximo carregamento da rede traduzido através de uma bifurcação do tipo sela-nó, em que o sistema de equações lineares pode não ter solução devido à singularidade e o mau condicionamento da matriz Jacobiana do fluxo de potência.

A estabilidade de um sistema de potência pode ser definida como a habilidade do sistema de, a partir de um ponto operativo inicial, atingir o ponto operativo de equilíbrio após ter sofrido uma perturbação, com a maioria de suas variáveis dentro dos limites estabelecidos (1) e (2). Se houver reserva de reativos e capacidade de transmissão suficiente, o processo tende para um novo ponto de equilíbrio operativo estável. Se não houver reserva de reativos ou capacidade de transmissão suficiente, o processo tende a

instabilidade. Geralmente, neste caso, a tensão tenderá a cair de forma monotônica. O problema pode ser ilustrado com o auxílio de uma rede composta por 2 barras. Ver Figura 4

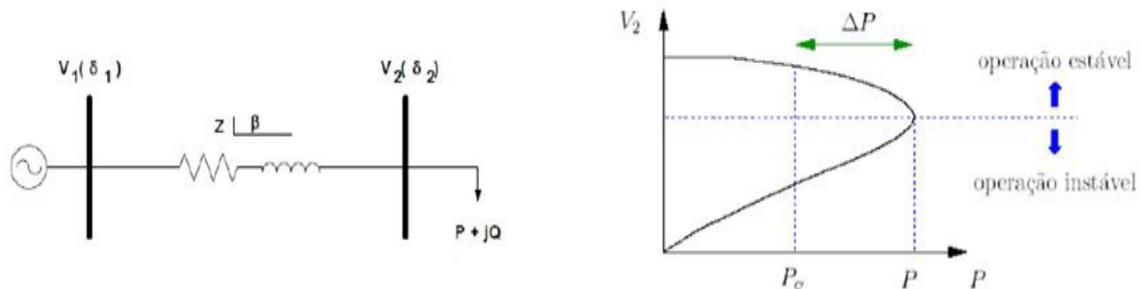


Figura 4 – Sistema de duas barras (10).

A demanda do sistema, representada pela barra 2, em um certo momento é  $P_0$ . A magnitude de tensão no barramento conectado a este sistema será igual a um valor que depende da própria demanda e dos parâmetros da rede que esta geração será transferida. Conforme a demanda do sistema varia, a magnitude de tensão também varia. Todavia há um valor de carregamento máximo  $P$ , ou seja, a margem de estabilidade de tensão do sistema, que pode ser atendida pela rede. Neste ponto, a matriz Jacobiana referente às equações de fluxo de potência torna-se singular. A conhecida margem de estabilidade que pode ser traduzida por:

$$\Delta P = P - P_0 \quad (1)$$

Se um carregamento maior que  $P$  for escoado através da rede a mesma entrará em modo de operação instável.

## 5 | ESTUDO DE CASO

Exemplificando o que foi apresentado, tomou-se como caso de estudo os parques renováveis do litoral do Estado do Ceará e do interior do Estado da Bahia, analisando o impacto das gerações sobre redes pouco malhadas e eixos de transmissão extensos, sob a ótica de estabilidade de tensão através da atuação dos modos de controle destas fontes renováveis intermitentes.

### 5.1 Caso 1 – Região litorânea do Ceará

Este caso avalia o eixo 230 kV de mais de 400 km compreendido pelas subestações (SEs) Cauípe, Sobral III, Acaraú II, Sobral II, Ibiapina II e Piripiri, com geração eólica concentradas nas SEs Ibiapina II, Sobral III, Acaraú II e Pecém II, para o período de carga média do sistema. Neste período a geração litorânea é bem elevada à exceção da SE

Ibiapina II que é classificada como região de interior. A capacidade instalada nesta região é de aproximadamente 1.430 MW. Ver Figura 5.

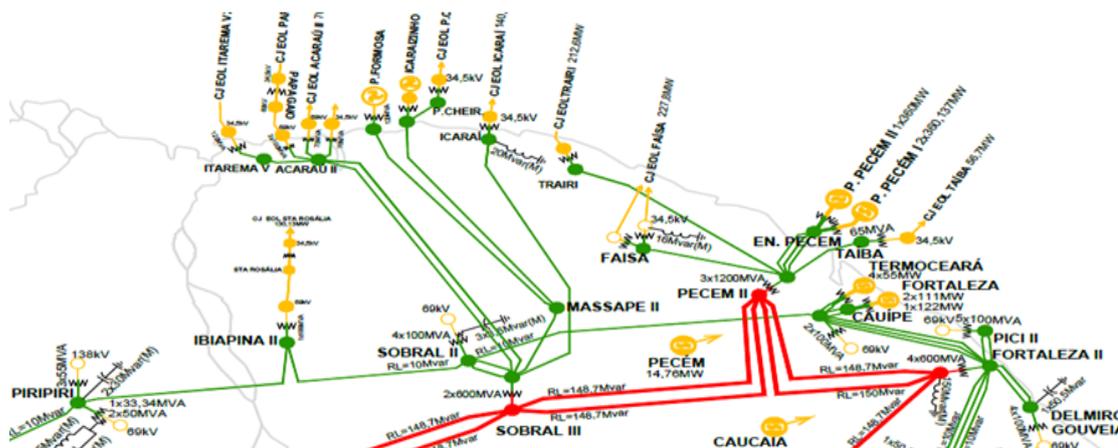


Figura 5 – Litoral do Estado do Ceará.

Após realizada a simulação no ORGANON para o referido sistema no período de carga mencionado foi constatado um gargalo no escoamento da geração da SE Acaraú II.

Para o cálculo da região de segurança em questão foi escolhido o grupo G1 – eixo das abcissas no diagrama, para ser composto pela geração eólica derivada de Acaraú II e o grupo G2 formado pela geração térmica do Estado do Ceará – eixo das ordenadas no diagrama. Os resultados apresentam a evolução do problema: sobrecarga superior ao limite de emergência o que aumenta significativamente as perdas no circuito remanescente (indicada pela área em amarelo – *Thermal Limit*), em seguida dificuldades para regular a tensão na barra de 230 kV de Acaraú II (indicada pelo contorno verde claro – *Voltage Limit*) e por fim culmina no colapso (representada por um triângulo deitado – *Nose Limit*). Ver Figura 7. Os resultados são extraídos, através do cálculo da Região de Segurança (RS) para uma análise de tensão do caso estudado considerando o uso dos modos de controle (A) e (B) das eólicas e/ou fotovoltaicas da área analisada. A área em verde escuro indica que a região operativa é segura para qualquer variação de geração térmica (G2), porém restringida por um determinado montante de geração eólica (G1). A área amarela remete a violação de carregamento que neste caso refere-se a sobrecarga na LT 230 kV Sobral III – Acaraú II C1 para a perda do circuito remanescente, identificado como a contingência mais crítica, com uma geração em Acaraú II violando os limites de tensão (contorno verde-claro) a partir de 403 MW. A área na cor vinho indica uma região insegura para operar podendo conduzir a instabilidades no sistema monitorado. Neste exemplo mostra um comparativo das eólicas operando no modo de controle de tensão (A) e no modo de controle de fator de potência (B). Ver Figuras 6 e 7.

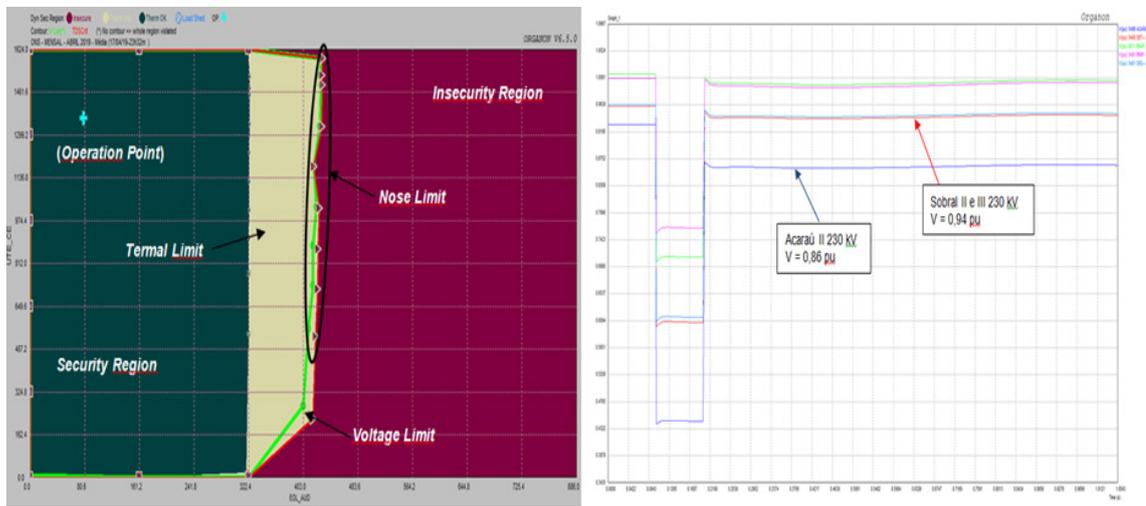


Figura 6 – RS: caso 1, modo (A) e a resposta dinâmica das tensões da região monitorada.

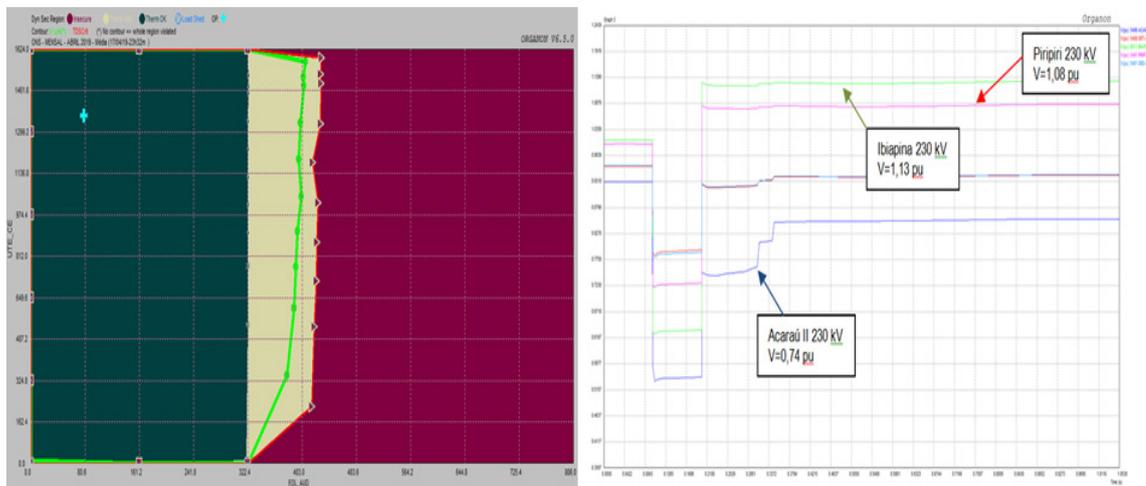


Figura 7 – RS: caso 1, modo (B) e a resposta dinâmica das tensões da região monitorada.

Observa-se da comparação dos dois modos de controle uma melhora no perfil de tensão em Acaraú II 230 kV no modo (A) em relação ao modo (B). Todavia pode-se constatar, geralmente, que em (A) assim que o ponto de operação ultrapassa o limite mínimo operativo de tensão para a contingência restritiva, ele já se encontra num ponto de instabilidade. Isto se deve a característica que este modo apresenta maiores perdas de potência conforme (10) o que acarreta a proximidade do ponto de sela-nó, mesmo respeitando os limites de tensão descritos em (8), e por fim o colapso de tensão da rede local (3).

Sistemas operados com as gerações no modo de controle (A) proporcionam maior margem de estabilidade em comparação com sua operação no modo (B) porque neste último a geração ou consumo de potência reativa é bem mais limitada dada a característica de manter o fator de potência constante. Já no modo (A) pode-se operar o gerador em toda sua faixa de potência reativa para controlar a tensão da rede (10). Já no modo de controle de fator de potência (B) o limite operativo de tensão é violado com uma geração menor, de cerca de 380 MW, para a mesma contingência. Outro ponto observado é o comportamento no domínio do tempo das tensões.

O modo (A) é capaz de mitigar o efeito de elevação de tensão no sistema comparado ao modo de controle (B). Esta flutuação de tensão pode causar sérios problemas à rede, o que pode reduzir a vida útil ou danificar os equipamentos conectados a ela. No modo (B) as tensões levam mais tempo para recuperar-se devido a dinâmica da carga. Merece destaque também que diante de perturbações as variações de tensão transitórias são mais evidentes no modo (B) em relação a (A) como pode ser constatado acima. Vê-se que variações no perfil de tensão em (A) permanecem dentro dos limites permitidos ( $\pm 5\%$ ) para este sistema, porém para (B) pode ser pior em termos das variações de tensão. Ver Figura 7.

## 5.2 Caso 2 – Regiões de chapadas da Bahia

Avaliou-se aqui a segurança do eixo 230 kV com cerca de 600 km desde a SE Juazeiro II até Bom Jesus da Lapa, com geração eólica e fotovoltaica ao longo de todo o eixo para o período de carga leve. Neste período a geração nas regiões de chapadas é bem intensa. A capacidade instalada nesta região é de aproximadamente 3.700 MW. Ver Figura 8.

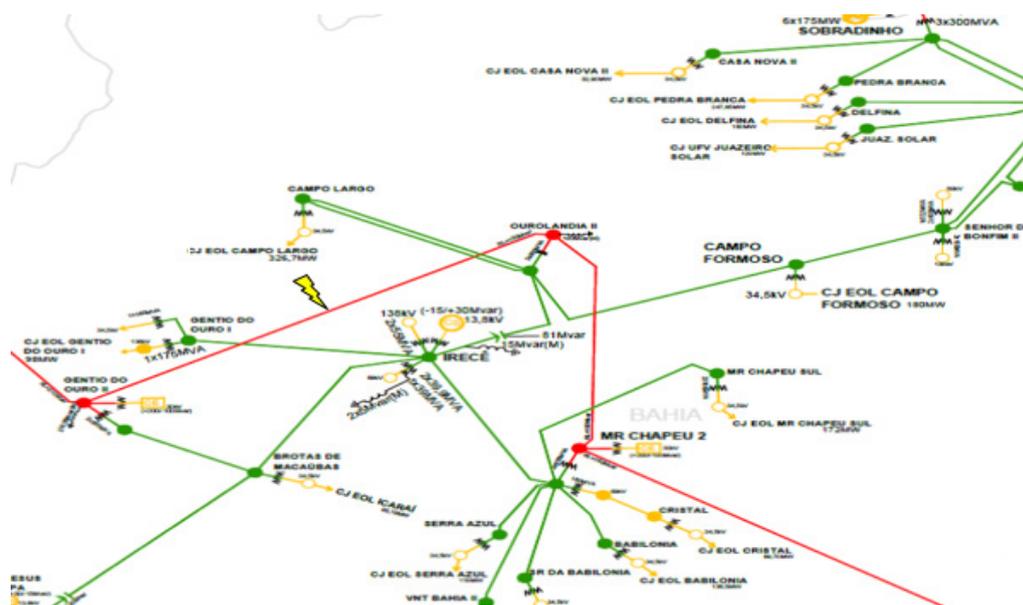


Figura 8 – Interior do Estado da Bahia.

O caso 2 seguiu a mesma linha de análise que o caso 1 como apresentado a seguir. Do ponto de vista de estabilidade de tensão a contingência crítica para este sistema é a perda da LT 500 kV Gentio do Ouro – Ouroilândia (indicada pelo símbolo do raio) para uma geração eólica / fotovoltaica de cerca de 3660 MW. De acordo com as RS calculadas tanto para o modo (A) quanto para o modo de operação (B). Ver Figuras 9 e 10. Para o cálculo desta região de segurança o grupo G1 é composto pela geração eólica do oeste do Estado da Bahia e o grupo G2 formado pela geração térmica do Nordeste – eixo das

ordenadas no diagrama.

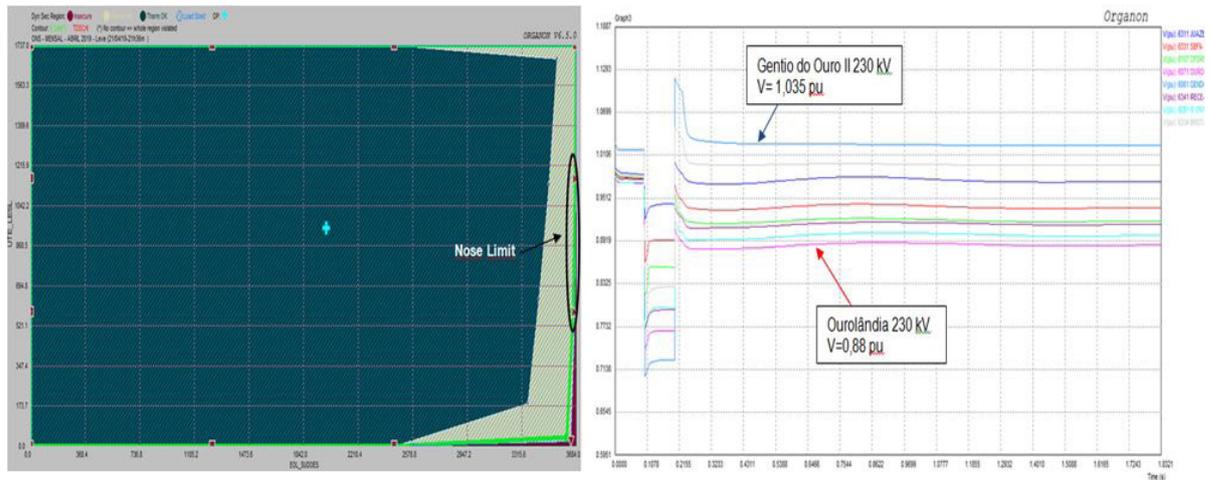


Figura 9 – RS: caso 2, modo (A) e a resposta dinâmica das tensões da região monitorada.

Para o modo de controle (A), tem-se uma área hachurada em azul, sobreposta ao diagrama, que indica a atuação de esquemas especiais de proteção de corte de geração, porém, para uma geração elevada ainda se verifica sobrecarga na LT 230 kV Senhor do Bonfim II – Campo Formoso. As tensões nesse eixo para a contingência crítica, em geral, permanecem dentro dos limites operativos. Destaca-se uma subtensão marginal na SE Ourolândia 230 kV e uma sobretensão (1,10 pu) em Gentio do Ouro II 230 kV logo após a eliminação do defeito através do desligamento da linha de transmissão. Ressalta-se que estes picos de tensão após eliminado o defeito é normal na operação do sistema. Para o modo de controle (B), a tensão em Ourolândia é bem próxima do modo (A). Para a SE Gentio do Ouro II a tensão pós-contingência é de 1,12 pu em relação a 1,10 pu verificado no modo (A). Estas tensões elevadas se dão pelo fato da carga analisada ser a leve porém em termos de variação de tensão o modo (A) apresenta 8% e o modo (B) 11%. Ver Figura 10.

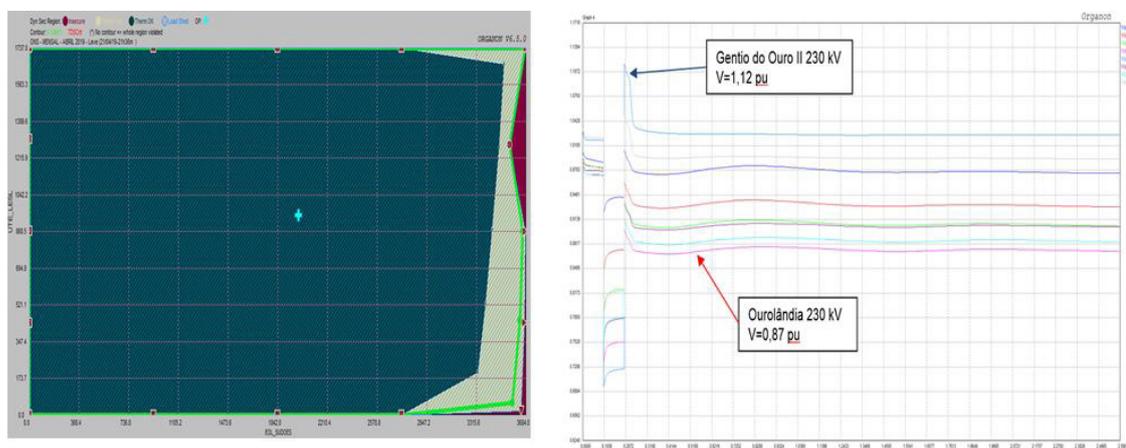


Figura 10 – RS: caso 2, modo (B) e a resposta dinâmica das tensões da região monitorada.

Outra análise realizada foi a da segurança do sistema do caso 2 (A) no período de carga média onde existe uma transição de extremos de geração, ver Figura 11, na qual pode-se observar que para gerações elevadas (eixo das abscissas) associadas a condição de intercâmbio baixo para o Nordeste há o esgotamento da rede no eixo analisado conduzindo este ao colapso. Para a condição de transição mencionada, traduzida na figura abaixo, pelo critério “*Security Limit*”, para a contingência da LT 500 kV Igaporã III – Ibicoara, também conduz a instabilidade e que por sua vez atinge o estado de colapso de tensão. O comportamento dinâmico das tensões deixa claro esta situação. Desta forma fica claro que a região oeste da Bahia convive com sérios problemas de suporte de reativo ao longo dos diversos patamares de carga o que torna complexo a sua operação. Isto indica a urgência da entrada das obras estruturantes indicadas pelo órgão de planejamento da expansão do setor elétrico.

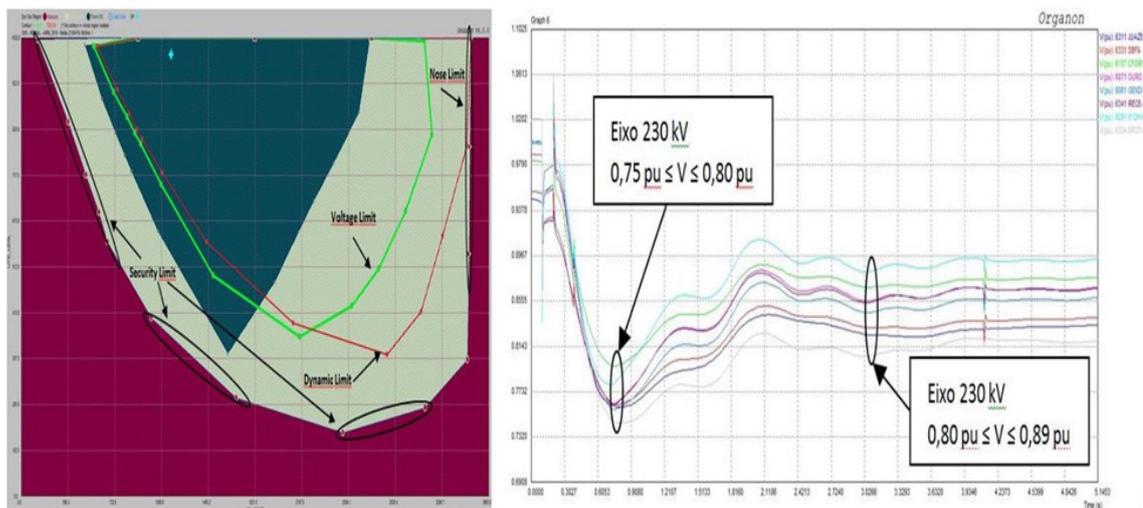


Figura 11 – RS: caso 2, modo (A), carga média.

## 6 | CONCLUSÃO

Pelo exposto observa-se que através do uso das regiões de segurança pode-se adquirir sensibilidade quanto as restrições operativas do sistema, dentre elas o impacto das gerações renováveis intermitentes na estabilidade de tensão e o efeito dos modos de controle que as mesmas possam disponibilizar para a regulação de tensão da rede na qual estão inseridas. Constata-se que o modo de controle de tensão terminal, modo (A), em relação ao modo de controle de fator de potência, modo (B), apresentou melhores resultados pelo fato de incrementar margem de estabilidade com o aumento do nível de tensão, suavizar as variações de tensão diante de contingências e possuir uma faixa operativa de potência reativa mais ampla para o controle da estabilidade porém aumentando as perdas de potência o que neste quesito o modo (B) reduz. Pode-se

verificar também a necessidade de expansão e/ou reforços na rede de modo a garantir o aumento da capacidade de transmissão e o adequado suporte de reativo ao sistema e que para ambos os caso de estudo apresentados as obras estruturantes de planejamento foram entregues a operação recentemente, no início do ano de 2020.

Conclui-se que um dos desafios da operação do sistema é o gerenciamento dos recursos de reativos das fontes intermitentes perante as variações destas ao longo das variações diárias de carga garantindo o desempenho necessário para a segurança do sistema e minimizando as condições operativas de instabilidades que possam surgir na ocorrência de perturbações.

## REFERÊNCIAS

CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L. **Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC systems**, 1993. IEEE - EUA.

CASTRO, A. C.; DA SILVA, L. C.; FONTANA, E. **Ferramenta Computacional para a Análise de Segurança de Redes Elétricas com Relação à Estabilidade de Tensão**. Programa de P&D da ANEEL/ CTEEP / UNICAMP - Brasil.

CHI, Y., LIU, Y., WANG, W., DAÍ, H. **Voltage stability analysis of Wind farm integration into transmission network**, *International Conference on Power System Technology*, 2006. IEEE – China.

FERREIRA, F. M. C., GASPAR, A. R., DE MELO FILHO, A. C. M., NETO, A. S., MENEZES, C. M. C., SOBRAL, F. R., DE MELO, K. C. V., VASCONCELOS, L. F. B., SOUTO, M. F., QUINTÃO, P. E. M. **Estudos e soluções para integração de usinas eólicas em redes fracas – experiência do planejamento da operação**, 2017. XXIV SNPTEE – Brasil.

HA, L. T., SAHA, T. K. **Investigation of power loss and voltage stability limits for large Wind farm connections to a sub-transmission network**. *Power Engineering Society General Meeting*, 2004. IEEE - EUA.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “**Boletim Mensal de Geração Eólica**” – dez/2019, disponível em [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), acessado em 26 fev. 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “**Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica**” – dez/2019, disponível em [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), acessado em 26 fev. 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. **Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. Procedimentos de Rede, Módulo 3, Submódulo 3.6, revisão 2.0, 2018. Brasil.

RAMOS, A. J. P., FILHO, J. S. V. N., VALENÇA, R. B., RAMOS J. B., DE SENA, D. J. G. **Desempenho comparativo de compensadores estáticos e STATCOM como recurso de controle para mitigar problemas de estabilidade de tensão em sistemas com elevados montantes de parques eólicos**, 2017. XXIV SNPTEE – Brasil.

ROY, N. K., POTA, H. R., HOSSAIN, M. J., CORNFORTH, D. **Impact of scig and dfig type Wind turbine on the stability of distribution networks: static and dynamics aspects**, 2012 11th *International Conference on Environment and Electrical Engineering*, IEEEIC Itália.

Santos, P.H.L., Neto, C.A., Chaves, S.B., Passaro, M.C., Monteath L., Santos, M.G. **Utilização de regiões de segurança em estudos de planejamento da ampliação de redes**, 2012. XII SEPOPE – Brasil.

ZHOU, F., JOOS, G., ABBEY, C. **Voltage stability in weak connection wind farms**. *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE – EUA.

## APLICAÇÃO DE MODELO MULTIOBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OBRAS DE CONEXÃO DA REDE

*Data de aceite: 01/06/2020*

*Data de submissão: 03/04/2020*

**Paulo Sérgio Zanin Júnior**

Enel Distribuição Goiás e Universidade Federal de Goiás  
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/3004032224048534>

**Lina Paola Garcés Negrete**

Universidade Federal de Goiás  
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/3707701912481754>

**Gelson Antônio Andrêa Brigatto**

Universidade Federal de Goiás  
Goiânia – GO

<http://lattes.cnpq.br/1356780309218421>

**RESUMO:** A geração distribuída cresce de maneira relevante no Brasil, modificando o setor elétrico em suas diversas esferas. Este trabalho aplica um modelo de otimização multiobjetivo referente a empreendimentos de geração distribuída, considerando aspectos técnicos e econômicos. Tal modelo permite encontrar um conjunto de configurações para alocação de empreendimentos de geração distribuída, utilizando um algoritmo genético e a métrica Maximin para formação de um conjunto-Pareto

de soluções, e, por meio de critérios de tomada de decisão, escolher uma dessas configurações como solução do problema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geração Distribuída, Algoritmos Genéticos, Métrica Maximin, Otimização Multiobjetivo.

MULTIOBJECTIVE MODEL APPLICATION FOR DISTRIBUTED GENERATOR SITING IN DISTRIBUTION SYSTEMS CONSIDERING NETWORK CONNECTION WORKS

**ABSTRACT:** Distributed generation grows relevantly in Brazil, modifying electrical sector in several ways. This work applies a multi-objective optimization model to distributed generation assets, considering technical and economic aspects. This model finds a set of siting configurations to distributed generation assets, using a genetic algorithm and Maximin metric to form a Pareto solution set and by some decision-making criteria, it allows the choice of one of the solutions.

**KEYWORDS:** Distributed Generation, Genetic Algorithms, Maximin Metric, Multi-objective Optimization.

## 1 | INTRODUÇÃO

A GD é uma fonte de energia elétrica conectada à rede de distribuição em uma unidade consumidora (UC) que é suficientemente menor que as grandes plantas de geração (GONZALEZ-LONGATT e FORTOUL, 2005). No Brasil, esta modalidade de geração é atualmente definida via resoluções normativas (REN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 482/2012, 687/2015 e 786/2017, sendo classificada em microgeração distribuída (microGD) – de 0 a 75 kW – e minigeração distribuída (miniGD) – de 75 kW a 5 MW – com três categorias de compensação para além da própria UC geradora: empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto (ANEEL, 2012), (ANEEL, 2015), (ANEEL, 2017(a)). Além disso o trâmite de acesso ficou regulamentado por meio do módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL (ANEEL, 2017(b)).

A GD apresenta-se no mercado brasileiro como uma alternativa à geração centralizada e distante dos centros de carga, sendo, portanto, uma resposta a vários fatores que pressionam a busca por formas diferentes de aumentar a oferta de energia e por tecnologias de conversão de pequeno porte, baixo impacto ambiental, mais eficientes e que reduzam custos (ZILLES, MACÊDO, *et al.*, 2012). Além disso, a GD no Brasil, que já ultrapassou a marca histórica de 1 GW de potência instalada (ANEEL, 2019), vence, gradativamente, os conhecidos desafios em países em desenvolvimento: incertezas regulatórias; falta de acesso a financiamentos; falta de informação, padronização de equipamentos e mão-de-obra capacitada; e barreiras fiscais de importação (REN 21, 2017).

Entretanto, a inserção deste tipo de fonte – em geral intermitente – agrega grande complexidade na integração devido a: múltiplos cenários operacionais, sazonalidade de fontes primárias, necessidade de reajustes de proteção devido a fluxos bidirecionais, aumento dos níveis de curto-circuito na vizinhança do ponto de conexão da GD, etc., especialmente em uma rede planejada para operar radialmente, como as redes de distribuição no Brasil,

Este trabalho, portanto, se insere neste contexto, no qual a GD é vista como uma resposta a fatores energéticos, mercadológicos e socioambientais. Propõe-se uma metodologia de alocação de empreendimentos de GD, por meio de um modelo de otimização multiobjetivo envolvendo um aspecto técnico de interesse da Companhia de Distribuição (CoDis) – redução de perdas ativas de energia – e um aspecto econômico de interesse do empreendedor da GD – o custo de implantação do seu empreendimento, considerando os custos de conexão.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados os principais conceitos necessários para compreensão do trabalho; no capítulo 3 é apresentado o modelo matemático e de otimização; no capítulo 4 são apresentados os resultados de aplicação do modelo em dois casos; e no capítulo 5, faz-se a conclusão do

trabalho.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica cobrirá os seguintes conceitos: 2.1. Fluxo de potência, uma das análises técnicas de maior importância para o cálculo de impacto da GD na rede; 2.2. Custo de implantação, um importante componente da análise econômica da GD; 2.3. Otimização multiobjetivo e dominância, conceitos utilizados quando dois objetivos são analisados concomitantemente; 2.4 Métrica Maximin, método selecionado para elaboração da fronteira de Pareto; e 2.5. Algoritmos genéticos (AG), a meta-heurística selecionada para realizar o processo de otimização.

### 2.1 Fluxo de potência

O problema fluxo de potência em sistemas elétricos de potência consiste em encontrar todas as variáveis (módulos e fases das tensões/correntes e potências ativa, reativa e aparente) do sistema elétrico em qualquer um dos equipamentos desta rede em regime permanente para avaliar a condição operativa do sistema em um determinado momento (MONTICELLI, 1983). O fluxo de potência é ferramenta fundamental para diversos estudos e análises de planejamento, proteção e operação do sistema (ZANIN JÚNIOR, 2019).

Há diversos métodos matemáticos para solucionar o problema do fluxo de potência. Foi selecionado para este trabalho o método de soma de potências (MSP), dado que ele é eficiente para redes radiais de distribuição de energia (BROADWATER, CHANDRASEKARAM, *et al.*, 1988). O método foi aplicado conforme descrito em Brigatto (2011) e Zanin Júnior (2019), por meio da solução iterativa de dois subsistemas via processos de varredura inversa, que acumula potência ativa e reativa nas barras, e direta, que corrige as tensões nas barras (varredura *backward-forward*). O MSP, portanto, permite, com o uso de álgebra e solução de equação de 4º grau reduzível à equação de 2º grau, encontrar a solução do problema do fluxo de potência, convergindo, em geral, com poucas iterações.

#### 2.2.2. Custo de implantação

O custo de implantação ( $C_I$ ) de um conjunto de empreendimentos de GD pode ser definido como a soma de duas componentes. A primeira componente é referente ao custo de instalação ( $C_{INS}$ ) de cada um dos empreendimentos. Neste trabalho, utilizam-se os valores médios por tecnologia de 2018 publicados por IRENA (2019), que estão apresentados na TABELA 1, juntamente com custos fixos de operação e manutenção anuais ( $C_{o\&m}$ ) e fator de capacidade para as tecnologias de GD utilizadas nos estudos de caso deste trabalho, ambos baseados nos dados publicados por IRENA (2019).

A segunda componente do custo de implantação é o custo de conexão ( $C_{CON}$ ),

referente às possíveis obras de adequação, melhoria e reforço da rede necessárias para integração dos empreendimentos de GD sem comprometimento da operação da rede. Em geral, nas empresas de distribuição do Brasil, essas obras são definidas por um engenheiro eletricista no âmbito do planejamento da distribuição após diversas análises e, devido ao grande número de pedidos de conexão de geração distribuída, dá-se preferência à análise comparativa entre os 4 cenários mais críticos de fluxo de potência: carga leve – geração máxima, carga leve – geração mínima, carga pesada – geração máxima e carga pesada – geração mínima.

Tecnologia	$C_{INS}$ (USD/kWp)	$C_{o\&m}$ (USD/kWp)	Fator de Capacidade (%)
Fotovoltaica	1210	14,5	18
Eólica ( <i>onshore</i> )	1497	62,5	34
Hidráulica	1492	44,76	47
Bioenergia	3976	159,04	84

TABELA 1 –  $C_{INS}$ ,  $C_{o\&m}$  e fator de capacidade médios por tecnologia de geração (IRENA, 2019).

A partir dos resultados das simulações de fluxo de potência, verifica-se se há alguma perturbação prejudicial ao sistema de potência. As perturbações mais analisadas são: variação rápida de tensão acima de determinado valor limite (em geral as distribuidoras brasileiras adotam 5%) entre cenários de geração máxima e mínima, sem alteração do cenário de carga (especialmente devido à intermitência das fontes renováveis); violação do limite superior de tensão de 1,05 p.u. (ANEEL, 2017(c)) no cenário de carga leve – geração máxima; ultrapassagem da ampacidade dos cabos em todos os cenários.

Esta componente de custo possui uma forte influência técnica e, de certa forma, norteia o empreendedor de GD a buscar pontos com mais carga/redes mais robustas de forma a minimizar ou mesmo nulificar esta componente. Portanto, quanto maiores forem as perturbações no sistema elétrico ocasionadas pelas GD, maior será o custo das obras de conexão, que podem ser desde um regulador de tensão/recondutoramento de trecho do alimentador à construção de novo alimentador exclusivo/implantação de novos transformadores em subestações, etc.

### 2.3 Otimização multiobjetivo e dominância

A otimização multiobjetivo é definida como um problema de minimização de um conjunto de funções-objetivo que são conflitantes entre si. Em termos matemáticos, esse problema pode ser escrito de acordo com a equação (1).

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } F(x), F = [f_1, f_2, \dots, f_{n_f}], x = [x_1, x_2, \dots, x_{n_x}] \\ & \text{sujeito a } \left\{ \begin{array}{l} g_i(x_j) = 0, i = 1, \dots, n_g \\ h_i(x_j) \leq 0, i = 1, \dots, n_h \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ j \in 1, 2, \dots, n_x \end{array} \right. \end{aligned} \quad (1)$$

Em que  $f_1, f_2, \dots, f_{n_f}$  são as  $n_f$  funções-objetivo;  $x_1, x_2, \dots, x_{n_x}$  são as  $n_x$  variáveis das  $n_f$  funções-objetivo;  $g_1, g_2, \dots, g_{n_g}$  são as  $n_g$  funções que representam restrições de igualdade;  $h_1, h_2, \dots, h_{n_h}$  são as  $n_h$  funções que representam restrições de desigualdade; e  $x_{\min}$  e  $x_{\max}$  são os limites das restrições de fronteira para o vetor de variáveis (ZANIN JÚNIOR, 2019).

Na resolução de problemas de otimização multiobjetivo, encontram-se soluções que satisfazem as restrições, porém, não é possível definir um ponto ótimo, já que a melhora em uma avaliação de uma função-objetivo causa uma piora em uma avaliação de outra função-objetivo, dado que elas são conflitantes. Para isso, define-se o conceito de dominância de Pareto: um conjunto de pontos ótimos no qual uma solução não pode melhorar uma de suas avaliações de uma função-objetivo sem degradar as avaliações de outras funções objetivo. O conjunto dessas soluções, ditas não-dominadas ou soluções de Pareto, é denominado conjunto de Pareto ou fronteira de Pareto.

## 2.4 Métrica Maximin, Espalhamento da fronteira de Pareto

A métrica Maximin é uma técnica capaz de classificar, numericamente, uma solução em dominada ou não-dominada e por trazer informação numérica do grau de aglomeração da solução não-dominada, podendo ser escrita de acordo com a equação (2).

$$\text{Maximin}_i = \max \left\{ \min_{\substack{j=1, \dots, Npop \\ j \neq i}} \{ f_1^i - f_1^j, \dots, f_{n_f}^i - f_{n_f}^j \} \right\}, i \in [1, NPop] \quad (2)$$

Em que  $Npop$  é o número de indivíduos da população e  $i$  é o índice que representa o indivíduo da população. Os indivíduos que possuem valor negativo na métrica Maximin são soluções não-dominadas (fronteira de Pareto) e quanto mais negativo for o seu Maximin, menos aglomerada a solução está em relação às outras soluções de Pareto. Um detalhamento matemático maior sobre esta técnica, exemplificações, bem como suas vantagens podem ser encontrados em Li (2004), Brigatto (2011), Menchaca-Mendez & Coello (2013), Zanin Júnior (2019).

Uma medida importante da fronteira de Pareto é o seu espalhamento, ou seja, o quanto bem distribuídas estão as soluções na fronteira. A distribuição das soluções na fronteira é melhor quanto mais o espalhamento se aproxima de zero, o que é um indício de que o processo de otimização trabalhou em todo o espaço de busca. O espalhamento da fronteira de Pareto,  $S$ , é calculado conforme equação (3), na qual  $N$  é o número de

soluções na fronteira de Pareto.

$$S = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{i=1}^l (\bar{d} - d_i)^2}, d_i = \min_{\substack{j=1, \dots, l \\ j \neq i}} \left\{ |f_1^i - f_1^j| + |f_2^i - f_2^j| + \dots + |f_{n_j}^i - f_{n_j}^j| \right\}, i \in [1, l] \quad (3)$$

## 2.5 Algoritmos genéticos

Os AG são parte da computação evolucionária, cujo princípio básico é o de utilizar um conjunto de soluções iniciais para resolução do problema, e não apenas uma, como é o caso dos algoritmos clássicos de cálculo numérico (ENGELBRECHT, 2007). Eles são inspirados na teoria da evolução de Charles Robert Darwin (1809 – 1882) e surgem com o trabalho de John Henry Holland (1929 – 2015) na década de 80, sendo aplicados a diversas áreas do conhecimento na atualidade para resolução de problemas complexos e não facilmente solucionáveis com algoritmos clássicos. A TABELA 2 apresenta a correspondência entre termos da linguagem biológica e da linguagem computacional dos AG. Vale destacar que para descrever o funcionamento de um AG, em geral se utilizam ambas as linguagens de maneira intercambiável.

Linguagem biológica	Linguagem computacional
Cromossomo	Indivíduo, <i>string</i>
Gene, material genético, genótipo	Característica
Alelo	Valor
Locus	Posição
Fenótipo	Avaliação
Geração	Iteração
Pai	Indivíduo selecionado para gerar indivíduos para a iteração sucessora
Filho, Prole	Indivíduo(s) gerado(s) a cada iteração
População	Conjunto de indivíduos

TABELA 2 - Correspondência entre linguagem biológica e linguagem computacional (ZANIN JÚNIOR, 2019)

## 3 | MODELO MATEMÁTICO E DE OTIMIZAÇÃO

O modelo matemático é descrito com base nas informações apresentadas nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 e é composto por duas funções objetivos e restrições para o problema de alocação de empreendimentos de GD. A primeira função-objetivo são as perdas ativas de energia de um dia na rede de distribuição, as quais representam o critério técnico de interesse da distribuidora. A segunda função-objetivo é o custo de implantação do empreendedor de GD, que é composto do custo de instalação e do custo de conexão e

representa o critério econômico. As restrições estabelecidas são: violação da ampacidade dos cabos, violação de limite superior de tensão e variação rápida de tensão maiores que seus respectivos limites. A equação (4) expressa este modelo.

$$\text{Minimizar: } \left\{ \begin{array}{l} E_{Perdas} = \sum_t \left[ \sum_{km} r_{km} \times I_{km}^2(t) \right] \\ C_I = C_{Ins} + C_{Con} \end{array} \right\}, \text{ Sujeito a } \left\{ \begin{array}{l} I_{km}(t) \leq A_{km} \\ V_k(t) \leq V_{m\acute{a}x} \\ \Delta V_k(t) \leq \Delta V_{m\acute{a}x} \\ k, m \in \Omega_B, t \in \Omega_T \text{ e } km \in \Omega_L \end{array} \right\} \quad (4)$$

Em que  $E_{Perdas}$  é a energia de perdas ativas em um dia (perdas técnicas diárias) em Wh,  $\Omega_T$  é o conjunto de intervalos de tempo de cada uma das simulações de fluxo de potência – que neste trabalho é um vetor horário de um dia [00:00 – 1:00, 1:00 – 2:00, ... 23:00 – 24:00],  $t$  é o indicador de horário,  $\Omega_L$  é o conjunto de ramos da rede elétrica de distribuição,  $r_{km}$  é a resistência em ohms do ramo  $km$ ,  $I_{km}(t)$  é a corrente no ramo  $km$  em amperes no horário  $t$ ,  $A_{km}$  é a ampacidade do ramo  $km$  em amperes,  $V_k(t)$  é a tensão em p.u. na barra  $k$  no horário  $t$ ,  $V_{m\acute{a}x}$  é o limite superior de tensão em p.u. – que é de 1.05 p.u. (ANEEL, 2017(c)),  $\Delta V_k(t)$  é a variação rápida de tensão em p.u. na barra  $k$  no horário  $t$ ,  $\Delta V_{m\acute{a}x}$  é o limite de variação rápida de tensão permitida – que neste trabalho é de 0,05 p.u e  $\Omega_B$  é o conjunto de barras da rede elétrica de distribuição.

As simulações de fluxo de potência, conforme equação (4), são efetuadas 24 vezes para cada uma das possíveis soluções (simulações horárias) para se obter o valor de  $E_{Perdas}$ , considerando a curva de carga horária da rede de distribuição e também curvas típicas de geração, para cada uma das fontes, de acordo com o fator de capacidade da TABELA 1. Essas simulações também fornecem, conforme seção 2.1, os valores de tensão e corrente, a cada hora, que permitem a verificação das três restrições.

Existem diversas formas de tratar a violação das restrições: rejeição, penalização, conversão do problema com restrições em sem restrições, manutenção do espaço de busca na região de factibilidade, etc (ZANIN JÚNIOR, 2019). Como o custo de conexão é maior quanto maiores forem as violações para situações práticas de análise de conexão de GD, estas violações serão incorporadas neste custo e dessa forma a violação de restrições será inserida na forma de penalização – violar as restrições piora a avaliação do indivíduo em uma função-objetivo, a econômica. A título de exemplo, a FIGURA 1 apresenta uma dispersão de custo de conexão por potência da GD da Enel Distribuição Goiás, que mostra a não-linearidade e a dificuldade de previsão do valor desta função.

Conforme consta na seção 2.2., existem muitas variáveis que influenciam o custo das obras de conexão: nível de curto-circuito do ponto de conexão, perfil de carga do alimentador, configuração da subestação, esquema de proteção, perfil de geração da fonte GD, etc. Esta função, custo de conexão, pode ser personalizada por cada CoDis, utilizando AG, redes neurais artificiais ou *machine learning* para o cálculo o seu cálculo.

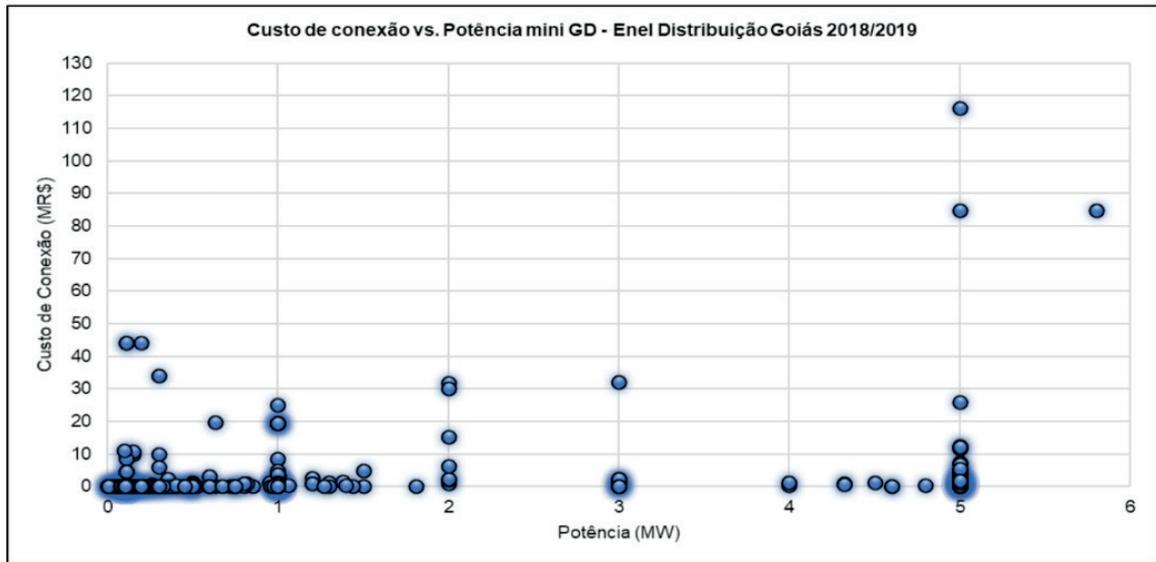


FIGURA 1 – Dispersão de custo de conexão para pedidos de acessantes GD da Enel Distribuição Goiás de janeiro/2018 a junho/2019 em função da potência da GD.

Para este trabalho, foi elaborada uma função de custo de conexão que aumenta exponencialmente de acordo com o número de violações de corrente em relação ao tamanho do sistema e de acordo com o número de violações de tensão e/ou variação rápida de tensão em relação ao tamanho do sistema – estes foram agrupados devido a geralmente estarem associados a uma mesma obra para solução de problemas de tensão. Assim sendo, esta função está descrita pela equação (5), na qual  $N_B$  é o número de barras do sistema. Quando não há violação de tensão e/ou corrente, o seu respectivo termo se torna nulo.

$$C_{Con} = C_{Ins} \left[ e^{\frac{\max(\sum I_{km}(t)-1)}{N_B}} - 1 \right] + C_{Ins} \times \left[ e^{\max\left(\frac{\max(\sum V_k(t)-V_{m\acute{a}x})}{N_B}, \frac{\max(\sum \Delta V_k(t)-\Delta V_{m\acute{a}x})}{N_B}\right)} - 1 \right] \left\{ \begin{array}{l} \forall V_k(t) > V_{m\acute{a}x} \\ \forall I_{km}(t) > A_{km} \\ \forall t \in \Omega_T \\ \text{com } k, m \in \Omega_B \text{ e } km \in \Omega_L \end{array} \right\} \quad (5)$$

Se não houver violação, =0

O custo de instalação é calculado pela equação (6), na qual  $N$  é o número de empreendimentos de GD que estão sendo alocados,  $n$  é o identificador do empreendimento de GD,  $C_{instal}^n$  é o custo de instalação em USD/kWp do empreendimento de acordo com sua tecnologia de geração (ver TABELA 1),  $NGD_n$  é o número de módulos de GD e  $PGD_n$  é a potência de cada um dos módulos de GD *e.g.*  $n=1$  indicia que se trata do empreendimento 1,  $NGD_1=5$  e  $PGD_1=300$  kWp indicam que são 5 módulos de 300 kW, ou seja, uma GD de 1500 kWp.

$$C_{Ins} = \sum_{n=1}^N C_{instal}^n \times NGD_n \times PGD_n \quad (6)$$

O modelo de otimização baseia-se nas seções 2.3, 2.4 e 2.5 e utiliza os resultados do modelo matemático e para buscar as soluções do problema. O AG deste problema possui

um cromossomo com genes, sendo que cada gene possui número de barra e número de módulos de GD. Cada um dos genes está associado a uma fonte de geração, com sua associada potência modular, número máximo de módulos e conjunto de possíveis barras candidatas. As representações do cromossomo e dos atributos de cada gene estão apresentadas nas TABELA 3 e TABELA 4.

$n$	1	2	3	4
Genótipo				
Barra Candidata	56	97	137	43
$NGD_n$	5	8	10	3

TABELA 3 – Exemplo de cromossomo do algoritmo genético

$n$	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	$PGD_n$ (kWp)
1	Fotovoltaica - A	[22 56 120 190]	10	200
2	Eólica	[37 54 97 210 256]	2	1000
3	Hidráulica	[130 137]	3	500
4	Fotovoltaica - B	[12 43 89 136 200 233]	15	150

TABELA 4 – Exemplo de características associadas a cada gene do cromossomo apresentado na TABELA 3

A população inicial é composta por indivíduos cujas barras e número de módulos de GD de seus cromossomos são escolhidos de maneira aleatória. A cada iteração, as funções-objetivo e as restrições são aplicadas à população. Caso alguma restrição seja violada, há uma penalização no custo de conexão, que compõe a função-objetivo de custo de implantação. Então, os resultados da avaliação são normalizados, submetidos à métrica Maximin e classificados. Os indivíduos cujo valor da métrica Maximin é menor que zero compõem a fronteira de Pareto.

Em seguida são aplicados os operadores genéticos à população: elitismo, no qual são reservados para a próxima população os 20% melhores indivíduos; seleção, pelo método da roleta viciada, tendo como critério o valor da métrica Maximin, que quanto mais negativa for, maior a probabilidade de seleção; recombinação com taxa de 100% com corte simples no cromossomo em local aleatório; e mutação com taxa de 5% em um dos genes de maneira aleatória, respeitando suas características inerentes, conforme TABELA 4.

Após este processo, tem-se uma nova população e o processo se repete até que o critério de parada adotado – neste trabalho é o número de iterações – seja atingido. No fim do processo, obtêm-se uma fronteira de Pareto ótima com os melhores indivíduos para as funções-objetivo a serem minimizadas e pode-se adotar algum critério de decisão para selecionar um dos pontos.

No próximo capítulo, são apresentados dois estudos de caso, destacando-se 4 critérios de decisão:  $E_{Perdas}$  mínima, previsão de energia gerada anual máxima, aproximação Máx-Mín (AMM, ponto de equilíbrio entre os objetivos) e mínimo custo global (MCG) de acordo com a metodologia prevista no módulo 2 do PRODIST para monetização de perdas diferenciais de energia por meio do custo marginal da expansão (CME). Adotou-se R\$ 193/MWh como CME (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016), 8% de taxa de interesse, 3,88 R\$/USD de taxa de câmbio e um horizonte de 10 anos para monetização das perdas diferenciais, as quais são calculadas subtraindo o valor da perda técnica diária encontrada para a solução de  $E_{Perdas}$  mínima do valor de perda técnica diária de todas as soluções, de forma a compará-las. Para o cálculo do custo global (CG), o valor das perdas diferenciais monetizadas e  $C_{con}$  foram somados, desconsiderando  $C_{ins}$ .

## 4 | RESULTADOS

Conforme mencionado na seção anterior, serão apresentados dois estudos de caso neste capítulo: A, no qual o estudo é feito com uma rede adaptada de um alimentador urbano da Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) Distribuição e B, o qual é feito com um alimentador da Enel Distribuição Goiás.

### 4.1 Estudo de caso A

O alimentador (al.) deste caso está representado na FIGURA 2(a), possui 192 barras e 191 ramos em 13,8 kV e possui carga máxima de 8,73 MVA (para dados do al., ver BRIGATTO (2011)), que pode ser visualizada na FIGURA 2(b) na forma de corrente e os dados para aplicação do modelo multiobjetivo estão contidos na TABELA 5.

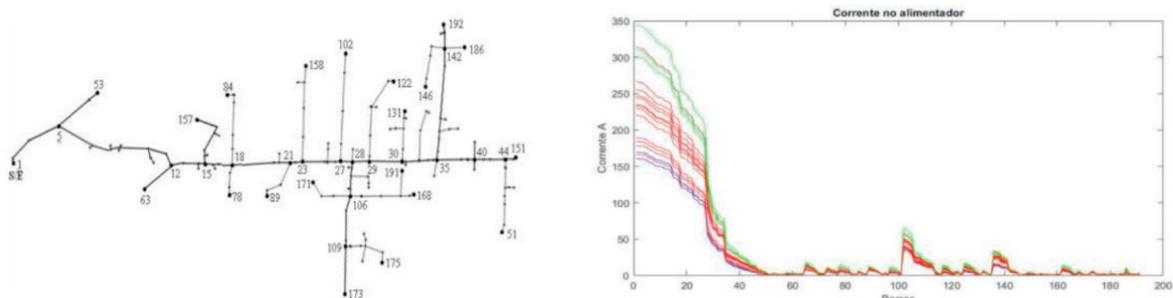


FIGURA 2 – (a) Desenho do al. (BRIGATTO, 2011) (esquerda) e (b) Corrente horária al. do caso A. (direita)

$n$	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	$PGD_n$ (kWp)
1	Fotovoltaica	[12 35 68 99 143]	15	200
2	Eólica	[23 78 111 154]	10	300
3	Hidráulica	[56 144]	5	500
4	Biomassa	[42 69 132]	6	500

TABELA 5 – Dados de entrada de possíveis GD no alimentador do caso A

A fronteira de Pareto resultante do processo de otimização, que utilizou uma população de 100 indivíduos e 500 gerações, está representada na FIGURA 3(a). A FIGURA 3(b) apresenta a previsão de energia gerada anualmente e o valor do custo global (CG) para cada uma das soluções. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I, II e III.

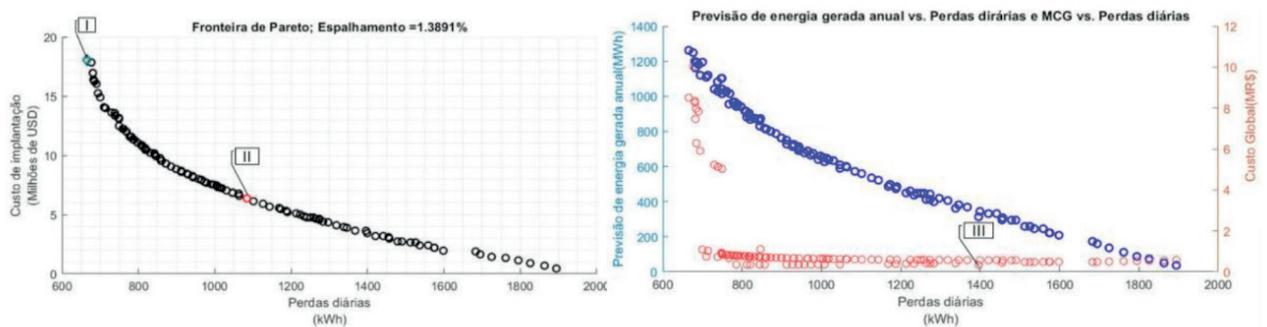


FIGURA 3 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) – Caso A.

O indivíduo I com avaliação de 18,06 MR\$ – 665,4 kWh/dia, é o indivíduo de  $E_{Perdas}$  mínima e o de maior previsão de energia gerada – 1262,2 MWh/ano – e possui o genótipo: Barra 99 – 1,6 MW (fotovoltaica), Barra 111 – 3,0 MW (eólica), Barra 144 – 1,0 MW (hidráulica) e Barra 132 – 2,0 MW (biomassa). O indivíduo II é o da AMM, representando o ponto de equilíbrio entre os objetivos, com avaliação 3,63 MR\$ – 1396 kWh/dia e genótipo: Barra 111 – 0,6 MW (eólica), Barra 468 – 0,5 MW (hidráulica) e Barra 632 – 0,5 MW (biomassa). Este indivíduo II evidencia que se pode ter uma redução considerável nas perdas ativas de energia (redução de 26,5% em relação a  $E_{Perdas}$  sem GD de 1900 kWh/dia) com um custo mais modesto (aprox. 5 vezes menor), se comparado ao da solução I.

O indivíduo III é o de MCG, possui avaliação 3,43 MR\$ – 1400 kWh/dia e genótipo: Barra 12 – 0,2 MW (fotovoltaica), Barra 111 – 0,6 MW (eólica), Barra 144 – 1,5 MW (hidráulica). Observa-se que este indivíduo é um vizinho de II, portanto, o MCG neste caso está em torno do ponto de equilíbrio da fronteira. Além disso, nota-se na FIGURA 3(b) que os indivíduos com custo de instalação mais elevados possuem obras de conexão mais caras, fazendo que seus CG alcancem valores entre 4 -10 MR\$ (pontos vermelhos na região superior-esquerda da FIGURA 3(b)).

## 4.2 Caso B

O alimentador deste caso é o circuito 01 da subestação (SE) Goiânia Leste, SE compartilhada entre a Enel Distribuição Goiás e a CELG GT, com 4 x 50 MVA – 230/13,8

kV e 27 alimentadores, que alimentam em torno de 15 a 20% da carga total do município de Goiânia (GO). Este alimentador pode ser visualizado na FIGURA 4(a) e possui uma carga máxima de 8,2 MVA, a qual pode ser visualizada sob forma de corrente na FIGURA 4(b). Os dados para aplicação do modelo multiobjetivo estão contidos na TABELA 6.

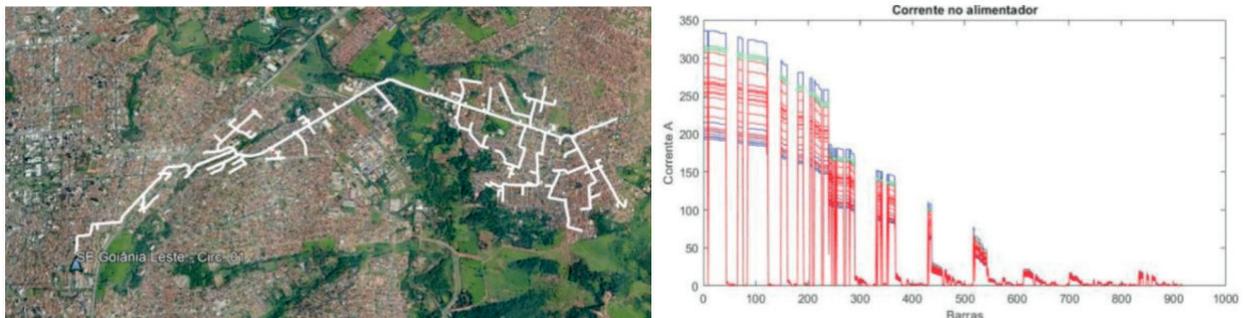


FIGURA 4 – (a) Georepresentação do al. Goiânia Leste 1 (esquerda) e (b) Corrente horária no al. do caso B (direita).

$n$	Fonte	Barras Candidatas	$NGD_{n,máx}$	$PGD_n$ (kWp)
1	Fotovoltaica - 1	[129 248 367 565]	10	500
2	Fotovoltaica - 2	[138 468 737 811]	10	500
3	Fotovoltaica - 3	[53 352 632 906]	10	400

TABELA 6 – Dados de entrada de possíveis GD no alimentador do caso B.

Este caso foi elaborado exclusivamente com fontes fotovoltaicas por se tratar de um alimentador em uma região bastante urbanizada. A fronteira de Pareto resultante do processo de otimização, que utilizou uma população de 100 indivíduos e 500 gerações, está representada na FIGURA 5(a). A FIGURA 5(b) apresenta a previsão de energia gerada anualmente e o valor do custo global para cada uma das soluções. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I, II e III.

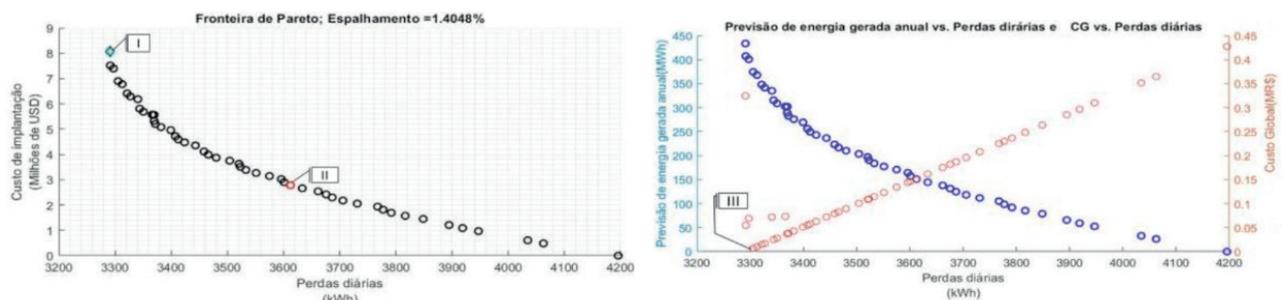


FIGURA 5 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) - Caso B.

O indivíduo I com avaliação de 8,07 MR\$ – 3291 kWh/dia, é o indivíduo de  $E_{Perdas}$  mínimo e o de maior previsão de energia gerada – 433,62 MWh/ano – e possui o genótipo: Barra 248 – 3,5 MW, Barra 468 – 1,5 MW e Barra 632 – 1,6 MW. O indivíduo II é o da AMM, representando o ponto de equilíbrio entre os objetivos, com avaliação 2,78 MR\$ – 3612 kWh/dia e genótipo: Barra 565 – 0,5 MW, Barra 468 – 1,0 MW e Barra 632 – 0,8 MW. Novamente, pode-se notar que é possível reduzir as perdas ativas de energia em 14 % ( $E_{Perdas}$  sem GD de 4200 kWh/dia) com uma solução com custo de investimento relativamente reduzido, em relação à solução I.

O indivíduo III, de MCG, possui avaliação de 7,4 MR\$ – 3297 kWh/dia, ou seja, quase a mesma de I, e possui genótipo: Barra 248 – 3,5 MW, Barra 468 – 1,0 MW e Barra 632 – 1,6 MW. Isso ocorre porque o indivíduo I possui custo associado às obras de conexão, o que pode ser observado pelo seu desvio dos outros pontos em relação à curva de custo global (ponto vermelho na região superior-esquerda da FIGURA 5(b)).

Foi simulado um subcaso adicional em que  $n = 3$  é uma GD cuja fonte é biomassa e não fotovoltaica, denominado Caso B.ad. Os resultados encontrados estão representados na FIGURA 6(a), que exibe a fronteira de Pareto para este caso e na FIGURA 6(b), que exibe a previsão de energia gerada anual e o CG em função das perdas. Nestas figuras são destacados os indivíduos que atendem os critérios de decisão indicados no capítulo 3.0: indivíduos I e II.

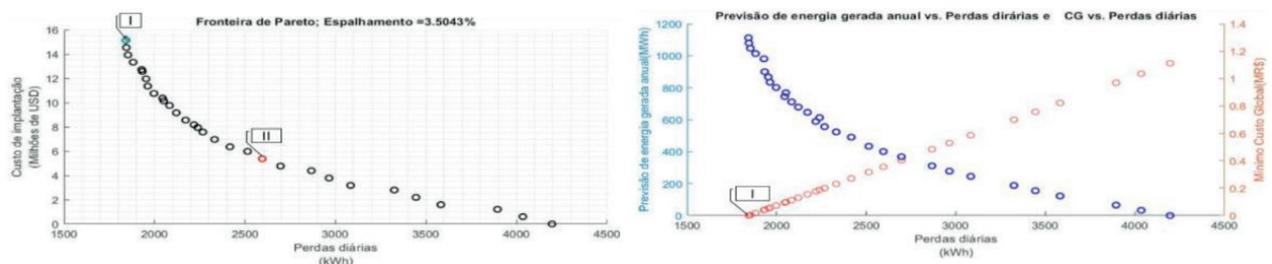


FIGURA 6 – (a) Fronteira de Pareto (esquerda) e (b) Previsão de energia gerada e CG (direita) – Caso B.ad.

Nota-se que com a possibilidade da entrada da fonte de biomassa, as perdas diárias entraram em novo patamar de redução:  $E_{Perdas}$  mínimo de 3291 kWh/dia (redução de 21,6%) no caso B para mínimo  $E_{Perdas}$  de 1843 kWh/dia (redução de 56,1%). Isso ocorre devido à menor intermitência da fonte de biomassa e à sua consequente prevalência em relação às GD solares fotovoltaicas. O indivíduo I, neste caso é o de  $E_{Perdas}$  mínimo, MCG e de maior previsão de energia gerada anual – 1112,52 MWh/ano – e possui avaliação 15,14 MR\$ – 1843 kWh/dia e genótipo: Barra 248 – 1,5 MW (fotovoltaica), Barra 468 – 0,5 MW (fotovoltaica) e Barra 352 – 3,2 MW (biomassa). Pode-se deduzir que devido à presença das fontes menos intermitentes de biomassa em todas as soluções, os custos de conexão foram reduzidos, dado o menor número de violações, especialmente para o caso da variação rápida de tensão.

O indivíduo II, de AMM, possui avaliação 5,98 MR\$ – 2514 kWh/dia e genótipo: Barra 367 – 0,5 MW (fotovoltaica), Barra 468 – 0,5 MW (fotovoltaica) e Barra 632 – 1,2 MW (biomassa). Observa-se novamente que este indivíduo é capaz de reduzir as perdas em 40% e que este indivíduo, que é o ponto de equilíbrio desta fronteira, possui  $C_I$  e  $E_{Perdas}$  menores que o indivíduo I do caso B.

## 5 | CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o modelo multiobjetivo para alocação de GD é eficaz no que tange ao horizonte de planejamento da distribuição, permitindo avaliar a inserção de GD em possíveis barras e com modularizações diferentes. Isso possibilita que o planejador crie estratégias de redução do custo de implantação para o empreendedor e/ou das perdas ativas de energia, a depender do critério de tomada de decisão adotado após obtenção da fronteira de Pareto. O trabalho também evidencia a alta complexidade do planejamento de inserção de renováveis no setor de distribuição de energia.

As fontes menos intermitentes/com maior fator de capacidade obtiveram maior presença nas soluções ótimas nos casos A e B.ad. As fontes eólicas e solares modeladas neste trabalho possuem o mesmo custo de instalação, conforme TABELA 1, entretanto o fator de capacidade da fonte fotovoltaica é praticamente metade do da fonte eólica. Pode-se afirmar, portanto, que o setor elétrico deve buscar melhora tecnológica e redução de custos da fonte fotovoltaica (como já tem ocorrido) para aumentar sua competitividade.

Sugerem-se como próximos trabalhos: a investigação do custo de conexão por meio de redes neurais ou *machine learning*, de forma a acelerar e automatizar processos dentro das CoDis; e a investigação regulatória e consequentes propostas que permitam um planejamento colaborativo de inserção de GD entre CoDis e empreendedor; e a realização deste tipo de modelo proposto neste trabalho incluindo a estocasticidade das fontes.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 9. 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 25. 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 786 de 17 de outubro de 2017**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 2. 2017(a).

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 3**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 74. 2017(b).

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8.** ANEEL. Brasília, p. 90. 2017(c).

ANEEL. Brasil ultrapassa marca de 1 GW em geração distribuída. **Site da Agência Nacional de Energia Elétrica**, 19 jun. 2019. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877)>.

BRIGATTO, G. A. A. **Modelo de decisão multiobjetivo para a busca de estratégias ótimas de inserção de empreendimentos em geração distribuída.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 212. 2011.

BROADWATER, R. P. et al. Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution System. **Electric Power System Research**, , v. 14, 1988.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Custo Marginal da Expansão (CME) - N° EPE-DEE-RE-010/2016-r0.** Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 13. 2016.

ENGELBRECHT, A. Computational Intelligence, an introduction. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007.

GONZALEZ-LONGATT, F.; FORTOUL, C. Review of the Distributed Generation Concept: Attempt of Unification. **RE&PQJ**, v. 1, n. 3, p. 281-284, March 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA); ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD).

**Projected Costs of Generation Electricity - 2015 Edition.** Paris: [s.n.], 2015.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2018.** Abu Dhabi. 2019.

LI, X. **Better Spread and Convergence:** Particle Swarm Multiobjective Optimization Using the Maximin Fitness Function. Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 2004. Seattle: Springer. 2004. p. 117-128.

MENCHACA-MENDEZ, A.; COELLO, C. A. **Selection Operators Based on Maximin Fitness Function for Multi-Objective Evolutionary Algorithms.** Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO 2013. Sheffield: Springer. 2013.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica.** 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1983.

REN 21. **Renewables 2017 Global Status Report.** Renewable Energy Policy Network for 21st Century. Paris, p. 302. 2017. (978-3-9818107-6-9).

ZANIN JÚNIOR, P. S. **Modelo multiobjetivo de alocação e dimensionamento de geração distribuída para redes de distribuição.** Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 190. 2019.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p. ISBN 978-85-7975-052-6.

## COMPLEXIDADES DA OPERAÇÃO DO SIN E SEUS IMPACTOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

Data de aceite: 01/06/2020

### **Vinicius Ragazi David**

Graduado em Engenharia Elétrica na UNICAMP, consultor da Thymos Energia

### **Daniela Souza**

Graduada Engenheira Eletricista pela Universidade de Pernambuco e Especialista em Sistema de Transmissão por Itajubá, Gerente na Thymos Energia

### **Leonardo Calabró**

Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Mauá SP com Pós-Graduação em Operação de Sistemas Hidrotérmicos – UNICAMP, Vice-presidente da Thymos Energia

### **João Carlos Mello**

Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio, Presidente da Thymos Energia e Coordenador do Comitê de Estudos C5, Mercados e Regulação, no Cigré Brasil

### **Xisto Vieira Filho**

Mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio, Presidente da ABRAGET

### **Edmundo P. Silva**

Formado em Engenharia Elétrica pela UFRJ, Diretor da ABRAGET

**RESUMO:** O presente trabalho tem como foco a discussão da necessária interação do planejamento com as novas realidades enfrentadas pela operação do SIN. A matriz

futura do SIN está se modificando de tal forma que as fontes renováveis com “custo marginal zero” vem ganhando cada vez mais espaço, em especial aquelas que são fontes intermitentes. Neste contexto, o presente artigo aborda os principais desafios e riscos necessários no aprimoramento do planejamento da expansão ao se deparar com questões que envolvam segurança energética e eventuais custos adicionais que devam ser considerados para escolha da alternativa de expansão numa condição de amplas incertezas frente ao futuro do setor. Além disso, será apresentada uma aplicação específica com comparações entre diversas alternativas para atendimento ao mercado futuro e os custos associados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Segurança Energética, Novas Fontes, Intermitência, Confiabilidade.

## 1 | INTRODUÇÃO

A geração hídrica sempre foi e ainda será um dos principais pilares da geração energética do país, sendo responsável por mais de 60% da capacidade atual instalada, porém, com as dificuldades de implementação de novas UHEs com grandes reservatórios de armazenamento, outras fontes renováveis vêm ganhando espaço na matriz energética

nacional e em especial fontes intermitentes como a solar, eólica e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Mesmo as novas grandes hidrelétricas da Amazônia são também intermitentes já que são fio d'água e dependem fundamentalmente da qualidade da estação chuvosa. A redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios brasileiros, aliada aos recentes cenários de baixas afluências vem ocasionando despacho termelétrico recorrente, normalmente de custos mais elevados, incluindo despacho fora de ordem de mérito por motivos de segurança energética determinados pelo Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE). Isto representa um importante desafio para o Operador Nacional do Sistema (ONS) na operação do sistema, atendendo critérios operativos e manter os reservatórios dentro dos níveis mínimos de segurança. Nesse sentido, a capacidade firme de geração termelétrica continuará a ser necessária para manter a estabilidade do sistema em caso de falhas e apoiar o desenvolvimento das fontes intermitentes, porém incluindo partidas e desligamentos mais rápidos, geração mínima menores e com maiores variações na geração. A relação da oferta de produtos termelétricos em consonância com a expansão das fontes renováveis num ambiente de amplas incertezas será a chave do sucesso da operação futura do SIN.

De acordo com as projeções apresentadas no Plano Decenal (2017-2026) pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), está prevista um aumento da geração termelétrica a gás natural que atingira 17.339 MW em 2026, além de um adicional de geração termelétrica para atendimento a ponta que poderá atingir 12.198 MW. Entretanto existe preocupações de que o principal combustível das térmicas pode não ter estrutura para o devido abastecimento. O gás natural nacional atualmente não possui estrutura para a geração térmica simultânea em todas as usinas. A materialização do escoamento do gás do Pré-Sal ainda não se comprovou em volumes suficientes para atender o suprimento crescente da indústria nacional e suprir as novas plantas geradoras, a situação é ainda mais impactante tendo em vista um possível fim de contrato de importação do gás boliviano (GASBOL) e restrições na Bolívia de nova oferta. Desta forma é necessária a continuação da importação de GNL com custos elevados e passíveis às variações do mercado internacional pelo atrelamento a índices internacionais e câmbio Real-Dólar, fatores que impõe novos riscos aos empreendimentos e podem ser limitantes de novos investimentos. A melhor expectativa é a exploração do gás associado do Pré-Sal, que conforme plano de negócios da Petrobrás, deverá estar disponível em meados da próxima década. Tendo em vista que a expectativa de operação mais frequente de térmicas será uma tendência no futuro próximo, devido às especificidades das demais fontes, faz-se necessário considerar instrumentos determinativos capazes de guiar a rota de expansão da geração, com medidas governamentais como, por exemplo, leilões de segurança energética para viabilizar projetos específicos. O término de contratos de comercialização de energia em ambiente regulado (CCEAR) de diversas térmicas a partir de 2021 também devem ser analisadas. A retirada dessas usinas pode impactar positivamente a

economia do sistema em contrapartida do detrimento da segurança energética nacional. Soluções propositivas para a continuação da operação dessas usinas, como alteração de combustível ou propósito de despacho, devem ser analisadas a fim de se evitar grandes perdas de capacidade e também mitigar os impactos sociais nas cidades e estados em que estão presentes.

Neste contexto, as diretrizes atuais utilizadas pelo planejamento deve contemplar as dificuldades que serão enfrentadas para assegurar o atendimento às demandas no Sistema Integrado Nacional (SIN), em todos os períodos de tempo, considerando os eventuais riscos que a efetiva expansão enfrentará (disponibilidade real de combustível, penalidades, atrasos das obras de transmissão, etc.), além de questões climáticas, elétricas e energéticas. A baixa previsão de geração hidrelétrica causada pelos impactos das mudanças climáticas, a elevação de geradores intermitentes e a falta de infraestrutura de abastecimento e transmissão, no momento certo, são apenas alguns dos problemas que o planejador necessita considerar nos modelos para agregar controlabilidade, confiabilidade e previsibilidade para todos os agentes envolvidos a fim de permitir a oxigenação do mercado de energia brasileira e garantir um crescimento sustentável, ecológico e social [1].

A verdade é que no planejamento brasileiro tem sido aplicado o conceito do “Mínimo Custo Global” para indicar os novos projetos de geração & transmissão (G&T) buscando uma visão do sistema como um todo. Os projetos da nova geração (G) foram selecionados por meio de leilões públicos com base no preço mínimo de compra, e só após novos projetos de transmissão (T) são indicados com o critério de “mínimo custo” para acomodar a nova geração. Os fatos são claros neste sentido: (i) o mix atual de preço de lance mínimo para G e “planejamento de mínimo custo” para T não encontra a melhor solução para os usuários finais; (ii) o problema é que a falta de atributos corretos que não levam em conta, por exemplo a intermitência de renováveis e linhas de longa distância para conectar todos os projetos G. Com o atual mix de tecnologias na G é fundamental obter segurança do sistema, resiliência, adequação ambiental, com custos mínimos. Também é importante buscar soluções locais sempre que houver uma região com abundância de oferta a ser explorada [2].

No novo ambiente para expansão as soluções para expansão provenientes somente de estruturas de oferta no atacado não serão mais as únicas rotas, como no passado. O “empoderamento” dos usuários de varejo fornecerá diferentes “soluções locais” com a geração distribuída (GD) e outras novas tecnologias de armazenamento. Ainda assim as novas energias renováveis com custos marginais “zero” dominarão de forma inexorável a expansão da matriz. Os planejadores e operadores devem estar conscientes desse novo ambiente e também fornecer as melhores “soluções locais” para acomodar a segurança do sistema. As eficiências para os consumidores finais são decididas por si mesmas (nova tendência) e a segurança do sistema deve ser coordenada por planejadores e

operadores. As conseqüências econômicas deste novo ambiente de planejamento devem ser discutidas levando-se em conta também a liberdade de soluções para os usuários do varejo. A discussão desse novo ambiente de expansão ainda está no começo no Brasil. O trabalho apresentado busca discutir um caso-teste com “soluções locais” no Nordeste com ênfase na segurança energética percorrendo os critérios de planejamento mirando também os requisitos operativos. A “solução local” é baseada em projetos térmicos, com o objetivo de garantir a segurança do sistema quando houver uma alta participação de fontes renováveis intermitentes. A eficiência para os consumidores finais é demonstrada, pois apesar do custo extra da usina térmica, outros custos do sistema são reduzidos e a segurança é amplamente melhorada.

## 2 | SEGURANÇA SISTÊMICA E MERCADO LOCAIS

O sistema elétrico brasileiro tem uma vasta experiência em planejamento e operações centralmente coordenadas. O benefício de um planejamento coordenado central e a operação tem sido significativo, devido às características do sistema brasileiro, como grandes hidrelétricas, múltiplas bacias hidrográficas, as operações de hidrelétricas em cascata, linhas de longa distância, novas múltiplas fontes renováveis em torno de todo país. Os leilões de expansão da geração seguiram esta tendência, com o objetivo de capturar o menor custo para os usuários finais buscando considerar o sistema de energia elétrica como um todo. Assim, a expansão da geração não leva em conta as exigências regionais e suas restrições locais. Este problema pode potencialmente criar outra restrição operacional para o operador devido à composição final da geração em cada área de mercado, ou mesmo devido à enorme capacidade de intercâmbio entre eles, o que ao final se torna necessário para enfrentar a forte variabilidade na geração regional.

Alguma discussão sobre leilões separados com base no perfil futuro esperado da geração regional tem sido feito, no entanto apenas ligeiros progressos foram aceitos. Claramente, a vantagem será uma melhor ligação com o planejamento central e operações futuras. A seleção deve ser feita separadamente para projetos térmicos e também para novas energias renováveis perseguindo alguns pressupostos básicos, tais como: segmentação regional conjunto diferente de perfis de despacho operacional (base, médio, intermitente e flexível).

### 2.1 O Sistema Nordeste

Este perfil de expansão criou um problema real para a área do mercado do Nordeste, onde existe a maior mudança estrutural no sistema elétrico brasileiro. Apesar do aumento regional da capacidade, o mercado Nordeste está mais vulnerável em termos de segurança: (i) A grande penetração das fontes renováveis intermitentes - eólica e solar - requerem despachos térmicos fora da ordem de mérito gerando custos adicionais para

os consumidores; (ii) uma carteira considerável de ativos térmicos com uma matriz mais cara - carvão, gás, óleo combustível e diesel; (iii) A bacia do rio São Francisco com a geração hidrelétrica com um desempenho permanentemente muito baixo – as vazões estão abaixo da média histórica de longo prazo, pelo menos nos últimos 20 anos, e menores do que o histórico mínimo no período seco dos últimos cinco anos, tendo como razões principais uma hidrologia desfavorável e várias novas aplicações - saneamento, irrigação, transposição. Assim, a geração no rio São Francisco já não tem o mesmo papel e deve alterar o seu perfil operacional da operação de base para uma nova missão, tal como proporcionar reserva girante e fechamento da curva de carga; (iv) as interconexões estão sendo utilizadas até o máximo para garantir o equilíbrio de potência e reserva frente aos desbalanços na operação, comprometendo a confiabilidade e segurança do Nordeste e, por vezes, o sistema como um todo.

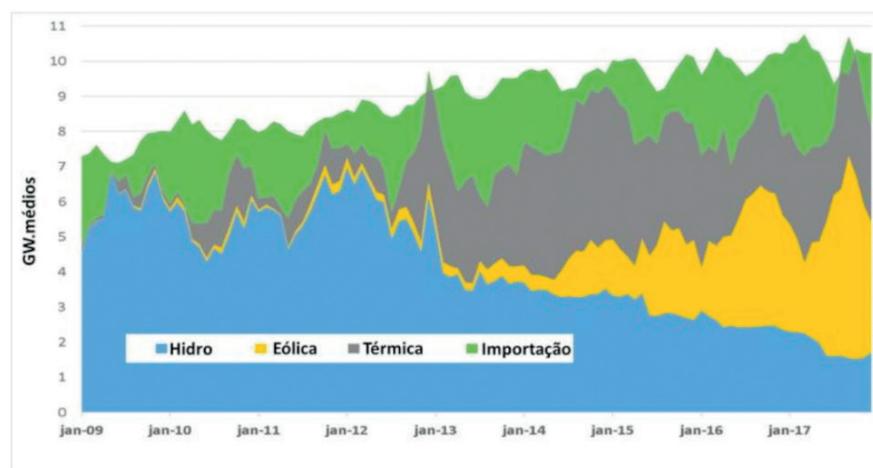


Figura 1 – Balanço Sistema Nordeste - 2009-2017

A Figura 1 apresenta o balanço no mercado do Nordeste, incluindo todas as fontes e as importações. O mercado do Nordeste vem experimentando mudanças consideráveis desde 2009. O primeiro movimento foi o aumento da produção eólica que atingem hoje em dia quase 30% do balanço energético. O segundo foi uma redução significativa da produção de hidro compensada pelo aumento de energia térmica e importação. No sistema Nordeste, um problema adicional vem ocorrendo, além da intermitência das renováveis: em alguns períodos do nível de carga leve, há um excesso de energia eólica, e então o operador freqüentemente impõe uma rotina diária colocar usinas térmicas flexíveis e caras em operação para garantir a segurança elétrica. Tais usinas, no entanto, não foram projetadas para realizar este tipo de serviço ancilar. Este é definitivamente um assunto que deveria ser reservado com uma operação melhor para as térmicas de base no sistema Nordeste. Isto iria proporcionar mais margens no sistema de transmissão que liga o Nordeste com outras regiões, o que permitiria o controle automático de geração (CAG) de centrais hidro no mercado local para absorver esses excessos de energia eventuais, bem

como para atender as intermitências, ficando as interligações para trocas energéticas em margens de segurança adequadas.

Uma solução aprimoramento de segurança local com viabilidade econômica deve ser concebida para compensar essas mudanças que criaram as exigências do mercado do Nordeste sobre segurança energética. Algumas questões precisam ser consideradas para aumentar a segurança local: (i) No caso de todos os reservatórios do sistema ser utilizados até o limite como em 2014? Não devem os impactos sobre as variações do mercado local e o desempenho das hidrelétricas locais serem considerados? (ii) Os atuais projetos térmicos existentes são adequados para a segurança local? Qual é o custo atual da segurança energética com estes projetos? (iii) Será que os novos projetos oriundos dos leilões de energia para cobrir o crescimento da carga são capazes de cumprir o critério de segurança por si só? (iv) Como garantir a segurança futura com a desconstrução de grandes volumes de geração térmica local existente a partir de 2020 - o gás natural, e, principalmente, óleo combustível e diesel?

## 2.2 Proposta de Expansão com Atributos e Mercados Locais

A fim de cobrir todas essas questões este trabalho recomenda uma nova solução chamada “projetos de segurança sistêmica e soluções locais”, selecionados por leilões públicos dedicados e cobrado a todos os consumidores. O mercado de energia brasileiro é atualmente um mercado apenas de energia (“energia-only”) e a ideia é introduzir também um “mercado capacidade” (lastro & energia) com soluções locais em cada área de todo o sistema, selecionados pelo operador e o planejador. Tais soluções serão adotadas para garantir a segurança sistêmica e de seus mercados locais, sem que necessariamente se esteja buscando atender apenas a demanda de energia do mercado. Para tal é necessário que o planejador e o operador indiquem claramente estas necessidades a tempo e a hora para que se considere todo o processo de implantação de novas soluções visando à segurança.

Um dos mitos que devem ser enfrentados de frente é a busca incessante pela “solução do mínimo custo global” para a expansão G&T. Deve ficar claro que isto hoje é apenas um desejo, pois a realidade é que o processo como um todo é desacoplado em termos de nova oferta de expansão e os requisitos da operação, e as incertezas que cercam a transmissão invariavelmente criam atrasos sem controle dos investidores, principalmente nos grandes troncos. Além disto, embora a pureza conceitual recomende o “mínimo custo global”, as incertezas que a ruptura tecnológica trará nos próximos anos, as questões ambientais se tornando muito mais latentes, e as mudanças climáticas impondo novos paradigmas na oferta, cria um ambiente de modelagem “global” muito mais complexo, e talvez até mesmo insuperável. Portanto, as visões mais apuradas em mercados locais cada vez de menor abrangência será uma das únicas saídas no futuro da expansão da oferta e infra-estrutura de suprimento.

Sendo assim, se recomenda a criação de critérios de planejamento da expansão da oferta totalmente acoplado com os requisitos de operação e com a infra-estrutura de suprimento necessária (redes de transmissão e suprimento de combustível) com foco também na solução de mercados locais, sempre que possível. A ponderação de soluções integradas do SIN versus soluções locais deve levar em consideração todos os riscos e incertezas envolvidos na construção de uma expansão mais robusta com os atributos adequados, com o compromisso do planejador e do operador junto ao poder concedente e ao regulador. A forma de seleção dos projetos poderá ser ainda discutida dentro de um arcabouço de um mercado de capacidade (lastro & energia), em que a obrigação da necessidade de nova oferta de lastro é centralizada, ou numa fase de transição, em que os novos projetos para contratos de energia estejam em consonância com a necessidade de novos critérios. No caso, se na transição os novos projetos não forem suficientes para alcançar a segurança operativa desejada, licitações dedicadas para a segurança seriam então realizadas, num processo similar aos leilões de reserva, em que todos os consumidores pagam pela segurança.

### **3 | CASO-TESTE – SOLUÇÕES SISTÊMICAS VERSUS LOCAIS**

O debate que envolve a busca de soluções sistêmicas versus as soluções de cunho local são novas no sistema brasileiro. Isto ocorre hoje pelas perspectivas tecnológicas mais recentes que buscam soluções descentralizadas para atender perspectivas de nova oferta locais. Neste contexto surgem as novas fontes renováveis de custo marginal “zero”, a intermitência das fontes, o armazenamento como solução, as redes inteligentes, as micro-redes dentre outros avanços previstos. Não existe a menor dúvida que estaremos diante de um novo sistema elétrico nas próximas décadas. Sistemas em mercados mais maduros já estão em discussões profundas sobre a adaptação da sua infra-estrutura neste novo contexto. O mercado brasileiro ainda está num caminho mais afastado de modernização, pelas dificuldades intrínsecas que ocorrem localmente com nossa estrutura de mercado.

Cabe lembrar que até a década de 50 do século passado as soluções locais sempre foram uma tônica devido às restrições de integração mais amplas. Ao contrário, a partir de década de 60/70, as soluções integradas tomaram conta da expansão da geração e transmissão, e o sistema brasileiro com suas dimensões continentais e oferta hidráulica abundante tomou partido da integração como nenhum outro sistema mundial. O momento agora é de reflexão, pois a nova fronteira hidrelétrica é a região amazônica, com seus desafios ambientais e de infra-estrutura, que deve levar o operador e o planejador a repensar a rota apenas nas grandes soluções globais.

Sendo assim, uma discussão paralela é a necessidade maior das térmicas de base no SIN para garantir a segurança do sistema frente à dependência cada vez maior dos

efeitos climáticos e sua intermitência, seja nas hidrelétricas sem armazenamento, seja nas novas renováveis. Esta é uma nova matriz térmica que necessita novos investimentos e um suprimento de combustível competitivo, para que as térmicas de base cumpram seu atributo principal que é um despacho mais prolongado, porém com eficiência e custos variáveis bem competitivos. Sendo assim, o gás natural é o principal candidato, uma vez que toda a comunidade ambiental mundial reconhece o gás natural (GN) como o melhor combustível fóssil na transição para uma matriz com baixa emissão de carbono. No entanto, existem incertezas na exploração e oferta do GN nacional.

### 3.1 A Oferta de GN

No Brasil as recentes descobertas na exploração do pré-sal entusiasmaram o setor energético com a possibilidade de uma nova oferta competitiva para as térmicas do setor elétrico. Em paralelo, as novas descobertas mundiais de gás natural não convencional aumentaram significativamente a oferta de GN e sua liquidez no mercado mundial. Sendo assim, a solução com gás natural liquefeito (GNL) tomou importância e credibilidade mundial, não só pelo aumento da liquidez, como pelos novos produtos, flexibilidade e novas opções oferecidas. A competição entre estas soluções de GN local e GNL importado para abastecer as térmicas de base é natural, dado que envolve também a questão de logística e maior facilidade de atendimento de mercados locais vis a vis o custo global da solução.

#### 3.1.1 Histórico do Pré-sal

O GN proveniente do pré-Sal apresenta um grande potencial de produção, por outro lado, existem enormes desafios tecnológicos para viabilizar o seu aproveitamento comercial, principalmente para geração térmica, levando em conta os arcabouços regulatório e comercial existentes. Os grandes reservatórios do pré-sal encontram-se a grandes distâncias da costa brasileira, o que encarece sobremaneira o escoamento deste gás em decorrência da distância e da profundidade dos campos. Atualmente, apenas 2 rotas de escoamento com origem no pré-sal estão em operação (rota 1 e 2) totalizando uma capacidade de transporte de 23 MMm<sup>3</sup>/dia. O gás do pré-sal apresenta um nível elevado de contaminação, em particular por CO<sub>2</sub>, o que implica em investimentos relevantes para sua separação. Boa parte das empresas que produzem gás natural no Brasil vende sua produção na boca do poço para Petrobras, que tem colocado à disposição do mercado grande parte da infraestrutura de escoamento, tratamento, transporte e de parte da distribuição.

O mercado brasileiro atualmente consome 105 MMm<sup>3</sup>/dia de GN, sendo a oferta de 38,6 MMm<sup>3</sup>/dia oriundo do off-shore (pós-sal), e 49,8 MMm<sup>3</sup>/dia do Pré-Sal (valores brutos), complementado por exploração em terra e importações, como apresentado na

Figura 2. Devido às impurezas e produção do petróleo, apenas 20 MMm<sup>3</sup>/dia (41%) de GN do pré-sal é transportado para a costa. A produção bruta do pré-sal cresceu 8% em 2016 e 7% em 2017. A indústria representa o maior mercado interno nacional, como na Figura 3. Nos anos de 2014 e 2015, o consumo para geração elétrica superou 40% do consumo do GN no Brasil. A geração elétrica e o consumo industrial representam mais de 85% do consumo líquido de GN. A concentração de CO<sub>2</sub> no gás do Pré-Sal (10 a 45%) está muito acima dos limites toleráveis pela ANP para comercialização (3% de CO<sub>2</sub>). A necessidade de uma maior capacidade de separação do CO<sub>2</sub> na plataforma não é viável dado à escassez de espaço na unidade de produção, sendo necessário o desenvolvimento de unidades compactas de separação de CO<sub>2</sub> nas plataformas para o aproveitamento do GN – ainda não há tecnologia existente para separação em escala. O gás com alta concentração de CO<sub>2</sub> não pode ser transportado até a costa sem a prévia separação do contaminante devido aos efeitos corrosivos nos equipamentos de transporte. O CO<sub>2</sub> separado deve ser reinjetado para evitar a contaminação da atmosfera e impactos potenciais no aquecimento global. Caso a reinjeção do CO<sub>2</sub> aconteça no reservatório de produção, o nível de contaminação do reservatório tende a aumentar com o tempo. Em suma, a produção ampla de GN do pré-sal tem suas dificuldades intrínsecas.

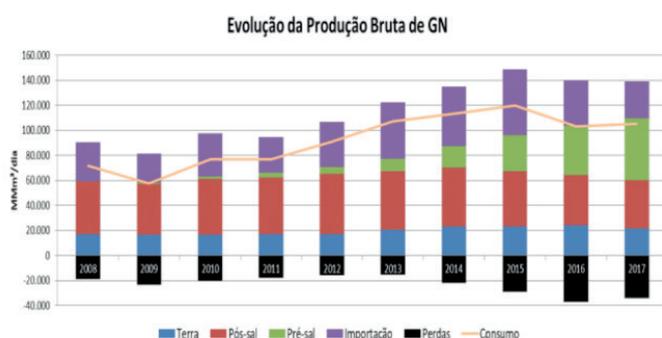


Figura 2 – Produção e Consumo de GN (Anuário Estatístico 2018 – ANP)

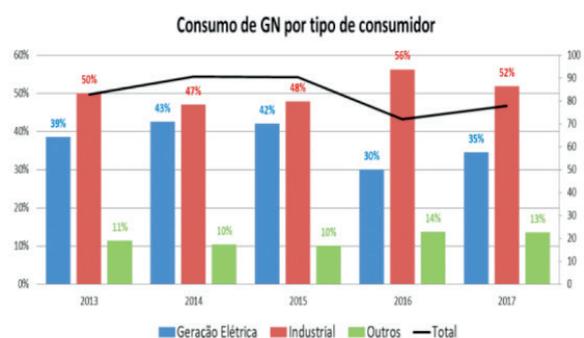


Figura 3 – Tipo de Consumo GN Nacional (MME – Maio 2018)

Outro entrave de logística é o escoamento do GN do pré-sal para a costa brasileira, e atualmente existem apenas 2 rotas. A rota 3 está em construção, aumentando a capacidade de escoamento para 44 MMm<sup>3</sup>/dia. O prazo de implantação está para 2020 (podendo ser postergado). O Estado de SP vislumbra uma 4<sup>a</sup> rota que teria uma capacidade de escoamento de cerca de 15 MMm<sup>3</sup>/dia com direção ao litoral de São Paulo. Contudo o projeto em fase de desenvolvimento ainda não possui licença ambiental e nem prazo de implantação. A Figura 4 ilustra as rotas do pré-sal.



Figura 4 – Rotas do Pré-sal (Petrobrás – Maio 2016)

Os gasodutos de escoamento do Pré-Sal são custosos em função da distância entre os campos e a costa (mais de 300 km), e em função da profundidade dos campos (7 km). Os equipamentos para transporte de gás em águas profundas apresentam custos mais elevados, pois devem ser reforçados (maior espessura) para suportar a elevada pressão. Por exemplo, segundo estimativas da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, espera-se que o gasoduto rota 4 exija um nível de investimentos de R\$ 6 bilhões. Contudo a atração de investimentos privados para o aproveitamento comercial do gás vai depender das condições de viabilidade econômica do projeto que, por sua vez, depende das condições para venda do GN ao mercado.

Os gasodutos projetados (Rotas 1 e 2) não são suficientes para escoar a produção do pré-sal. A entrada da Rota 3 alivia o escoamento do pré-sal somente até 2025. O mercado mais comprometido é o Sudeste, teve apenas 3 MMm<sup>3</sup>/dia de sobra em 2017. A partir de 2026, projeta-se limite da capacidade de escoamento considerando todos os gasodutos disponíveis da malha interligada. Atrasos nas obras de ampliação de capacidade também podem afetar o escoamento do Gás do pré-sal para outras regiões. A Figura 5 ilustra estas perspectivas de produção e escoamento do pré-sal. Os desafios técnicos, econômicos e regulatórios para o escoamento do gás do pré-sal no longo prazo depende de uma política setorial à altura destes desafios. No PDE 2026, a projeção em 2017 é 20 MMm<sup>3</sup>/dia de oferta maior do que o realizado. Com isso a produção a partir de 2018 considera resultados pessimistas com relação ao PDE. O contrato de importação da Bolívia, que prevê a importação de 30 MMm<sup>3</sup>/dia, vence em 2019, diminuindo a oferta de gás para 20 MMm<sup>3</sup>/dia – segundo estimativas da ANP. Há estabilidade de apenas 5 anos após 2026, sendo necessário novos investimentos para suprir a crescente demanda.

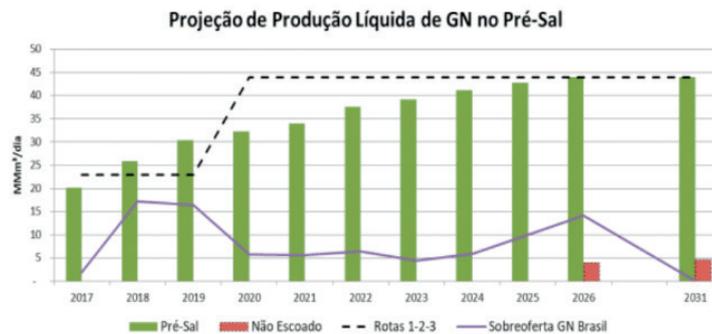


Figura 5 – Produção e Escoamento do Pré-sal (Plano Decenal 2026 – MME/EPE)

### 3.2 Térmicas de Base com GN - Desafios

A necessidade de térmicas de base na matriz brasileira é indiscutível, pois a curva térmica é uma mistura muito heterogenea de combustíveis com crescimento muito acentuado. Os padrões de despacho do ONS utilizam esta curva térmica com objetivo de minimização do custo de operação, e recentemente com uma hidrologia não tão favorável a térmicas de custo muito alto foram utilizadas na base. A Figura 6 ilustra a curva térmica atual. A pilha térmica é cara na medida em que cresce muito rápido o custo variável pela falta de usinas de base com CVU menor. Quando valor d'água supera R\$ 250/MWh o crescimento é muito acentuado, ou seja, o CMO/PLD salta de valores menores rapidamente para níveis mais altos.

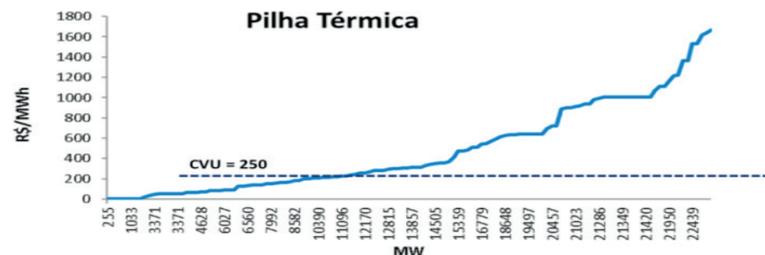


Figura 6 – Pilha Térmica no SIN (ONS)

As dificuldades usuais da implantação de uma térmica são as seguintes: (i) a dificuldade de garantir uma oferta estável em decorrência de questões técnicas e geológicas de GN constitui uma barreira para o acesso a investidores privados (ainda não existe um mercado secundário de GN nem infraestruturas de estocagem); (ii) A incerteza quanto ao nível de consumo da térmica representa um grande desafio para o planejamento da oferta do gás, além de impor um elevado custo para a disponibilidade permanente do GN para 100% da capacidade; (iii) As condições de contratação (lastro, percentual de inflexibilidade, patamar de penalidades) são orientadas para um perfil de operação complementar à geração hídrica, não compatível com a operação na base da

curva de carga; (iv) Houve evolução na exigência de comprovação de reservas para 10 anos do projeto termelétrico, com renovação a cada 5 anos, (Portaria MME 121/2018) o período é o mesmo praticado por empresas no setor petrolífero (anteriormente a exigência era de 15 anos, com renovação a cada 5 anos). A orientação para uma térmica de base com inflexibilidade mais alta, reduz esta série de incertezas e introduz uma tendência de custos de combustíveis mais baixo.

### 3.3 Térmicas de Base com GNL – Sistema Nordeste

Atualmente, a importação de gás via GNL na região Nordeste ocorre por dois terminais de regaseificação, localizados no Ceará e na Bahia, cujas capacidades são de 7 MM m<sup>3</sup>/dia (Pecém) e 14 MM m<sup>3</sup>/dia (Baía de Todos os Santos) respectivamente. A operação do primeiro terminal foi iniciada em 2009 e a do segundo em 2014. Novos terminais de regaseificação de GNL em construção/planejado na região Nordeste irão aumentar a oferta do insumo no médio-prazo: (i) terminal de Barra dos Coqueiros/SE - Capacidade para 14MMm<sup>3</sup>/dia (previsto para 2020) com a UTE Porto Sergipe I (PE) que possui demanda inicial de 6 MMm<sup>3</sup>/dia, com possibilidade de aumento para cerca de 12 MMm<sup>3</sup>/dia – potência máxima de 3000 MW – e será necessário a interligação do terminal com a malha interligada de gasoduto para distribuição do gás; (ii) Terminal de Suape/PE – Capacidade para 14 MMm<sup>3</sup>/dia (em planejamento) e a região ainda é atrativa pela proximidade da rede interligada e pelo polo industrial (Suape é o maior porto do N/NE).

### 3.4 Estudo Comparativo UTE GN Sudeste & UTE GNL Nordeste

A oferta do pré-sal na região Sudeste e os resultados recentes dos últimos leilões de energia com térmicas de base no sistema Sudeste criam um grande atrativo para a implantação de novas soluções com GN do pré-sal no Sudeste. Em paralelo, a demanda local por mais térmicas de base no Nordeste cria a necessidade do suprimento com GNL para a solução local. A visão sistêmica de implantar no Sudeste uma térmica de base com GN do pré-sal e colocar uma interligação a mais para atender o Nordeste confronta a solução local de uma térmica base de GNL no próprio sistema Nordeste. A Figura 7 ilustra as 2 alternativas estudadas. Foram avaliados os custos operacionais e seus efeitos (impacto no GSF, expansão da transmissão etc.) considerando variantes de valores do CVU para as alternativas estudadas considerando térmica no Nordeste e no Sudeste. Evidentemente, que a expansão da transmissão das alternativas estudadas foi diferente na medida em que uma térmica de base no Sudeste ou Nordeste altera o padrão de intercâmbio entre estes mercados. Em relação a expansão da transmissão com a térmica no Sudeste se manteve o elo CC Graça Aranha – Silvânia 800 kV, considerado pela EPE no plano decenal, com possibilidade de atuação bidirecional, com mudanças de intercâmbios entre Sudeste e Norte/Nordeste ao longo do ano, o que resulta numa RAP de R\$ 0,94 Bilhões/ano. No caso da térmica no Nordeste seria necessário apenas um

novo reforço em CA de 500 kV para acomodar os intercâmbios entre Sudeste e Nordeste ao longo do ano, o que resulta numa RAP de R\$ 0,19 Bilhões/ano. A Tabela 1 apresenta as características técnicas consideradas para as térmicas em análise. O custo de investimento da geração foi adotado igual para ambas as alternativas, mesmo com a solução GNL no Nordeste que incluiria a regaseificação do GNL com FSRU nos custos operacionais. O estudo considerou a entrada da térmica de base de 3.000 MW seria então para 2024 nestas alternativas. Notar que, as inflexibilidades são diferentes pela característica do combustível adotado em cada alternativa.

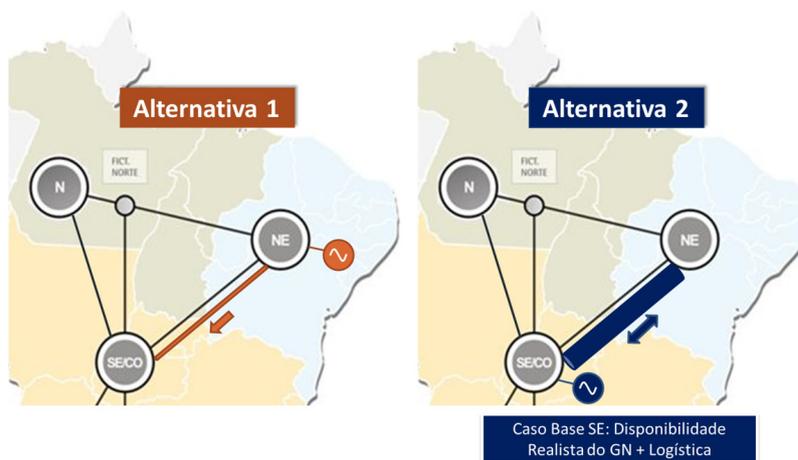


Figura 7 – Alternativas de Térmica de Base – Sudeste x Nordeste

Em relação aos custos operacionais das alternativas térmicas no Sudeste ou no Nordeste, a Tabela 1 apresenta os valores considerados nas simulações. No caso da térmica no sistema Sudeste, para os anos 2024-2026 foi considerado como “caso real”, que haveria atraso do GN do pré-sal, sendo necessário importação de GNL (CVU R\$ 320/MWh). Ao contrário, o “caso ideal” seria com o CVU de GN identificado na Tabela 1, desde o começo da operação em 2024. Independentemente do CVU e localização da usina, os custos das demais variáveis monitoradas (valores de GSF e custo operacional restante) seguem muito próximos (a exceção do caso SE320). O custo operacional restante representa o custo de despacho das demais térmicas do sistema. A Figura 8 ilustra os resultados verificados para ambas as variáveis do mercado - valores de GSF e custo operacional restante.

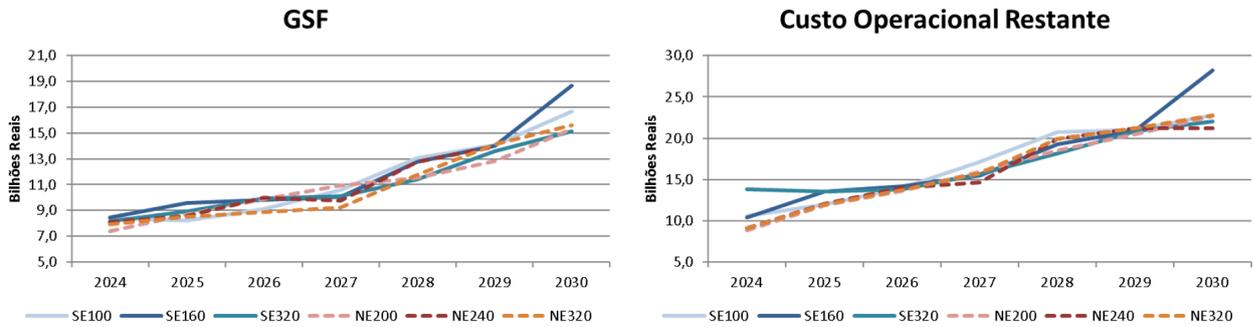


Figura 8 – GSF e Custos das Demais Térmicas – Alternativas Sudeste x Nordeste

A Tabela 1 apresenta as características técnicas consideradas para as térmicas em análise. O custo de investimento da geração foi adotado igual para ambas às alternativas, mesmo com a solução GNL no Nordeste que incluiria a regaseificação do GNL com FSRU nos custos operacionais. O estudo considerou a entrada da térmica de base de 3.000 MW seria então para 2024 nestas alternativas. Notar que, as inflexibilidades são diferentes pela característica do combustível adotado em cada alternativa.

UTE 3.000 MW					
GNL			GN		
Localidade	CVU	Inflexibilidade <sup>1</sup>	Localidade	CVU	Inflexibilidade <sup>1</sup>
NE	320	50% sazonal <sup>2</sup>	SE	320	100%
NE	240	50% sazonal <sup>2</sup>	SE	160	100%
NE	200	50% sazonal <sup>2</sup>	SE	100	100%

(1) - Adequação do TEIF e TEIP para a inflexibilidade da usina  
 (2) - 30% - Dez-Mai / 70% - Jun-Nov

Tabela 1 – Térmica de Base – Sudeste x Nordeste

A comparação dos resultados do PLD entre as alternativas da térmica de base no Sudeste ou Nordeste é ilustrada na Figura 9. Com as expansões consideradas em cada alternativa, não se verificou descolamento entre os submercados. A diferença entre o caso com a UTE no SE com CVU 320 R\$/MWh e o caso UTE SE com CVU 160 R\$/MWh é de cerca de 17 R\$/MWh, como na Figura 9. Os custos totais de cada alternativa consideram as seguintes variáveis: (i) Custo de Operação da Nova Térmica de Base; (ii) Impacto no GSF; (iii) Custo de expansão da transmissão; (iv) Custo Operacional demais térmicas. O valor presente (taxa de desconto 12 a.a.) numa comparação das alternativas com CVU de R\$ 160/MWh com GN do pré-sal no Sudeste e CVU de R\$ 240/MWh com GNL no Nordeste, expectativas mais realistas de CVU no período 2024 a 2030, do “caso ideal” seria de R\$ 0,9 Bilhões e do caso “real” seria de R\$ 36 Bilhões. Percebe-se que a diferença entre as alternativas do “caso ideal” é pequena e a do “caso real” é bem significativa, mostrando uma ampla de vantagem para a solução com a térmica de base Nordeste com GNL e

CVU de R\$ 240/MWh. Cabe lembrar que, a diferença entre o “caso ideal” e “caso real” é o início da oferta de GN do pré-sal, onde existe uma incerteza enorme para novas ofertas de GN. A Tabela 2 apresenta os resultados em valor presente (taxa de desconto 12 a.a.) comparando as alternativas para diferentes valores de CVU, considerando a opção de “caso real”. Os benefícios em prol da solução da térmica de base no Nordeste variam de R\$ 15 a 47 Bilhões considerando apenas o período 2024 -2030.

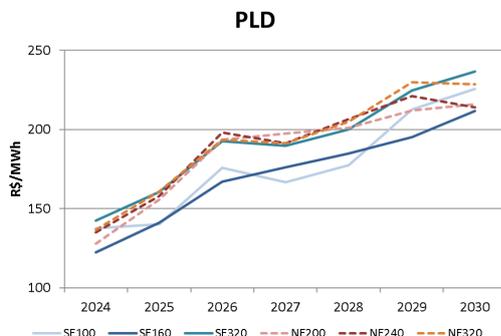


Figura 9 – PLD – Alternativas Sudeste x Nordeste

Benefício UTE NE 320 x UTE SE		Benefício UTE NE 240 x UTE SE		Benefício UTE NE 200 x UTE SE	
SE 100	R\$15.43	SE 100	R\$22.64	SE 100	R\$26.35
SE 160	R\$28.87	SE 160	R\$36.08	SE 160	R\$39.80
SE 320	R\$35.95	SE 320	R\$43.16	SE 320	R\$46.88

Tabela 2 – Benefício Alternativas Sudeste x Nordeste – Valor Presente (R\$ Bilhões)

A permanência dos intercâmbios na interligação SE-NE é ilustrada na Figura 10. Observa-se que a utilização da interligação não opera nos limites indicados na maior parte dos casos (95%), tanto no período úmido (maior importação do NE), quanto no período seco (maior geração eólica no NE). Evidencia-se que colocando a UTE no NE se faz necessário apenas de uma ampliação de 1.000 MW na exportação no NE-SE, mantendo os limites praticados pelo PMO no sentido SE-NE. A consequência deste efeito é o uso adequado da interligação SE-NE, reconhecendo a localização das renováveis – eólicas e solares - no Nordeste, bem como a nova térmica de base no mesmo mercado, sem que haja grandes reforços nas interligações. Isto se deve a uma visão da necessidade local do Nordeste vis a vis a necessidade sistêmica.

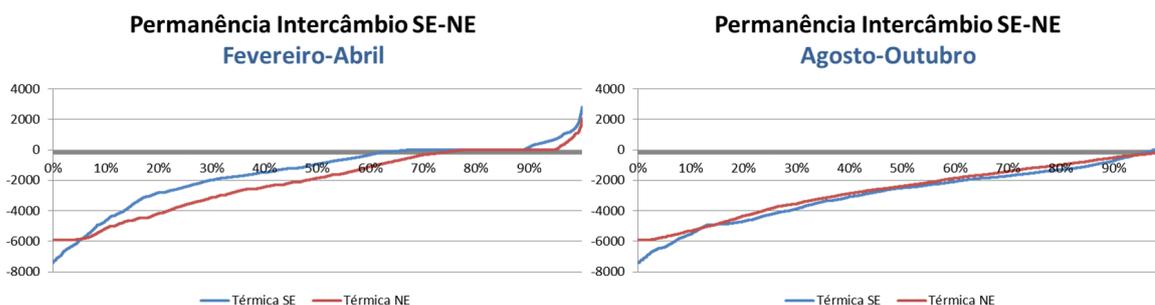


Figura 10 – Permanência dos Intercâmbios SE-NE

### 3.5 Térmicas de Base e Reservatórios – Uma Visão Real

As térmicas de base podem afetar os geradores do MRE? Esta é uma questão recorrente que a seleção de térmicas de base enfrenta na expansão. Claramente, deve haver um impacto no MRE, mas não seria necessariamente apenas negativo. O controle de estoque das hidrelétricas aumenta e os armazenamentos tendem a ficar mais controlados, o que é positivo para o MRE. Nas simulações realizadas a inserção da UTE no NE aumenta o nível de reservatório do SIN comparado com os casos onde são consideradas a UTE no SE (CVU 160 e 320 R\$/MWh), como na Figura 11. No entanto, as térmicas de base podem eventualmente deslocar o despacho das hidrelétricas, o que é negativo para o MRE. As ponderações dos efeitos negativos e positivos no MRE dependem da situação energética do sistema a cada instante. O certo é que o efeito prático pode ser mais complexo. Por exemplo, nas simulações ora realizadas o perfil de GSF se apresenta mais controlado – ver Figura 8 - e o perfil de PLD é mais baixo – ver Figura 9. Em resumo, a mística que as térmicas de base causam efeito negativo ao MRE não é verdadeira. O caso do sistema Nordeste é emblemático. O padrão de vazões no posto de Itaparica (logo após o reservatório de Sobradinho) no Rio São Francisco nos últimos 20 anos apresentou vazões que se encontram praticamente abaixo da MLT, a média destes anos é de apenas 76% da MLT. É certamente o período mais crítico de afluições para a bacia da região do Médio São Francisco [3]. Numa outra visão mais apropriada de captura de tendências fica claro que o padrão das vazões afluentes no Médio São Francisco está muito alterado e decrescente. O aumento do uso consuntivo é um dos responsáveis por várias alterações nas vazões nas bacias brasileiras [4], sendo que a maior intensidade ocorre legitimamente na bacia do Rio São Francisco, em virtude desta bacia representar um importante indutor do desenvolvimento dos diversos Estados que o mesmo percorre. Em resumo, uma térmica de base no Nordeste permite reconhecer que as hidrelétricas do Rio São Francisco não possuem mais o papel energético, mas seriam capazes de fazer o acompanhamento da curva de carga e das intermitências das renováveis. Esta é uma troca de função necessária e prática do ponto de vista da operação.



Figura 11 – Nível dos Reservatórios do SIN – Alternativas Sudeste x Nordeste

### 3.6 Impactos Tarifários

Dependendo da forma de cobrança desta nova oferta da segurança energética, os encargos devem aumentar para cobrir esta nova modalidade, mas as tarifas no ACR e preços no ACL necessariamente não. Os projetos de segurança energética possuem a capacidade de reduzir aumentos de preços no curto prazo (PLD), o que tende a reduzir preços no ACL e custos das térmicas de disponibilidade, impactos do GSF no ACR – tarifas e ESS de segurança energética. O custo benefício das reduções – diretas e indiretas - versus o aumento de encargos deve ser ponderado em cada momento antes dos leilões de geração, entretanto este balanço é um desafio permanente e deve ser enfrentado. De forma indireta, os projetos para segurança energética permitem um padrão de operação mais controlado no sistema, com redução no perfil do PLD e despacho de térmicas mais caras. No ACR reduz impacto nos custos com contratos de disponibilidade e nas parcelas com influencia do GSF (Itaipu, Cotas e Repactuação do GSF) – exposição MCP. No ACL um novo perfil de PLD influencia os preços dos contratos bilaterais negociados com o consumidor livre e demais agentes.

## 4 | CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho busca debater a mudança de paradigma do planejamento visando proposições objetivas que auxiliem a operação do sistema. O aumento das incertezas não permitem soluções únicas na busca incessante do “mínimo custo global” G&T do ponto de vista sistêmico. Na verdade esta é uma ilusão permanente, uma vez que as licitações de geração buscam o valor da melhor oferta e nas de transmissão, definidas sem a necessária sincronia no tempo e espaço com a geração, são práticas competitivas pela melhor tarifa. Sendo assim, é salutar repensar as indicações de oferta da geração que prevejam também a segurança local dos mercados com potenciais fragilidades na operação. Foi debatido no trabalho o caso de uma solução local no mercado Nordeste versus outra solução sistêmica com expansão da geração no Sudeste e reforço na transmissão. O fato é que um potencial projeto térmico no Sudeste pode ser competitivo com o GN do pré-sal, no entanto, pelas projeções atuais não haverá oferta de GN do pré-sal suficiente para essa utilização, e maior risco com a redução da oferta do GASBOL até 2026. A localização de uma UTE no SE representa agregar muitos riscos ao investidor, riscos que ele não tem poder de atuação. Com isso, a melhor localização da UTE é no NE devido aos ganhos para o sistema. O exemplo busca enfatizar que uma incerteza no fornecimento do GN é suficiente para priorizar uma solução local ao invés de uma solução aparentemente mais competitiva apenas no custo da geração térmica.

## REFERÊNCIAS

CIGRÉ WG C1.27, “The Future of Reliability – Definition of Reliability in Light of New Developments in Various Devices and Services which offer Customers and System Operator New Levels of Flexibility”, January 2018.

X.V. Filho, D.S.Ramos, J.C.O.Mello, D.Souza, E.Neves. T.Prandini, “The New Market Paradigm of the Brazilian Power System considering Thermal Base Generation for Supporting the Renewable Source Expansion”, Cigré Meeting, 2018

Pereira S.B., Pruski F.F., Da Silva, D.D., Ramos, M.M., “Estudo do Comportamento Hidrológico do Rio São Francisco e seus Principais Afluentes”, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.6, p.615–622, 2007.

Braga R.S., Matos B.A., Troger, F.H., “Estimativa de Vazões de Uso Consuntivos da Água nas Principais Bacias do SIN”, XIX SNPTEE, GOP, Rio de Janeiro, 2007.MME/EPE - “Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas – UHEs Despachadas Centralizadamente no Sistema Interligado Nacional – SIN”, 25 de abril de 2017.

# CAPÍTULO 5

## ESTRATÉGIAS DE O&M UTILIZADAS NA GESTÃO DE DESEMPENHO DOS PARQUES EÓLICAS, EM TEMPO REAL, PÓS OPERAÇÃO E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO NO CURTO E MÉDIO PRAZO, MOSTRANDO OS RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE BIGDATA, BUSINESS INTELLIGENCE E MACHINE LEARNING

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 30/04/2019

**Flávio Martins ribeiro**

CPFL Renováveis

Jundiaí – São Paulo

**Marcus Antonius Queiroz da Cunha**

CPFL Renováveis

Fortaleza – Ceará

**RESUMO:** No setor de energias renováveis, mais precisamente na geração de energia eólica, ferramentas computacionais aliadas a estratégias de O&M tem sido cada vez mais foco de estudos e investimentos. Esse informe apresenta algumas ferramentas computacionais e estratégias de O&M utilizadas na gestão de desempenho de parques eólicos, em Tempo Real, Pós Operação e Engenharia de Manutenção no curto e médio prazo, mostrando os resultados obtidos com a utilização de Big Data, Business Intelligence (BI) e Machine Learning (ML).

**PALAVRAS-CHAVE:** Business Intelligence, Aprendizagem de máquina, Machine Learning, Geração eólica.

O&M STRATEGIES USED IN WIND FARM PERFORMANCE MANAGEMENT, AT REAL TIME, POST OPERATION AND MAINTENANCE ENGINEERING IN THE SHORT AND MEDIUM TERM, SHOWING THE RESULTS OBTAINED FROM THE USE OF BIGDATA, BUSINESS INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING

**ABSTRACT:** In the renewable energy sector, more specifically in the generation of wind energy, computational tools combined with O&M strategies have been increasingly the focus of studies and investments. This report presents some computational tools and O&M strategies used in the performance management of wind farms, in Real Time, Post Operation and Maintenance Engineering in the short and medium term, showing the results obtained with the use of Big Data, Business Intelligence (BI) and Machine Learning (ML).

**KEYWORDS:** Business Intelligence, Machine Learning, Wind Energy Generation

### 1 | INTRODUÇÃO

O Aerogerador é composto por um conjunto de vários componentes que

possibilitam a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica de maneira controlada, confiável e eficiente. OS aerogeradores podem ser divididos em sistemas mecânicos, elétricos e de controle. Os componentes mecânicos incluem torre, nacelle, pás, cubo, gearbox (caixa de engrenagens), sistema de pitch, sistema de yaw, sensores de velocidade do vento, drive train e freios mecânicos. Os componentes elétricos incluem o gerador elétrico, o conversor eletrônico de potência (quando existente) junto com filtros harmônicos do lado do gerador e da rede, transformador de força e rede trifásica ou ponto de entrega. Os componentes relacionados ao controle dos sistemas de conversão de energia mecânica e elétrica. As partes mais visíveis nas grandes turbinas eólicas são a torre, a nacelle e as pás do rotor, e os demais componentes estão alojados dentro da turbina eólica.

Assim, para monitoramento do funcionamento dos aerogeradores de grande porte, os diversos sistemas podem ser capazes de disponibilizar informações como alarmes de funcionamento dos sistemas, estados e demais pontos digitais dos aerogeradores, além de variáveis analógicas, como potência ativa, potência reativa, correntes elétricas, tensões, frequência elétrica, velocidade do vento, direção do vento, densidade do ar, temperatura ambiente, velocidade do rotor, velocidade do gerador, ângulos do pitch, posição angular da nacelle, posição angular da nacelle em relação ao vento, temperatura dos rolamentos do Gearbox, temperatura do óleo da Gearbox, temperatura dos rolamentos do gerador, temperatura dos enrolamentos do gerador, temperatura da Nacelle, temperatura de painéis, vibração da torre, vibração do Drive train, além de muitos outros, dependendo do fabricante e topologia do aerogerador.

Aerogeradores de grande porte (>1MW) podem ser de 4 tipos diferentes. Os três tipos mais utilizados comercialmente são apresentados nas Figura 1, 2 e 3 (YARAMASU, 2015).

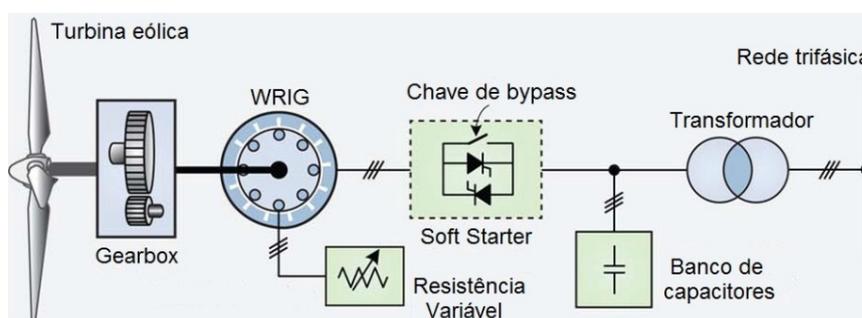


Figura 1. Tipo 2 – WRIG (YARAMASU, 2015)

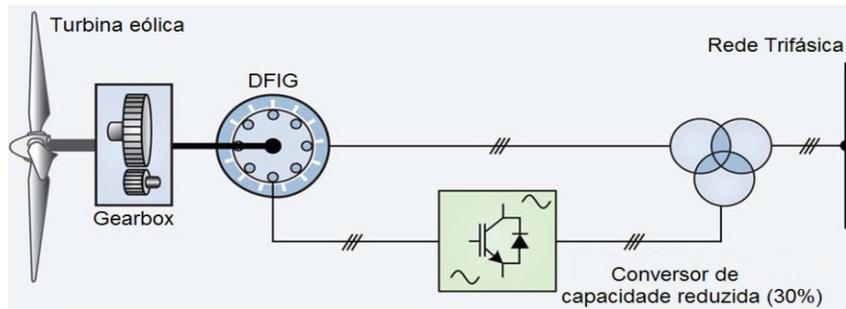


Figura 2. Tipo 3 - DFIG (YARAMASU, 2015)

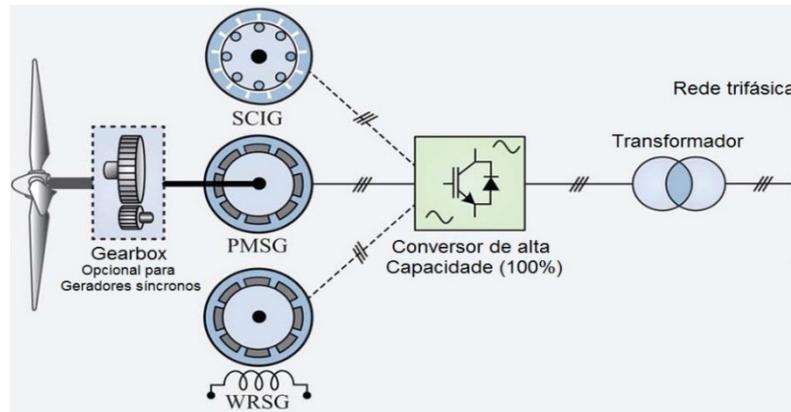


Figura 3. Tipo 4 - Full converter (YARAMASU, 2015)

Cada fabricante de aerogeradores comerciais de grande porte disponibiliza seus dados em plataformas variadas de dados e em banco de dados próprios e com configurações determinadas pelo próprio fabricante. Assim, realizar trabalhos de criação de banco de dados únicos com informações padronizadas se torna uma tarefa difícil utilizando essas plataformas.

O objeto de estudo utilizado no desenvolvimento das estratégias tratadas nesse informe técnico são 645 aerogeradores diferentes das três topologias mais utilizadas comercialmente e de 6 fabricantes diferentes, conforme Tabela 1,

Fabricante	Topologia	Nº de AEGs da frota
1	Tipo 2 e Tipo 3	182
2	Tipo 3	147
3	Tipo 3	133
4	Tipo 4	34
5	Tipo 4	109
6	Tipo 3	120

Tabela 1 – Topologias e nº de aerogeradores por fabricante

## 2 | DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS

Devido a diversidade de topologias e fabricantes, o primeiro passo foi desenvolver um Sistema Supervisório (SCADA) único que consolidasse a aquisição de todos os

pontos digitais e analógicos dos 645 aerogeradores e diversos pontos do Bop elétrico, se tornando o maior sistema de automação do Brasil em número de pontos supervisionados (~700mil pontos). Esse sistema faz a aquisição em fração de segundos das grandezas dos aerogeradores e possuem regras de análise de desempenho. O objetivo aqui é não “deixar para amanhã” ajustes de parâmetros e manutenções que podem ser realizadas imediatamente para se obter a maior eficiência na geração de energia.

## 2.1 ANÁLISE EM TEMPO REAL

Para atingir metas arrojadas de perda por indisponibilidade e perda por ineficiência, o Centro de Operação tem em tempo real visualização do número de aerogeradores, por usina, que estão disponíveis, disponíveis não gerando, indisponíveis e sem comunicação. Além disso, um gráfico de rosca auxilia no entendimento da perda de potência por indisponibilidade ou por eficiência. Uma tela apresentando diversas informações (em tempo real) de todos os conjuntos/complexos eólicos objeto do estudo encontra-se na Figura 4.



Figura 4. Tela de visão geral das usinas eólicas (Autor, 2019)

Na tela apresentada na Figura 4 é possível visualizar gráfico de barras, apresentando número de aerogeradores comunicando (ou não), disponíveis (ou não) e disponíveis gerando (ou não). Além de ser possível visualizar gráficos de rosca para cada conjunto/complexo eólico. Esse gráfico de rosca é dividido em 4 setores: Potência ativa geral, Potência ativa média perdida por indisponibilidade, Potência ativa média perdida por ineficiência e a diferença entre a potência nominal e a soma das três outras, conforme Figura 5.

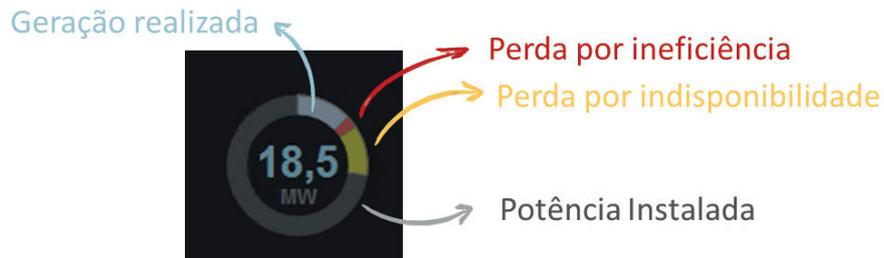


Figura 5. Legenda de cores do gráfico de rosca de cada usina (Autor, 2019)

A partir das informações apresentados nos gráficos, o operador do Centro de Operação de tempo real consegue ter uma primeira visualização de indisponibilidades e ineficiências, podendo investigar as principais perdas por parques e por aerogeradores, tendo a possibilidade de tratar grandes indisponibilidades e grandes ineficiências ainda em tempo real. Além disso, um alarme é acionado para cada aerogerador que apresenta baixa eficiência, conforme Figura 6.

Data e hora	Área	Estado	Descrição
24/04/2019 10:30:00,997	EDIM.DIM-004		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-003		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-005		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-007		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-008		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-009		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,997	EDOM.DOM-012		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-002		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-006		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-011		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-012		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-013		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:30:00,091	EBEN.BEN-014		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:20:00,676	EBEN.BEN-008		Potência ativa perdida por ineficiência
24/04/2019 10:10:00,430	EDOM.DOM-006		Potência ativa perdida por ineficiência

Figura 6. Tela de alarmes do aerogerador no SCADA (Autor, 2019)

A partir dos indicativos visuais e alarmes, o operador de tempo real, consegue acessar dados de cada aerogerador, através de uma tela de detalhamento criada dentro do sistema de supervisão, e realizar análise aprofundada da perda visualizada, dependendo do grau de prioridade que tenha essa perda.



Figura 7. Tela de detalhamento do aerogerador no SCADA (Autor, 2019)

Devido ao grau de ocupação dos operadores de centro de operação nas atividades de tempo real (supervisão e operação dos ativos), pequenas perdas visualizadas graficamente são desprezadas em uma análise de tempo real, sendo investigados em outro momento, através de análises de curto e médio prazo.

## 2.2 ANÁLISE DE CURTO E MÉDIO PRAZO

Todos os pontos aqisitados pelo supervisório são historiados com estratégias de armazenamento em Big Data, melhorando a capacidade de armazenamento e desempenho de consultas. Através desses dados análises de desempenho com o uso de ferramentas de BI são realizadas pela área de Pós Operação imediatamente no dia seguinte, assim como semanalmente, apresentado em reunião de Análise de Performance (curto prazo).

As análises primárias baseiam-se em gráficos de desempenho amplamente conhecidos, como a curva de potência e a curva de potência x velocidade do gerador. Com a consolidação das análises, uma lista de ações específicas para cada área da empresa é desenvolvida e amplamente discutida em reuniões dedicadas. Além disso, indicadores como perdas por eficiência e perdas por indisponibilidade são calculados e permitem acompanhar a evolução das ações que são tomadas para maximizar o desempenho. Como alguns parâmetros de desempenho apenas podem ser observados com maior profundidade de dados na área de Engenharia de Manutenção ocorrem análises mensais, trimestrais e semestrais (médio prazo).

### 2.2.1 Análise de Curto Prazo

Análises de curto prazo envolve ver pequenas e médias ineficiências que não puderam ser observadas na rápida análise de tempo real, além de poderem ser observadas

ineficiências que não foram vistas pelo tempo real por conta de contingências sistêmicas.

Para desenvolvimento das análises de curto prazo foram desenvolvidos dashboards específicos em com curvas, gráficos e tabelas que permitam a análise rápida e precisa. Na Figura 8 é possível analisar as seguintes curvas e informações aquisitadas pelo supervisor e armazenadas com estratégias de BigData:

- Gráfico Cascata: contém acompanhamento (com período a escolha) dos indicadores de Geração Realizada e Orçada, perdas ou ganhos energéticos, mostrando graficamente a diferença da geração realizada pela esperada. As variações energéticas acompanhadas são o recurso, condições externas, indisponibilidade, eficiência, perdas na rede de média e de baixa tensão.
- Curva de potência x velocidade de vento
- Curva de potência x velocidade de gerador
- Curva da Posição angular Nacelle x direção do vento:
- Curva da Potência ativa x potência reativa
- Curva da diferença entre ângulos de blades (pás)



Figura 8. Primeira tela do dashboard para análise de curto prazo (Autor, 2019)

Também há a possibilidade de análises de curvas temporais, conforme Figura 9, onde é apresentado a segunda tela do dashboard, contendo:

- Posição da nacelle e direção do vento.
- Diferença entre os ângulos das blades.
- Razão da posição da nacelle pela direção do vento da torre anemométrica
- Diferença entre direção do vento da Nacelle e da torre anemométrica

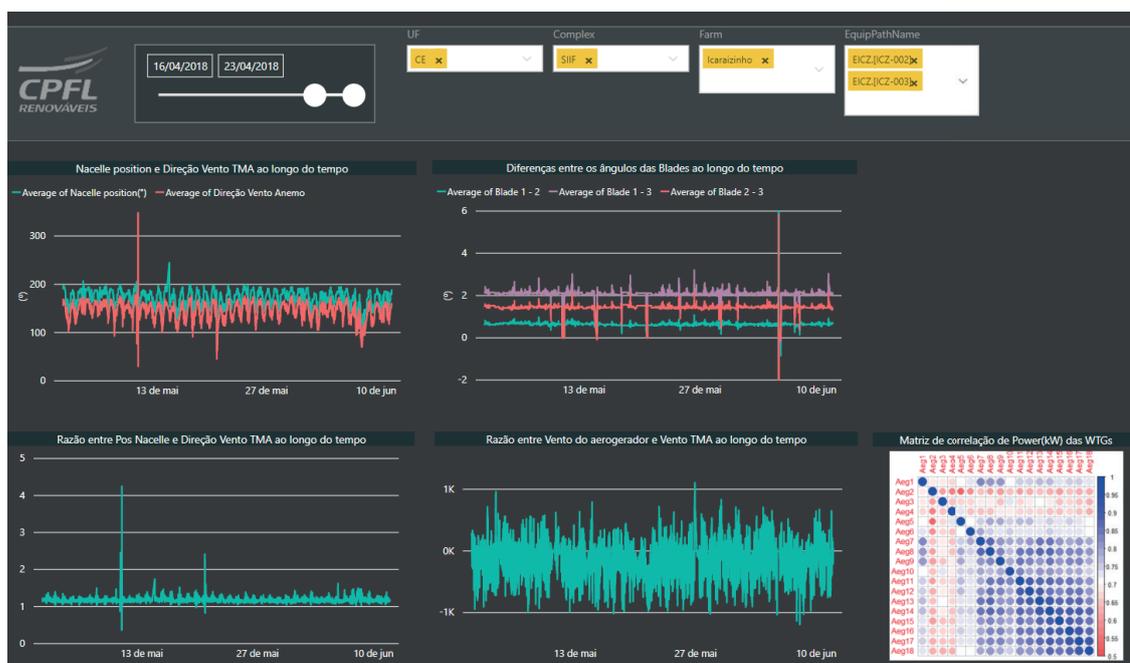


Figura 9. Segunda tela do dashboard para análise de curto prazo (Autor, 2019)

Outras variáveis também são estudadas, mas com menor frequência e de forma pontual, como: Análise de Função de Transferência da Nacelle (NTF) e análise dos Ângulos das Pás e a Velocidade do Vento.

### 2.2.2 Análise de Médio Prazo

As ações listadas durante processo de análise de curto prazo fornecem subsídios e foco nas análises de médio prazo, além de auxiliar na escolha da melhor ferramenta para estudo dos casos. Ferramentas de análise em médio prazo baseiam-se na utilização das informações geradas durante o processo, inclusive envolvendo dados de manutenções (passado, presente, futuro) planejadas e não-planejadas e resultados de performance de cada WTGs, porém com uma série de estudos não comumente realizados.

Alguns desses gráficos envolvem curvas de temperatura correlacionando-os com alarmes e paradas programadas e não programadas, possibilitando que a equipe de engenharia realize uma análise baseada na condição da máquina antes e depois dessa manutenção. Na Figura 10 são apresentados alguns dos diversos dashboards, desenvolvidos em linguagem R, para análise de temperaturas da caixa de engrenagens de um aerogerador Tipo 2 da frota estudada. Além da visualização gráfica de alguns envelopes de temperaturas do Gearbox por potência gerada, também são apresentados alarmes, sendo possível escolher o parque, aerogerador e semana (representação por cores) da análise a ser realizada.

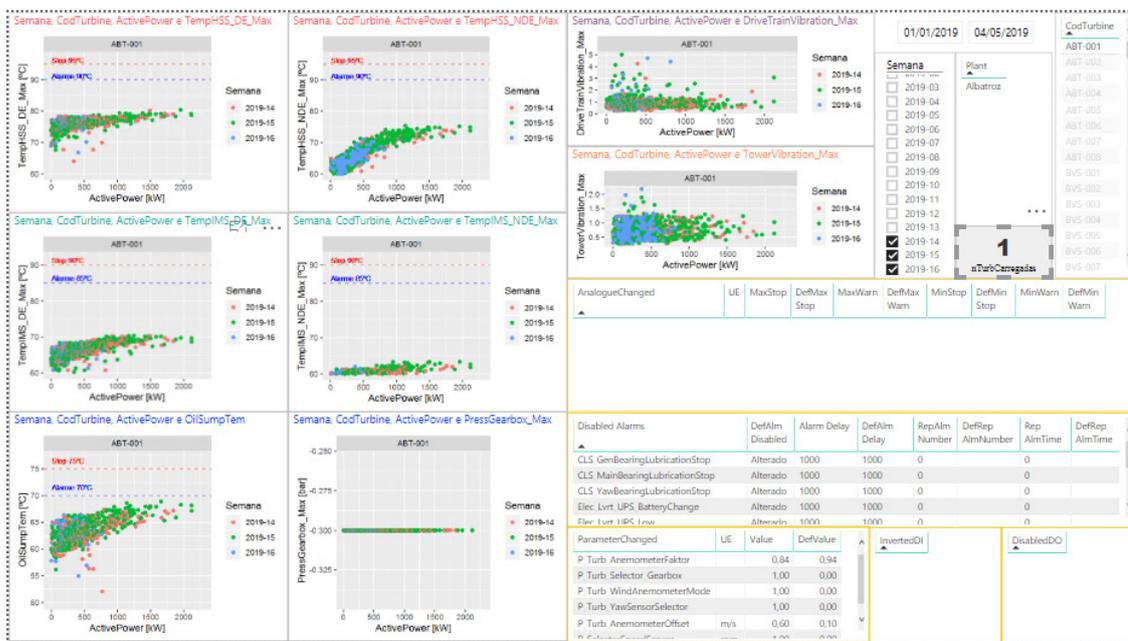


Figura 10. Tela do dashboard para análise de médio prazo (Autor, 2019)

Na Figura 11 são apresentados outros dashboards para análise de temperaturas do gerador também de um aerogerador Tipo 2 da frota estudada. Além da visualização gráfica de alguns envelopes de temperaturas do Gerador por potência gerada, também são apresentados alarmes, sendo possível escolher o parque, aerogerador e semana (representação por cores) da análise a ser realizada.



Figura 11. Tela do dashboard para análise de médio prazo (Autor, 2019)

Também para análise de médio prazo, foram desenvolvidos, em um projeto de P&D, algoritmos de aprendizagem de máquina que definiram um modelo de comportamento padrão dos envelopes de temperatura dos grandes componentes dos aerogeradores,

com foco principal em gearbox, gerador e rolamentos. Dessa forma, sendo possível aliar as informações do Dashboard desenvolvido e o conhecimento do comportamento padrão dos envelopes de temperatura. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as curvas de comportamento padrão do óleo da caixa de engrenagens e do eixo intermediário do Gearbox.

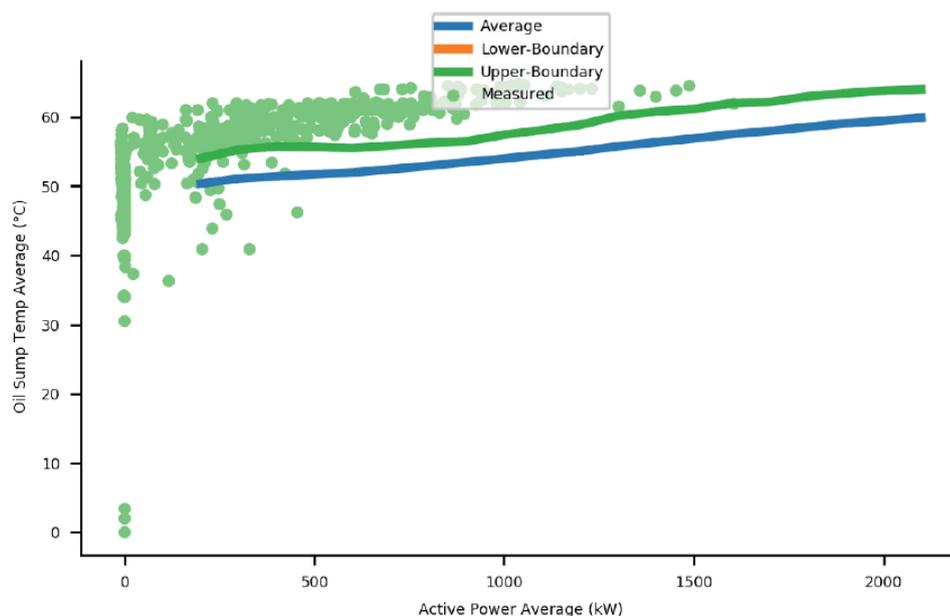


Figura 12. Curva de predição da temperatura do óleo da gearbox (Autor, 2019)

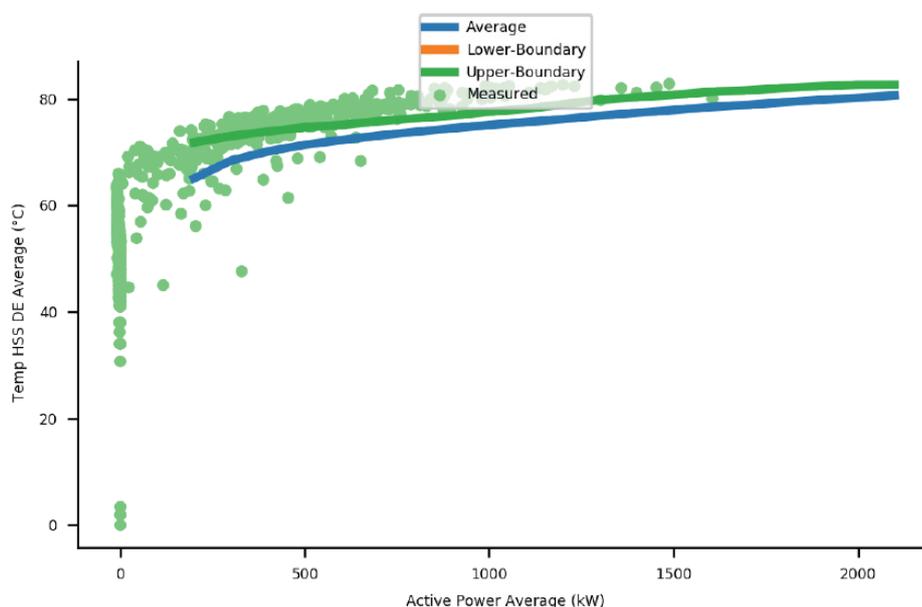


Figura 13. Curva de predição da temperatura do eixo da gearbox (Autor, 2019)

Com os modelos de comportamento padrão desenvolvido para cada aerogerador ou grupo de aerogeradores, um outro passo é o desenvolvimento de modelo temporal afim de prever a data de ocorrência da próxima falha, antecipando a aquisição de grandes componentes e realizando as atividades nos períodos de menores perdas.

### 3 | CONCLUSÃO

Com as estratégias utilizadas até o momento, e com o desenvolvimento de novas ferramentas, diversas falhas em aerogeradores (sistemas de pitch, yaw, anemômetros, gerador, gearbox, etc.) puderam (e poderão) ser identificadas e corrigidas em seu estágio inicial. Limitações causadas por falhas no controlador do parque e por limitações de temperatura dos componentes dos aerogeradores foram rapidamente identificadas e sanadas. Em alguns casos, dados de temperatura dos componentes de aerogeradores, mesmo com baixa taxa de amostragem, auxiliaram no direcionamento das equipes de manutenção, mostrando que o desenvolvimento de ferramentas computacionais, aliados a dados com a adequada amostragem, trouxeram e trarão cada vez mais benefícios à gestão de usinas eólicas de médio e grande porte.

### REFERÊNCIAS

YARAMASU, V., WU, B., SEN, P. C., KOURO, S., NARIMANI, M.; High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-art and Emerging Technologies. Proceedings of the IEEE, v.103, nº5, Maio 2015.

## IMPACT OF HOURLY PRICES ON FUTURE WIND FARM CONTRACTS IN BRAZIL

*Data de aceite: 01/06/2020*

### **João Carlos De Oliveira Mello**

PhD in Electrical Engineering from PUC-Rio, President of Thymos Energy and Coordinator of the C5 Study Committee, Markets and Regulation in Cigré Brazil

### **Cláudio Ferreira**

It is corporate vice president and new business of ECHOENERGIA. It has a PhD in Economics PUC / SP

### **Lucas Soares**

Graduated in Electrical Engineering from the Federal University of Itajubá. It operates in the electricity market as Market Research Analyst at Thymos Energy

### **André Castro**

Graduated in Electrical Engineering from the Federal University of Itajubá and served as Market Research Analyst at Thymos Energy and is now Business Analyst at Beta Energy

### **Daniela Souza**

Graduate Engineer Electrical University of Pernambuco and Specialist Transmission System for Itajubá, Manager at Thymos Energy

### **Evelina Neves**

Master's degree in Electrical Engineering and PhD in Computational Physics from the University of São Paulo, an MBA in Market Regulation by FIPE, and Senior Consultant in Thymos Energy

The implementation of the hourly prices, scheduled for 2021, will result in significant impacts on market framework. Clearly, it is a natural enhancement, once it will allow an explicit representation and a more detailed of the operational constraints associated with hydro and thermal generation, and the temporal impact of variability of non-dispatchable sources.

The role of the hourly price is to bring more credibility to the price signal that is currently offered by load steps with weekly update. The change in the Brazilian matrix with the increasing entry of renewable sources of “zero marginal cost” substantially alter the price signal over the daily load curve. However, the fact is that some wind power projects have very different production standards from other sources, depending on your location, which reflects the pattern of incidence of winds. A large set of long-term bilateral contracts from wind farm projects were sold at public auctions to distribution utilities, and for final free users, with a different price profile.

The Brazil appears among the countries with the one of the highest installed capacity in wind farms and is on an upward trajectory of investments in this type of source. This growth

has been driven by strong investor interest to the characteristics of the winds, especially in the Northeast region, seen by many experts as one of the world’s best for the production from the winds. The prospect of implementing the hourly price, which offers extremely dynamic characteristics when compared with the price format for weekly levels, currently practiced, many enterprises will be subject to additional risks increasing the importance of evaluating the time marketing to risk management.

In this context, this CIGRE market disturbance approach proposes to assess factors that are important, such as seasonality and modulation to provide an understanding of the risks and impacts of wind projects. In this regard, the modulation will have a significant impact when implemented the hourly price, taking into account that the spot market price follows a varied profile throughout the year due to the influence of hydro inflows.

Usually, for direct sales to free consumers have clear goals on the issue of risk. Consumers wishing to legitimately purchase bilateral contracts with low risk, including modulation risks and seasonality. On the other hand, wind generators are difficult to incorporate these risks, especially with the hourly rates that can expose a lot of the generators at higher price points during the day. A large set of wind farm production profile is have

A prudent risk management by the generators is required focusing on purchase and sale of portfolios with a sufficient plurality risk mitigation. This is not yet widespread practice in Brazil and the structuring of new trading companies belonging to a group of generators can be a good alternative.

This is a problem that already exists without the adoption of PLD time. In the graphs of Figure 3 2015 compares the profile generation of 24 wind farms located in Bahia. The annual generation in each series and the delivery of energy has been considered as the P90 (not shown annual exposure). By reading the graphs below, considering the delivery of contracts as load seasonality or typical generation profile in the Northeast you can check that with PLDs 2015 monthly average, there would be a high exposure to such price if the contractual seasonal adjustments were made according to charge generating material exposure to sellers.

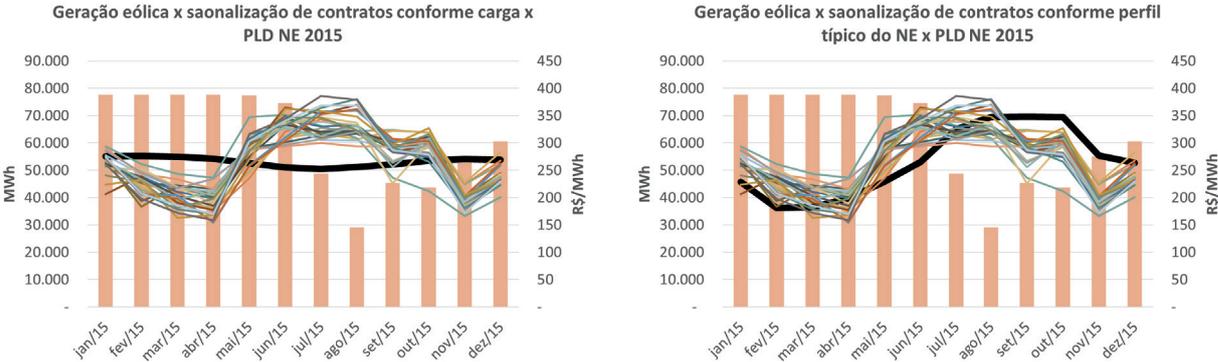


Figure 3 - MCP Risks - Profile PLD 2015

In the graphs of Figure 4 observing the behavior of generation in 2017 of these

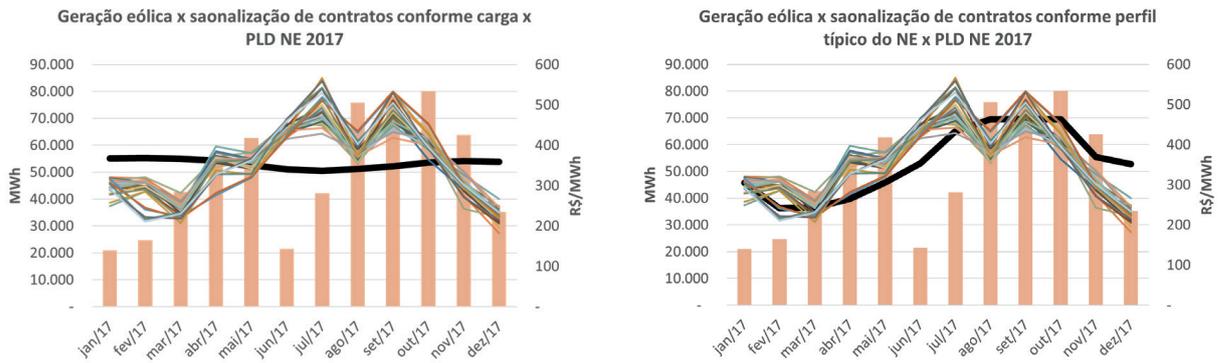


Figure 4 - MCP Risks - Profile PLD 2017

24 wind farms located in Bahia to find that this year the monthly exhibitions of contracts compared to the seasonal adjustments to both the load and that typical of the Northeast generators would have a very different behavior from the year 2015 Figure 3. This is due to the behavior of PLDs of this year, with much higher values in the second half. Thus, the monthly allocation of the contracts as typical profile would generate a higher exposure. Thus, the risk of pricing with a number of contract with the ACL should be another. In short, even without the LDP schedule already exists the monthly risk of exposure to MCP.

With the PLD time, the shadow simulations conducted by the ONS / CCEE, show that PLDs average monthly change slightly, but mainly the values throughout the day the change is large, since instead of the 3 values level exposure will be confronted with the 24 hour values. Therefore, the time modulation in the contracts with the ACL is what can cause greater risk to wind generators.

An interesting view is shown on hourly variations of wind generation, obtained from the ONS [3]. At Figure 5 They are presented for the month of March 2018 the wind power fluctuations throughout the day, considering all wind generators of SIN, the Northeast, and those located in Bahia and Rio Grande do Norte. In these graphs is shown in wind generation hourly basis for all days of the month, with, highlighted, is shown the minimum, maximum and mean time for each generation. The interesting thing to note is the dispersion in the generation profile of wind projects, depending on your location.

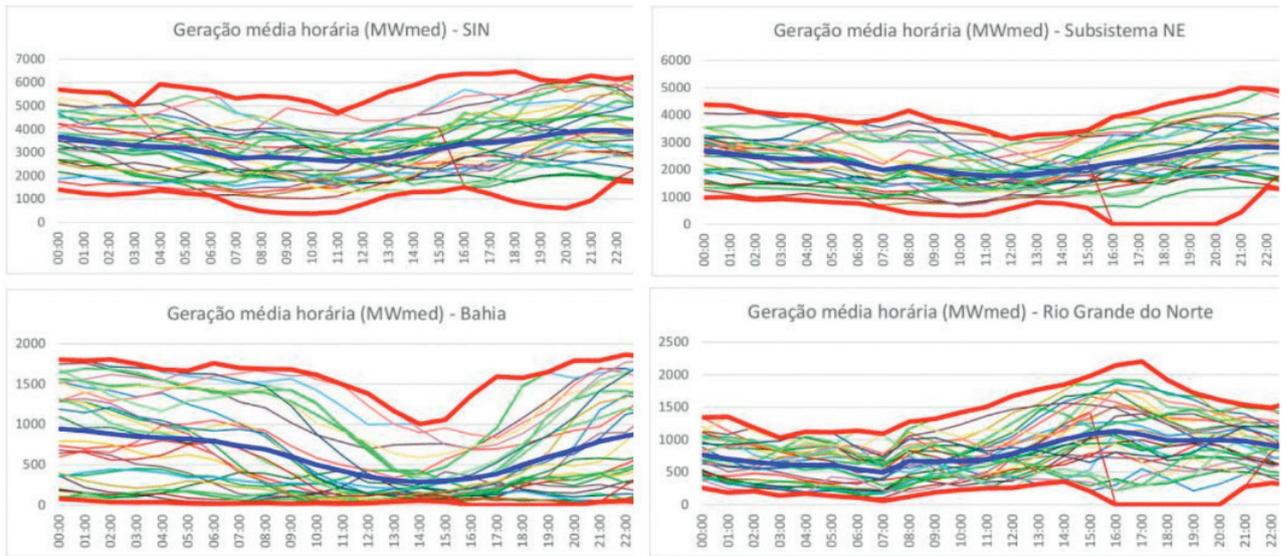


Figure 5 - Wind Generation Hourly - SIN, Northeast, Bahia and Rio Grande do Norte - March 2018 [3]

## 1 | RISK ASSESSMENT - CASE STUDY

To display so very objective the impact of PLD time was carried out in this work a specifically risk assessment for a wind project in Rio Grande do Norte. The project was then simulated time before the price profile of the year 2018. The simulation was performed in October 2018 considering the “decks” shadow operation and future simulation from October to December. All input data for mounting the “decks” referring to DESSEM model (time) for these periods were obtained with the help of DECODESS converter as Figure 6. They have always been considered the cases with and without transmission network, since there is no definition yet of the method to be adopted officially. Due to the cases of network conversion impossibility it was made a comparative analysis of approximately 7000 official timetable published values with and without network (eliminating the ceiling values and floor) in order to obtain an hourly price behavior with network x LAN for the Northeast submarket for each day of the week, as in Figure 7. The differences with and without network are located in a band -20% / + 60%, and most prices are lower network with the first 12 hours of the day and is higher in others.

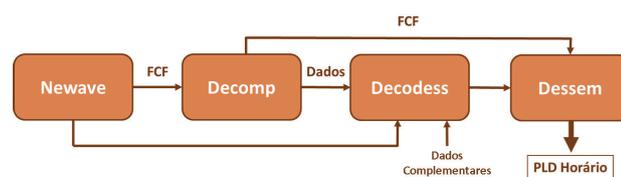


Figure 6 - Simulation Models

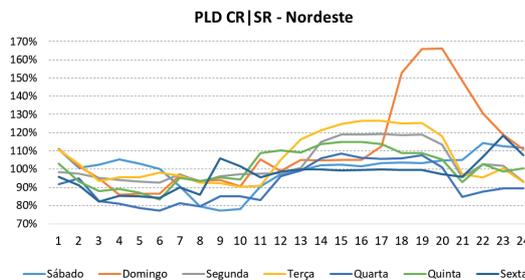


Figure 7 - PLD Time With and Without Network - Northeast

The curve of hourly generation refers to a wind farm in Rio Grande do Norte region that has the capacity to generate about 160 MW.médios a year. The curves daily generation of each month and the seasonality of the total energy delivered for each month are shown in Figure 8. It adopted a loss factor of 4% (~ 151.7 MW.médios lossless). They considered two recruitment scenarios - Scenario 1 with no contract - typical closing in the short term and only scenario 2 with delivery “flat” - typical of the industrial consumer. Comparisons are made using the current PLD patamarizado and PLD time with and without network. Of course, comparing the pattern of the wind farm generation curve (Figure 8) With a delivery contract with “flat”, exposure to MCP will be positive even 19 hours at 5 o'clock the following day and will be negative in the remaining hours.

This effect of different exposures MCP throughout the day will bring different results clearly with PLD time.

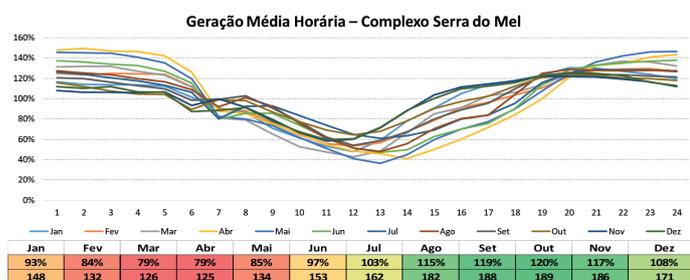


Figure 8 - Generation Standard - Wind Energy Complex (RN)

THE Figure 9 illustrates a sample of the PLD time (January to October 2018) in the Northeast used in the comparisons of the PLD versus weekly schedule impact.

The curves illustrate the PLD absolute time values with and without network and weekly PLD, and in addition, the difference between the time and week.

Note that the monthly average values are very close in all cases, however differences over the days and hours are visible. This difference is that it brings the impact of hourly rates in wind projects.

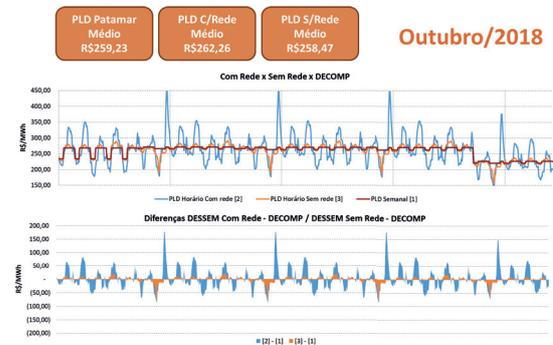
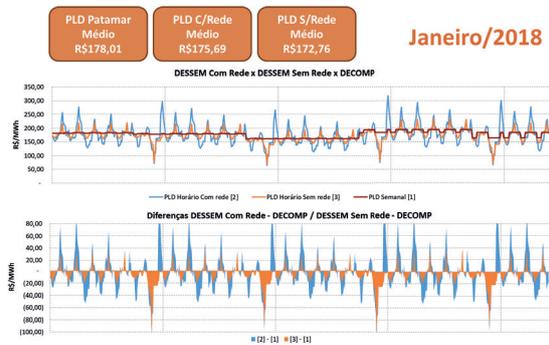


Figure 9 - Sample of Prices and times Considered Weekly - Northeast (January and October 2018)

## 1.1 Results

The results comparing the impact of PLD time with and without network versus the weekly spot price in terms of exposure to MCP wind project for two scenarios - all MCP and sales “flat” is shown in Figure 10. Note that in the two scenarios there are differences over years and months in the PLD values reached the ceiling or near it (May and June) are the major differences.

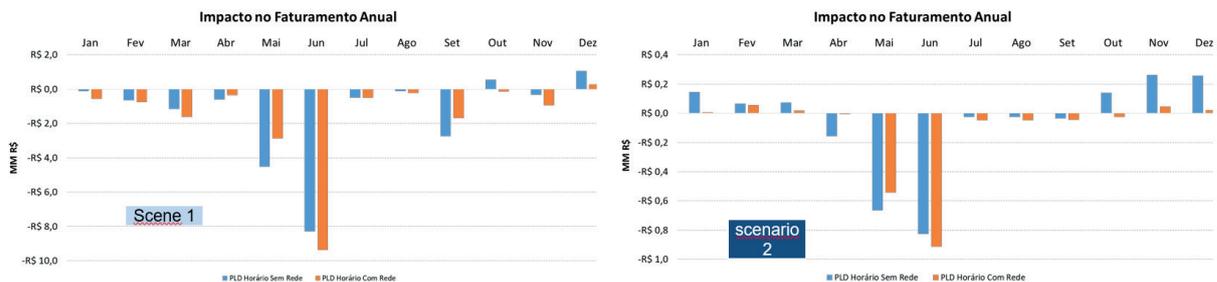


Figure 10 - Impact on Annual Revenue

The consolidated values are shown in Table 1 and Table 2. In scenario 1 with total exposure to MCP, project billing with PLD time loses 13-14 R \$ / MWh - with and without network, respectively. They are important financial impact on project revenue profile. In scenario 2 with contract sales “flat” with the implementation of PLD time would require the pricing of new contracts of this type with a “premium” annual average of + R \$ 0.59 / MWh in the case of PLD time considering the network and + R \$ 1.11 / MWh in the case of PLD LAN.

Complexo Eólico RN – Resultado Anual			
	Geração x PLD Semanal	Geração x PLD Horário com rede	Geração x PLD Horário sem rede
<b>Total [R\$]</b>	<b>R\$ 402,997,808.18</b>	<b>R\$ 385,645,502.79</b>	<b>R\$ 384,311,69</b>
<b>Total Geração (MWh)</b>	<b>1332815.00</b>		
<b>Total [R\$/MWh]</b>	<b>R\$ 302.37</b>	<b>R\$ 289.35</b>	<b>R\$ 288.35</b>
<b>Diferença [R\$/MWh]</b>		<b>-R\$ 13.02</b>	<b>-R\$ 14.02</b>
<b>Média PLD [R\$/MWh]</b>	<b>R\$ 290.95</b>	<b>R\$ 277.61</b>	<b>R\$ 277.22</b>
<b>Diferença [MM R\$]</b>		<b>-R\$ 17.35</b>	<b>-R\$ 18.69</b>

Complexo Eólico RN – Resultado Anual			
	Geração x PLD Semanal	Geração x PLD Horário com rede	Geração x PLD Horário sem rede
<b>Total [R\$]</b>	<b>-R\$ 172,393.21</b>	<b>-R\$ 962,547.62</b>	<b>-R\$ 1,651,88</b>
<b>Média PLD [R\$/MWh]</b>	<b>R\$ 290.95</b>	<b>R\$ 277.61</b>	<b>R\$ 277.22</b>
<b>Diferença [MM R\$]</b>		<b>-R\$ 0.79</b>	<b>-R\$ 1.48</b>
<b>Diferença [R\$/MWh]</b>		<b>-R\$ 0.59</b>	<b>-R\$ 1.11</b>

Evaluating Scenario 1, the month of June had the highest negative impact of the price schedule in relation to the price per level. What weighed more for this result is the difference - 70.26 R \$ / MWh comparing the average monthly price per level with the case with network and - 79.65 R \$ / MWh with no network case. Moreover, we can see a higher occurrence of lower hourly rates in the early hours of the day where the generation is high and higher prices in the middle of the day where the generation is low. Also in relation to Scenario 1, the month of December showed the highest gain (positive impact) due to the close proximity of the average prices per level and average monthly price schedules and presents several instances of PLD time peaks in the late afternoon, where the generation is found in high levels. Focusing the evaluation of Scenario 2, the justifications for the greatest negative impact in July and the biggest positive impact occurs at the end of the year is very similar to those presented for Scenario 1. In addition, we can see a small annual impact mainly due to compensation of low prices x generation high earlier in the day with high prices and high generation at the end of the day. In general, the hourly price tends to behave increasingly throughout the day. The contract modulation according to given load curve has the ability to change this significantly scenario. There are numerous possible configurations contracts on the open market.

The occurrence of major impacts of PLD without network time with respect to the PLD time with the network (on average PLD with <PLD LAN network) in a few months is due to the possibility of “impoundment” of wind generation in the Northeast system at times, due to a greater restriction to the flow of this energy with consideration of the network. The results presented here are the result of simulations using a model (DESSEM) has not finished and the possibility of significant changes to its full implementation.

## 2 | LIGHTENING THE RISK

In the test case study it was used a wind farm in Rio Grande do Norte, which has a different system of winds from other states in the Northeast. At Figure 5 You can compare the profile of Rio Grande do Norte (RN) with the State of Bahia (BA). Note that the highest incidence of winds in the RN occurs in late-night time and night-BA dawn occurs. With the PLD time the values in these periods are quite different. In this case, the RN projects take advantage over those in the BA. The specific project in NB has a production standard (Figure 8) Slightly different from the general pattern of newborns with increased production of the slight displacement for the night. An average loss in sales was around 5% in scenario 1 with all the energy sold in the short term, and as it was only computed the average, there is situation of greater and lesser impact as those illustrated in Figure 11 and Figure 12.

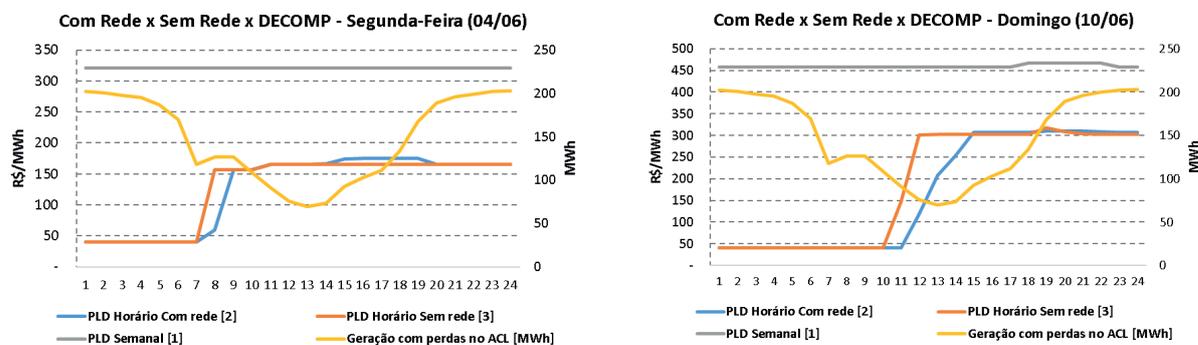


Figure 11 - Detailing Generation Standard and PLD Schedule and Week (June / 2018)

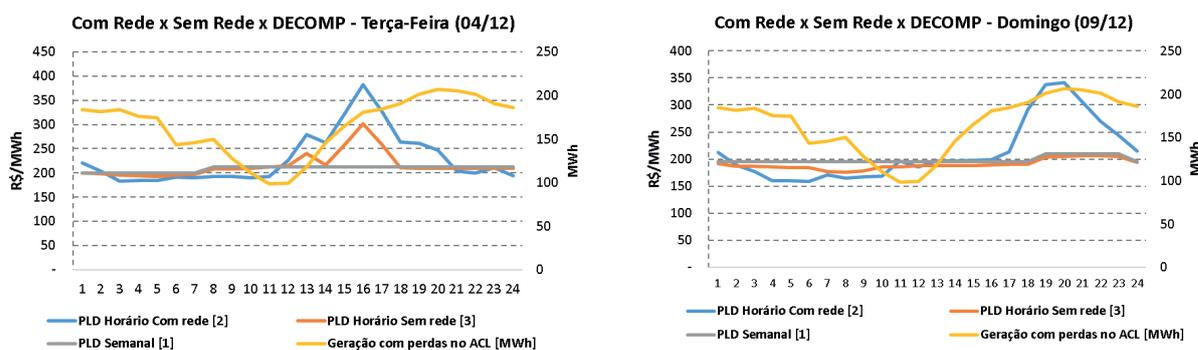


Figure 12 - Detailing Generation Standard and PLD Schedule and Week (December / 2018)

At Figure 11 focusing on two specific days of June, the average PLD time was far below the level for PLD. This creates a situation of high PLD time with low generation and high generation PLD down earlier in the day. This effect takes project sales value. In the Figure 12, focusing in December, the average PLD time was higher than the level for PLD and PLD notices a high time on day of the period with high generation. This effect creates a positive value in the wind project. In two different times and two different effects of PLD Time. Of course, this creates more uncertainty to future investors, and even those who are already operating projects. Similarly, a project in BA would have a slightly greater impact than the standard production of a project in RN (see Figure 5).

### 2.1.1 Attention points

In the analysis of the time it was not implemented the Unit Commitment of heat that can accentuate the differences, particularly the effect that occurs when the spot price is higher.

### 2.1.2 Assessment of Impacts

Although it is expected a reduction of charges, the CCEE has not quantified this benefit in the operation shade when the implementation of the PLD time. In fact, the benefits to lower tariffs for consumers will depend on the evolution of the release of the ACL and the high volatility of hourly rates will not affect you at first.

It is emphasized that the implementation of the PLD hours may generate significant losses for wind projects already made possible, since part of the generation comes from the difference between the estimated production by P50 and P90. Thus, the projects sold energy in the ACR may be adversely affected. Thus, it must be seen by the regulator forms of compensation such entrepreneurs avoid a sector-like Judicialization to what happened with the SFM. In addition, the implementation of the hourly price will increase the risk of new projects as the increased uncertainty (high volatility, unpredictability and legal uncertainty) which will increase the cost of renewable sources due to the incorporation of new risks for these new projects.

### *2.1.3 Regulatory and Contractual advances*

For those investors who are coming to build and operate new wind farms, the new profile of hourly rates is a lesson to be learned, and adjustments in the market contract prices will be at your own risk. On the contrary, for those investors who have already applied for wind farms based on business plans at the weekly price per level, the results of the projects in this new context schedules prices could suffer a negative impact of smaller and larger amounts, or in the ACR or even ACL. It is noteworthy that the regulation should protect the ACR projects sold energy in the current rule and shall refer to the ACL projects investment assumptions. In order to avoid a large litigation of wind generators against the adoption of the hourly price, the authors suggest that the government imagine some mitigation measures to mitigate the new risks in the sector. Among the measures to be considered are some very objective, how to adjust the price in the contracts of auctions at ACR, and also the extension of the term of the grant so that investors can accommodate the new uncertainties that the price schedule can bring.

### *2.1.4 Hybrid plants*

Hybrid plants tend to be a “protection” against unwanted exposure in the MCP, which increase the efficiency of the set as whole. This scheme seeks complementarity of energy resources and the production of energy from sources involved in order to produce more efficient results, which are suitable and reliable for optimizing the use of the transport system for the transportation of energy [3]. The input of this storage is also a hybrid process technological advances expected in conjunction with wind power. Of course, this is a great outlet to avoid negative impacts of wind projects in the PLD time, yet the batteries still have high costs.

### 3 | CONCLUSIONS

The purpose of this paper seeks to discuss the impact of the price schedule in the Brazilian wind projects, always remembering that the commercialization of energy from wind farms is increasing in SIN. The fact is that wind is part of the sources of “zero marginal cost” and are dispatched with priority given to the system power requirement, not the power. Brazilian states in the Northeast and South are those with the highest incidence of winds suitable for the production of wind energy, and still wind production profile among these is different. The predictability of revenue from the wind power generation is challenging, since its production depends on a weather phenomenon, and its order is a priority. Using the PLD time as new pricing platform CCEE, uncertainty in revenues tend to increase. This can happen in contracts in the ACR, which from 2018 has adopted the Contracts Quantity, and where there may be unwanted exposure to higher PLD hours, or happen in the ACL with greater and lesser impact depending on the contractual standard. market measures to mitigate risks in SIN still have low liquidity, and beyond that, it is interesting that the government propose risk mitigation measures for those projects that set up their business plan in the pattern of weekly prices. These measures may include additives in contracts to accommodate differences in prices, or even the extension of the grant, establishing a deadline for projects already granted so that investors can have more time to recovery of the capital invested. and where there may be unwanted exposure to higher PLD hours, or happen in the ACL with greater and lesser impact depending on the contractual standard. market measures to mitigate risks in SIN still have low liquidity, and beyond that, it is interesting that the government propose risk mitigation measures for those projects that set up their business plan in the pattern of weekly prices. These measures may include additives in contracts to accommodate differences in prices, or even the extension of the grant, establishing a deadline for projects already granted so that investors can have more time to recovery of the capital invested. and where there may be unwanted exposure to higher PLD hours, or happen in the ACL with greater and lesser impact depending on the contractual standard. market measures to mitigate risks in SIN still have low liquidity, and beyond that, it is interesting that the government propose risk mitigation measures for those projects that set up their business plan in the pattern of weekly prices. These measures may include additives in contracts to accommodate differences in prices, or even the extension of the grant, establishing a deadline for projects already granted so that investors can have more time to recovery of the capital invested. market measures to mitigate risks in SIN still have low liquidity, and beyond that, it is interesting that the government propose risk mitigation measures for those projects that set up their business plan in the pattern of weekly prices. These measures may include additives in contracts to accommodate differences in prices, or even the extension of the grant, establishing a deadline for projects already granted so that investors can have more time to recovery

of the capital invested. market measures to mitigate risks in SIN still have low liquidity, and beyond that, it is interesting that the government propose risk mitigation measures for those projects that set up their business plan in the pattern of weekly prices. These measures may include additives in contracts to accommodate differences in prices, or even the extension of the grant, establishing a deadline for projects already granted so that investors can have more time to recovery of the capital invested.

## THANKS

The authors acknowledge the support of Abeeólica - Brazilian Association of Wind Energy - in investigations and some of the data provided in this work.

## REFERENCES

Technical Note 5/2017 / AEREG / SE - “Legal Framework of Improving Power Sector” - Public Consultation MME 33 - July 2017 - available in [www.mme.org.br](http://www.mme.org.br)

F. Wolak - “Options for Short-Term Price Determination in the Brazilian Wholesale Electricity Market” - 2008 - Report prepared for the CCEE. - Available in <https://web.stanford.edu/group/fwolak/cgi-bin/?q=node/3>

ONS - “Generation Wind Power Monthly Bulletin - March / 2018”

EPE, “Hybrid Power Plants - A qualitative analysis of regulatory and trade issues relevant to planning” (No. EPE-DEE-NT-011/2018-r0)

## DESAFIOS ENCONTRADOS NA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NO COMPLEXO TERMELÉTRICO JORGE LACERDA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

### Liliana Dutra dos Santos

Diamante Geração de Energia LTDA  
Capivari de Baixo - Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/3339926834131652>

### Rofferson Rosa Izidoro

Diamante Geração de Energia LTDA  
Capivari de Baixo - Santa Catarina

### Daniel José Schmitz de Aguiar

Diamante Geração de Energia LTDA  
Capivari de Baixo - Santa Catarina

### Fábio Silveira Costa

Diamante Geração de Energia LTDA  
Capivari de Baixo - Santa Catarina

### Juceli Locks Junior

Diamante Geração de Energia LTDA  
Capivari de Baixo - Santa Catarina

**RESUMO:** A Usina Termelétrica Lacerda C (UTLC) gera energia elétrica a partir da queima de carvão da região sul de Santa Catarina, o qual possui alto teor de enxofre e cinzas. Os gases de exaustão saem por uma chaminé de concreto armado de 200 m de altura e aproximadamente 6,4 m de diâmetro de topo. Neste artigo serão apresentadas as etapas da implantação de um

sistema completo de monitoramento contínuo de emissões instalado na chaminé da UTLC, incluindo todos os desafios enfrentados desde a seleção da melhor tecnologia até a obtenção dos primeiros resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissões, Monitoramento, Contínuo, Termelétrica, Carvão.

### CHALLENGES IN THE IMPLEMENTATION OF A CONTINUOUS EMISSIONS MONITORING SYSTEM IN THE JORGE LACERDA THERMAL POWER STATION

**ABSTRACT:** The Lacerda C Thermal Power Plant (UTLC) burns coal from the southern region of Santa Catarina, which has a high content of sulfur and ash. The flue-gas stack made of reinforced concrete is 200 m high and approximately 6.4 m in top diameter. In this article, the stages of the implementation of a complete continuous emission monitoring system installed in the UTLC chimney will be presented, including all the challenges faced since the selection of the best technology to the first results obtained.

**KEYWORDS:** Emissions, Monitoring, Continuous, Powerplant, Coal.

## 1 | INTRODUÇÃO

As emissões atmosféricas representam um dos maiores aspectos ambientais de uma usina termelétrica, especialmente quando o combustível utilizado é o carvão mineral, como no caso do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (CTJL). A queima do carvão resulta na emissão de diferentes efluentes gasosos, sendo os principais o material particulado e os óxidos de enxofre e nitrogênio (NOx e SOx). O monitoramento destes poluentes é fundamental para adoção de medidas de controle, cumprimento de condicionantes ambientais e avaliação do impacto das atividades das usinas na qualidade do ar da região.

O monitoramento das emissões de processos de combustão em termelétricas é realizado principalmente através de medições pontuais nos gases de exaustão. Apesar do histórico de resultados servir como base para avaliação, este tipo de medição representa apenas uma fotografia do momento, dificultando o controle no processo produtivo em tempo real.

A primeira usina do CTJL a receber um sistema completo de monitoramento contínuo de emissões atmosféricas (CEMS) foi a Usina Termelétrica Lacerda C (UTLC), a qual possui capacidade instalada de 363 MW. O projeto contemplou o monitoramento de vazão, temperatura, pressão, teor de oxigênio e as concentrações de NOx, SO<sub>2</sub>, CO e material particulado. Os dados serão transmitidos em tempo real para o órgão ambiental.

As características únicas desta usina tornaram o projeto complexo e cheio de desafios. Neste artigo serão apresentadas as etapas da implantação do sistema, incluindo a escolha da melhor tecnologia, peculiaridades do processo de instalação e primeiros resultados. O orçamento para implantação do projeto foi liberado em 2017 e a instalação foi concluída em 2018. Não serão abordados detalhes comerciais do projeto e detalhes que pertençam à propriedade intelectual do fornecedor.

## 2 | IMPLANTAÇÃO DO PROJETO

A implantação do projeto contemplou desde a fase de estudo do sistema até a seleção do fornecedor, aprovação do projeto, instalação e comissionamento.

### 2.1 Descrição do Empreendimento

A UTLC faz parte do CTJL, localizado no sul de Santa Catarina, no centro da cidade de Capivari de Baixo. A região de influência do CTJL inclui a cidade onde está inserido, a qual possui pouco mais de 24 mil habitantes, e a cidade vizinha, Tubarão, com população aproximada de 105 mil habitantes.

A usina possui capacidade instalada de 363 MW e queima aproximadamente 125.000 toneladas de carvão por mês. A Licença Prévia do empreendimento foi emitida em 1989 e a operação foi iniciada apenas em 1996. Atualmente possui Licença Ambiental

de Operação (LAO) emitida pelo órgão ambiental estadual de Santa Catarina (Instituto de Meio Ambiente – IMA) em janeiro de 2018, válida até 2022.

O carvão mineral CE 4500, utilizado como fonte de energia no processo, é proveniente da bacia carbonífera do sul de Santa Catarina. Este carvão possui em média 43% de cinzas e 2% de enxofre, e sua combustão gera gases contendo SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e alto teor de material particulado.

Os gases de exaustão da combustão na caldeira da UTLC passam por dois precipitadores eletrostáticos, com eficiência mínima de 99%, para remoção de material particulado e saem por uma chaminé de 200 m de altura. Até a implantação deste projeto, não existiam equipamentos ou sistemas de controle para as emissões de SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>. Pontos de amostragem de material particulado e gases estão localizados nos dutos de saída dos precipitadores eletrostáticos, antes da entrada dos gases na chaminé. Além das medições pontuais, estão instalados nestes locais, monitores contínuos de material particulado, conforme apresentado na Figura 1.

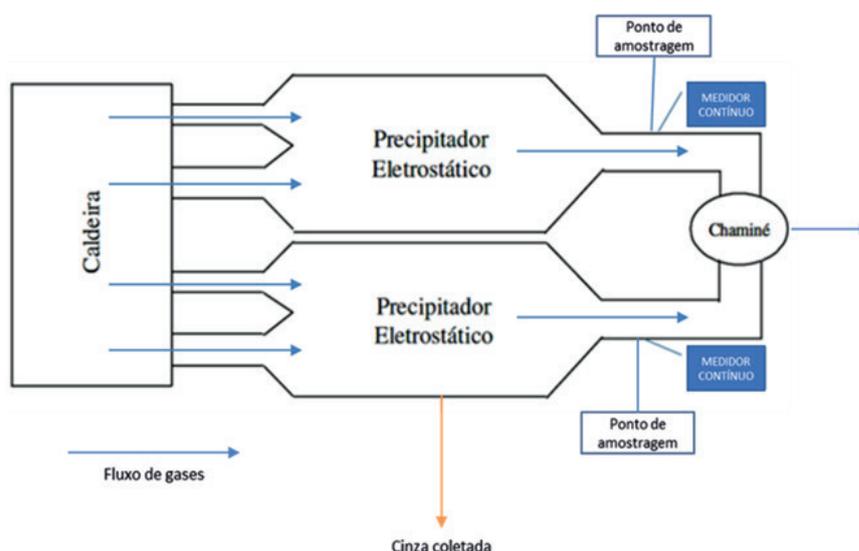


Figura 1. Fluxo de gases na UTLC e pontos de monitoramento das emissões.

## 2.2 Objetivo da implantação do sistema

A medição em tempo real das emissões, além de melhorar o monitoramento, permite maior rapidez na aplicação dos controles operacionais, quando necessário.

O CTJL possui 3 estações de qualidade do ar nas cidades de Tubarão e Capivari de Baixo, as quais monitoram partículas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e outros, em tempo real. Também são realizados estudos de dispersão atmosférica para avaliação da influência das usinas no ar da região. O registro de dados de emissões também em tempo real tornará estes estudos muito mais precisos.

O projeto em questão tratou da instalação de um sistema de monitoramento contínuo das emissões da UTLC contemplando as concentrações de material particulado, SO<sub>x</sub> em

termos de SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre), NO<sub>x</sub> em termos de NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio), CO (monóxido de carbono), com medições de O<sub>2</sub> (oxigênio) para correção das concentrações, e ainda vazão, temperatura e pressão dos gases.

O monitoramento contínuo das emissões de material particulado, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub> com a transmissão dos dados para o órgão ambiental atenderá as condicionantes da LAO 202/2018. O monitoramento contínuo de vazão, pressão e temperatura permitirá também o cálculo da massa de poluentes emitida.

### 2.3 Local de Instalação

A primeira decisão a ser tomada foi o local de instalação do sistema: mesmo local dos monitores de particulado já instalados, com acesso mais fácil; ou na chaminé. Para instalação nos dutos seria necessária a instalação de dois sistemas, ou então, de uma sonda para cada duto e um sistema único de análise, o qual intercalaria as amostragens entre os dois dutos. Avaliou-se neste caso, as determinações sobre monitoramento contínuo de emissões descritas no anexo XIV da Resolução Conama 436/2011, o qual exige o mínimo de 67% do tempo da operação monitorada em um ano, sendo a média diária válida quando houver monitoramento válido no mínimo 75% do tempo (BRASIL, 2011).

Tendo em vista que as seções transversais dos dutos não atendem aos critérios de medição ideal descritos pela norma CETESB L9.221/1990 (CETESB, 1990), concluiu-se que a instalação na chaminé atenderia melhor as condições de linearidade de fluxo para medição de material particulado, facilitaria a avaliação das emissões da usina (sem a necessidade de calcular a média ponderada entre os dutos) e atenderia mais facilmente os requisitos de frequência definidos pela Resolução Conama 436/2011.

### 2.4 Avaliação das Características dos Processo

O monitoramento contínuo de emissões deve ser confiável, preciso e robusto, especialmente considerando a necessidade da transmissão dos dados para os órgãos ambientais. Desta forma, foram avaliadas criteriosamente as tecnologias mais utilizadas e disponíveis no mercado.

Inicialmente, procurou-se encontrar referências na literatura, em normas internacionais, e em grandes companhias, avaliando as melhores práticas entre os sistemas apresentados. No entanto, constatou-se que não existe melhor sistema, e sim o sistema mais adequado para cada aplicação. Desta forma, foi dada atenção às características da estrutura de instalação e do processo.

A chaminé da UTLC pode ser visualizada na Figura 2, na qual é possível identificar a existência de plataforma, construída na altura de 63,35 m, com acesso através de escada marinho.

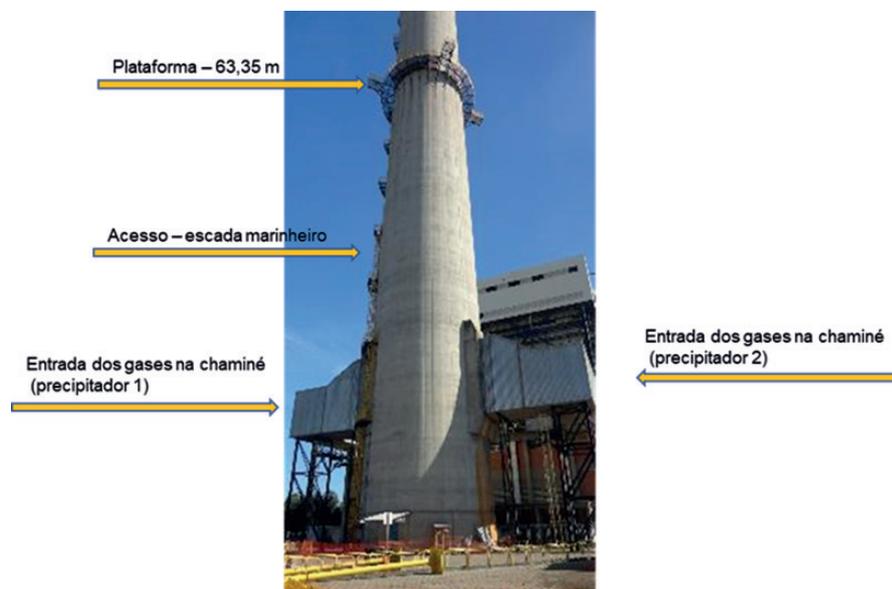


Figura 2. Chaminé da UTLC vista de baixo.

Nesta fase de estudo foram levantadas as características da chaminé, através de desenho antigo encontrado, as quais são apresentadas na Tabela 1.

<b>Altura total chaminé (m) – nível solo</b>	200,00
<b>Altura plataforma (m)</b>	63,35
<b>Diâmetro externo (m) – na altura da plataforma</b>	11,42
<b>Diâmetro interno (m) – na altura da plataforma</b>	9,96
<b>Largura plataforma (m)</b>	2,00
<b>Espessura parede (m)</b>	0,73
<b>Diâmetro superior interno (m)</b>	6,44
<b>Material construtivo</b>	concreto

Tabela 1. Características da Chaminé da UTLC.

A natureza das emissões também é fator determinante na definição da tecnologia a ser adotada e dos ranges de medição. A Tabela 2 apresenta as características das emissões da UTLC. Os valores foram calculados com base nos registros históricos obtidos a partir das medições realizadas nos pontos de amostragens apresentados na Figura 1.

Parâmetros	Mínimo	Média	Máximo	Unit
Velocidade (dutos)	14	18	20	m/s
Umidade	6	8	12	%
Vazão do gás seco	800.000	1.250.000	1.500.000	Nm <sup>3</sup> /h
Temperatura média do gás	155	162	168	°C
Concentração média de material particulado	15	150	300	mg/Nm <sup>3</sup>
Pressão (saída pptdor 1)	-9,7		-29,8	mmaq
Pressão (saída pptdor 2)	-10,1		-30,3	mmaq
O <sub>2</sub>	4	6	9	vol-%
SO <sub>x</sub> (expresso em termos de SO <sub>2</sub> )	1000	1.884	2500	ppm
NO <sub>x</sub> (expresso em termos de NO)	300	460	700	ppm
Temperatura ambiente	0	15	30	°C

Tabela 2. Características das emissões atmosféricas da UTLC.

Observa-se que nunca haviam sido realizadas medições de emissões na chaminé, apenas nos dutos, e assim foram feitas algumas inferências para o processo. Considerando a vazão de gás úmido e o diâmetro na altura da plataforma da chaminé, estimou-se uma velocidade dos gases no ponto de amostragem da chaminé entre 3 e 6 m/s considerando 8% de umidade. Também se considerou a média das concentrações de poluentes medidas nos dutos.

Além disso, foi importante considerar que as concentrações de particulado apresentadas na Tabela 2 se referem às condições normais de operação. Porém, concentrações instantâneas podem ultrapassar este valor caso ocorram falhas nos precipitadores eletrostáticos, as quais devem ser apontadas pelo medidor. Os medidores contínuos em operação nos dutos chegaram a registrar picos instantâneos de concentração maiores que 500 mg/Nm<sup>3</sup>, exigindo a prática das ações do plano de emergência pela operação da usina.

## 2.5 Escolha das Tecnologias

Ainda no intuito de escolher um sistema que atendesse todas as necessidades, foram visitadas várias empresas com sistemas de monitoramento de emissões instalados, com variadas configurações, e foi possível perceber que existem ofertas no mercado de ótimos equipamentos de medição. Ainda assim, independentemente da tecnologia e/ou fabricante, os cuidados na instalação, a manutenção e a boa assistência técnica são fundamentais para o sucesso do monitoramento. Todo esse processo de benchmarking foi fundamental para a segurança na tomada de decisão. Ganham maior peso os sistemas que já operavam com sucesso em plantas com características semelhantes ao CTJL.

As dimensões da chaminé e a dificuldade de acesso também foram consideradas. O acesso através de escada marinho na altura de 63 m exige, além de planejamento, boas condições físicas da equipe, condições climáticas adequadas e liberação pela equipe de segurança do trabalho. Desta forma, optou-se por instalar o mínimo de componentes na altura de 63 m, quando possível.

### *2.5.1 Medidores de Gases*

As principais tecnologias sugeridas para medição de gases foram os métodos extrativos por diluição e por extração total cold/dry. Os sistemas por extração total hot/wet não foram considerados por serem muito mais caros e os sistemas in situ não foram considerados pelo baixo desempenho para altas concentrações de particulado e dificuldade para calibração (MCKETTA, 1998).

Na Extração por diluição, é realizada a injeção de ar puro no momento da coleta do gás na chaminé com o objetivo de reduzir o ponto de orvalho da amostra ao ponto de orvalho do ar, evitando o uso de linhas aquecidas. Neste caso são utilizados analisadores com faixas de medição na escala de ppb (partes por bilhão) e posteriormente calculada a concentração dos poluentes considerando o fator de diluição. Estes sistemas exigem extremo cuidado com o sistema de diluição, pois qualquer contaminação pode acarretar grandes erros.

No sistema de extração total cold/dry a amostra é captada, sem diluição, através de uma sonda com um filtro para reter o material particulado e bombeada através de um traço aquecido para impedir a condensação da amostra até a entrada no sistema de análise. Ao chegar no sistema de análise a amostra é resfriada rapidamente para condensação e retirada da umidade, para que a amostra de gás seco possa entrar no analisador propriamente dito. Nesta configuração, com a amostra concentrada, é possível a utilização de multianalisadores, e não é necessária a aplicação de fatores de correção. Por outro lado, o traço aquecido é um item caro do sistema e requer muito cuidado durante a instalação e atenção na operação pois o sistema de resistência deve manter a temperatura em todo o percurso da amostra. Considerando o benchmarking realizado optou-se pelo sistema extrativo total cold/dry.

### *2.5.2 Medidores de material particulado*

A medição contínua de material particulado nas emissões das usinas do CTJL já era realizada por meio de medidores com princípio de cintilação óptica. Este tipo de medidor é composto por um transmissor e um receptor de um feixe de luz visível. Quando as partículas passam através deste feixe, causam uma variação na intensidade da luz recebida. A variação no percentual da luz recebida em relação à emitida é convertida em termos de concentração de material particulado. Existem diversas outras tecnologias disponíveis no mercado para medição de material particulado em fontes fixas, no entanto, os demais princípios de medição não se mostraram adequados ao processo da UTLC, seja pela interferência eletrostática dos precipitadores, seja pela concentração de partículas ou pelo diâmetro da chaminé. Desta forma buscou-se variações mais modernas do próprio

sistema de transmissão óptica.

### 2.5.3 Medidores de vazão

Para escolha do medidor de vazão foi considerada tecnologia adequada para o diâmetro da chaminé, a qual tivesse robustez para suportar a agressividade dos gases e menor probabilidade de entupimento pelo material particulado, evitando falhas e grande número de manutenções. Desta forma, optou-se pela medição ultrassônica.

## 2.6 Etapa de Projeto

As etapas do projeto envolveram o levantamento das informações solicitadas pelo fornecedor para determinar os ranges dos equipamentos e realizar a aquisição, elaboração dos projetos pelo fornecedor (projeto executivo, elétrico etc.), aprovação dos projetos e execução do sistema de análise durante a importação dos equipamentos (em torno de 120 dias).

Todo o sistema analítico foi montado e testado na fábrica do fornecedor. A conclusão da montagem do sistema, a chegada dos equipamentos importados e a furação da chaminé eram pré-requisitos para instalação de todos os componentes na usina. O sistema contemplou medições in situ de temperatura, pressão, vazão e concentração de material particulado, além de sonda para extração dos gases. Na base da chaminé, no nível do solo, foi projetada casa de analisadores, para acondicionamento dos analisadores de gases e demais partes do sistema. O projeto teve início em abril de 2018 e a configuração simplificada é apresentada na Figura 3.

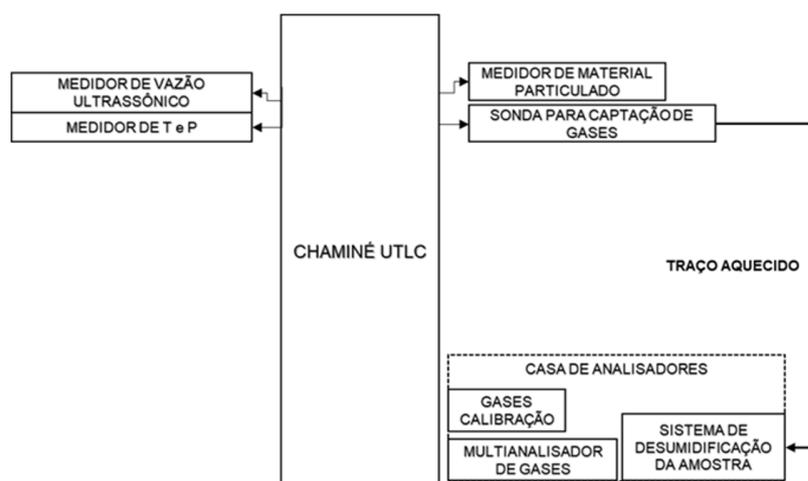


Figura 3. Configuração simplificada do sistema de monitoramento de emissões da UTLC

### 2.6.1 Dificuldades Enfrentadas

As informações relativas à chaminé haviam sido coletadas a partir de desenhos

antigos da época de construção da usina. Durante o levantamento dos dados para o fornecedor, decidiu-se conferir in loco as condições da chaminé, do acesso à plataforma, das furações já existentes para isocinética e da estrutura em si, para subsidiar inclusive a atividade de furação.

Esta inspeção revelou detalhes inesperados. Conforme descrito na Tabela 2, imaginava-se que a chaminé possuía estrutura inteira de concreto armado, com 9,96 m de diâmetro interno. Contudo, a chaminé possui parede dupla, sendo a parede externa de concreto armado, com espessura de 0,43 m, plataforma interna contornando toda a estrutura interna com largura de 1,00 m, e parede interna construída com tijolo refratário, com 0,16 m de espessura e diâmetro interno de 8,48 m. As imagens da inspeção são apresentadas na Figura 4.



Figura 4. (a). Plataforma de acesso na altura de 63 m. (b). Vão interno da chaminé com plataforma interna de 1m de largura. (c). Confirmação da espessura da parede externa. (d). Verificação dos dutos instalados para amostragem isocinética.

As diferenças encontradas na estrutura trouxeram preocupação tanto em relação às alterações necessárias no projeto, quanto em relação à furação da chaminé propriamente dita. O principal impacto sofrido foi na medição da vazão. O medidor de vazão é composto por duas partes, as quais devem ser instaladas alinhadas em um ângulo de  $45^\circ$  ou  $60^\circ$ , sendo o alinhamento perfeito crucial para uma boa medição. O equipamento não possuía comprimento suficiente para ser instalado na parede externa e ainda assim atingir a parede interna (1,6 m de distância). Cogitou-se a fabricação de uma extensão, mas isso dificultaria o alinhamento das partes e a remoção nas manutenções e limpezas periódicas. Assim, a solução seria a instalação direta na parede interna, o que trouxe dúvidas da equipe de engenharia civil quanto à integridade da estrutura. Sendo assim a solução encontrada foi soldar o bocal (conjunto flange + tubo) em uma placa e parafusar na parede de refratário da chaminé.

A instalação de equipamentos na parede interna da chaminé caracterizou a atividade como espaço confinado, sendo necessária atenção da equipe de segurança do trabalho. A equipe multidisciplinar envolvida decidiu pela contratação de empresa especializada para furação da chaminé e não se considerou necessária a parada de máquina para a

atividade.

O projeto foi reajustado e a versão final previu 8 furos na chaminé para instalação dos equipamentos, sendo 4 apenas nas paredes internas para instalação do medidor de vazão (duas partes), T e P, 3 furos alinhados nas paredes externa e interna para instalação do medidor de particulado (duas partes) e sonda para coleta de gases e mais 1 apenas na parede externa para passagem de cabos.

## 2.7 Etapa de Instalação

### 2.7.1 Furação da Chaminé

O fundamental para o sucesso da etapa de furação foi o planejamento das atividades. Os responsáveis pelo projeto primeiramente fizeram as marcações para as furações e inspecionaram o local. Assim, a empresa contratada para furação conseguiu realizar as atividades em 2 dias, sem maiores contratempos. A Figura 5 mostra as imagens da realização das atividades.



Figura 5. (a). Parede externa durante a furação. (b). Parede externa finalizando o primeiro furo. (c). Vista da parede interna depois de furada em diagonal para instalação do medidor de vazão. (d). Resíduos de concreto da furação.

### 2.7.2 Instalação dos Equipamentos

Após a furação da chaminé foi dado início à instalação do sistema de bandejamento para cabos, contemplando o traço aquecido, alimentação elétrica, alimentação de ar comprimido e demais suprimentos do sistema. Todo o serviço foi executado com atividade de alpinismo industrial, exigindo atenção redobrada nos quesitos de segurança. A Figura 6 apresenta algumas imagens da execução dos serviços.



Figura 6. Alpinistas industriais realizando a instalação do sistema de bandejamento.

### *2.7.3 Dificuldades Enfrentadas*

A principal dificuldade na etapa de instalação dos equipamentos foi devida às condições climáticas que interferiram diretamente nas atividades de alpinismo. Os serviços de instalação estavam previstos para o mês de novembro e justamente neste período houve vários dias de chuva e principalmente fortes ventos no período da tarde. Muitas vezes com a previsão do vento após o meio dia, as atividades não eram liberadas no período da manhã pelo setor de segurança, pois não haveria tempo hábil para a subida dos equipamentos, realização dos serviços e descida das equipes de forma segura, antes das rajadas de vento. Esse período de incerteza exigiu muita paciência e negociação com a equipe contratada e causou atrasos no projeto.

## **2.8 Comissionamento e primeiros resultados**

No mês de dezembro de 2018 foi concluída a instalação dos equipamentos, realizadas as calibrações dos medidores de gases e realizadas as amostragens isocinéticas para calibração de material particulado. A Figura 7 mostra o painel localizado na casa de analisadores com os registros de dados instantâneos das concentrações dos parâmetros, os quais são armazenados em um datalogger, permitindo a elaboração de gráficos e relatórios. Também é possível visualizar um exemplo de gráfico com as concentrações dos parâmetros medidos.

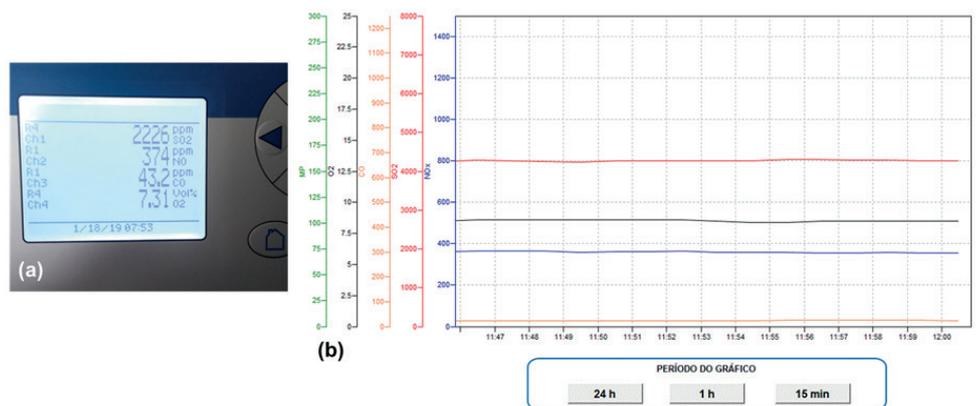


Figura 7. (a). Painel mostrando as concentrações dos parâmetros medidos em ppm e %vol. (b). Gráficos apresentando as concentrações em mg/Nm<sup>3</sup>.

Os primeiros resultados têm se apresentado dentro da ordem de grandeza esperada pelo histórico registrado na unidade. O sistema está sendo avaliado no primeiro semestre de 2019 para posterior interligação dos dados com o órgão ambiental. Pretende-se utilizar os dados de emissões gerados em tempo real para rodar modelos de dispersão atmosférica com maior precisão, gerando maior confiabilidade perante os órgãos ambientais e comunidades vizinhas.

### 3 | CONCLUSÃO

Durante o projeto em questão, foram realizadas pesquisas de mercado e visitas técnicas em diferentes empresas, sendo avaliados diferentes sistemas de monitoramento de emissões atmosféricas. Constatou-se que não existe um único e melhor sistema, e sim sistemas mais adequados para cada aplicação, sendo necessário, em primeiro lugar, o pleno conhecimento das características do processo produtivo (especialmente as concentrações dos poluentes e umidade), e da estrutura de instalação.

Conforme as dúvidas foram surgindo, mais profissionais foram sendo envolvidos na equipe do projeto, mostrando a necessidade de uma equipe multidisciplinar, como os profissionais da área de meio ambiente, os quais conhecem as necessidades de atendimento ambiental, da área de automação e controle, para suporte em relação aos princípios de funcionamento dos equipamentos, das áreas de elétrica e civil para avaliação e acompanhamento dos projetos e instalação, de saúde e segurança do trabalho para supervisão e liberação das atividades, e ainda da operação da usina, os quais deverão observar a influência nas emissões atmosféricas e prever os controles a serem tomados, quando necessário.

Os dados contínuos das emissões serão transmitidos aos órgãos ambientais e devem ter precisão e confiabilidade. Mesmo tendo sido escolhidos equipamentos robustos, uma das principais conclusões deste projeto foi que o bom funcionamento está

diretamente relacionado aos cuidados dedicados ao sistema. A estação deve ser verificada periodicamente, deve haver plano de calibração e manutenção preventiva e ainda assim uma boa assistência técnica será fundamental e isso deverá ser levado em consideração no processo de aquisição.

A implantação deste sistema aprimorará a qualidade do monitoramento das emissões, facilitando a adoção de medidas de controle operacionais, quando necessário. A comparação dos dados contínuos de emissões e de qualidade do ar permitirá uma melhor avaliação da contribuição da operação da usina na qualidade do ar da região em que está instalada. Espera-se a consolidação do sistema em 2019, trazendo maior confiabilidade ao processo.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA n°. 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 dez. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>. Acesso em: 14.mar.2019.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **L9.221 – Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação dos Pontos de Amostragem: Procedimento**. São Paulo, 1990.

MCKETTA, John. J. **Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 65 -- Waste: Nuclear Reprocessing and Treatment Technologies to Wastewater Treatment: Multilateral Approach**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1998.

## AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS DINÂMICOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO PARA ESTRUTURAS DE SUBESTAÇÕES

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

**Rafael Faria da Silva**

TSE – Tecnologia em Sistemas Elétricos

Itajubá – MG

<http://lattes.cnpq.br/7122370536834999>

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade para os esforços dinâmicos em estruturas de subestações isoladas a ar em função da variação de alguns dos vários parâmetros envolvidos no cálculo dessas grandezas, tais como: comprimento do vão, número de espaçadores, bitola do condutor e flecha adotada. Apresentam-se, de forma resumida, as metodologias para o cálculo dos esforços estáticos e dinâmicos. Por fim, apresentam-se as análises comparativas para a variação dos parâmetros envolvidos no cálculo. O objetivo do trabalho é fornecer ao leitor informações e resultados para que se tenha dimensão da influência de certas variáveis no resultado dos esforços dinâmicos em condutores flexíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Esforços Dinâmicos, IEC 60865-1, Subestações Isoladas a Ar,

Condutores Flexíveis

ASSESSMENT OF DYNAMIC TENSILE FORCES IN SUBSTATIONS STRUCTURES DUE TO VARIATION OF PARAMETERS USED IN THEIR CALCULATION

**ABSTRACT:** This paper presents an assessment of dynamic tensile forces due to variation of some parameters related to their calculation: length of the span, quantity of spacers, diameter of conductor e sag of the span. The calculation methodologies of static and dynamic tensile forces are presented. After that, results of calculation for dynamic tensile forces are presented for variation of some parameters related to their calculation. The main goal of this paper is to provide information for the reader about the influence of certain parameters in the results of dynamic tensile forces.

**KEYWORDS:** Dynamic Tensile Forces, IEC 60865-1, Air Insulated Substations, Flexible Conductors.

### 1 | INTRODUÇÃO

O dimensionamento das estruturas de suporte é uma etapa importante do projeto de

uma subestação. Estas estruturas devem suportar as forças a elas impostas verticalmente, transversalmente e longitudinalmente. Verticalmente, tem-se o peso dos condutores de fase, cabos-guarda, cadeias de isoladores, ferragens, polos de seccionadoras, entre outros. Transversalmente, tem-se a força devida ao efeito dos ventos atuando sobre cadeias de isoladores, condutores de fase e cabos-guarda. Longitudinalmente, tem-se a tração estática - determinada para as condições de flecha adotadas no projeto - e as trações dinâmicas, devidas à passagem da corrente de curto-circuito pelos condutores de fase. Os esforços dinâmicos compreendem três forças de tração: a tração  $F_{t,d}$  de *swing-out* originada da força entre os condutores de fase, a tração  $F_{f,d}$  de *drop-back* resultante do movimento do condutor de volta à posição original no momento em que a passagem da corrente de curto-circuito cessa e, por fim, a força de tração  $F_{pi,d}$  de *pinch* resultante da interação entre subcondutores de uma mesma fase para o caso de utilização de mais de um condutor por fase (bundle). Estruturas sobredimensionadas representam gastos desnecessários ao empreendimento, enquanto estruturas subdimensionadas representam um risco à integridade da instalação e ao sistema elétrico ao qual a subestação se conecta.

Este trabalho é fruto de uma dissertação de mestrado desenvolvida durante o período 2015-2018 na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e das experiências profissionais do autor que, desde 2014, atua como consultor na área de projetos e estudos elétricos especializados.

Ao longo destes anos de trabalho, obteve-se acesso a diversas memórias de cálculos de esforços em estruturas de diversas empresas e consultorias nacionais e, para elaboração do trabalho de mestrado, obteve-se acesso também a memórias e relatórios de algumas empresas multinacionais. A análise destes relatórios e o contato com outras empresas que atuam no ramo mostrou que não há consenso com relação à aplicação das metodologias de cálculo dos esforços dinâmicos e que existe divergência na maneira de considerar estes esforços para o dimensionamento das estruturas.

Apesar da existência da norma internacional, a IEC 60865-1, que estabelece a metodologia de cálculo detalhada, observou-se que os esforços dinâmicos são muitas vezes negligenciados no dimensionamento das estruturas. Em outros casos, as memórias e cálculo eram incompletas e continham erros nas premissas adotadas para os cálculos.

Em 2017, no XXIV SNPTEE, um artigo foi apresentado abordando a utilização dos efeitos simultâneos de vento e curto-circuito para o cálculo dos esforços em estruturas. Apesar da brochura do CIGRÉ, na qual a norma IEC 60865-1 foi baseada não recomendar a consideração de vento e curto-circuito simultaneamente, um dos clientes da empresa exigiu que esta condição fosse considerada. Durante o evento, o tema gerou uma boa discussão. No entanto, percebe-se que hoje, dois anos depois, muito ainda há que se discutir com relação a esse tema.

Este trabalho apresenta de forma resumida a metodologia para determinação dos esforços estáticos e o procedimento apresentado na norma IEC60865-1 para a

determinação dos esforços dinâmicos em condutores flexíveis. Por fim é realizada a avaliação dos efeitos da variação de alguns parâmetros utilizados no cálculo dos esforços dinâmicos e os resultados são apresentados em forma de gráficos.

## 2 | ESFORÇOS ESTÁTICOS

A metodologia para o cálculo de esforços estáticos, resumida abaixo, é apresentada em detalhes no livro “*Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*”.

A flecha pode ser obtida a partir da expansão em série de potência do cosseno hiperbólico, considerando apenas o primeiro termo série e supondo os suportes à mesma altura:

$$f = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[ \cosh\left(\frac{m_c \cdot g \cdot a}{2 \cdot H}\right) - 1 \right] = \frac{H}{m_c \cdot g} \cdot \left[ 1 + \left(\frac{m_c \cdot g \cdot a}{2 \cdot H}\right)^2 - 1 \right] = \frac{m_c \cdot g \cdot a^2}{8 \cdot H}$$

A equação de mudança estado, responsável por determinar as trações para condições diferentes da condição inicial, é apresentada a seguir:

$$\frac{E \cdot A \cdot (a \cdot m_{c2} \cdot g)^2}{24} = H_2^2 \cdot \left[ H_2 - H_1 + \frac{E \cdot A \cdot (a \cdot m_{c1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} + E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \right]$$

## 3 | ESFORÇOS DINÂMICOS

Nesta seção são apresentadas as considerações para os cálculos dos esforços dinâmicos devidos à passagem das correntes de curto-circuito pelos condutores flexíveis da subestação. O procedimento completo de cálculo é apresentado na norma IEC 60865-1.

Primeiramente, calcula-se a força eletromagnética característica por unidade de comprimento em condutores flexíveis:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_K'')^2}{a} \cdot \frac{l_C}{V}$$

Determina-se, então, a relação entre a força eletromagnética característica “F” e a gravidade:

$$r = \frac{F'}{n \cdot m_s \cdot g}$$

A direção “ $\delta$ ” da força resultante entre o peso do condutor e a força eletromagnética característica “F” é dada por:

$$\delta_1 = \tan^{-1}(r)$$

O cálculo do período de oscilação do condutor depende da flecha no meio do vão que foi determinada no cálculo dos esforços estáticos ou pode ser calculada em função da tração estática “ $F_{st}$ ”, conforme segue:

$$f_{es} = \frac{n \ m_s \ g \ l^2}{8 \ F_{st}}$$

O período de oscilação do condutor, considerando uma flecha constante, é dado pela expressão:

$$T = 2 \ \pi$$

$$\delta_{\text{end}} = \begin{cases} \delta_1 \cdot \left[ 1 - \cos \left( 360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right) \right], & \text{para } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \cdot \delta_1, & \text{para } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases}$$

O cálculo do máximo ângulo de oscilação depende de um parâmetro “ $\chi$ ” dado por:

$$\chi =$$

$$v_1 = f \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \frac{(a_s - d) \cdot m_s'}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}}$$

O fator “v<sub>2</sub>” depende do fator “v<sub>1</sub>” calculado e pode ser obtido pela expressão:

$$v_2 = \frac{\sin(4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2 \cdot \gamma) + \sin(2 \cdot \gamma)}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}}\right) \sin^2(\gamma) -$$

$$- \frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(\gamma)}{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2} \left\{ \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}}\right) e^{-\frac{f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right.$$

$$\left. + \frac{\sin(\gamma) - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(\gamma)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right\}$$

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{3} \cdot \ln\left(\frac{\kappa - 1,02}{0,98}\right), \text{ para } \kappa \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \tan^{-1}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)$$

Se  $\kappa < 1,1$ , o valor 1,1 deve ser utilizado;

f.T<sub>pi</sub> é a solução da equação:

$$v_1 = f \cdot T_{pi} \cdot \sqrt{v_2}$$

O fator “v<sub>3</sub>” depende diretamente da relação entre a distância entre os subcondutores “a<sub>s</sub>” e o diâmetro do condutor “d” e é calculado pela equação abaixo.

$$v_3 = \frac{\frac{d}{a_s}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\frac{a_s}{d} - 1}}{\tan^{-1}\sqrt{\frac{a_s}{d} - 1}}$$

A partir dos valores calculados de “v<sub>2</sub>” e “v<sub>3</sub>” determina-se a força “F<sub>v</sub>”, relativa à passagem da corrente de curto-circuito, que representa a força de atração entre os subcondutores do *bundle*.

$$F_v = (n - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_2}{v_3}$$

Dois fatores relativos à contração do bundle são calculados: “ε<sub>st</sub>” e “ε<sub>pi</sub>”.

$$\epsilon_{st} = 1,5 \cdot \frac{F_{st} \cdot l_s^2 \cdot N}{(a_s - d)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

$$\epsilon_{pi} = 0,375 \cdot n \cdot \frac{F_v \cdot l_s^3 \cdot N}{(a_s - d)^3} \cdot \sin^3\left(\frac{180^\circ}{n}\right)$$

O parâmetro “j” determina a configuração dos subcondutores durante o curto-circuito, A partir deste cálculo é possível determinar se os condutores colidem ou se a distância entre eles é apenas reduzida sem colisão.

$$j = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi}}{1 + \epsilon_{st}}}$$

A força “F<sub>pi,d</sub>” é calculada de diferentes formas para cada uma dessas condições.

### 3.1 Caso em que há colisão – $j \geq 1$

Dois outros fatores são calculados:

$$v_4 = \frac{a_s - d}{d}$$

$$v_e = \frac{1}{2} \left[ \frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{I_k}{n} \right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left( \frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \cdot \frac{\text{sen}^4 \left( \frac{180^\circ}{n} \right)}{\xi^3} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2}$$

O valor da força de pinçamento é dado pela equação:

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left( 1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \cdot \xi \right)$$

Ressalta-se que a força “ $F_{pi,d}$ ” depende diretamente do valor do esforço estático e de um parâmetro “ $\xi$ ” que é obtido por:

$$\xi^3 + \epsilon_{st} \cdot \xi^2 - j^2 \cdot (1 + \epsilon_{st}) = 0 \quad \frac{2}{j^3} \leq \xi \leq j$$

### 3.2 Caso em que não há colisão – $j < 1$

Dois outros fatores são calculados:

$$v_4 = \eta \cdot \frac{a_s - d}{a_s - \eta \cdot (a_s - d)}$$

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[ \frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{I_k}{n} \right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left( \frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \cdot \frac{\text{sen}^4 \left( \frac{180^\circ}{n} \right)}{\eta^4} \cdot \left\{ 1 - \frac{\tan^{-1} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2}$$

O valor da força de pinçamento é dado pela expressão:

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left( 1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \cdot \eta^2 \right)$$

A força “ $F_{pi,d}$ ” para este caso também depende diretamente do valor do esforço estático e de um parâmetro “ $\eta$ ”, que pode ser obtido pelas expressões a seguir:

$$\eta^3 + \epsilon_{st} \cdot \eta - j^2 \cdot (1 + \epsilon_{st}) \cdot f_n = 0$$

$$0 \leq \eta \leq 1$$

Para determinação de “ $f_n$ ” a sequência de expressões abaixo deve ser utilizada:

$$f_n = \frac{v_3}{\frac{a_{sw}}{a_s}}$$

$$\frac{a_{sw}}{a_s} = \frac{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{\sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}}}{\tan^{-1} \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}}}$$

$$2 \cdot \frac{y_a}{a_s} = 1 - \eta \cdot \left(1 - \frac{d}{a_s}\right)$$

## 4 | RESULTADOS

Este item apresenta a análise de sensibilidade dos resultados para os esforços dinâmicos considerando a variação de alguns dos parâmetros envolvidos no cálculo.

Consideraram-se, de forma geral, os seguintes dados: cadeias de isoladores de 300 kg (500 kV) e 65 kg (138 kV), com 6 m (500 kV) e 2,75 m (138 kV), flecha de 3,5% para ambas as classes de tensão, constante S de 650000 N/m (500 kV) e 75000 N/m (138 kV), corrente de curto-circuito de 63 kA (500 kV) e 31,5 kA (138 kV), espaçamento entre subcondutores de 0,457 m (500 kV) e 0,2 m (138 kV), distância entre fases de 8,0 m (500 kV) e 3 m (138 kV) e 3 espaçadores no vão para os vãos de ambos os setores. Para o setor de 500 kV foram considerados quatro condutores Rail 954 MCM por fase e para o setor de 138 kV foram considerados dois condutores Oriole 336,4 MCM por fase.

### 4.1 Variação do comprimento do vão

Os gráficos a seguir apresentam os resultados para diferentes comprimentos de vãos.

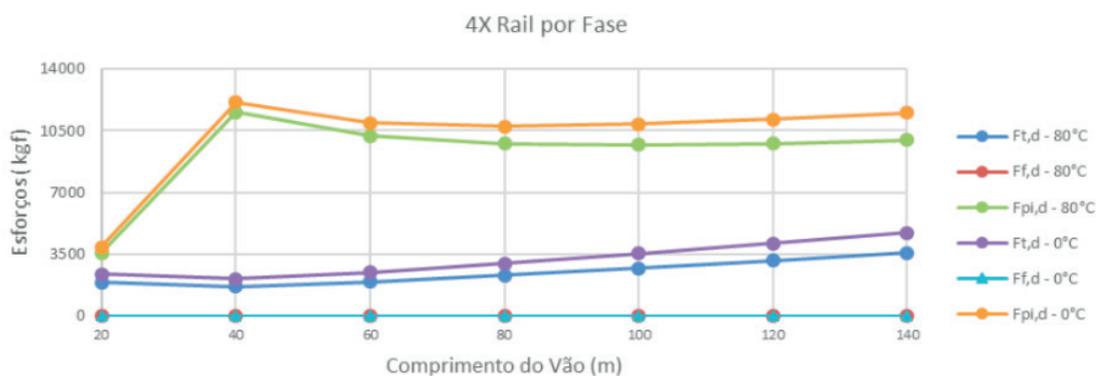


FIGURA 1 – Variação do comprimento do vão.

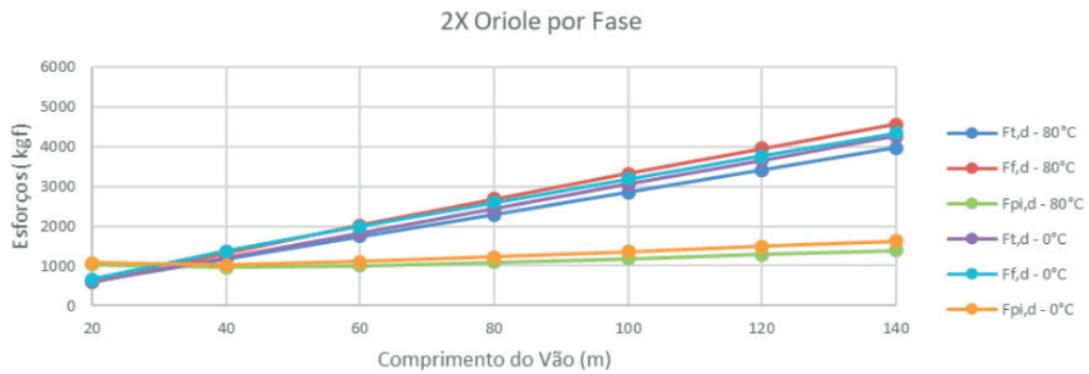


FIGURA 2 – Variação do comprimento do vão.

Para os condutores Rail, observa-se que, para o tempo de duração do curto-circuito utilizado, o efeito da força  $F_{f,d}$  é desconsiderado. A força  $F_{t,d}$  acompanha o efeito observado para as forças estáticas e aumenta com o aumento do comprimento do vão. A força  $F_{pi,d}$  apresenta um pico por volta dos 40 metros de comprimento e, para comprimentos superiores, é reduzida. Observa-se que a força de *pinch* para um vão de 40 metros de comprimento é praticamente idêntica à força de *pinch* para um vão de 140 metros. Para o cabo Oriole observa-se que tanto  $F_{t,d}$  quanto  $F_{f,d}$  aumentam de acordo com o aumento do comprimento do vão. A força  $F_{pi,d}$ , apesar de aumentar, é bem menos influenciada pelo comprimento do vão. Ressalta-se que o número de espaçadores foi mantido constante para todos os casos analisados.

#### 4.2 Variação do condutor utilizado

Para este caso, considerou-se um vão de 40 metros e um vão de 90 metros. Os seguintes condutores foram analisados:

Diâmetro do condutor em [cm]**														
2.7	2.8	2.9	3.0	3.0	3.3	3.4	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	4.4	4.5	4.6

\*\*Os condutores com mesmo diâmetro possuem características físicas diferentes

Tabela 1 – Condutores utilizados.

Os gráficos a seguir apresentam os resultados para diferentes comprimentos de vãos.

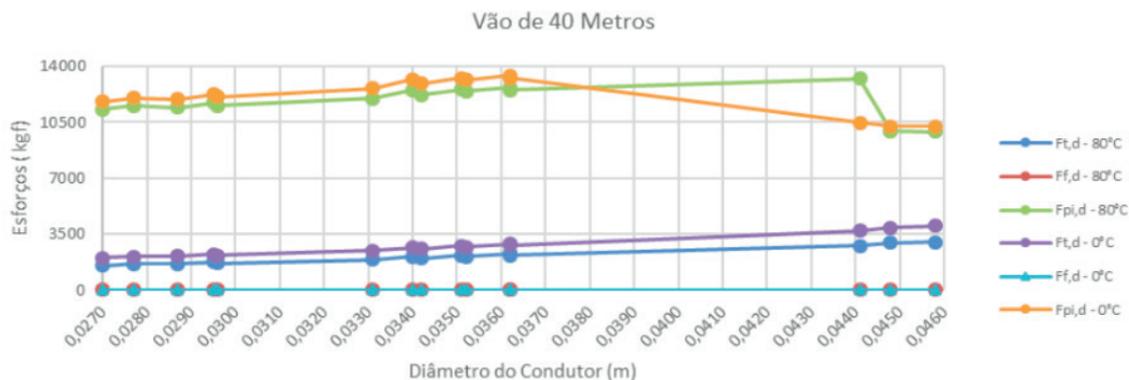


FIGURA 3 – Variação dos condutores utilizados – vão 40 metros.



FIGURA 4 – Variação dos condutores utilizados – vão 90 metros.

Tanto a força  $F_{t,d}$  quanto a força  $F_{pi,d}$  são afetadas pela variação da bitola do condutor utilizado sendo que, para o menor vão, o efeito da variação do condutor é bem menos pronunciado. Como o número de espaçadores manteve-se inalterado, observa-se para o vão menor que, para os condutores com maior bitola, não há colisão efetiva destes, ocorrendo, portanto, redução dos valores de  $F_{pi,d}$ . O mesmo efeito não é observado para o vão de 90 metros.

### 4.3 Variação da flecha adotada

Para este caso, novamente adotaram-se os vão de 40 metros e 90 metros, considerando condutores Oriole e Rail, respectivamente, conforme utilizado no item 4.1.

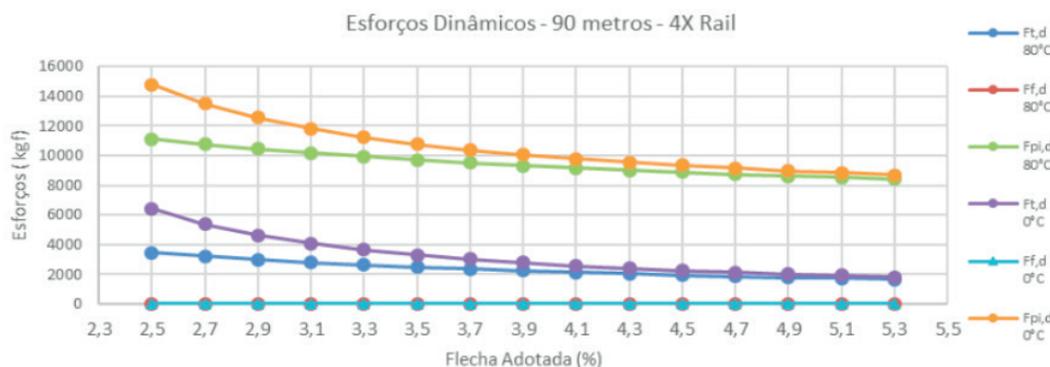


FIGURA 5 – Esforços dinâmicos – 90 metros – 4X Rail por fase.

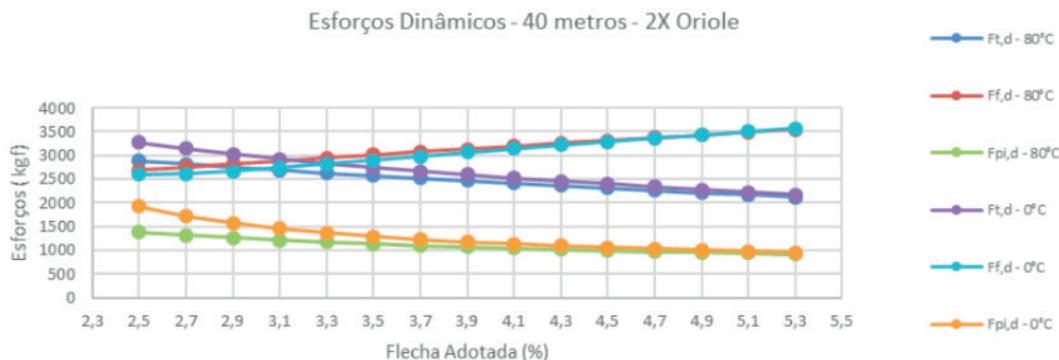


FIGURA 6 – Esforços dinâmicos – 40 metros – 2X Oriole por fase.

Com relação aos esforços dinâmicos, observa-se redução dos valores de  $F_{t,d}$  e  $F_{pi,d}$  com a redução dos valores dos esforços estáticos (flechas maiores implicam esforços estáticos menores), o que é natural, uma vez que há uma dependência direta dos valores dos esforços estáticos. Entretanto, observa-se que o valor de  $F_{f,d}$  aumenta com o aumento da flecha. Isso se dá devido ao fato de que um condutor mais leve e com uma flecha maior acaba oscilando mais (maiores ângulos de oscilação). Apesar da tração inicial ser menor, o efeito da força de *drop-back* acaba sendo maximizado devido aos maiores ângulos de oscilação.

#### 4.4 Variação do número de espaçadores

A figura abaixo apresenta o comportamento dos esforços dinâmicos para a variação do número de espaçadores. Considerou-se um vão de 90 metros para a análise com 4 condutores Rail por fase.

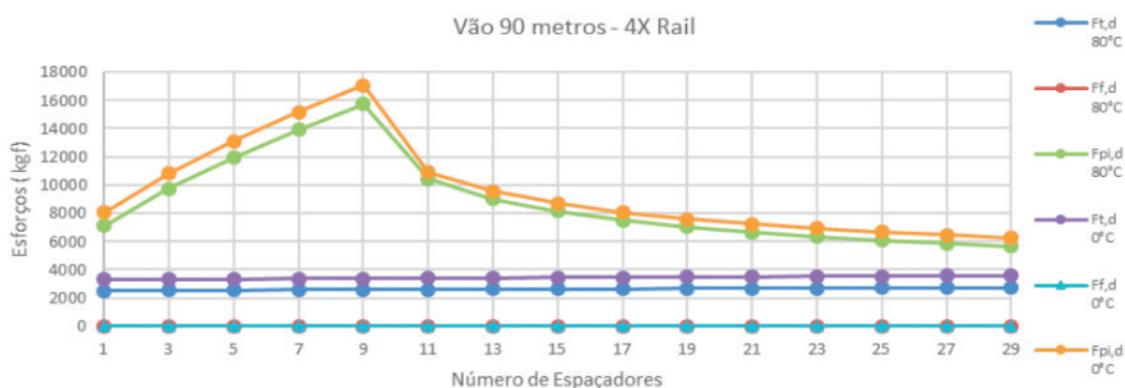


FIGURA 7 – Esforços dinâmicos – Variação do número de espaçadores.

O número de espaçadores influencia diretamente os esforços de *pinch*, conforme pode ser observado na figura acima. Há um valor a partir do qual os condutores deixam de colidir efetivamente e o resultado do esforço cai drasticamente. Em algumas memórias de cálculo analisadas ao longo dos anos de trabalho e durante a pesquisa para o mestrado,

observou-se que é comum aumentar ou reduzir o número de espaçadores no vão para reduzir os esforços de *pinch*. Os esforços devidos ao balanço e ao *drop-back* praticamente não são afetados.

## 5 | CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho é sensibilizar o leitor com relação às grandezas envolvidas no cálculo de esforços dinâmicos em subestações isoladas a ar.

Observou-se ao longo dos anos de trabalho em consultoria que, apesar do tema possuir diretrizes e normas para cálculo, estas não têm sido aplicadas de forma adequada pelas empresas no território nacional. Vários foram os memoriais de cálculo analisados nesse período cujo conteúdo apresentava erros na aplicação das equações e, em muitos dos casos, erros na aplicação dos conceitos envolvidos. Esse fato poderia resultar em estruturas subdimensionadas que colocariam em risco a integridade da instalação e, conseqüentemente, do sistema da região ou poderia resultar em estruturas sobredimensionadas que aumentariam os custos envolvidos na construção da subestação.

Ressalta-se a necessidade de que esforços sejam feitos no sentido de padronizar e estabelecer uma forma de se considerar ou não os esforços dinâmicos no dimensionamento de estruturas de subestações isoladas a ar no país. Existem divergência sobre o assunto entre projetistas, consultorias e fabricantes.

## REFERÊNCIAS

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects. 3 ed. Genebra, 2015.

KIESSLING, F. et al. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. 1. ed (em inglês). Berlin: Springer-Verlag, 2003. 759 p.

SILVA, R. F.; et al. Comparação dos Resultados Obtidos para os Esforços Devidos ao Efeito da Passagem de Correntes de Curto-Circuito em Barramentos Flexíveis de Subestações Isoladas a Ar Simultaneamente à Ação dos Ventos, Segundo as Normas NBR 5422, NBR 6123 e da NBR 8681. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 24, 2017, Curitiba.

SILVA, R. F.; Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com Barramentos Flexíveis. 2018, 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

## ESTUDO E SIMULAÇÃO DE PROTEÇÃO DE ZONA MORTA EM SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

**Rodrigo Niederauer da Silva**

CEEE-GT

Porto Alegre – RS

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a resposta da proteção para curtos-circuitos em zona morta de proteção, região entre o DJ e o TP na LT CIN C1 na SE NSR, onde faltas nesse ponto são eliminadas por retaguarda remota, através do relé de distância em tempos de segunda zona, não atendendo o procedimento de rede do ONS e a portaria do MME em tempos atuais. Dessa forma será avaliada faltas nessa zona, através da modelagem da LT no *software ATPDraw*, e posterior modelagem do relé de proteção de zona morta, demonstrando os benefícios da inclusão dessa proteção e servindo de base para estudos e simulações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Zona morta de proteção, curto-circuito, relé de distância, relé diferencial, *ATPDraw*.

### STUDY AND SIMULATION OF DEAD ZONE PROTECTION IN ELECTRICITY TRANSMISSION SUBSTATION

**ABSTRACT:** This work presents the protection response for short circuits in protection dead zone, region between the DJ and the TP on the LT CIN C1 on the SE NSR, where faults at that point are eliminated by remote rear, through the distance relay in second zone times, not following the ONS network procedure and the MME ordinance in current times. In this way, faults in this zone will be evaluated, through the modeling of the LT in the *ATPDraw* software, and later modeling of the dead zone protection relay, demonstrating the benefits of including this protection and serving as a basis for studies and simulations.

**KEYWORDS:** Dead protection zone, short circuit, distance relay, differential relay, *ATPDraw*.

### 1 | INTRODUÇÃO

Certas faltas podem ocorrer em zonas críticas conforme a configuração e disposição das chaves e disjuntores em uma subestação de energia, de modo que os dispositivos de proteção podem não detectar ou identificar

esses defeitos, não o isolando de forma correta, deixando o sistema elétrico vulnerável, podendo levar a interrupções no fornecimento de um número maior de consumidores ou ainda a maiores danos nos equipamentos das subestações e nas linhas de transmissão.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo investigar faltas na zona morta de proteção, região entre o transformador de corrente (TC) e o disjuntor (DJ), na subestação Nova Santa Rita (NSR), parte de 230 kV, na LT Cidade Industrial (CIN) Circuito (C) 1. No primeiro momento será modelado os relés 21 em ambos os lados da LT e 87B adaptado à somente essa LT, simulando situações de curtos-circuitos em toda extensão da LT, até o ponto de zona morta de proteção, após esta etapa validar a modelagem com os valores de Curtos-circuitos já modelados no *software ASPEN OneLiner* pela CEEE-GT. Com isso analisar o comportamento dos relés de distância a essas faltas com as proteções já existentes e depois com a inclusão de proteção de zona morta, visto que nesta SE não dispõe da mesma nos módulos de 230 kV. A modelagem será através do *software Alternative Transient Program (ATPDraw)*, utilizando-se de recursos atuais de fabricantes de relés.

Esse trabalho se baseia nos requisitos mínimos que devem ter os sistemas de proteção em subestações da rede básica que consta no módulo 2 do procedimento de rede do ONS e na portaria do Ministério de Minas e Energia (MME) de nº 576, de 31 de outubro de 2012, onde ditam que todos os componentes da instalação devem possuir funções de proteção unitárias, com sobreposição de zonas ou lógicas adicionais para zonas mortas e se todas as faltas na instalação são eliminadas por atuação de proteções unitárias, sem necessidade de atuação das proteções de retaguarda remota. [1; 2].

## 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A proteção de barramento e linhas de transmissão podem incluir esquemas especiais para eliminar faltas em zona morta através de *trips* seletivos aos DJs localizados nas zonas adjacentes, onde falhas entre TCs e DJs são falhas de linha observadas pela medição, mas são falhas de barramento no ponto de vista do local da falha, devido os sistemas de proteção não distinguem a diferença quando o DJ está fechado e em condições normais de operação não podem ser extintas instantaneamente quando o DJ da zona de defeito está aberto. [3].

Para o caso em que o TC está entre o barramento e o DJ e a falta está no ponto marcado conforme Figura 1 - (a) o referido DJ será aberto pela proteção de linha e a falta vai persistir devido ainda estar sendo alimentada pelo barramento e fora da zona de proteção do mesmo. Uma solução para extinção da falta é confiar na função BF, onde é iniciada a partir da abertura do DJ e como continuará passando a corrente de falta pelo TC, o tempo programado expira e manda *trip* para todos os DJs da zona do barramento. Essa aplicação do BF requer que o mecanismo de medição do relé verifique o sinal de

corrente e não somente o sinal de posição do DJ. [3].

Uma segunda solução é alterar o limite da zona, ou seja, removendo a corrente do TC-2 da zona de medição da proteção diferencial do barramento quando o DJ se abre, conforme a Figura 1 - (b), colocando um atraso de 2 ciclos para permitir que as medições de corrente do 87B sejam redefinidas logo que a própria corrente sair dos cálculos, expandindo assim a zona do barramento até os polos abertos do DJ, sendo uma solução moderna, permitindo que o relé de 87B atue após aberto o DJ da LT, como mostra a Figura 1 - (c). Esse esquema de expansão da zona do barramento até o DJ aberto é equiparado à função BF, com diferença que se a falha ocorrer e o DJ estiver aberto, terá um pequeno atraso em relação ao BF, e contida na zona do barramento, independente dos elementos de linha e do relé da função BF. Importante ressaltar é o atraso extra na eliminação da falta, que além do tempo de abertura do DJ, tem o atraso da lógica; e que a medição de corrente do TC-2 deve ser automaticamente incluída nos cálculos do diferencial instantes antes que o DJ seja fechado, com auxílio de supervisão de comando do DJ. [3; 5].

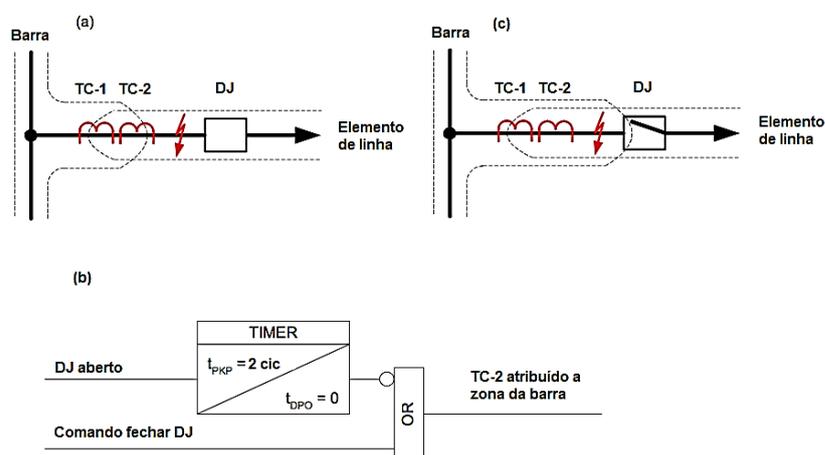


Figura 1 - Considerando TC no lado da barra. [3]

A Figura 2, mostra como na Figura 1, como funciona a expansão e atuação do 87B. Como o 87B verifica se há diferença de corrente entre o e a soma das demais correntes , e , enquanto estiver na soma dos cálculos a corrente no TC-2, medindo a corrente de defeito, não vai haver diferença, mas quando retira dos cálculos do diferencial , vai ser diferente da soma de , pois a corrente de defeito ainda está no . Dessa forma o 87B manda *trip* para os DJ 52-1, 52-2, 52-3, eliminando as possíveis fontes de tensão do barramento.

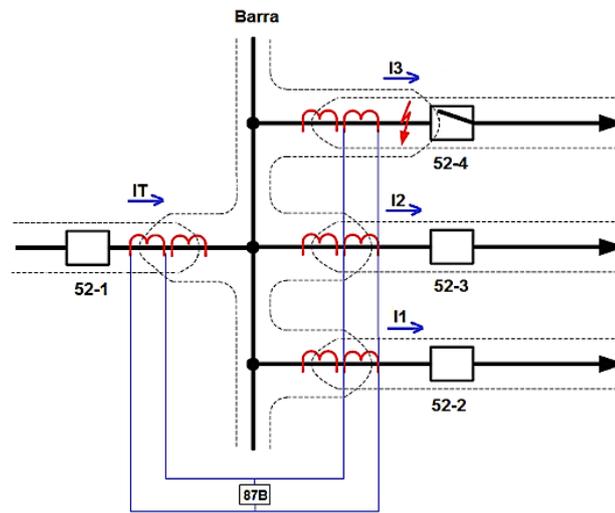


Figura 2 - Expansão da zona do barramento com TC no lado da barra  
Elaborado pelo autor.

Outra forma é aplicar a mesma lógica da Figura 1 - (b) no relé de linha, usando uma função de sobrecorrente instantânea que supervisiona a corrente do TC-1, que percebendo corrente com DJ aberto manda *trip* para todos os DJs do barramento. [3].

Quando instalado o TC somente no lado da LT, a falha entre TC e o DJ, ver Figura 3 - (a) e Figura 3 - (c), não terá atraso pela proteção do barramento, pois a falha agora está na zona do mesmo, sendo removida como tal, através de disparo da função BF, iniciado pela proteção de barras, semelhante ao caso do TC do lado do barramento já mencionado, não sendo seletivo, porque os DJs do barramento são todos abertos, sendo que o ideal que esse defeito não desse *trip* aos elementos que não estão com falha. Como o defeito está na zona morta a falha vai permanecer e só será extinguida em tempos de segunda zona pelo 21 remoto, como já comentado, salvo se o relé diferencial dispor de função específica para esse tipo de defeito. A exemplo de relés 87B atuais que incluem a função *End fault protection (EFP)*, que ao detectar que o DJ está aberto, supervisiona com um relé de sobrecorrente a corrente ainda passante entre o TC e o DJ, ver Figura 3 - (b), em caso positivo, a proteção atua disparando um TDD para a extremidade remota do circuito; e logo desabilitada a função assim que receba comando de fechamento do DJ.

Esse método também pode ser útil quando o circuito apresenta um gerador, detectando o defeito e desconectando-o do sistema, mostrando que o defeito não é no mesmo e sim na zona morta, deixando o gerador apto para entrar em serviço logo que falta seja removida. De forma diferente o relé de linha com função de sobrecorrente, supervisiona o defeito entre TC e o DJ e acionam o BF, disparando tanto os DJs dos módulos ligados ao barramento e também os remotos. A vantagem é que a magnitude da falha não tem grandes proporções, pois é removida rapidamente; mas a seletividade desse sistema de proteção ainda não é o ideal, mas aceitável, mesmo que o 87B desligue todos os DJs ligados ao barramento para um defeito de linha, visto que estudos do sistema apresentam

raridade para faltas em zona morta, mas não devendo ser desconsiderados. [3; 5].

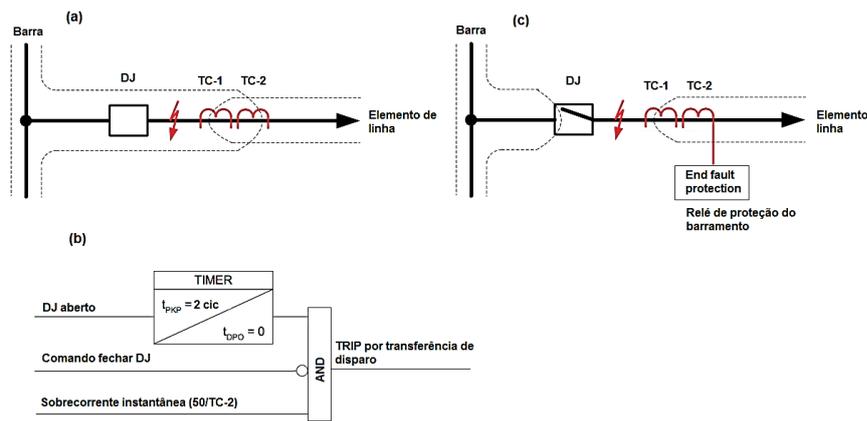


Figura 3 - Considerando TC somente no lado da linha. [3].

### 3 | METODOLOGIA

Nesta seção apresenta a simulação, através da modelagem no *software ATPDraw*, de faltas na LT até a sua zona morta de proteção, demonstrando a dinâmica das proteções de distância e de diferencial do barramento, no início a proteção com sua configuração original e depois com inclusão de proteção de zona morta. A metodologia para alcançar o objetivo deste trabalho, se dará a partir de procedimentos, coletas de dados e técnicas de análise conforme o fluxograma da Figura 4.

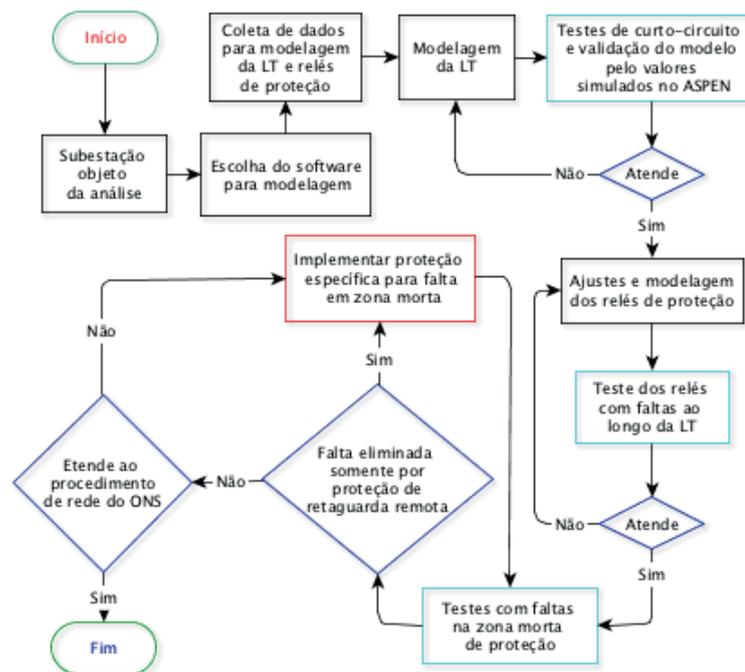


Figura 4 - Fluxograma da metodologia.

Elaborado pelo autor.

### 3.1 Sistema de proteção da LT CIN C1 e ponto de zona morta

A LT CIN C1 assim como os demais circuitos de responsabilidade da CEEE-GT na SE NSR dispõe de relés 21, 21N, 27, 59, 62 BF, 67N, 79, 85, *SOTF* e 87L, com configuração de TCs após o DJ.

A Figura 5 apresenta uma falta na zona morta na LT CIN C1 em NSR, onde a corrente de curto-circuito está com potência total, sendo fornecida pela contribuição de NSR e CIN.

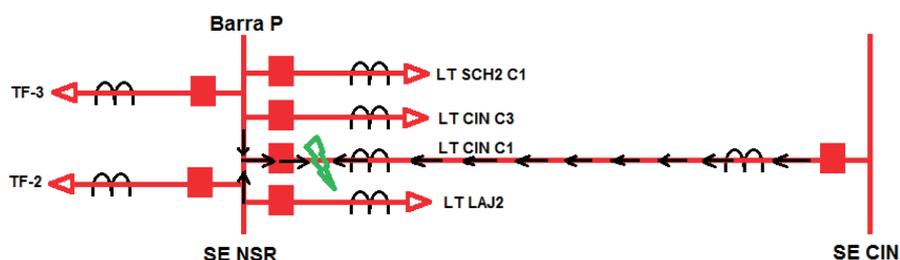


Figura 5 - Falta em zona morta na LT CIN C1 na SE NSR.

Elaborado pelo autor

Instantes após o início da falta, como está na zona do diferencial, 87B, ocorre disparo de todos os disjuntores ligados à barra P de 230 kV, com tempos aproximados na ordem de 70 ms, ou seja, 1 ciclo da atuação do diferencial e mais 3 ciclos para abertura dos DJs.

Na Figura 6, apresenta a configuração após atuação do diferencial, com todos DJs desligados da barra P de 230 kV em NSR, onde a falta se mantém pelo lado remoto, SE CIN, até a atuação do relé de distância em segunda zona, na ordem de 300 ms mais o tempo de disparo do DJ e extinção total da falta, próximos de 350 ms.

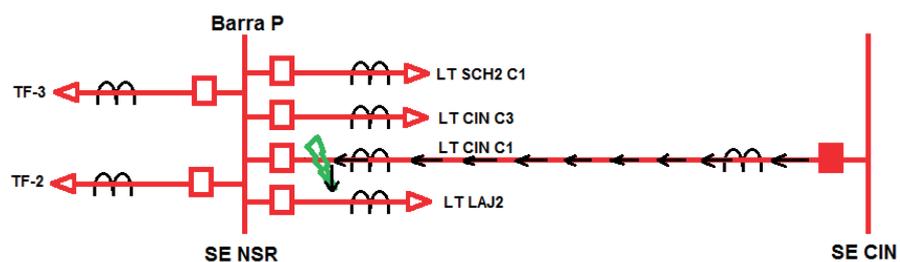


Figura 6 - Falta em zona morta na LT CIN C1 após atuação do 87B.

Elaborado pelo autor

### 3.2 Módulo de proteção lado de NSR modelado no ATPDraw

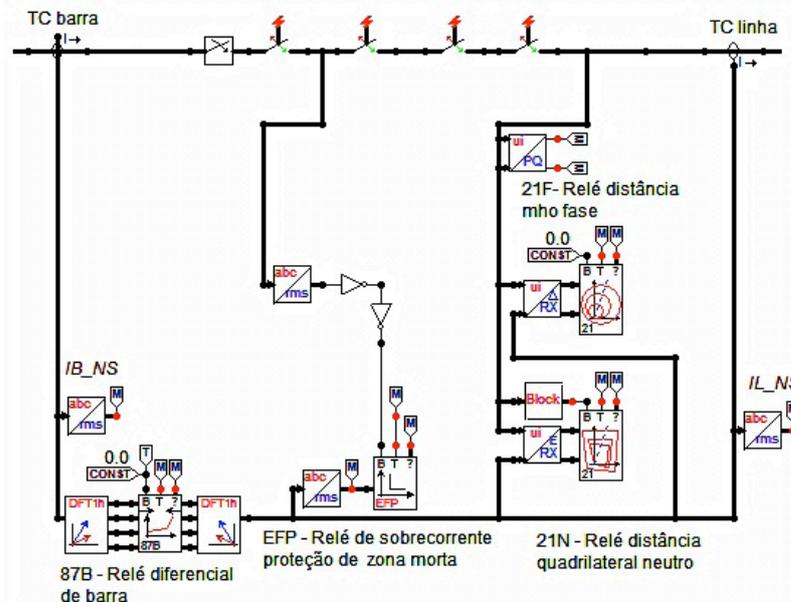


Figura 7 - Sistema de proteção modelado no lado de NSR.

Elaborado pelo autor

No lado da SE CIN foram modelados somente os relés 21F e 21N, a fim de simular a atuação desses relés nas faltas ao longo da LT até a zona morta em NSR.

#### 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes da proteção de distância, do diferencial de barras e do *EFP*. Os testes realizados foram em toda extensão da LT até a zona morta para diferentes tipos de falta, a fim de validar o modelo e verificar as vantagens do uso do relé diferencial com *EFP*.

Os testes realizados foram todos com falta a partir de  $t = 50\text{ms}$ , a fim de identificar da melhor forma nos gráficos o início dos *trips* e correntes de falta.

##### 4.1 Curtos-circuitos na linha de transmissão

A Figura 8 apresenta falta trifásica em 16,33% da LT CIN em NSR e 83,33% da LT NSR C1 em CIN.

Nota-se que as impedâncias de falta vistas pelo relé 21F do lado de NSR no momento da falta saem da zona de impedância de carga do sistema para a impedância linha, com *trip* em zona 1 no lado da SE NSR, e em zona 2 no lado da SE CIN.

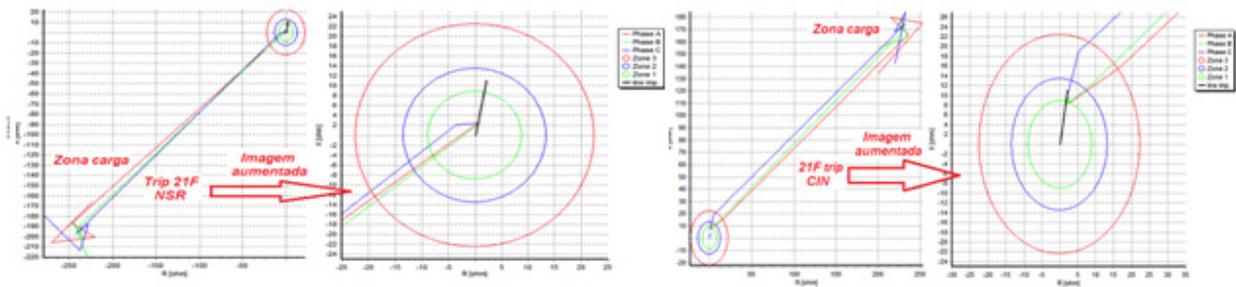


Figura 8 - Curto-circuito trifásico aplicado na LT.

Elaborado pelo autor

A Figura 9 apresenta curto-circuito monofásico a terra franco em 16,33% da linha a partir de NSR e a 83,33% do terminal da CIN, onde atua zona 1 no lado de NSR e em zona 2 no lado da SE CIN.

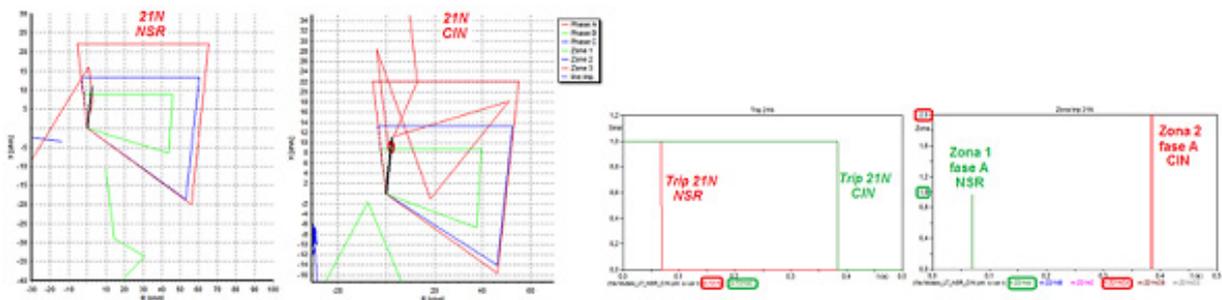


Figura 9 - Atuação dos relés 21N nos dois terminais com indicação de zona.

Elaborado pelo autor

#### 4.1.1 Resumo dos testes ao longo da LT

A Tabela 1 resume todos os testes realizados ao longo da LT para diferentes tipos de falta, indicando qual o relé que sensibilizou e os tempos de *trip*. Uma observação importante na mesma tabela é que deve-se considerar o tempo em que os relés perceberam a falta e realizaram o *trip*, não o tempo de extinção das faltas, pois serão acrescentados há esse tempo um tempo médio de abertura dos DJs de 50 ms.

Tipo de falta	Trip relé	Lado	1º zona - t (ms)				2º zona - t (ms)	
			16,67%	33,33%	50%	66,67%	83,33%	100%
			3,75km	7,5 km	11,25km	15km	18,75km	22,5km
a-g	21N	NSR	18,52	20,61	22,70	24,79	312,70	314,80
		CIN	16,43	20,61	21,61	45,69	333,60	337,80
ab	21F	NSR	16,43	18,52	20,61	23,40	316,20	316,30
		CIN	15,40	20,63	32,70	32,70	312,70	314,80
ab-g	21N	NSR	14,34	14,34	16,43	22,70	312,70	314,81
		CIN	16,42	12,25	32,70	34,79	312,58	312,60
abc	21F	NSR	16,43	18,52	20,61	22,69	311,20	313,30
		CIN	26,43	30,61	32,70	32,70	312,70	314,80

Tabela 1 - Tempos de *trip* para diferentes tipos de falta

Elaborado pelo autor

## 4.2 Curtos-circuitos na zona morta em NSR

Nesta subseção apresentará as simulações de faltas na zona morta de proteção na LT CIN C1 em NSR. Primeiro sem a proteção *EFP* e depois com a inclusão dessa.

### 4.2.1 Sem proteção de zona morta

A Figura 10 apresenta a simulação de falta monofásica na fase b na zona morta de proteção, com medição das correntes no lado da barra e da linha, onde no início da falta o curto-circuito é alto devido ao transitório e a influência das fontes de tensão nos dois lados do circuito. Assim que ocorre o *trip* pelo 87B e o DJ é desligado, o nível de curto-circuito reduz devido já ter passado o transitório e também devido à fonte de tensão ficar só pelo lado da SE CIN, onde se mantém o curto-circuito até operar o 21N em zona 2.

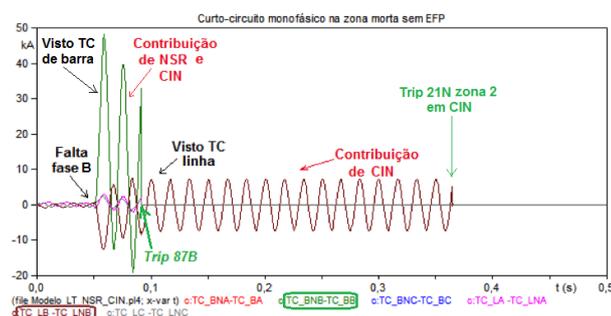


Figura 10 - Curto-circuito monofásico na fase b na zona morta.

Elaborado pelo autor.

Enquanto as correntes que entram pelo TC de barra e saem pelo TC de linha ou vice-versa são praticamente iguais em módulo e fase não ocorre *trip* do 87B, essas correntes percorrem juntas como pode ser percebido na Figura 11 as fases a e c, e quando ocorre

a falta, que nesse caso foi na fase b, esse corrente destoa e insiste na zona de *trip*.

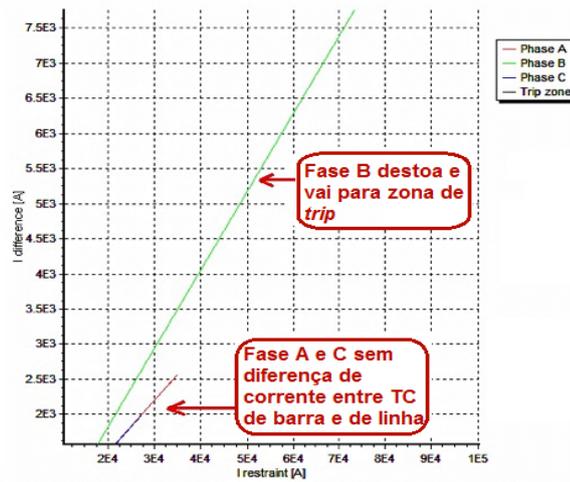


Figura 11 - Corrente diferencial vista pelo 87B.

Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2 Com proteção de zona morta

A Figura 12 apresenta a simulação de falta monofásica na fase a na zona morta de proteção, onde também há atuação do 87B devido à falta ser do lado do barramento, e no mesmo instante o relé de sobrecorrente instantâneo percebe que ainda há corrente passando no TC de linha, atingindo sua corrente de *pick-up* e disparando o DJ remoto na SE CIN, eliminando a fonte de alimentação do defeito antes da atuação dos relés 21.

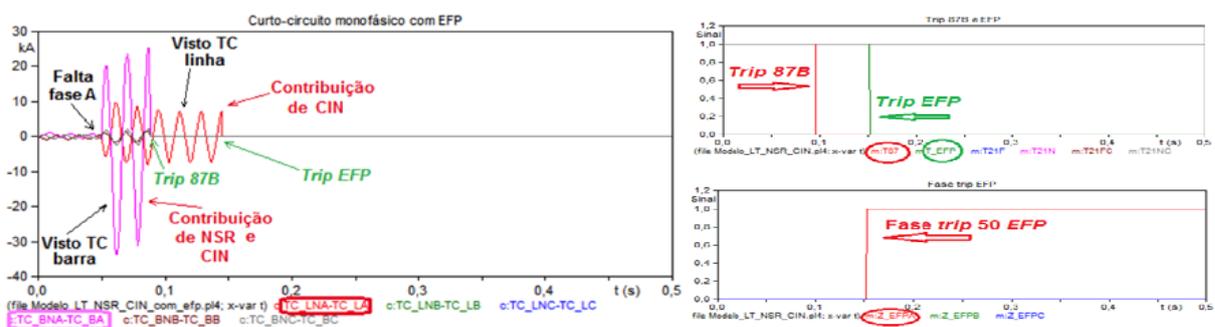


Figura 12 - Curto-circuito monofásico na fase a na zona morta.

Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a corrente atingindo os níveis de *pick-up* do relé de sobrecorrente, onde em 10 ms a corrente está próxima de 500 A, ainda abaixo da corrente máxima de projeto da LT.

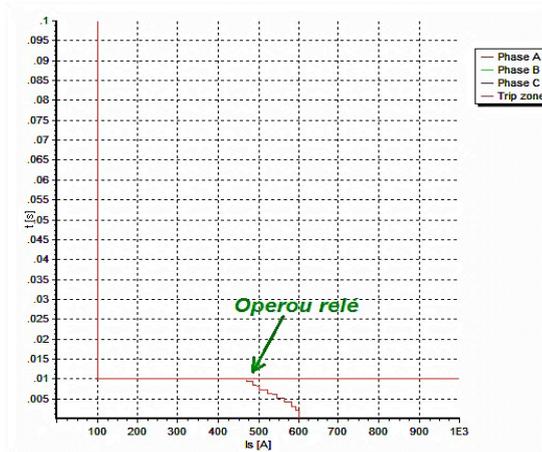


Figura 13 - Atuação do relé 50 *EFP*.

Elaborado pelo autor.

As simulações para diferentes tipos de falta na zona morta são mostradas na Tabela 2, agora com ganho de tempo de extinção total da falta em metade do tempo de zona 2 do relé 21, e diferente do sistema de proteção sem *EFP*, mesmo com resistência de falta o *trip* ocorre. Testes com valores de 450 ohms de resistência de falta foram realizadas para verificar a eficácia do sistema, sempre ocorrendo o *trip* do DJ remoto na SE CIN.

Tipo de Falta		t (ms)
abc	S/Rf	128,5
ab-g	S/Rf	133,7
bc	S/Rf	131,6
a-g	S/Rf	119,1
	C/Rf 80Ω	101,2

Tabela 2 - Tempos de extinção total do curto-circuito com *EFP*

Elaborado pelo autor.

A Figura 14 apresenta um comparativo de tempos de extinção das faltas em zona morta com em sem o sistema *EFP*.

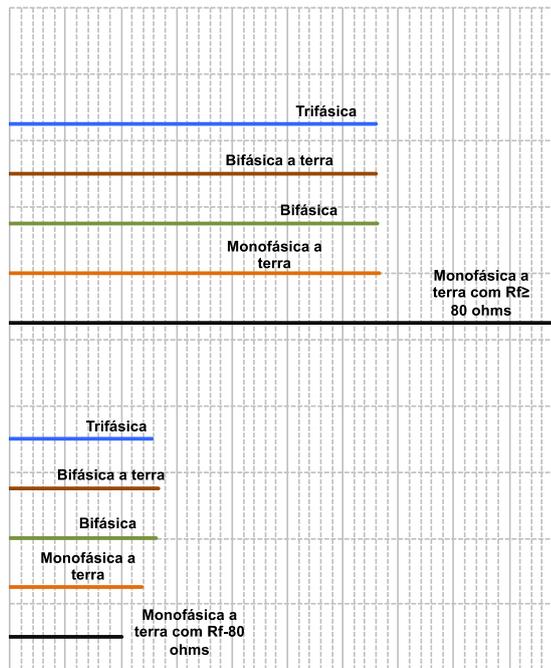


Figura 14 - Comparativo de tempos de extinção de faltas na zona morta.  
Elaborado pelo autor.

## 5 | CONCLUSÃO

Em virtude do que foi mencionado de modo geral, considera-se as seguintes vantagens do sistema de proteção *EFP* verificado nas simulações:

- atua extinguindo o curto-circuito em menos do que a metade do tempo de segunda zona dos relés de distância de retaguarda remota;
- atende aos requisitos mínimos que o ONS define para os sistemas de proteção, não dependendo de proteção de retaguarda remota;
- identifica o módulo e a fase envolvida no defeito, tornando mais eficiente as atitudes a serem tomadas pelas equipes de operação e manutenção no restabelecimento das LTs conectadas ao barramento;
- evita problemas maiores caso a resistência de falta seja alta e não atue os relés de distância remotos.

A viabilidade da troca do relé diferencial de barras na SE NSR, parte de 230 kV, assim como em outros casos de subestações sem esse tipo de proteção, tens que avaliar o custo do relé e seus periféricos, desde os transformadores de instrumentos até a sala de comando, custo com equipes trabalhando, a necessidade de desligamentos, onde a soma disso tudo, comparar com índice provável de acontecer uma falha nessas zonas mortas e o custo caso haja a falta em multas por não cumprir a normativa imposta pelo

procedimento de rede, considerando ainda a adição de LTs novas ao barramento, visto que a subestação está projetada para incorporar módulos futuros, considerando também não o impacto financeiro por final, mas sim o impacto a sociedade com possíveis faltas de energia elétrica.

A pesquisa e posterior modelagem e simulação demonstrou uma solução para faltas em zona morta, ampliando a compreensão, atingindo o que foi proposto nesse estudo, demonstrando também que faltas em zona morta inevitavelmente faz atuar o relé o diferencial, desligando todos os módulos conectados a esse, acredita-se que a pesquisa vai levar num futuro próximo a algoritmos incorporados a relés, que vão identificar a falta nessa zona antes da atuação do 87B.

## REFERÊNCIAS

(1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. Rev 2. [S.l.], 2011. Disponível em: <[http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/01C17A75ACE6C74383257945005D54F4/\\$file/Submódulo%202.6\\_Rev\\_2.0.pdf?openelement](http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/01C17A75ACE6C74383257945005D54F4/$file/Submódulo%202.6_Rev_2.0.pdf?openelement)>. Acesso em: 25 ago. 2016.

(2) BRASIL. Ministério de Minas e Energia ( MME). **Portaria nº 576, de 31 de outubro de 2012**. Anexo: Protocolo de avaliação dos sistemas de proteção, item: 7.9.8. Requisitos Gerais de Operação . Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139125/CMSE\\_-\\_Ata\\_da\\_120x\\_Reuniao\\_xExtraordinaria\\_x31-10-2012x.pdf/a7c2d6c6-dffd-465c-944e-9c2de3f0cf52](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139125/CMSE_-_Ata_da_120x_Reuniao_xExtraordinaria_x31-10-2012x.pdf/a7c2d6c6-dffd-465c-944e-9c2de3f0cf52)>. Acesso em: 25 ago. 2016.

(3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses**. Nova York: IEEE, 6 nov. 2009. Documento em pdf.

(4) MYSORE, Pratap; HDR, Inc. Introduction to Power System Protection. **IEEE Twin Cities Workshop**. [S.l.], Abr. 2015. Disponível em: <[https://www.google.com.br/?gfe\\_rd=cr&ei=JE4KWODuMa3L8geE37HAAQ&gws\\_rd=ssl#q=IEEE+Twin+Cities+Workshop+April+17%2C+2015+Pratap+Mysore%2C+P.E.%2C+HDR%2C+Minneapolis%2C+MN](https://www.google.com.br/?gfe_rd=cr&ei=JE4KWODuMa3L8geE37HAAQ&gws_rd=ssl#q=IEEE+Twin+Cities+Workshop+April+17%2C+2015+Pratap+Mysore%2C+P.E.%2C+HDR%2C+Minneapolis%2C+MN)>. Acesso em: 18 set. 2016.

(5) RUSH, Peter. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. Coordenação da tradução de José Antonio Jardim. 1. ed. São Paulo: Editora Blücher: Schneider, 2011. Livro eletrônico.

## ELETROENCEFALÓGRAFO DE BAIXO CUSTO: CONCEITOS E PROJETO

Data de aceite: 01/06/2020

### Vitor Nestro Rauffmann

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.  
Eng. Elétrica, Joinville-SC

### Pedro Bertemes Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.  
Eng. Elétrica, Joinville-SC

**RESUMO:** O objetivo deste capítulo é elucidar alguns conceitos envolvidos na medição de sinais biopotenciais da cabeça, como o posicionamento de eletrodos, a aquisição do sinal e os artefatos envolvidos, para que, a partir dessa revisão, se possa desenvolver um eletroencefalógrafo com baixo custo, utilizando como base do dispositivo, o circuito integrado ADS1299. A medição de sinais de eletroencefalograma tem grande importância na medicina, pois ajuda na investigação de atividades comportamentais de seres humanos e também no diagnóstico de doenças como, por exemplo, a epilepsia ou o acidente vascular cerebral. A implementação desse projeto pode ser realizada com conhecimentos básicos de eletrônica, afinidade com algum *software* de prototipagem de placas e domínio de algum microcontrolador juntamente com sua linguagem de programação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biopotenciais, Eletroencefalografia, ADS1299, Projeto Baixo Custo.

**ABSTRACT:** The objective of this chapter is to elucidate some concepts involved in the measurement of biopotential signals from human head, such as the positioning of electrodes, the acquisition of the signal and the artifacts involved, so that, from this review, a low-cost electroencephalograph can be developed, using the ADS1299 integrated circuit as the base of the device. The measurement of electroencephalogram signals is of great importance in medicine, as it helps in the investigation of behavioral activities of human beings and also in the diagnosis of diseases such as epilepsy or stroke. The implementation of this type of project can be carried out with basic knowledge of electronics, affinity with some prototyping software for boards and mastery of some microcontroller along with its programming language.

**KEYWORDS:** Biopotentials, Electroencephalography, ADS1299, Low Cost Project

## 1 | INTRODUÇÃO

A aquisição de sinais bioelétricos se mostram essenciais para diversos exames da área da saúde, como o eletrocardiograma (ECG), o eletromiograma (EMG), o eletrooculograma (EOG) e o eletroencefalograma (EEG), sendo este último, a abordagem principal deste trabalho. Para o entendimento da origem dos sinais medidos no EEG, que essencialmente é composto pelos sinais elétricos medidos na região craniana, se faz necessário o aprofundamento de alguns conhecimentos relacionados com o sistema nervoso e o cérebro (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016).

### 1.1 O ELETROENCEFALOGRAMA

De acordo com Hall e Guyton (2017), a medição de sinais elétricos na superfície da cabeça, através do exame conhecido como eletroencefalograma (EEG), prova que existe atividade elétrica contínua nessa região. É de grande interesse científico analisar um grande grupo de neurônios em atividade, pois devido a essas ondas cerebrais medidas é possível fazer o estudo de doenças neurológicas como a epilepsia, analisar propriedades cognitivas durante a vigília (pessoa acordada) e até mesmo do período de sono (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2017; HALL; GUYTON, 2017).

Como pode-se verificar na Tabela 1, o EEG, comparado com a aquisição de outros sinais bioelétricos, é um processo de medição de sinais de baixa amplitude, muito propício a interferência de ruídos externos como de aparelhos eletrônicos próximos (60 Hz) e até mesmo de outros potenciais de ação de músculos vizinhos (FERNANDES; CASTRO, 2017).

Tipos de medição	Faixa de amplitude	Faixa de frequência
EEG	5 a 300 $\mu$ V	0 a 150 Hz
ECG	0,5 a 4 mV	0,01 a 250 Hz
EMG	0,1 a 5 mV	0 a 2,5 kHz

Tabela 1. Faixa de tensões e frequências em leitura de sinais bioelétricos (Adaptado de Cardoso, 2010).

As ondas cerebrais são normalmente classificadas por sua frequência e amplitude. A caracterização da amplitude da onda está diretamente relacionada com a atividade executada na região do córtex cerebral medida, ou seja, quando um grande grupo de neurônios é excitado de forma síncrona, uma maior amplitude é percebida na superfície. Já a caracterização da frequência é principalmente determinada pelo comportamento e estado do indivíduo (COIMBRA, 1994; ADUR, 2008).

Na maior parte do tempo as ondas medidas através do EEG têm comportamentos irregulares, porém em certos momentos, como durante uma crise epilética, essas medidas adquirem padrões certamente diferenciáveis que podem ser estudados (HALL; GUYTON,

2017). Já para pessoas saudáveis, Hall e Guyton (2017) afirmam que as ondas medidas são classificadas em alfa, beta, teta e delta. As mesmas podem ser visualizadas na Figura 1.

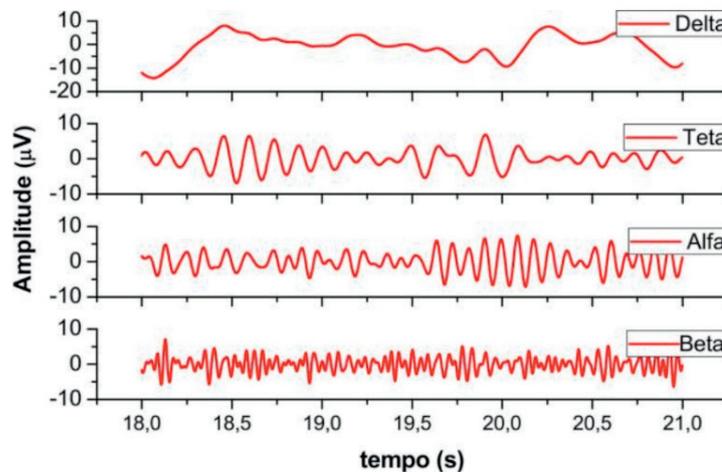


Figura 1. Amplitude em função do tempo das ondas *alfa*, *beta*, *teta* e *delta* (ZANETTI et al., 2014)

A diferença entre cada tipo de onda pode ser visualmente pequena, porém cada uma representa diferentes estados de comportamento. A onda delta é característica de sono profundo ou de doença cerebral orgânica grave, possuindo frequências menores que 4 Hz e normalmente tem amplitude de duas a quatro vezes maior em relação as outras ondas (HALL; GUYTON, 2017). A onda teta tem frequência entre 4 e 7 Hz, e aparece em crianças nas regiões temporal e parietal, podendo também se mostrarem em adultos em momentos de estresse emocional como a frustração por exemplo (HALL; GUYTON, 2017). A onda alfa possui frequência de 8 a 13 Hz e é ligada a estados de vigília em que a pessoa está calma (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2017). A onda beta por sua vez possui frequência de 15 Hz a até 80 Hz, e aparece quando o indivíduo entra num estado de concentração em alguma atividade (HALL; GUYTON, 2017).

Não seria possível de se medir o sinal de uma única célula nervosa na superfície da cabeça, e por isso os sinais bioelétricos lidos num eletroencefalograma são o resultado do somatório do potencial de ação de milhares de neurônios disparando de maneira síncrona em determinadas regiões do encéfalo, gerando um campo elétrico que pode ser medido por eletrodos colocados na superfície do escalpo (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016; CARDOSO, 2010; GOMES, 2015).

A Figura 2 mostra exatamente como ao abrir os olhos, a onda alfa, de maior amplitude, é substituída por uma onda com maior frequência e menor amplitude. Isso deve-se ao fato de que esta última, conhecida como onda beta, é o resultado de sinais neurais fortes porém não-sincronizados que causam uma anulação na medição devido a suas diferentes polaridades (HALL; GUYTON, 2017).



Figura 2. Substituição das ondas *alfa* pelas ondas *beta* (HALL; GUYTON, 2017)

De acordo com Tavares (1997), o Sistema Internacional de Posicionamento de Eletrodos 10-20 foi proposto por Hebert Jasper, em 1958, para medições na superfície do escalpo do paciente. O mesmo é utilizado até os dias de hoje, e além de indicar a posição dos eletrodos, indica também a designação de cada um deles (TAVARES, 1997; ADUR, 2008).

A Figura 3 mostra a disposição dos eletrodos no sistema 10-20, que possui esse nome graças ao posicionamento dos eletrodos que utiliza uma proporção de 10 a 20% dos marcos anatômicos da região da cabeça (a região occipital na parte de trás da cabeça, as regiões préauriculares nas laterais esquerda e direita, e a a região frontal) (ADUR, 2008).

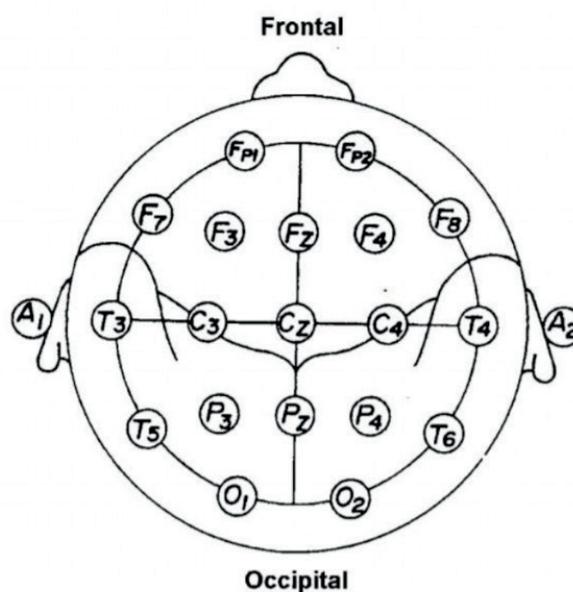


Figura 3. Vista superior da cabeça representando o padrão de posicionamento dos eletrodos de acordo com o sistema 10-20 (TAVARES, 1997)

Cada ponto tem uma designação, onde O é referenciado como região occipital, P como parietal, C como central, T como temporal, A como auricular, F como frontal e FP como frontal polar. Os eletrodos posicionados no hemisfério esquerdo recebem numeração ímpar, do hemisfério direito recebem numeração par e aqueles posicionados na linha central recebem o índice “z”(TAVARES, 1997).

A Tabela 2 resume as regiões onde se é possível encontrar cada tipo de onda e o comportamento necessário para a visualização da mesma.

Ritmo cerebral	Região de medição	Comportamento para visualização
<i>alfa</i>	Região parietal e occipital	Adulto em repouso e acordado, porém de olhos fechados
<i>beta</i>	Região parietal e frontal	Durante intensa atividade do sistema nervoso central
<i>delta</i>	Nas regiões parietais, temporais	Frequente em crianças, sono inicial, estresse emocional em adultos
<i>teta</i>	Todas as regiões	Doenças graves do cérebro, sono profundo em crianças

Tabela 2. Relação entre ritmos cerebrais e posição dos eletrodos (Adaptado de Cantarelli, Júnior e Jr, 2016).

Os amplificadores diferenciais são responsáveis por medir a diferença de potencial desejada no escalpo, e as derivações mais comuns para a aquisição do sinal são a monopolar e a bipolar (CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016). A aquisição monopolar consiste em utilizar como referência um ponto sem atividade neural (no queixo, em um lóbulo da orelha ou em dois lóbulos conectados) e medir a diferença de potencial entre esse ponto e um eletrodo ativo, da região que se pretende medir. Já o método bipolar, mede a diferença de potencial entre dois eletrodos ativos, ou seja, com atividade neural (ADUR, 2008).

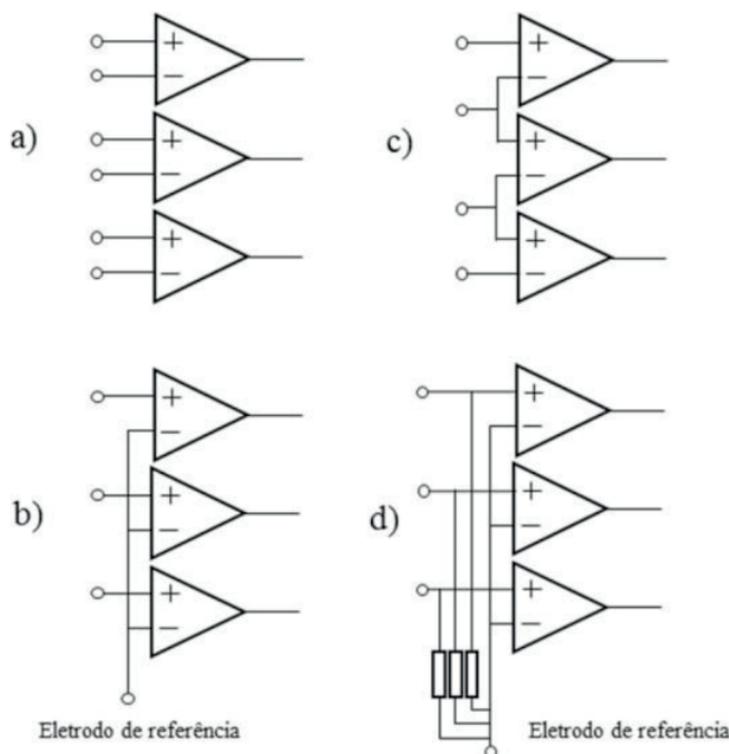


Figura 4. Ligações para aquisição a) bipolar; b) monopolar; c) bipolar unida; d) unipolar com referência(CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016).

A Figura 4 mostra as conexões para aquisição monopolar, bipolar e também duas

outras formas utilizadas: a unipolar com referência, que utiliza um ponto de referência médio, e a bipolar unida, que junta um ponto de atividade neural em dois ou mais amplificadores. Adur (2008) afirma que as informações lidas pelo método monopolar e bipolar são basicamente as mesmas, onde que o que normalmente se faz é utilizar o método monopolar e fazer operações de subtração digitalmente de duas derivações monopolar para se obter uma derivação bipolar.

## 1.2 AQUISIÇÃO DE SINAIS

A medição dos valores de potencial elétrico para obtenção do EEG dependem do entendimento de alguns conceitos envolvendo os eletrodos e o circuito eletrônico que condiciona o sinal para uma amplitude que possa ser processada digitalmente e exibida em um computador. Essa seção tratará de uma breve revisão desses conceitos.

Os eletrodos são a interface que liga a superfície do escalpo ao circuito de aquisição de sinal. Eles consistem em transdutores que convertem uma corrente iônica em uma corrente elétrica e normalmente são usados em conjunto com um gel ou pasta condutora (solução eletrolítica) (GRIMNES; MARTINSEN, 2015; CARDOSO, 2010).

O diâmetro dos eletrodos de EEG pode variar de 4 a 10 mm, e seus materiais mais utilizados são a Prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) recobertos ou não com ouro, devido a sua não polarizabilidade, facilidade de fabricação e baixo custo (CARDOSO, 2010; CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016; TAVARES, 1997; ADUR, 2008).

A utilização de eletrodos em instrumentação biomédica da origem a alguns problemas de medição que precisam ser levados em consideração, como por exemplo a tensão que surge entre o eletrodo e o eletrólito e a grande concentração de ruído advinda da aquisição do sinal devido sua baixa amplitude.

Um tipo de reação que acontece na medição de qualquer sinal utilizando eletrodos é a oxirredução. Esse tipo de reação envolve a transferência de elétrons, ou seja, um elemento perde elétrons (oxidação) e outro elemento ganha elétrons (redução) (WELLER et al., 2017).

As semi-reações de oxidação e redução para os elementos genéricos A e B são descritas nas Equações 1 e 2.



A Equação 1 explica que o elemento A, inicialmente no estado sólido no eletrodo, se transforma no íon  $A^{n+}$  e libera  $n$  elétrons no eletrodo. A Equação 2 informa que o íon  $B^{m+}$  do eletrólito reduz para o estado sólido, causando a depósito do elemento B no eletrodo. Essa reação coleta  $m$  elétrons do eletrodo (CARDOSO, 2010).

Uma tensão surge entre o eletrodo e o eletrólito quando qualquer metal entra em

contato com o eletrólito (o gel condutor). Isso ocorre porque o elemento do eletrodo sofre oxidação e libera cátions no eletrólito. Como o eletrólito já possui ânions, que têm carga oposta, forma-se uma dupla camada elétrica na região, devido às forças columbianas (ADUR, 2008; WEBSTER, 2009). Após a estabilização da reação, surge uma diferença de potencial própria na região, chamada de potencial de meia célula, como é demonstrado na Figura 6.

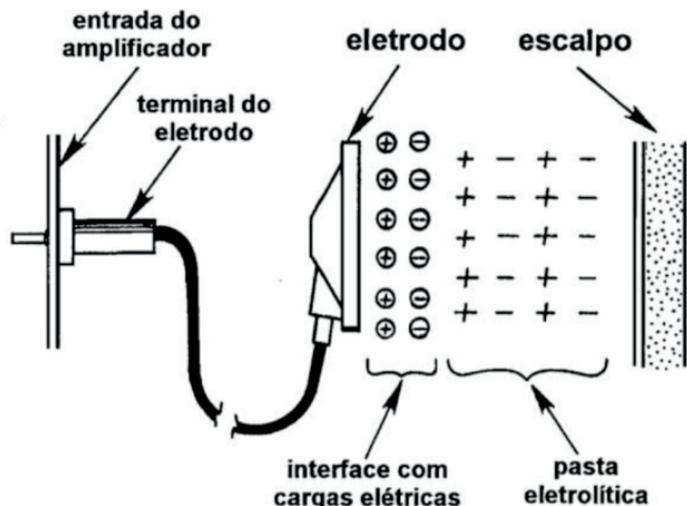


Figura 6. Dupla camada elétrica na interface eletrodo-escalpo formada por consequência das reações de oxirredução (TAVARES, 1997)

O eletrodo ideal deve possuir o mínimo de variação possível na diferença de potencial da interface eletrodo-escalpo (WEBSTER, 2009).

De acordo com o material do eletrodo, ele pode ser classificado como polarizável ou não polarizável (GRIMNES; MARTINSEN, 2015). Um eletrodo polarizável tem maior aglomerado de cargas elétricas na interface eletrodo-eletrólito, significando o aumento da capacitância na região, além da sua alta impedância (CARDOSO, 2010). Por outro lado, o eletrodo não polarizável, como o de Ag/AgCl por exemplo, possui baixa impedância, e menor capacitância, podendo ser utilizado para sinais de mais baixa frequência e menor amplitude. Apesar disso, os eletrodos não polarizáveis não podem ser utilizados por períodos maiores de tempo, por causa de sua toxicidade (GRIMNES; MARTINSEN, 2015).

Segundo Webster (2009), o eletrodo de Ag/AgCl (não polarizável) apresenta algumas vantagens na sua utilização, como o baixo ruído comparado a eletrodos metálicos e baixa resistência e capacitância na fronteira de contato eletrodo-eletrólito. Essas características definem o eletrodo de Ag/AgCl como apto para medições de baixa potência e baixa frequência, que é o caso do EEG.

Para realizar-se a medição do EEG, deve-se conectar os eletrodos a algum amplificador diferencial, para que ele multiplique a diferença de potencial entre os

eletrodos por um ganho a ser definido e o sinal possa ser convertido para digital na melhor resolução possível. Cardoso (2010) recomenda que o amplificador operacional utilizado para a aquisição do sinal tenha elevada impedância de entrada (diminuindo as correntes de polarização), baixa impedância de saída, alto ganho e alto CMRR. Essas características são encontradas, por exemplo, em amplificadores de instrumentação.

O amplificador de instrumentação é uma estrutura melhorada de amplificação de sinais, que utiliza dois AMPOP's no estágio de entrada e um AMPOP no estágio de saída (SEDRA; SMITH, 2015; HOROWITZ; HILL, 2015). O circuito mencionado é mostrado na Figura 8.

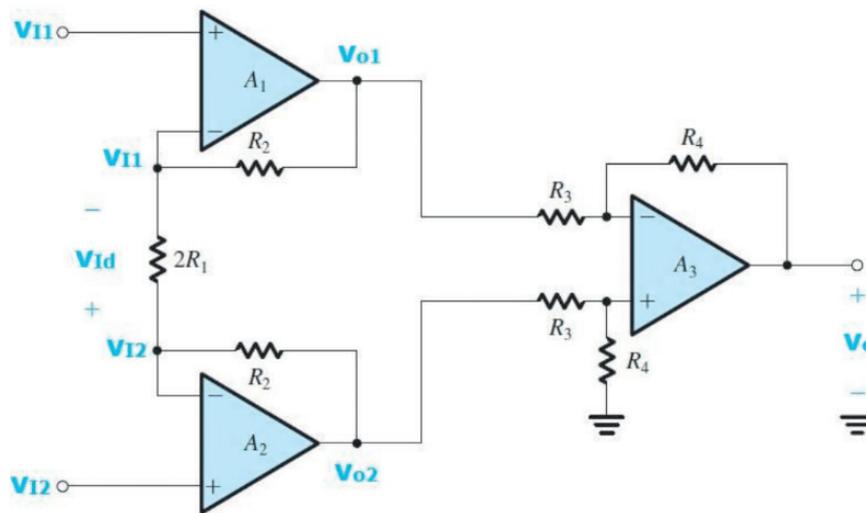


Figura 8. Amplificador de instrumentação (Adaptado de SEDRA; SMITH, 2015).

Seguindo o modelo ideal do AMPOP, as tensões nas entradas não inversoras de  $A_1$  e  $A_2$  são repassada para os terminais inversores. A corrente em cima do resistor  $2R_1$  é dada pela Equação 3, e flui pelos resistores denominados  $R_2$ .

$$i = \frac{v_{I2} - v_{I1}}{2R_1} \quad (3)$$

Realizando-se a lei das malhas, e chamando  $v_{I2} - v_{I1} = v_{Id}$ , tem-se que:

$$v_{o1} - v_{o2} + v_{Id} \cdot \frac{R_2}{2R_1} + v_{Id} + v_{Id} \cdot \frac{R_2}{2R_1} = 0 \quad (4)$$

$$v_{o2} - v_{o1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Logo, como o amplificador do segundo estágio está em sua configuração subtratora, a tensão na saída  $v_o$  é facilmente obtida:

$$v_o = \frac{R_4}{R_3} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{Id} \quad (6)$$

A grande vantagem do amplificador de instrumentação é que o primeiro estágio não amplifica as tensões de modo comum da entrada do circuito, e no segundo estágio, o modo comum é subtraído um do outro. Outro ponto interessante é que como pode ser visto na Equação 6 que variando-se o resistor  $2R_1$ , varia-se também o ganho diferencial do circuito para o valor desejado de acordo com a aplicação (SEDRA; SMITH, 2015).

O amplificador de ganho programável (PGA) também é uma opção para realizar essa etapa da aquisição dos dados, como no caso do ADS1299 (que será melhor aprofundado na seção metodologia), da Texas Instruments, que internamente possui amplificadores de instrumentação que têm resistência variável (INSTRUMENTS, 2012). Dessa maneira o amplificador de instrumentação com ganho programável possui as mesmas características descritas anteriormente, porém a seleção do ganho, essencial para a adequação da amplitude do tipo de onda medida no EEG, é feita através de bits enviados ao circuito integrado (CI) por meio de alguma comunicação serial como SPI ou I2C (HOROWITZ; HILL, 2015).

A rápida evolução na eletrônica digital, na redução de tamanho e velocidade de processamento, possibilitou a digitalização de praticamente todos os sinais analógicos para o tratamento desses dados de forma discreta, e os conversores analógicos para digital (ADC) são os responsáveis por fazer esse trabalho (HOROWITZ; HILL, 2015).

Após a leitura da onda cerebral, os sinais estão já amplificados pelo amplificador de ganho programável, então utiliza-se o ADC para converter esse sinal para bits, de maneira que se possa processar estes dados em computador ou microcontrolador.

Para o EEG, deve-se escolher o ADC pensando principalmente na resolução e na escala de entrada do conversor, devido a natureza de baixa amplitude do sinal. Alta velocidade de aquisição e de conversão não são especificações exigidas para sinais de eletroencefalograma, pela frequência dos sinais medidos ser normalmente menor que 150 Hz (CARDOSO, 2010).

Artefatos são sinais elétricos não desejados que aparecem na medição, porém que não são de origem cerebral e portanto devem ser minimizados. Na obtenção do EEG existem artefatos de origem técnica e artefatos de origem fisiológica (AZEVEDO, 2005).

Artefatos de origem técnica são aqueles devido a má projeção ou ao mal funcionamento dos equipamentos usados na aquisição do EEG, como por exemplo interferências eletromagnéticas de 60 Hz ou flutuação na impedância dos eletrodos. Esses problemas podem ser minimizados com a blindagem de cabos, com filtros analógicos ou digitais e com a aplicação adequada dos eletrodos em conjunto com gel condutor (AZEVEDO, 2005; CANTARELLI; JÚNIOR; JR, 2016).

Também existem os artefatos de origem fisiológica, que compreendem interferências vindas do próprio paciente, como por exemplo a pulsação arterial, a movimentação dos olhos e movimentos da parte superior do corpo. Esses artefatos podem ser minimizados instruindo o paciente sobre os procedimentos do exame (não mexer a cabeça, evitar

piscar e mexer os olhos) (AZEVEDO, 2005).

### 1.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Para a aquisição de sinais de baixa amplitude, é necessário o uso de técnicas que tratem o ruído presente. Para isso, existem métodos de remoção de ruídos, como a filtragem digital, que se resume em remover uma parcela do sinal medido que tenha corrompido o EEG, utilizando, por exemplo, passa baixa, para retirar frequências altas, passa alta, para retirar sinais DC, e rejeita faixa, principalmente para eliminação dos 60 Hz da rede elétrica (ADUR, 2008; AZEVEDO, 2005).

A duas principais formas de se filtrar sinais de EEG consistem em ou modificar a amplitude do sinal ou a sua fase (ROSA, 2009). Os filtros digitais, que recebem esse nome por serem implementados em software, são amplamente utilizados em aplicações de aquisição de sinal de EEG, ECG e EMG (ADUR, 2008; TAVARES, 1997; JUNIOR, 2004).

De acordo com Rosa (2009), os filtros digitais possuem vantagens quando comparados com o analógico, como a invariação a mudanças de temperatura, a utilização de um mesmo filtro repetidas vezes sem que se precise construir um mesmo hardware várias vezes, o fácil armazenamento de tanto os dados filtrados quando os não filtrados, o pouco espaço que os microcontroladores ocupam e sua velocidade de processamento.

Filtros digitais podem ser classificados como filtro de resposta ao impulso finita (FIR) ou filtro de resposta ao impulso infinita (IIR) (LATHI; GREEN, 2014). O primeiro deles é abordado a seguir.

O filtro FIR é representado pela Equação 7, onde:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (7)$$

E sua função de transferência é dada por:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} \quad (1.8)$$

onde  $h(k)$  são os coeficientes do sistema à resposta impulso do sistema e  $N$  é a ordem do filtro.

O FIR é comumente utilizado devido sua facilidade de implementação e sua maior estabilidade quando comparada com filtros IIR (LATHI; GREEN, 2014). Além disso, ao contrário do IIR, filtros do tipo FIR tem resposta de fase linear. Por filtros IIR terem menor ordem, normalmente são a melhor escolha para soluções onde se necessita pouco processamento e resposta mais imediata. Por outro lado, quando não há necessidade de imediatismo ou limite máximo de processamento, filtros FIR são a melhor escolha, e por

isso será usado nesse trabalho (LATHI; GREEN, 2014; ROSA, 2009).

## 2 | METODOLOGIA DE PROJETO

Com o objetivo de baixar o custo do projeto e assim sua complexidade, recomenda-se:

- I. A medição das ondas alfa e beta, devido a menor complexidade que é necessária para forçar suas aparições através de estados de comportamento da pessoa;
- II. O uso de eletrodos de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) devido a sua não polarizabilidade ser adequada para medição de sinais ruidosos e de baixa potência;
- III. O uso de posicionamento dos eletrodos de acordo com o método 10-20 de Hebert Jasper;
- IV. O uso de uma pasta condutora na região ao redor de cada eletrodo para reduzir ruídos e aumentar o contato de medição;
- V. O emprego de filtro ativo analógico passa-baixa (veja figura 9), que irá atenuar frequências acima de 60 Hz, pois a componente de 60 Hz normalmente aparece nos sinais medidos devido a interferência da rede elétrica. Segundo figura 9, a topologia do filtro é a rede Sallen-Key, com aproximação Butterworth, de ordem 2, que pode ser projetado com auxílio da ferramenta Filter Pro, da Texas Instruments. O circuito utiliza o ampop TL082, por ser um componente facilmente encontrado e por atender as especificações de baixo custo, além de resistores e capacitores de montagem em superfície

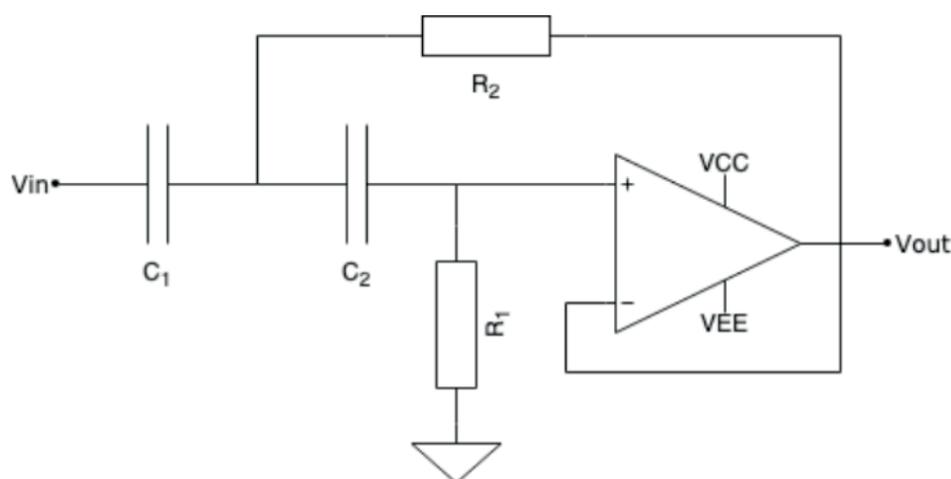


Figura 9. Filtro ativo passa-baixa *Sallen Key* de segunda ordem

- VI. O uso do conversor analógico/digital ADS1299, fabricado pela Texas Instruments, que é específico para medições de biopotencial e sinais de EEG. Nesta etapa, os valores medidos das ondas cerebrais devem ter um ganho programável

de escala adequada com a entrada de um microprocessador. É importante reforçar algumas características do ADS1299 a fim de ter uma boa utilização do dispositivo e garantir seu bom funcionamento. As principais características são mostradas na Tabela 3.

Especificação	Mínimo	Nominal	Máximo	Unidade
Resolução	-	24	-	bits
Alimentação Analógica	4.75	5	5.25	V
Alimentação Digital	1.8	1.8	3.6	V
Clock Externo	1.5	2.048	2.25	MHz
Velocidade Aquisição	250	-	160000	SPS
CMRR	-110	-120	-	dB
PSRR	-	96	-	dB

Tabela 3. Características do ADS1299.

- VII. O uso de um microprocessador de baixo custo, como é o caso do Arduino Uno. Este dispositivo possui as tensões internas de 5 e 3.3 V, facilitando a conversão analógico/digital. Assim, não é necessário o uso de clock externo, podendo ser usado o seu oscilador interno de 2.048 MHz;
- VIII. O uso da função de detecção de desconexão do ADS1299 (DC Lead-off e AC Lead-off), a fim de monitorar as conexões dos eletrodos com o passar do tempo, e mostrar quando o contato dos eletrodos estiver sendo ineficaz;
- IV. O uso da ferramenta MATLAB para o processamento dos sinais através do filtro de resposta finita ao impulso (FIR), atenuando ao máximo os componentes harmônicas geradas pela rede. Também, pode-se fazer o uso da transformada de Fourier rápida (FFT) para conferir se as componentes de maior amplitude das ondas lidas estão de acordo com as referências;
- X. O uso do software Altium Designer para projeto da placa de circuito impresso, seguindo as recomendações da Texas Instruments para a otimização do ADS1299. As partes digitais e analógicas devem ser separadas o máximo possível, evitando ruídos digitais nos sinais analógicos. O plano de terra deve ser projetado de maneira que cubra a maior parte dos espaços vazios e provenha retorno de baixa impedância para as correntes que fluem próximas dos sinais de EEG, reduzindo as chances de interferência eletromagnética (EMI). Além disso, capacitores são necessários entre as entradas analógicas diferenciais e também próximos aos pinos de alimentação do ADS1299, buscando redução de ruídos de alta frequência e estabilidade.

### 3 | DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho deve servir como ponto de partida para reflexões do

projetista acerca do projeto em desenvolvimento.

É importante reforçar o fato que interferências nas medições ocorrerão, pois estas são feitas por cima dos cabelos. Lembrando que os cabelos devem ser afastados de forma que interfiram minimamente no contato de cada eletrodo. Além disso, como já mencionado, o problema do contato dos eletrodos deve ser mitigado com a utilização de uma pasta condutora e com a funcionalidade da detecção de desconexão do ADS1299 (circuito integrado proposto).

Buscando medir as ondas alfa, com frequência entre 8 e 13 Hz, recomenda-se fortemente que o voluntário fique com os olhos fechados em estado de relaxamento, a fim de que uma medição completa de alguns segundos possa ser realizada com sucesso. O mesmo ocorre para a onda beta, de frequência entre 15 e 80 Hz, mas neste caso o voluntário deve permanecer de olhos abertos sem movimentação corporal. A fim de não comprometer a aquisição deste tipo de sinal devido a presença de ruído de 60 Hz, recomenda-se fazer uma boa filtragem no sinal de modo que a amplitude do ruído seja pelo menos dez vezes menor do que a amplitude do sinal da atividade cerebral a ser estudada.

A título de comparação, as formas de onda medidas devem ser comparadas com uma forma de onda de EEG padrão (como por exemplo, aquela encontrada em banco de dados específicos na área). Cuidados devem ser tomados nesta comparação, pois haverá diferenças consideráveis entre os sinais medidos e os padrões, já que as ondas retiradas do banco de dados não são do mesmo voluntário. Uma solução seria realizar a medição no voluntário utilizando um equipamento de EEG clínicos, para fins de comparação. Deste modo, com uma análise na frequência, através da transformada de Fourier, respostas mais precisas podem ser geradas a respeito da confiabilidade da medição.

## REFERÊNCIAS

ADUR, R. **Sistema de processamento de sinais biomédicos: módulo didático de eletroencefalograma**. Dissertação (Mestrado) — UFSC, Florianópolis, 2008.

AZEVEDO, A. P. **Estudos do sinal eletroencefalográfico (EEG) aplicado a interfaces cérebro computador com uma abordagem de reconhecimento de padrões**. Dissertação (Mestrado) — UFES, Vitória, 2005.

BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. **Neurociências : desvendando o sistema nervoso**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 974 p.

CANTARELLI, T. L.; JÚNIOR, J. J. A. M.; JR, S. L. S. **Fundamentos da medição do eeg: Uma introdução**. **Seminário de eletrônica e automação**, 2016. 2016.

CARDOSO, A. S. V. **Instrumentação e metodologias de medição de biopotenciais**. Tese (Doutorado) — UFMG, Minas Gerais, 2010.

COIMBRA, A. J. F. **Análise computadorizada de sinais bioelétricos**. Dissertação (Mestrado) — UFSC,

Florianópolis, 1994.

FERNANDES, J.; CASTRO, M. C. F. de. Estudo do ci ads1299 e aplicação na aquisição de eeg. **VII Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI**, 2017. 2017.

GOMES, M. da M. Bases fisiológicas do eletroencefalograma. **Revista Brasileira de Neurologia**, 2015. v. 51, n. 1, 2015.

GRIMNES, S.; MARTINSEN Ørjan G. **Bioimpedance bioelectricity basics**. 3. ed. [S.l.]: Academic Press, 2015. 563 p.

HALL, J. E.; GUYTON, A. C. **Tratado de fisiologia médica**. 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The art of electronics**. 3. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. 1992 p.

INSTRUMENTS, T. **Datasheet: Low-Noise, 4-, 6-, 8-Channel, 24-Bit, analog-to-digital converter for EEG and biopotential measurements**. [S.l.: s.n.], 2012.

JUNIOR, A. L. D. S. Desenvolvimento de uma plataforma para coleta e processamento de sinais biomédicos. In: . [S.l.: s.n.], 2004.

LATHI, B. P.; GREEN, R. **Essentials of digital signal processing**. New York: Cambridge University Press, 2014. 748 p.

## FONTES DE CORRENTE EM TOMOGRAFIA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA MULTIFREQUENCIAL: ESTADO DA ARTE

Data de aceite: 01/06/2020

### Lucas Cordeiro Butzke

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.  
Engenharia Elétrica, Joinville, SC  
lucas.butzke@udesc.edu.br

### Pedro Bertemes Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina, Dept.  
Engenharia Elétrica, Joinville, SC

**RESUMO:** Fontes de corrente para tomografia de impedância elétrica demandam um projeto minucioso do circuito eletrônico para realizar uma reconstrução de imagem com a menor quantidade de erros possíveis, estas fontes são multifrequenciais e diferenciais. Esta revisão faz um levantamento desde necessidades de projeto, suas falhas e limites para duas topologias de fontes de corrente mais utilizadas na área, as fontes Howland e amplificadores de transcondutância. Caso o projeto possua recursos a melhor opção é utilizar os amplificadores de condutância pela superior performance, as fontes Howland são mais fáceis de elaborar e servem para rápida prototipagem, além disso, são bem menos custosas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fontes de Corrente Controladas por Tensão, Tomografia por impedância elétrica, Medição Multifrequencial.

**ABSTRACT:** Current sources for electrical impedance tomography require a detailed design of the electronic circuit to perform an image reconstruction with the least amount of errors possible, these sources are multifrequency and differential. This review clarifies most of the project needs, their flaws and limits based on two topologies of current sources most used in the area: the Howland sources and transconductance amplifiers. If the project has enough budget, then the best option is to use conductance amplifiers for superior performance. However, Howland sources are easier to develop, faster for prototyping and much less costly.

**KEYWORDS:** Voltage Controlled Current Source, Electrical Impedance tomography, Multifrequency Measurement.

### 1 | INTRODUÇÃO

Tomografia de impedância elétrica é um método clínico para reconstrução de imagens utilizando espectroscopia de impedância elétrica em tecidos biológicos realizando medições em múltiplos canais [1]. Consiste na injeção de corrente de alta frequência e baixa amplitude na seção desejada do tecido

biológico e medir simultaneamente a diferença de potencial entre as combinações dos eletrodos [2], chamado medição de impedância a quatro fios, onde os eletrodos que injetam a corrente e medem a tensão são independentes, de modo a melhorar a leitura de impedância.

Os elementos que formam um tomógrafo de impedância são uma fonte de corrente para realizar injeção de corrente na carga biológica, aquisição entre os eletrodos conectados ao tecido e, por fim, a multiplexação dos sinais de excitação biológico [3].

Para desenvolver um sistema de tomografia é preciso estudar o que foi feito em trabalhos anteriores de vários autores, para tomar conta das limitações e das tecnologias empregadas na elaboração. Este trabalho foca na revisão de duas topologias de fonte de corrente mais utilizadas em tomografia de impedância elétrica.

Bioimpedância elétrica possui variadas aplicações além de TIE, podendo avaliar massa corporal e até diagnosticar câncer [4]. Nesta área a topologia de fonte mais usada é a fonte de corrente controlada por tensão Howland, um circuito de funcionamento simples mas de complexo projeto para atender quesitos de alta performance, pois a fonte Howland possui limitações bem conhecidas e a utilização de componentes discretos torna inviável este circuito quando a frequência atingir poucas dezenas de MHz.

Uma alternativa a fonte Howland são os amplificadores de transcondutância (OTAs), que são circuitos integrados de fontes de corrente controlados por tensão e, portanto, com parâmetros mais precisos e com menores limitações em relação a Howland. Os ruídos e atrasos dos sinais na Howland causam redução da amplitude dos sinais devido a diminuição da impedância de saída da fonte de corrente [5], os OTAs podem ultrapassar outras fontes de corrente e manter grande impedância de saída mesmo em grandes frequências.

Para direcionar a corrente e medir as tensões nos eletrodos corretos, são utilizados multiplexadores. Um multiplexador ideal possui impedância zero quando acionado, impedância infinita quando desligado e nenhum atraso, características que não representam componentes fabricados. Circuitos integrados comerciais possuem internamente elementos parasitas que interferem na medição dos dados, como: correntes de fuga, resistências internas, capacitâncias parasitas e capacitâncias de *cross-talk* entre os canais do multiplexador [6].

Elementos parasitas adicionados as capacitâncias externas do circuito e devido aos cabos longos ligados aos eletrodos, introduzem maior tempo de transitório e ruídos nos dados coletados [7]. Juntamente com a excitação do tecido sistemas para mitigar os problemas dos componentes e conseguir um desempenho superior que não é possível sem eles.

Para se obter uma imagem reconstruída com os menores erros a fonte de corrente confiável é essencial. Manter impedância de saída alta, amplitude de corrente constante

e modo comum baixo devem ser os parâmetros para o projeto da fonte em toda a faixa de frequência utilizada.

Este é um sistema simples de entender o funcionamento mas possui grande complexidade de projeto do *hardware* eletrônico e também alto grau de dificuldade de processamento dos dados para reconstrução das imagens devido à matemática avançada das equações.

## 2 | FONTES DE CORRENTE

Desenvolvimento de um *hardware* eletrônico para uma fonte de corrente diferencial e multifrequencial para um tomógrafo de impedância elétrica possui muitas complicações. Esta seção abrange os problemas encontrados na área e as duas topologias de fonte mais empregadas na área, fontes Howland e OTAs.

Um problema de sistemas de TIE é o número de canais de medição, sendo necessários dispositivos que permitem a multiplexação entre estes canais, de modo os tecidos biológicos serem excitados em corrente e realizar a leitura em tensão. A introdução dessas chaves analógicas também acrescentam problemas ao dispositivo, problemas esses que interferem na resposta em frequência da fonte de corrente, a impedância de saída e os transientes na medições dos canais. é imprescindível levar em conta os problemas e colocar meios de transpor eles no projeto para atingir melhores resultados.

Um sistema eletrônico analógico possui elementos parasitas intrínsecos que são difíceis de serem retirados apenas com a escolha de melhores componentes e na elaboração das placas de circuito impresso. Um dos problemas é a capacitância parasita, ela traz fuga de corrente e diminui a resposta em frequência [6], os principais elementos dentro do *hardware* de um TIE que contem são a fonte de corrente, nos multiplexadores e nos cabos.

A adição um circuito compensador de energia reativa no sistema pode tornar o sistema funcional em toda a banda de frequência almejada, atuando em contrapartida com as capacitâncias parasitas [8]. Os compensadores são amplamente utilizados para fontes de corrente Howland, principalmente em TIE. Os circuitos se dividem basicamente em três topologias: geradores de impedância negativa [2], indutores ativos [6] e conversores de impedância [9], [10].

Outro problema comum em sistemas de bioimpedância e TIE são tensões de modo comum, que se originam de diversas formas, como por exemplo: devido a fonte de corrente desbalanceada, conexões dos eletrodos no corpo e a impedância do corpo para o terra do circuito[11]. Essas tensões trazem problemas as fontes de corrente e as medições de tensão, a imagem reconstruída depende da fidelidade dos sinais adquiridos e a realimentação do modo comum pode mitigar estes problemas [12].

Foi conseguido uma redução de modo comum em até 40 \$dB\$ em frequências até

10 kHz [12], enquanto que atualmente novos experimentos atingem 62 \$dB\$ de redução para tensões de modo comum e 31 \$dB\$ para correntes de modo comum de frequências de 50 kHz até 1 MHz [11].

A escolha de fazer excitação em corrente no tecido biológico provém maior segurança para o indivíduo analisado, caso a corrente for elevada o tecido pode ser carbonizado. A excitação em tensão pode causar aumento da impedância do tecido biológico no caso de se formarem coágulos de sangue na área que o eletrodo está, causando menor fluxo de corrente [4].

A maioria dos padrões internacionais, como a IEC 60601-1, limita a corrente a 100 uA rms para frequências de até 1 kHz e podendo chegar até uma corrente de 10 mA para frequências acima de 100 kHz . Utilizando o padrão imposto pelo NFPA (*National Fire Protection Association*), o máximo de corrente que pode ser injetada no corpo é de 5 mA em 50 kHz [13] e para frequência em 4 kHz a corrente máxima é de até 0,4 mA [14], dependendo do amplificador utilizado a corrente de polarização é de até 10 uA, sendo desprezível se comparado a norma.

## 2.1 Fonte Howland

A fonte Howland consiste em uma fonte de corrente controlada por tensão feita a partir de um amplificador operacional, a Figura 1 mostra a topologia da fonte Howland modificada, a fonte funciona a partir da relação (1).

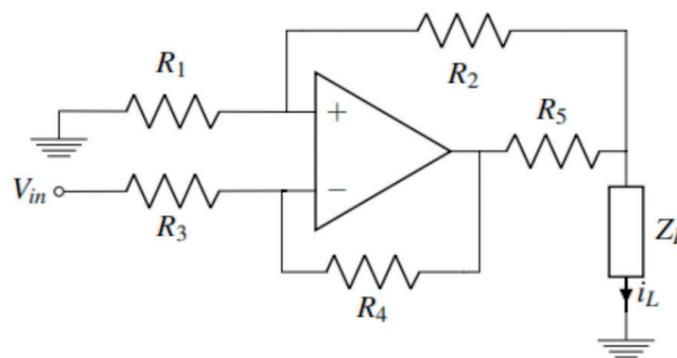


Figura 1: Fonte Howland Modificada.

$$\frac{R_2 + R_5}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

A função de transferência é dada em (2), é importante manter esta relação para a realimentação negativa sempre se sobrepôr a realimentação positiva para o circuito se manter estável[9], para o correto funcionamento deve-se fazer  $R_2 = R_3 = R_4 = R$ , manter ,  $R_5 = r \ll R$ , e  $R_1 = R + r$ .

$$\frac{I_{\text{Out}}}{V_{\text{in}+} - V_{\text{in}-}} = \frac{1}{R_5} \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{R_5} \frac{1 - \beta_{\text{fb}}}{\beta_{\text{fb}}} \quad (2)$$

onde  $\beta_{\text{fb}} = R_3 / (R_3 + R_4)$ .

A relação das resistências é um fator importante para o correto funcionamento desta fonte de corrente e também para a impedância de saída, caso as resistências possuam incompatibilidade de impedâncias o desempenho será afetado pela relação da equação (3) [16]. Sendo  $T$  a tolerância dos resistores utilizados no circuito e  $\beta_{\text{fb}}$  o ganho de malha aberta do amplificador usado.

$$R_{\text{out}} = \frac{(R_1 + R_2) \parallel R_5}{1 - \beta_{\text{fb}}} \frac{(1 - T)^2}{\pm 4T} \quad (3)$$

A equação mostra a necessidade de escolher resistores com baixa tolerância, amplificadores operacionais com grande razão de realimentação e projetar com altos valores de resistores para aumentar a impedância de saída da fonte de corrente.

Existem muitas opções desenvolvidas para melhorar as características desta topologia, como: compensação de capacitância parasita [9], [17], fonte de corrente diferenciais [18], fonte Howland com realimentação com *buffer* [19] e compensação *lead-lag* [16].

A impedância de saída para a fonte Howland Simples chega até  $3,3 \text{ M}\Omega$  em 200 kHz com a compensação *lead-lag* [16], com a fonte com configuração diferencial e com compensação o  $R_{\text{out}}$  pode chegar até  $24,98 \text{ M}\Omega$  em 200 kHz.

Uma fonte de corrente para TIE deve ter uma saída diferencial que faça a excitação dos tecidos biológicos, sendo uma forma de se obter é utilizando duas fontes Howland espelhadas. A Figura 2 mostra a configuração da topologia. As fontes possuem defasamento de 180 entre elas [9], para isto este *design* deve ter uma entrada diferencial do sinal que se deseja injetar na carga e isto não é uma tarefa fácil de realizar.

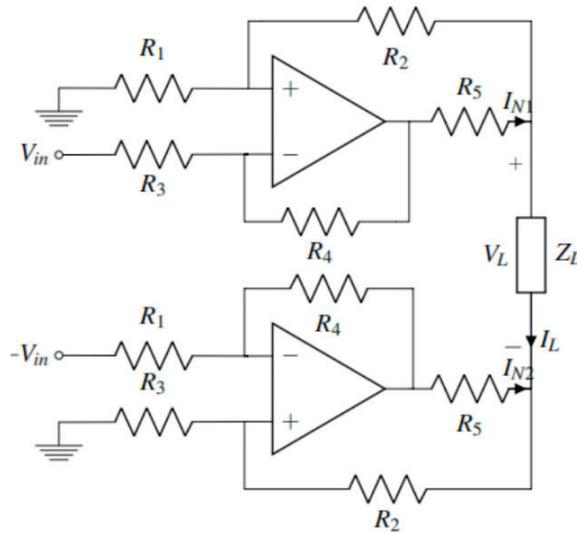


Figura 2: Fonte Howland Espelhada.

Na equação (4) a corrente de saída é calculada [25], a corrente de saída de cada lado desta fonte é dada por  $I_{N1}$  e  $I_{N2}$  e as respectivas impedâncias são  $Z_{N1}$  e  $Z_{N2}$  [1]. As impedâncias de saída de cada lado da Howland espelhada podem ser calculadas por (3).

$$I_L = \frac{I_{N1} \cdot Z_{N1} + I_{N2} \cdot Z_{N2}}{Z_L + Z_{N1} + Z_{N2}} \quad (4)$$

A cálculo da tensão diferencial aplicada na carga é dado em (5), caso a fonte possuir um desbalanço nas correntes de cada lado da fonte o modo comum aumenta na carga.

$$V_{\text{dif}} = \frac{(I_{N1} - I_{N2}) \cdot Z_{N1} \cdot Z_{N2} + (V_{N1} - V_{N2}) \cdot Z_L / 2}{Z_L + Z_{N1} + Z_{N2}} \quad (5)$$

A impedância de saída para a fonte Howland espelhada depende bastante das tolerâncias dos resistores e dos amplificadores operacionais utilizados, no melhor caso com resistências tolerâncias de 0,1% chega até 1,02 MΩ em 10 kHz [9]. Mais recentemente se chegou em 4,02 MΩ em 100 kHz até 185 kΩ em 1 MHz [8].

A fonte Howland com amplificador diferencial, Figura 3, é um método para uma saída diferencial de corrente com apenas um amplificador operacional diferencial, com isto são utilizados menos componentes e, por esta razão, é possível desenvolver um sistema menos suscetível a componentes parasitas.

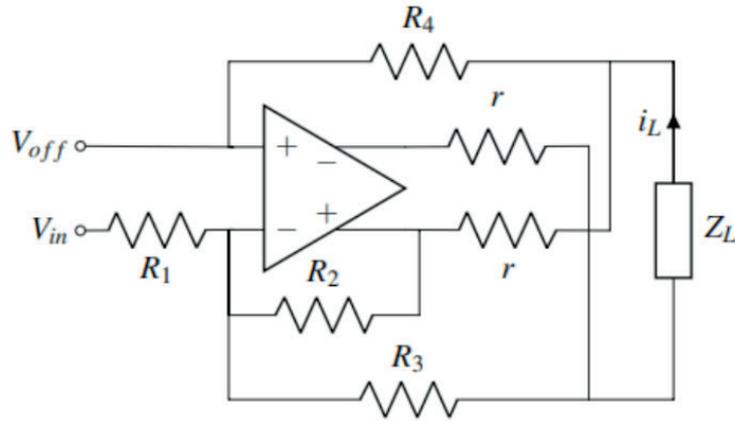


Figura 3: Fonte Howland com amplificador operacional diferencial.

O cálculo da corrente de saída da fonte é diferente das fontes anteriores, na equação (6) observa-se que as entradas diferenciais não são iguais, onde  $R_2 = r + R_3$  e  $R_3 = R_4$ .

$$I_L = \frac{(R_2 + 2R_1)V_{off} - R_2V_{in}}{R_1r} \quad (6)$$

Equação para cálculo da tensão de saturação do amplificador diferencial para calcular a impedância máxima que a fonte suporta sem saturar a saída é dada pela equação (7) [20], sendo  $V_{sat}$  a tensão de alimentação do amplificador.

$$V_{amp} = I_{saída}r \left[ 1 + \frac{Z_L}{2r} \left( 1 + \frac{r}{R_3} \right) \right] \leq V_{sat} \quad (7)$$

A impedância de saída da fonte Howland diferencial é de aproximadamente  $1\text{ M}\Omega$  até  $100\text{ kHz}$  e chega até aproximadamente  $200\text{ k}\Omega$  em  $1\text{ MHz}$  [20].

O desenvolvimento da topologia com a carga na realimentação do amplificador operacional foi pensada para aumentar a impedância de saída da fonte de corrente Howland [10]. A Figura 4 mostra como o circuito é implementado, uma fonte de corrente controlada por tensão (V/I) é colocada na entrada inversora de um amplificador operacional, na realimentação a carga estará fluando nesta configuração.

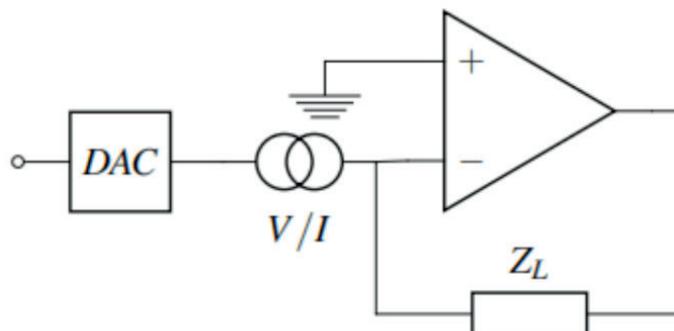


Figura 4: Fonte Howland com a carga na realimentação.

Esta topologia de circuito possui muitas variações possíveis, desde para aumentar a impedância de saída da fonte, diminuir o modo comum na carga e até diminuir a capacitância parasita. A fonte Howland com a carga na realimentação consegue atingir um ganho de transcondutância de  $302,9 \mu S$  até  $13,2 \text{ MHz}$  [10] e uma impedância de saída de  $24,98 \text{ M}\Omega$  em  $200 \text{ kHz}$  [18].

## 2.2 Amplificadores de Transcondutância

Os amplificadores de transcondutância (OTAs) são fontes de corrente controladas por tensão em circuito integrados, com o circuito no encapsulamento já pronto tem superior desempenho que um circuito discreto como na fonte Howland. Os tipos de OTA apresentadas em trabalhos recentes são *current conveyor*, classe A e classe AB. Enquanto os de classe A e AB se referem a classe de amplificador na saída os *current conveyor* são implementados com estruturas translineares ou com pares diferenciais [21].

A Figura 5 mostra um OTA simétrico totalmente diferencial onde o bloco tracejado é a saída aperfeiçoada para minimizar afeitos de sobrecarga [22]. Para TIE uma topologia diferencial é desejável para retirar o tecido biológico de qualquer referência de tensão ou corrente do circuito e deixar flutuando.

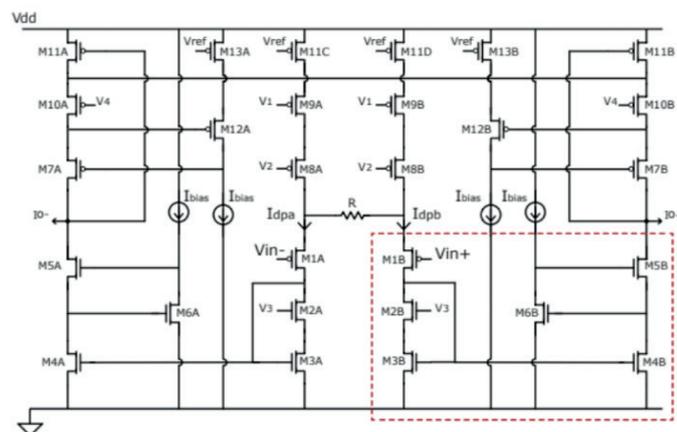


Figura 5: Arquitetura de um OTA simétrico totalmente diferencial [16].

Com este circuito simples de um OTA diferencial já apresenta um grande avanço na melhora da impedância de saída das fonte de corrente. A Figura 6 mostra que a impedância de saída do OTA pode ser de até  $79 \text{ M}\Omega$  para baixas frequências e  $324 \text{ k}\Omega$  em  $1 \text{ MHz}$  [22], outros OTAs chegam até  $2,8 \text{ M}\Omega$  em  $1 \text{ MHz}$  [21].

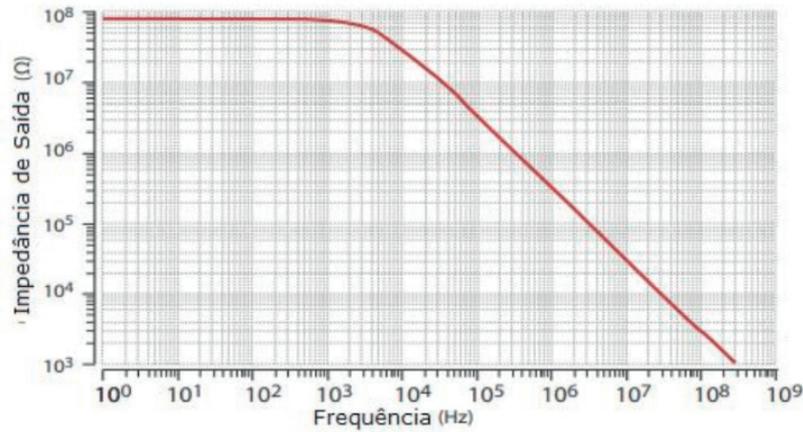


Figura 6: Impedância de saída para a topologia OTA da Figura 5 [16].

Com a configuração mista entre *current conveyor* e o classe AB é possível atingir impedâncias acima de 10 MΩ e 1 MΩ em 5kHz e 1 MHz, respectivamente [23]. As características dos OTAs dependem do projeto do circuito e variam a cada trabalho, mas são relativamente melhores do que as fontes Howland já citadas [24].

Grande parte dos trabalhos em bioimpedância projetam os próprios circuitos integrados customizados e não usam componentes comerciais [21], [22], [23]. Este método de excitação pode ser custoso e desperdiçar bastante tempo com apenas o projeto da fonte de corrente.

Uma solução implementar os OTAs pode ser o uso de Matrizes Analógicas Programáveis de Campo (MAPC), elas possibilitam projetar a fonte em um chip único e que não precisa ser retirado para mudar as características da fonte, apenas reprogramar [25].

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma comparação direta entre os diferentes tipos de OTAs e a fonte Howland espelhada foi feita por Bertemes [2], as figuras 7 e 8 detalham os resultados de cada topologia para corrente de saída e a impedância de saída, respectivamente.

Enquanto os OTAs tem a capacidade de manter amplitude de corrente constante em toda a banda de frequência, de DC até a frequência de corte, as fontes Howland contém capacitores na saída para filtrar tensões *offsets* do circuito. Caso um sistema almeje adquirir informações em maiores faixas de frequência os amplificadores de transcondutância são mais indicados para tal. A impedância de saída de duas topologias se apresentam superior a Howland, *current conveyor* (CCII) e Classe-AB.

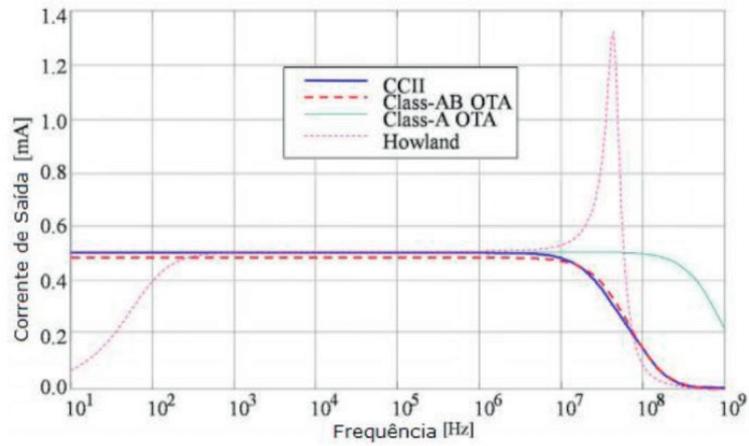


Figura 7: Comparação da saída de corrente entre as fontes de corrente [21].

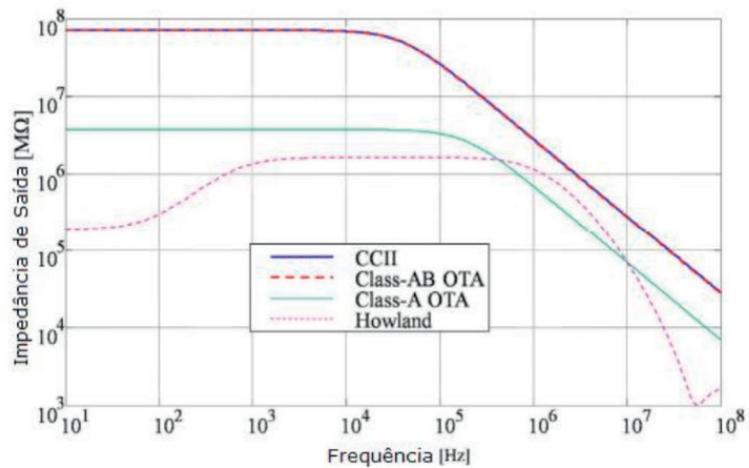


Figura 8: Comparação da impedância de saída entre as fontes de corrente [21].

Algo comum em fontes Howland é o aumento da amplitude da corrente de saída indicada na figura 7, próximo a frequência de corte a fonte apresenta um grande pico na amplitude e logo após diminui rapidamente. A reconstrução de imagem de tomografia depende da constância da aquisição dos dados e o quanto a fonte de corrente mantém a sua fidelidade ao longo de toda banda de frequência, caso contrário a reconstrução não possuirá capacidade de formar uma imagem próxima a do objeto medido.

As características da fonte Howland dependem dos componentes utilizados, da topologia e dos parâmetros dos amplificadores operacionais. Uma fonte de corrente para TIE necessita de multiplexadores e cabos longos, estes elementos introduzem componentes parasitas ao equipamento e pioram o desempenho dos circuitos. Com a adição de elementos para compensar componentes parasitas a fonte Howland pode ser aprimorada para atingir frequências maiores e diminuir erros de modo comum.

A introdução de elementos para compensação de capacitâncias parasitas são fundamentais para melhorar a impedância de saída das fontes de corrente para altas frequências e a realimentação de modo comum também é um ótimo método para melhorar as fontes de corrente com problemas de casamento de impedâncias. Na aquisição das

tensões ao longo dos canais a introdução de *buffers* pode ser uma solução, o aumento da impedância de entrada diminui a corrente nos multiplexadores e nos cabos, diminuindo perdas.

Desenvolver uma fonte de corrente para TIE é uma tarefa árdua e demanda muito tempo para projeto e *design* de placas de circuito, existem muitas opções de topologias diferentes para utilizar e muitas aplicações para escolher. A tabela 1 contém os resultados das fontes de corrente citadas, os dados variam entre os trabalhos devido a cada autor produzir sua própria topologia.

Fontes de Corrente	Impedância de Saída	
	$R_{saída} (M\Omega)$	$f_{op}$
Howland Modificada [23]	3,3 $M\Omega$	200 kHz
Howland Espelhada [25]	4,02 $M\Omega$	100 kHz
Howland Diferencial [19]	200 $k\Omega$	1 MHz
Howland Carga Realimentação [12]	24,98 $M\Omega$	200 kHz
OTA [2]	2,8 $M\Omega$	1 MHz

Tabela 1: Comparação das fontes de corrente apresentadas, sendo ( $R_{saída}$ ) a impedância de saída e ( $f_{op}$ ) a frequência de operação.

## 4 | CONCLUSÃO

Os resultados para os OTAs são superiores do que as fontes Howland pois eles são circuitos integrados e possuem maior controle dos parâmetros de fabricação, tendo maior controle sobre os parâmetros e possuindo melhor performance. Circuitos com componentes discretos dependem de mais etapas de processos de fabricação, como os valores dos resistores e da placa de circuito impresso, diminuindo sua eficácia.

Enquanto a fonte Howland é simples de se implementar e tem grande número de trabalhos publicados relacionados a TIE, os OTAs tendem a demandar projeto do circuito integrado. Uma solução para não fabricar circuitos integrados customizados seria usar MAPCs para projeto da fonte de corrente e ser de fácil implementação e posterior alteração. Usar OTAs comerciais é um caminho alternativo, utilizando os dados de projeto dos trabalhos de TIE deve-se conseguir um dispositivo similar.

## REFERÊNCIAS

- [1] Pedro Bertemes-Filho, Alexandre Felipe, and Volney C Vincence. High accurate howland current source: Output constraints analysis. *Circuits and Systems*, 4(07):451, 2013.
- [2] Pedro Bertemes-Filho, Volney C Vincence, Marcio M Santos, and Ilson X Zanatta. Low power current sources for bioimpedance measurements: a comparison between howland and ota-based cmos circuits. *Journal of Electrical Bioimpedance*, 3(1):66–73, 2019.

- [3] Pedro Bertemes Filho. *Tissue characterisation using an impedance spectroscopy probe*. PhD thesis, University of Sheffield, 2002.
- [4] Paco Bogónez-Franco, Lexa Nescolarde, Carolina Gálvez-Montón, Ramon Bragós, and Javier Rosell-Ferrer. An implantable bioimpedance monitor using 2.45 ghz band for telemetry. *Physiological measurement*, 34(1):1, 2012.
- [5] Dhouha Bouchaala, Olfa Kanoun, and Nabil Derbel. High accurate and wideband current excitation for bioimpedance health monitoring systems. *Measurement*, 79:339–348, 2016.
- [6] Joseph D Bronzino. *Biomedical engineering handbook*, volume 2. CRC press, 1999.
- [7] Brian H Brown. Electrical impedance tomography (eit): a review. *Journal of medical engineering & technology*, 27(3):97–108, 2003.
- [8] Ali Ghahary and John G Webster. Electrical safety for an electrical impedance tomograph. In *Images of the Twenty-First Century. Proceedings of the Annual International Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 461–462. IEEE, 1989.
- [9] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The art of electronics*. Cambridge Univ. Press, 1989.
- [10] Achraf Lamlih, Philippe Freitas, Stephane David-Grignot, Jérémie Salles, Vincent Kerzérho, Fabien Soulier, Serge Bernard, Tristan Rouyer, and Sylvain Bonhommeau. Wideband fully differential current driver with optimized output impedance for bioimpedance measurements. In *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [11] Peter J Langlois, Yu Wu, Richard H Bayford, and Andreas Demosthenous. On the application of frequency selective common mode feedback for multifrequency eit. *Physiological measurement*, 36(6):1337, 2015.
- [12] Jinzhen Liu, Xiaoyan Qiao, Mengjun Wang, Weibo Zhang, Gang Li, and Ling Lin. The differential howland current source with high signal to noise ratio for bioimpedance measurement system. *Review of Scientific Instruments*, 85(5):055111, 2014.
- [13] Amin Mahnam, Hassan Yazdani, and Mohsen Mosayebi Samani. Comprehensive study of howland circuit with non-ideal components to design high performance current pumps. *Measurement*, 82:94–104, 2016.
- [14] Orjan G Martinsen and Sverre Grimnes. *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Academic press, 2011.
- [15] KF Morcelles, VG Sirtoli, P Bertemes-Filho, and VC Vincence. Howland current source for high impedance load applications. *Review of Scientific Instruments*, 88(11):114705, 2017.
- [16] Nazanin Neshatvar, Peter Langlois, Richard Bayford, and Andreas Demosthenous. Analog integrated current drivers for bioimpedance applications: A review. *Sensors*, 19(4):756, 2019.
- [17] Javier Rosell and Pere Riu. Common-mode feedback in electrical impedance tomography. *Clinical Physics and Physiological Measurement*, 13(A):11, 1992.
- [18] Dan Sheehan and Matt Smith. Bandwidth, off isolation and crosstalk performance of the adg5xxa multiplexer series. *AN-250 Application Note, Analog Devices, Norwood, MA*.
- [19] Vinicius Sirtoli. Desenvolvimento de um medidor de bioimpedância rápido utilizando discrete interval binary sequences (dibs). *UDESC*, 2018.

- [20] V Grando Sirtoli, V Coelho Vincence, and Pedro Bertemes-Filho. Mirrored enhanced howland current source with feedback control. *Review of Scientific Instruments*, 90:024702, 2019.
- [21] Rodrigo Alecio Stiz, Pedro Bertemes, Airton Ramos, and Volney Coelho Vincence. Wide band howland bipolar current source using agc amplifier. *IEEE Latin America Transactions*, 7(5):514–518, 2009.
- [22] Hakan Töreyn, Sahil Shah, Sinan Hersek, Omer T Inan, and Jennifer Hasler. Proof-of-concept energy-efficient and real-time hemodynamic feature extraction from bioimpedance signals using a mixed-signal field programmable analog array. In *2017 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)*, pages 233–236. IEEE, 2017.
- [23] Aaron S Tucker, Robert M Fox, and Rosalind J Sadleir. Biocompatible, high precision, wideband, improved howland current source with lead-lag compensation. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 7(1):63–70, 2012.
- [24] Ali Zarafshani, Thomas Bach, Chris R Chatwin, Shanshan Tang, Liangzhong Xiang, and Bin Zheng. Conditioning electrical impedance mammography system. *Measurement*, 116:38–48, 2018.
- [25] Fu Zhang, Zhaosheng Teng, Haowen Zhong, Yuxiang Yang, Jianmin Li, and Jiangyan Sang. Wideband mirrored current source design based on differential difference amplifier for electrical bioimpedance spectroscopy. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 4(2):025032, 2018.

## TEORIA E ESTUDOS DE APLICAÇÕES DA TRANSFORMADA FRACIONAL DE FOURIER

Data de aceite: 01/06/2020

Data da submissão: 03/04/2020

### **Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/9465411495928667>

### **Adailton Braga Júnior**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/5914795787360469>

### **Beatriz Cristina Reis Cordeiro**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/6109459940410639>

### **Marcelo Luiz de Carvalho Ribeiro**

Gera Geradora de Energia do Amazonas S/A.  
Manaus - AM

<http://lattes.cnpq.br/7652123700396894>

### **Pierre Teixeira Rodrigues**

Jordão Engenharia  
Rio de Janeiro - RJ

<http://lattes.cnpq.br/2423817783390317>

### **Petrus Luiz Luna Pequeno**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Civil  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/4952012589605929>

### **Antônio Carlos Duarte Ricciotti**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

### **Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti**

Fundação Universidade Federal de Rondônia,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Porto Velho - RO

<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

**RESUMO:** A transformada fracional de Fourier (*fractional Fourier transform* - FrFT) é uma generalização da transformada clássica de Fourier (*Fourier transform* - FT) cujo pressuposto básico exige que existam potências não inteiras para o operador ordinário de Fourier. A FrFT tem origem em publicações do século XX, em que o tratamento da transformada de Fourier como a aplicação de um operador linear a uma função permitiu a generalização da operação para um conjunto contínuo de domínios fracionais, ou seja, domínios intermediários entre tempo e frequência. As aplicações da transformada fracional de Fourier vão desde técnicas de criptografia e multiplexação de sinais até aplicações em resolução de equações diferenciais que descrevem fenômenos

quânticos. O objetivo deste trabalho é apresentar as propriedades principais do operador de Fourier de ordem  $a$  e do núcleo da transformação, para a obtenção da forma discreta da ferramenta. A FrFT implementada foi utilizada para realizar análises iniciais de sinais que representam distúrbios na rede elétrica e foram estudadas novas aplicações para a FrFT como: Detecção de ilhamento e curto circuito no sistema elétrico de potência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transformada de Fourier; Processamento de Sinais; Transformada fracional de Fourier.

## THEORY AND APPLICATION STUDIES OF THE FRACTIONAL FOURIER TRANSFORM

**ABSTRACT:** The fractional Fourier transform is a generalization of the classic Fourier transform, and if  $F^a$  is the Fourier operator,  $a$  is a real number, however if  $F^a$  is a FrFT operator,  $a$  is a non integer number. FrFT has its origins in publications of the 20th century, in which the treatment of the Fourier transform as the application of a linear operator to a function allowed the generalization of the operation for a continuous set of fractional domains, that is, intermediate domains between time and frequency. The applications of the Fourier fractional transform range from cryptography and signal multiplexing techniques to applications in solving differential equations that describe quantum phenomena. The objective of this work is to present the main properties of the Fourier operator of order  $a$  and of the transformation kernel, to obtain the discrete form of the tool. The implemented FrFT was used to perform initial analysis of signals that represent disturbances in the electrical network and new applications for FrFT were studied, such as: Island detection and short circuit in the electrical power system.

**KEYWORDS:** Fourier Transform; Signal Processing; Fractional Fourier Transform.

## 1 | INTRODUÇÃO

O campo do processamento digital de sinais sempre se beneficiou de uma estreita conexão entre teoria e aplicações práticas em novas tecnologias (NETO, 2019). Em engenharia elétrica os conceitos de processamento digital de sinais permitem que sejam aplicados algoritmos eficientes na resolução de uma vasta classe de problemas que, sob o ponto de vista do paradigma analógico de processamento de sinais, não podem ser tratados.

Existem diversos estudos a respeito de transformadas em corpos finitos cujas aplicações são desenvolvidas desde os anos 1970 quando John M. Pollard apresentou “The fast Fourier transform in a finite field” onde foram apresentadas as definições da transformada discreta de Fourier aplicada em corpos finitos e também são apresentados os algoritmos para o cálculo da transformada (NETO, 2019). A transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform*- DFT) é, provavelmente, o exemplo mais conhecido de

uma transformada de comprimento finito com diversas aplicações em engenharia elétrica e processamento de sinais.

A definição clássica da transformada de Fourier foi formalizada pelo matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier durante o estudo da equação diferencial que modela a difusão do calor. Atualmente existem inúmeras variações da transformada clássica de Fourier cujas aplicações se estendem por diversos campos do conhecimento. Apesar da formulação original da transformada ser integral com tempo contínuo, a discretização da ferramenta escrevendo-a em termos de uma base composta de exponenciais complexas conferiu a possibilidade do desenvolvimento de algoritmos computacionais para o cálculo da transformada.

O objetivo deste trabalho é apresentar os conceitos fundamentais acerca da FrFT e as possíveis aplicações no contexto da engenharia elétrica. Diversas aplicações já foram estudadas como a multiplexação de sinais baseada na aplicação de transformações fracionais aos sinais, implementação de filtros fracionais, tecnologia de encriptação de sinais e outras aplicações (LIMA, 2012).

O trabalho investiga ainda a aplicabilidade da FrFT como ferramenta para análise de sinais que caracterizam eventos no SEP. Os eventos analisados foram: Curto-circuito e ilhamento. Os resultados obtidos evidenciam o fato de que é possível utilizar a FrFT como ferramenta para extrair características destes sinais.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA TRANSFORMADA FRACIONAL DE FOURIER

A FrFT é uma generalização da FT que admite a existência de potências não inteiras para o operador ordinário de Fourier. Uma vez que a transformada de Fourier ordinária realiza a mudança do domínio de uma função do tempo para a frequência, a transformada fracional de Fourier de ordem  $\alpha$  levará esta função a um domínio intermediário no plano tempo-frequência (OZAKTAS; KUTAY; MENDLOVIC, 1999).

Para definir com precisão a transformada fracional de Fourier, é válido fazer algumas considerações a respeito da transformada clássica de Fourier. Antes de construir a transformada, propriamente, é necessário definir um espaço vetorial topológico onde estão contidas as funções de interesse. A metodologia utilizada será definir a transformada clássica de Fourier em um espaço de Fréchet, que é uma generalização localmente convexa dos espaços de Banach.

Então seja  $L$  o espaço de Fréchet que contém funções suaves  $f$  infinitamente diferenciáveis, é necessário estabelecer condições de existência para a FT. Uma condição suficiente para a existência da FT exige que o módulo do maior valor do produto entre a  $m$ -ésima potência de  $t$  e a  $n$ -ésima potência de  $f(t)$  seja sempre menor que infinito, ou seja:

$$\gamma_{m,n} f(t) = \sup |t^m f^n(t)| < \infty \text{ para todo } m, n = 0, 1, 2 \quad (1)$$

Se a condição estabelecida na equação se cumpre define-se o operador ordinário de Fourier para uma função  $f \in L$ :

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

A transformada clássica de Fourier é invertível e a expressão da operação inversa é dada pela equação abaixo:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (3)$$

As equações e são, respectivamente as expressões para análise e síntese de Fourier. Uma vez definidos os operadores de análise e síntese de Fourier no espaço estabelecido, é possível desenvolver os conceitos iniciais a respeito da transformada clássica de Fourier. Estas propriedades levam a uma interpretação geométrica das transformadas fracional e ordinária de Fourier.

A primeira propriedade a se definir para a FT é chamada de propriedade da paridade, o operador de paridade da FT é obtido através da aplicação sucessiva da FT. Então, seja  $f(t)$  uma função do tempo de frequência  $\xi$ , a aplicação sucessiva da FT em  $f(t)$  é dada por:

$$F^2 f(t) = (F(Ff))(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4)$$

Então, a equação pode ser escrita como:

$$F^2 f(t) = (F(Ff))(t) = f(-t)$$

Seja  $F$  o operador ordinário de Fourier, então o operador de paridade é dado por  $F^2$ . De maneira análoga é possível verificar o comportamento de potências mais altas da FT. Então, seja  $F^3$ , o comportamento da FT é dado pela equação :

$$F^3 f(t) = (F(F^2 f))(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(-t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

Então:

$$F^3 f(t) = (F(F^2 f))(t) = f(-\omega)$$

A equação (5) evidencia o fato de que  $F^3$ , ou seja, aplicar a transformada de Fourier ordinária três vezes a uma função, é equivalente a aplicar a transformada inversa de Fourier nesta função. De maneira análoga é possível verificar o comportamento do operador  $F^4$ :

$$F^4 f(t) = f(t) = I \quad (6)$$

O operador  $F^4$  coincide com o operador  $F^0 = I$  que é o operador identidade de Fourier, desta maneira aplicar a transformada de Fourier quatro vezes consecutivas à mesma função tem como resultado a própria função. A equação (6) também permite verificar que a FT possui um período igual a 4, ou seja, potências maiores do que 4 para o operador ordinário vão ter comportamento semelhante ao que foi observado nos operadores identidade ( $F^0$  e  $F^4$ ), paridade ( $F^2$ ) e inversa de Fourier ( $F^3$ ).

Os operadores podem ser escritos como  $F^a$  com  $a \in \mathbb{Z}$ , e sintetizados de acordo com a equação (7), em que se define um ângulo de rotação  $\alpha$  cujo valor está relacionado ao parâmetro  $a$ .

$$\alpha = \frac{a\pi}{2} \text{ para todo } a \in \mathbb{Z} \quad (7)$$

E a FT pode ser escrita como uma matriz de rotação dependente do ângulo  $\alpha$  e, conseqüentemente, do parâmetro  $a$ .

$$\begin{bmatrix} t_a \\ \omega_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ \omega \end{bmatrix}$$

A interpretação geométrica da FT decorre da possibilidade de interpretá-la como uma rotação aplicada ao domínio de um sinal do tempo, levando-o para o domínio da frequência. De forma geral o que se considera é que a aplicação da transformada de Fourier rotaciona em um ângulo de  $\pi/2$  graus no sentido anti horário o domínio da função, ou seja, na transformada de Fourier  $a = 1$  na equação (7). Já para os operadores de paridade, inversa e identidade de Fourier o parâmetro  $a$  causa rotações de  $\pi$ ,  $3\pi/2$  ou  $-\pi/2$  e  $2\pi$  ou  $0$ , respectivamente, nos domínios das funções.

Os resultados podem ser observados em um sistema de coordenadas cartesiano em que o eixo  $x$  representa o domínio do tempo e o eixo  $y$  representa o domínio da frequência, vide Figura 1:

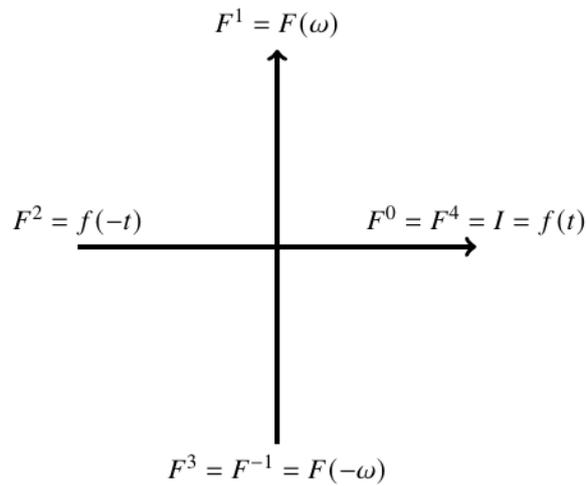


Figura 1: Interpretação dos operadores no plano tempo frequência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As propriedades da transformada clássica de Fourier no plano tempo frequência evidenciam o aspecto de rotação da transformada de Fourier. Formalizar a transformada de Fourier a este ponto exigiu, em um primeiro momento, a definição de um espaço vetorial topológico que contém as funções em que a transformada está sendo aplicada. Neste mesmo espaço considerado anteriormente é possível formalizar a transformada fracional de Fourier e, através da mesma metodologia e verificar o caráter de rotação da FrFT.

Para obter a FrFT através da mesma metodologia utilizada até aqui, deve ser possível que as potências do operador  $F$  sejam números não inteiros. Então, assume-se que a equação (7) pode ser escrita como:

$$\alpha = \frac{a\pi}{2} \text{ para todo } a \in \mathbb{R} \quad (8)$$

Com o parâmetro  $a$  pertencendo ao conjunto dos números reais, o ângulo de rotação  $\alpha$ , que descreve a rotação do domínio das funções pode assumir valores diferentes de  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  e  $2\pi$ . Então, ao aplicar a FrFT à uma função, o resultado obtido é uma função cujo domínio está definido em uma reta não colinear com o domínio do tempo e não colinear com o domínio da frequência.

Eventualmente, o resultado da FrFT é idêntico ao da FT, uma vez que o conjunto  $\mathbb{Z}$  está contido em  $\mathbb{R}$  e, assim a FT é, na verdade, um caso especial da FrFT que acontece quando o parâmetro  $a$  é um número inteiro.

Para definir a matriz de rotação da FrFT, com  $a$  associado a equação (8) é conveniente definir variáveis adimensionais para os resultados da FrFT, uma vez que os resultados não serão definidos nos domínios da frequência e do tempo. Então seja  $x_a$  a variável independente após a aplicação da FrFT e  $\xi_a$  a variável dependente, a matriz de rotação pode ser definida por:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ \xi_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}$$

O plano tempo frequência pode ser definido para as variáveis da FrFT como mostrado na Figura 2.

A continuidade do parâmetro  $a$  na FrFT é garantida através da demonstração do comportamento do *kernel* da transformação quando o ângulo de rotação aplicado é  $\alpha = 0$  e  $\alpha = \pi / 2$ . As consequências da aplicação de transformadas fracionais com estas dimensões serão vistas na seção que trata das propriedades do *kernel* da transformada e será visto que, para estes casos especiais, a FrFT se comporta como a função  $\delta$ .

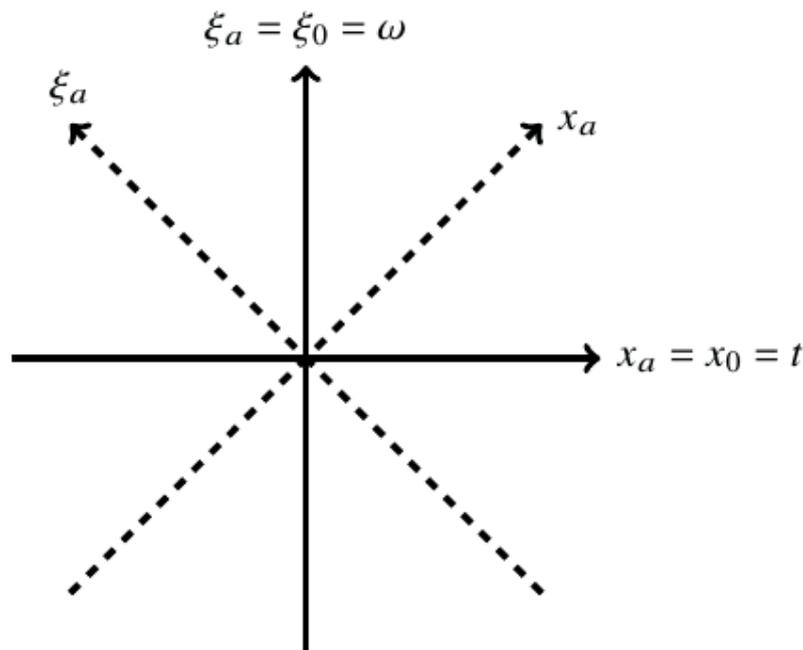


Figura 2: Resultados da FrFT no plano tempo frequência.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com as propriedades vistas até aqui, é possível prosseguir para a definição da expressão integral da FrFT:

$$f_a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} k_a(x, \xi) f(x) dx \quad (9)$$

O termo  $k_a(x, \xi)$  na equação (9) é o *kernel* da FrFT e admite uma expansão espectral em termos de autofunções da FT, caso em que os autovetores da FrFT e da FT são compartilhados, porém com os autovalores da FT elevados a  $a$ -ésima potência fracional da FrFT. A definição da FT como uma equação de autovalores leva a investigação da

autoestrutura das transformadas, campo em que várias pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de obter conjuntos de autovetores que aproximem o resultado numérico e as propriedades da FrFT.

Para a definição da FrFT através da autoestrutura da FT, é necessário definir primeiro uma base do espaço  $L$ . A base do espaço que deseja-se obter é um conjunto de autovetores da FT. Uma vez que  $l$ , todos os autovalores da transformada de Fourier estão no conjunto  $\{1, -i, -1, i\}$  e, portanto, existem apenas quatro autovalores e quatro espaços próprios diferentes, todos com dimensão infinita. Deve-se considerar que o conjunto de autovetores, neste caso, não é único (devido as multiplicidades dos autovalores da FT), porém os autovetores pertencentes a diferentes espaços próprios serão automaticamente ortogonais uma vez que  $F$  é auto adjunto no espaço  $L$  munido de produto interno. Dentro de cada espaço próprio a escolha de um conjunto ortonormal de autovetores pode ser arbitrária (BULTHEEL; SULBARAN, 2002).

Um conjunto ortonormal de autofunções, neste caso é chamado de funções Hermite-Gaussianas. Escolhendo este conjunto específico de autofunções a transformada de Fourier pode ser escrita como:

$$F^1 \phi_n = e^{-in\frac{\pi}{2}} \phi_n \quad (10)$$

Aqui, o autovalor para  $\phi_n$  é dado por  $\lambda_n = e^{-in\frac{\pi}{2}}$  com  $\lambda_1 = -i = e^{-i\frac{\pi}{2}}$  representando uma rotação por um ângulo de  $\pi / 2$ . Como as funções Hermite-Gaussianas são um conjunto de autofunções da transformada de Fourier no espaço  $L$ , isto é suficiente para definir a FrFT neste conjunto de autofunções. Assim a transformada fracional de Fourier de ordem  $a$  é dada por:

$$F^a \phi_n = e^{-ian\frac{\pi}{2}} \phi_n \quad (11)$$

A expansão espectral do *kernel* da FT é dada por:

$$k(t, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n \phi_n(\omega) \phi_n(t) \text{ com } \lambda_n = e^{-in\frac{\pi}{2}} \quad (12)$$

Enquanto que expansão espectral do *kernel* da FrFT, em termos das mesmas autofunções, é dado por:

$$k(x_a, \xi_a) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n^a \phi_n(\xi_a) \phi_n(x_a) \text{ com } \lambda_n^a = e^{-ian\frac{\pi}{2}} \quad (13)$$

Em que  $\phi_n(x_a)$  é a  $n$ -ésima função Hermite-Gaussiana e  $e^{-ian\frac{\pi}{2}}$  corresponde a  $a$ -ésima potência do autovalor  $\lambda_n^a$  da transformada de Fourier ordinária. A expansão espectral

do *kernel* da transformada fracional em polinômios Hermite-Gaussianos fundamenta métodos de discretização da transformada a partir do conhecimento da sua autoestrutura. O estudo da autoestrutura das transformadas discretas sobre os reais tornou o horizonte de pesquisas e aplicação destas transformadas mais amplo e expandiu as pesquisas no campo das transformadas fracionais (NETO, 2019). Em Lima (2012) é possível observar alguns exemplos de aplicações da FrFT e métodos utilizados para obter as suas versões discretizadas.

Agora, se forem definidos os operadores de síntese e análise por  $T_\phi$  e  $T_\phi^*$ , respectivamente, e o operador que representa os autovalores por  $S_\lambda$ , então:

$$T_\phi : f \rightarrow c_n, \quad c_n = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\phi_n(x)dx$$

$$S_\lambda : \{\lambda_n c_n\}, \quad \lambda_n = e^{-in\frac{\pi}{2}}$$

$$T_\phi^* : \{d_n\} \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} d_n\phi_n(x)$$

Então, pode-se escrever a equação da transformada clássica de Fourier:

$$F = T_\phi^* S_\lambda T_\phi \quad (14)$$

Para a FrFT é possível escrever a mesma equação, considerando as potências não inteiras do operador  $F$  e o fato de que as duas transformadas compartilham os mesmos autovetores, com a diferença de que os autovalores da transformada fracional de Fourier estão elevados também ao parâmetro não inteiro  $a$ , ou seja:

$$F^a = T_\phi^* S_\lambda^a T_\phi \quad (15)$$

Verifica-se que o operador  $T_\phi$  é unitário e  $T_\phi^*$  é o seu adjunto. Através desta representação é possível demonstrar várias propriedades fundamentais do operador  $F^a$ , as principais propriedades estão listadas abaixo:

1. Propriedade da FT: Para a transformada clássica de Fourier  $a=1$  e  $\alpha = \pi/2$  então  $Ff(t) = F(\omega)$ ;
2. Propriedade da identidade: Se  $a = 0$ ,  $F^a f(t) = 1 f(t) = f(t)$ ;
3. Propriedade da paridade: Se  $a = 2$ ,  $F^2 f(t) = f(-t)$ ;
4. Propriedade aditiva: Sejam os operadores  $F a$  e  $F b$ , para todo  $a, b \in \mathbb{R}$ , então  $(F a + F b) f(t) = F a f(t) + F b f(t)$ ;
5. Raiz quadrada: A FrFT de ordem  $a = 0,5$  é a raiz quadrada da FT, uma vez que  $(F^{0,5} + F^{0,5}) f(t) = F f(t) = F(\omega)$ ;
6. Propriedade da unitariedade:  $(F^a)^{-1} = (F^a)$ ;

7. Comutatividade:  $F^a F^b = F^b F^a$ ;
8. Associatividade:  $F^a (F^b F^c) = (F^a F^b) F^c$ .

Então valem as propriedades abaixo para o *kernel* da FrFT:

1. Simetria Diagonal:  $k_a(x, x) = k_{\square a}(x, x)$ ;
2. Complexo conjugado:  $k_{\square a}(x, x) = k_a^*(x, x)$ ;
3. Simetria Pontual:  $k_a(\square x, x) = k_a(x, \square x)$ ;
4. Aditividade:  $k_a(\square x, x) k_b(\square x, x) = k_{a+b}(\square x, x)$ ;
5. Ortogonalidade:  $k_a(x, x) k_a^*(x, x) = d(x \square x)$ .

### 3 | ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA TRANSFORMADA FRACTIONAL DE FOURIER

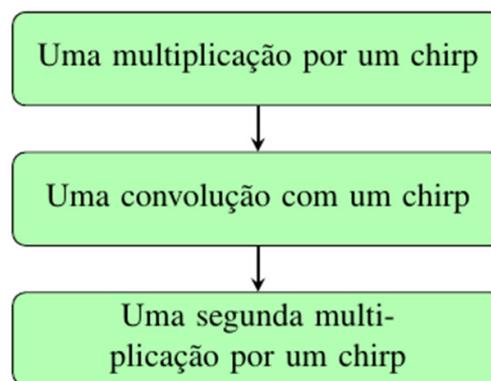


Figura 3: Algoritmo para o cálculo da transformada fracional de Fourier.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em Ozaktas *et al* (1996) são apresentados dois métodos computacionais para o cálculo da FrFT, ambos baseados no fato de que transformações lineares canônicas, como é o caso da FrFT podem ser divididas em operações mais simples como multiplicação e convolução por um *chirp* e a transformação ordinária de Fourier. Em Ozaktas, Kutay, Mendlovic (1999), o processo para o cálculo da FrFT é definido através do seguinte procedimento:

Para definir a FrFT de acordo com o procedimento acima, assume-se que em todos os domínios fracionais, de variável  $x$ , a função  $f_\alpha$  está contida no intervalo  $[-\Delta x/2, \Delta x/2]$ . Essa definição é equivalente a assumir que a distribuição de Wigner das funções  $f$  está contida em um círculo de raio  $\Delta x/2$ , o que garante que boa parte da energia do sinal está contida no mesmo raio, desde que  $\Delta x$  seja suficientemente grande. A FrFT pode ser escrita, com a expressão do *kernel* simplificada, como:

$$F^a f(x) = A_\alpha e^{i\pi \cot(\alpha)x^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi \csc(\alpha)x_a x} e^{i\pi \cot(\alpha)x^2} f(x) dx \quad (16)$$

O parâmetro  $a$  (que determina o ângulo de rotação do domínio dos sinais) deve estar limitado ao intervalo  $0,5 \leq a \leq 1,5$  para que a função modulada  $e^{ip \cot(a) x^2}$  esteja contida no intervalo  $\pm \Delta x$ . Por fins de simplificação, assume-se que  $a^* = \cot(a)$  e  $b = \csc(a)$ .

Sabendo que a distribuição de Wigner é zero para um círculo de raio maior que  $\Delta x$  centrado na origem, aplica-se o método da interpolação de Shannon para reescrever  $e^{ip \cot(a) x^2} f(x)$  como:

$$e^{ip \cot(a) x^2} f(x) = \sum_{n=-N}^N e^{i\pi \alpha^* (n/2\Delta x_a)^2} f \alpha^* (n/2\Delta x_a) \text{sinc}(2\Delta x_a (x - (n/2\Delta x_a))) \quad (17)$$

Onde  $N = (\Delta x)^2$ . O somatório na equação (17) é realizado de  $-N$  até  $N - 1$  e assume-se que  $f(x)$  é igual a 0 fora do intervalo  $[-\Delta x/2, \Delta x/2]$ . Substituindo a equação (17) em (16) e mudando a ordem de integração e soma:

$$f_a(x_a) = A_\alpha e^{i\pi \alpha^* (x_a)^2} \sum_{n=-N}^{N-1} e^{i\pi \alpha^* (n/2\Delta x_a)^2} f(n/2\Delta x_a) \int e^{i\pi \beta x_a^2} x \text{sinc}(2\Delta x_a (x - (n/2\Delta x_a))) dx \quad (18)$$

Uma vez que a integral  $\text{rect}(\csc(a) / 2 \square x_a) = 1$  no intervalo  $|x| \leq \Delta x / 2$ . Então as componentes de  $f_a(x_a)$  podem ser calculadas por:

$$f_a(x_a) = (A_\alpha / 2\Delta u) \sum_{n=-N}^{N-1} e^{i\pi \alpha^2 x_a^2} e^{i\pi \beta (n/2\Delta x_a)} e^{i\pi \alpha^* (n/2\Delta x_a)^2} f(x / 2\Delta x) \quad (19)$$

A equação (19) é uma versão discretizada da FrFT que pode ser implementada computacionalmente, no entanto o esforço computacional exigido é proporcional ao número de operações que a operação exige. Para reduzir o número de operações, adota-se o método descrito no início desta seção, em que a FrFT é dividida em operações mais simples e, então, a equação (19) é escrita como uma convolução por  $e^{ipb(n/2 \square x)^2}$  como:

$$f_a(m / \Delta x_a) = (A_\alpha / 2\Delta u) e^{i\pi (\alpha^* - \beta)(m/2\Delta x_a)^2} \sum_{n=-N}^{N-1} e^{i\pi \beta ((m-n)/2\Delta x)^2} e^{i\pi (\alpha^* - \beta)(n/2\Delta x_a)^2} \quad (20)$$

A FrFT pode ser implementada através da equação 20 para qualquer domínio fracional, embora o parâmetro  $a$  esteja limitado ao intervalo  $0,5 \leq a \leq 1,5$ , graças a propriedade da aditividade, os domínios fracionais que não estão contidos no intervalo podem ser obtidos através de aplicações sucessivas de FrFT no intervalo de  $a$ .

A Figura 4 mostra a evolução da função retangular do domínio do tempo para o domínio da frequência, passando por dois domínios fracionais. Em (a), a FrFT aplicada é a identidade de Fourier, caso em que  $a = 0$ , em (b) é possível verificar o resultado da aplicação de uma FrFT com  $a = 0,5$ , caso em que o resultado obtido é a raiz quadrada da FT (de acordo com as propriedades já descritas anteriormente), em (c) a FrFT aplicada possui  $a = 0,7$  e, com o domínio fracional se aproximando do domínio da frequência, as componentes de frequência do sinal se destacam e o resultado se aproxima da FT.

Finalmente, em (d) a FrFT aplicada coincide com a FT com  $a = 1$  e o resultado obtido é a função *sinc*, que corresponde exatamente ao resultado esperado.

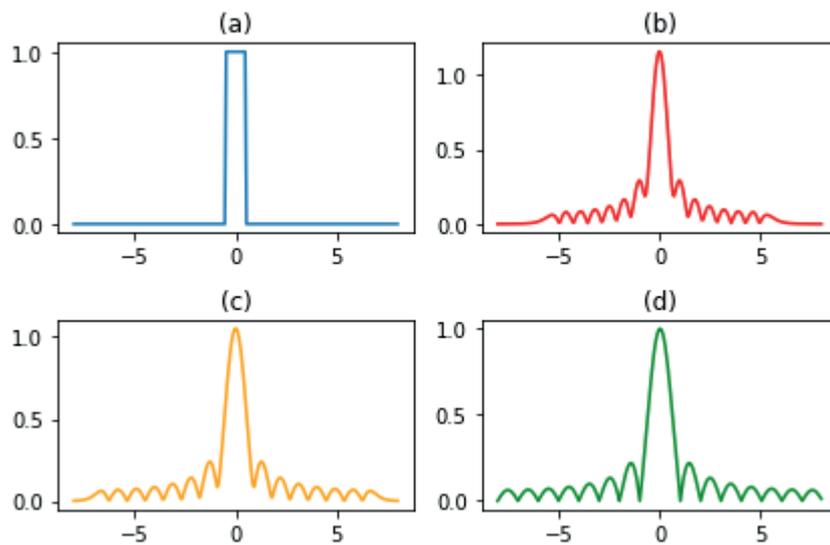


Figura 4: Módulo de diferentes transformadas fracionais da função retangular.

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4 | APLICAÇÕES DA TRANSFORMADA FRACTIONAL DE FOURIER

### 4.1 MULTIPLEXAÇÃO DE SINAIS

Uma das possíveis aplicações da FrFT, no âmbito da comunicação é utilizá-la na multiplexação de sinais. Multiplexar sinais significa transmiti-los através de um mesmo canal utilizando, para isto, ferramentas multiplexação e demultiplexação. A técnica de multiplexação baseada na FrFT consiste em rotacionar os domínios dos sinais a serem transmitidos em direções fixas no plano tempo frequência de modo a garantir um melhor aproveitamento do uso da largura de banda.

Nos trabalhos de Ozaktas *et al*, (1994), Martone (2001) e Erseghe, Laurenti e Cellini (2005) são tratados conceitos relacionados a multiplexação de sinais no domínio do tempo e da frequência e multiplexação de sinais em domínios fracionais contendo informação dos dois espaços. Os autores apresentam modelos em que é possível transmitir sinais através dos mesmos canais sem que haja sobreposição das informações, utilizando a FrFT.

Estudos mais recentes demonstram a possibilidade da utilização da FrFT em sistemas de multiplexação através de um sistema que procura otimizar o aproveitamento do plano tempo frequência. No sistema proposto em Tao, Meng e Wang (2010) é realizada a multiplexação de sinais baseada na ordem da transformada fracional aplicada. Nesse sistema, as funções de base dos sinais transmitidos são uniões dos *kernels* das transformadas fracionais aplicadas aos sinais.

## 4.2 FILTROS FRACIONAIS

Além da multiplexação de sinais, outra aplicação da FrFT em comunicações é a utilização para filtragem de sinais. A FrFT é utilizada para filtrar sinais cujas componentes indesejadas são sobrepostas nos domínios do tempo e da frequência, porém podem ser separadas em domínios fracionais.

O processo de filtragem fracional pode ser resumido através da Figura 5, o sinal em (a) é um pulso gaussiano modulado por um *chirp* e o objetivo de aplicar um filtro fracional a este sinal é recuperá-lo, no domínio do tempo, com o mínimo de componentes do *chirp* adicionado.

Em (b) é possível observar o primeiro estágio do processo de recuperação do sinal, uma FrFT de  $a = 0,8$  foi aplicada ao sinal de modo a observar, no domínio fracional, as componentes de frequência presentes. O pulso gaussiano (componente de maior magnitude) é mantido, enquanto que o restante da informação do sinal é eliminada através de um filtro passa faixa.

Em (c) é possível verificar o resultado após a filtragem, ainda no domínio fracional. Para recuperar o sinal, em (d) é necessário aplicar uma FrFT inversa de mesma ordem a que foi aplicada anteriormente.

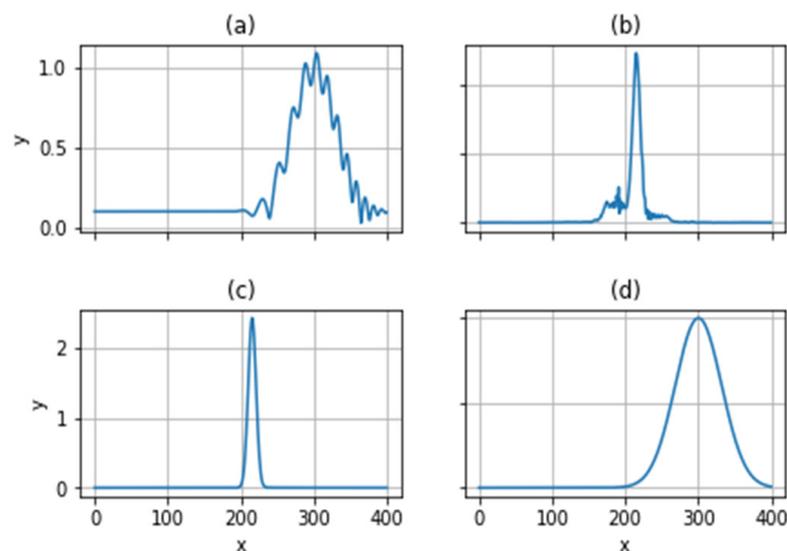


Figura 5: Aplicação de um filtro fracional para recuperação de um sinal.

Fonte: Modificado de Lima (2012).

## 4.3 DETECÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

A utilização de ferramentas matemáticas avançadas à análise de vibração em máquinas elétricas é um campo com vasta aplicabilidade para transformadas de Fourier. A utilização da FrFT para identificação de falhas em motores é estudada no trabalho de

GU et al, (2018) em que são estudadas falhas no rotor de máquinas trifásicas de indução.

No estudo realizado por GU et al, (2018) foram obtidos resultados promissores com relação a utilização da FrFT na detecção de falhas em 4 experimentos distintos. Foram verificadas falhas do tipo: rotor danificado, uma barra do rotor oca e danos no rolamento da esfera. Além disso, foram introduzidos ruídos intencionais aos sinais de modo a verificar a eficiência do método desenvolvido para sinais com ruídos.

#### 4.4 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA UTILIZANDO A TRANSFORMADA FRACIONAL DE FOURIER

O conceito de qualidade de energia está diretamente relacionado às formas de onda de tensão e corrente e com a frequência do SEP. Os limites de oscilação dos parâmetros do sistema elétrico são fixados através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2017).

Em operação normal, a frequência da rede deve ser tão próxima quanto possível do valor nominal de 60 Hz e as formas de onda da corrente e da tensão não devem apresentar distorções. Dentre os fenômenos que podem causar degradação da qualidade de energia podem se destacar: Harmônicos, flutuações de tensão, afundamento de tensão, transitórios eletromagnéticos, curto circuito, ilhamento, etc.

A análise de distúrbios no SEP pode ser realizada através de ferramentas de processamento digital de sinais que são utilizadas para extrair características e identificar anomalias nos sinais. Na Figura 6 é possível observar o resultado do módulo da FrFT aplicada ao sistema elétrico trifásico em operação normal.

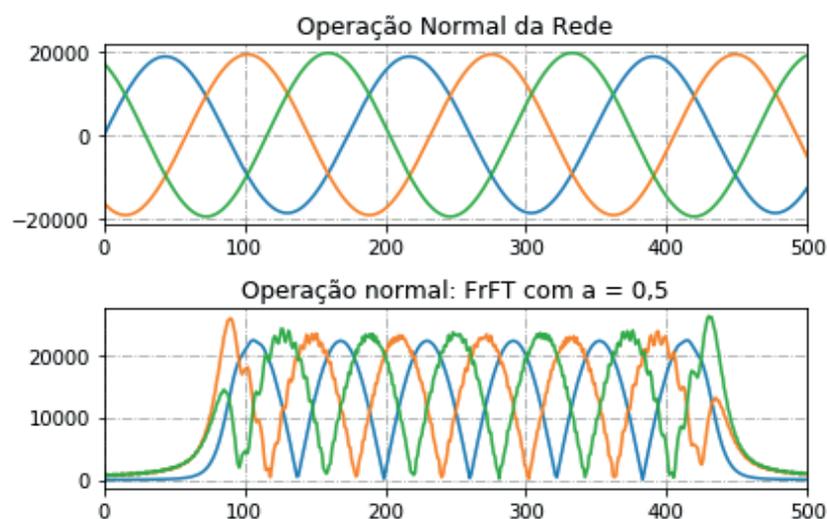


Figura 6: Representação das 3 fases do sistema elétrico no domínio do tempo e as respectivas FrFT's.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma das ocorrências que precisa ser detectada nos instantes iniciais, no sistema elétrico de potência, é o curto circuito. Um curto circuito ocorre quando a corrente elétrica flui através de um caminho de impedância que, teoricamente, tende a zero. Existem diferentes tipos de curtos circuitos e cada um deles possui características particulares. Podem ocorrer curtos trifásicos, curtos bifásicos e monofásicos, além disto os curtos bifásicos e trifásicos podem ou não ter envolvimento com a terra, entretanto o curto circuito monofásico acontece sempre entre uma das fases do sistema e a terra.

A ocorrência de curtos circuitos assimétricos SEP causa um desbalanço entre fases que pode ser observado nas formas de onda de cada uma das três fases do sistema. A FrFT pode ser utilizada para analisar sinais que representam curto-circuito no SEP. Na Figura 7 é possível verificar o resultado da aplicação de uma FrFT de ordem 0,5 (a raiz quadrada da FT) ao sinal de tensão durante um curto circuito bifásico entre as fases A e B do sistema.

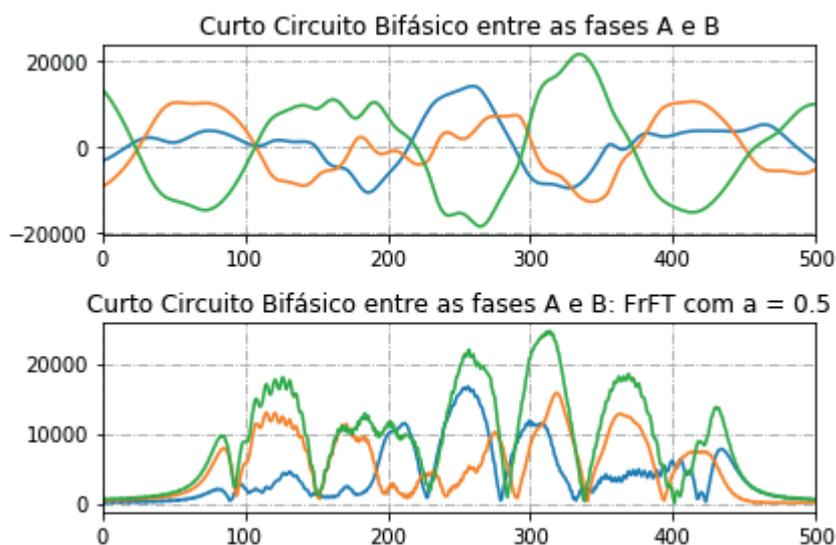


Figura 7: Módulo da FrFT aplicada a um sinal de curto circuito no SEP.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Além do curto circuito bifásico, foi verificado o resultado da FrFT ao analisar um curto circuito monofásico na fase A. O resultado obtido para os casos de curto circuito analisados evidenciam o fato de que a FrFT possui um maior grau de liberdade com relação a FT, uma vez que nos domínios fracionais, a informação contida nos sinais mantém relação com as informações do tempo e da frequência. O resultado obtido para o curto circuito monofásico pode ser visto na Figura 8, onde foi plotado o sinal de tensão durante o curto:

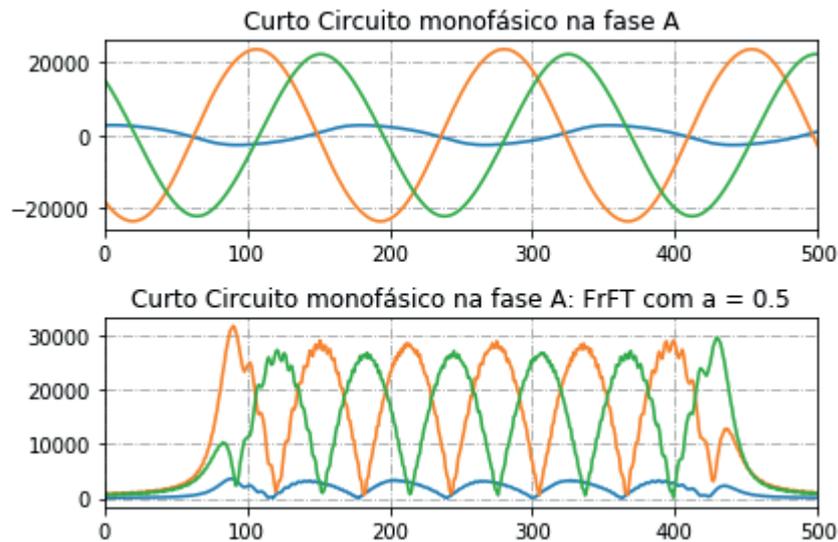


Figura 8: Módulo da FrFT aplicada a um sinal de curto circuito no SEP.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outro evento analisado foi o ilhamento. Um ilhamento ocorre quando, por algum motivo, parte da rede elétrica é desconectada do sistema principal e permanece energizada por um gerador distribuído. Os sistemas de detecção de ilhamento devem ser capazes de distinguir entre os eventos do SEP de modo a evitar atuações indevidas. Além disso, é necessário que os sistemas sejam confiáveis, uma vez que a não detecção de ilhamento causa diversos problemas ao SEP como queda da qualidade de energia, perda de referência de tensão, entre outros problemas.

As principais técnicas de detecção de ilhamento podem ser classificadas em: Técnicas locais, que podem ser ativas, passivas ou híbridas; Técnicas remotas e Técnicas que utilizam processamento de sinais. As vantagens de se empregar técnicas baseadas em processamento de sinais são a não degradação da qualidade de energia, problema que ocorre em técnicas ativas, e a confiabilidade conferida ao sistema. O resultado obtido com a FrFT aplicada a um sinal de ilhamento pode ser visto na Figura 8.

Durante o ilhamento ocorre um valor elevado de transitórios no sinal da tensão. Componentes do sinal que se sobreponham nos domínios do tempo e da frequência serão perdidas com  $FrFT = FT$ , entretanto, é possível analisar as componentes transitórias nos domínios fracionais.

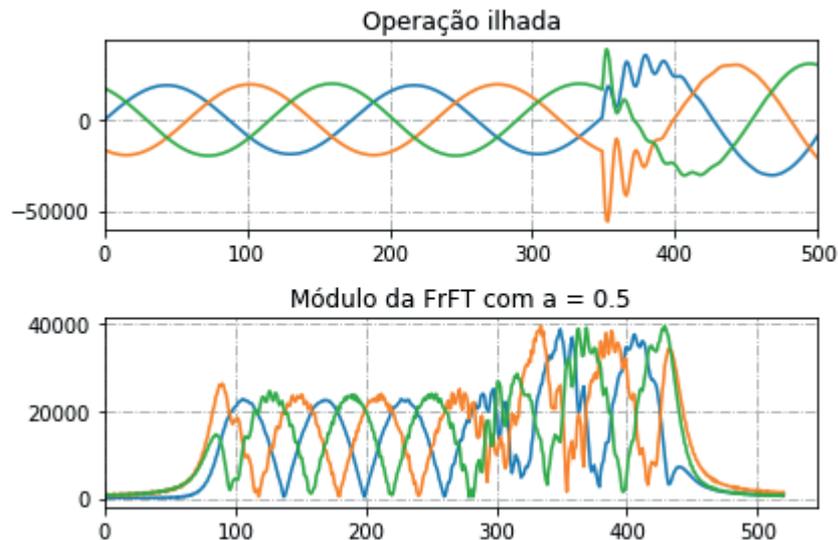


Figura 8: Módulo da FrFT aplicada a um sinal de ilhamento no SEP.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outra possibilidade é utilizar a FrFT para tratar a energia do sinal, uma vez que é possível determinar domínios fracionais com um pequeno número de amostras que contém toda a energia do sinal.

## 5 | CONCLUSÃO

A transformada fracional de Fourier é uma ferramenta cujo campo de aplicações ainda está aberto a ser explorado, dada a vasta utilidade da ferramenta nos mais variados problemas.

Neste trabalho foram apresentados conceitos consagrados a respeito da FrFT, como a sua definição em termos de autofunções da FT, as propriedades do *kernel* da transformada, as propriedades fundamentais do operador fracional de Fourier e um dos métodos através dos quais é possível implementá-la computacionalmente.

Também foram vistos conceitos iniciais cujas aplicações ainda não foram desenvolvidas pela comunidade de processamento de sinais, como a análise de distúrbios no sistema elétrico de potência, sendo estes distúrbios o ilhamento e o curto circuito.

Embora a transformada de Fourier seja uma ferramenta consagrada no tratamento deste tipo de problema, o fato de a transformada fracional de Fourier possuir uma resposta mais geral, dada a continuidade do parâmetro  $a$ , abre uma nova gama de possibilidades em processamento de sinais.

A análise de sinais em domínios fracionais pode ser empregada em conjunto com técnicas de inteligência computacional para o reconhecimento de padrões em distúrbios do SEP e, assim, novos modelos de técnicas de detecção de ilhamento, curto circuito, oscilações de tensão e outros distúrbios podem ser tratados do ponto de vista do

processamento digital de sinais utilizando a transformada fracional de Fourier.

## AGRADECIMENTOS

A toda a equipe do Laboratório de Controle e Automação - LACA da Fundação Universidade Federal de Rondônia.

Agradecimento especial ao Engenheiro Marcelo Luiz de Carvalho Ribeiro pelo apoio com a pesquisa realizada.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, Módulo. 3 (PRODIST). Acesso ao Sistema de Distribuição, Brasil, 2008.

BULTHEEL, A.; SULBARAN, H. M. **A shattered survey of the fractional fourier transform**. TW Reports, Department of Computer Science, KULeuven; Leuven, Belgium, 2002.

ERSEGHE, T.; LAURENTI, N.; CELLINI, V. **A multicarrier architecture based upon the affine fourier transform**. IEEE Transactions on Communications, IEEE, v. 53, n. 5, p. 853–862, 2005.

GU, F.-C. et al. **Rotor fault identification of induction motor based on discrete fractional fourier transform**. In: IEEE.2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). [S.l.], 2018. p.205–208.

LIMA, J. B. **A transformada fracional de fourier: Conceitos e cenários de aplicação**. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2012.

MARTONE, M. **A multicarrier system based on the fractional fourier transform for time-frequency-selective channels**. IEEE Transactions on Communications, IEEE, v. 49, n. 6, p. 1011–1020, 2001.

NETO, J. R. d. O. **Construção de autovetores de transformadas discretas de fourier: novos métodos e aplicações**. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

OZAKTAS, Haldun M.; KUTAY, M. Alper; MENDLOVIC, David. **Introduction to the fractional Fourier transform and its applications**. In: Advances in imaging and electron physics. Elsevier, 1999. p. 239-291.

OZAKTAS, H. M. et al. **Digital computation of the fractional fourier transform**. IEEE Transactions on signal processing, IEEE, v. 44, n. 9, p.2141–2150, 1996.

OZAKTAS, H. M.; MENDLOVIC, D. **Fractional fourier transform as a tool for analyzing beam propagation and spherical mirror resonators**. Opticsletters, Optical Society of America, v. 19, n. 21, p. 1678–1680, 1994.

TAO, R.; MENG, X.-Y.; WANG, Y. **Transform order division multiplexing**. IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE, v. 59, n. 2, p. 598–609, 2010.

## RELÉ INTELIGENTE BASEADO NA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE 4 VALORES MULTIFUNCIONAL - RI LPA4V

*Data de aceite: 01/06/2020*

### **Viviane Barrozo da Silva**

Fundação Universidade Federal de Rondônia -  
UNIR  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

### **Ghendy Cardoso Júnior**

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Santa Maria – RS  
<http://lattes.cnpq.br/6284386218725402>

### **Antonio Carlos Duarte Ricciotti**

Fundação Universidade Federal de Rondônia -  
UNIR  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

### **Pierre Teixeira Rodrigues**

Jordão Engenharia  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/2423817783390317>

### **Marcelo Luiz De Carvalho Ribeiro**

Gera Maranhão - Geradora de Energia do  
Maranhão S/A  
Maranhão – MA  
<http://lattes.cnpq.br/7652123700396894>

**RESUMO:** Este artigo apresenta o relé inteligente (RI) de proteção com múltiplas funções para sistemas baseados em inversores

que utiliza uma rede neural paraconsistente. Essa rede trabalha com graus de evidência favorável, desfavorável, sensibilidade e tempo. O RI inclui as funções de detecção de ilhamento, detecção de falta, reconhecimento do tipo de falta e bloqueio seletivo de falta. O RI LPA4v multifunção proposto foi testado em ambiente hardware-in-the-loop (HIL). Os resultados mostram que o RI proposto é superior aos métodos tradicionais de reconhecimento de ilhamento em relação à confiabilidade, segurança e tempo de detecção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Relé inteligente, Geração distribuída, Ilhamento, Rede neural paraconsistente, Proteção.

**ABSTRACT:** This article presents the protection relay (IR) with several functions for systems based on inverters that use a paraconsistent neural network. This network works with favorable, unfavorable degrees of evidence, sensitivity and time. The IR includes the functions of islanding detection, fault detection, fault type recognition and selective fault blocking. The proposed multifunctional APL4v IR was tested in a hardware-in-the-loop (HIL) environment. The results show that the proposed IR is superior to traditional island recognition methods in terms of reliability, security and detection time.

**KEYWORDS:** Intelligent relay, Distributed generation, Islanding, Paraconsistent neural network, Protection.

## 1 | INTRODUÇÃO

O Setor Energético Brasileiro está sob intensa transformação, a oferta descentralizada e ambientalmente sustentável tem impulsionado a utilização de gerações de pequeno e médio porte (microgeração e minigeração) conectadas aos sistemas de distribuição chamadas de Gerações Distribuídas baseados em inversores (GDs). O uso das GDs é benéfico para as concessionárias de energia, proprietários de GDs e consumidores finais, pois melhora a confiabilidade, a qualidade da energia e é economicamente vantajoso. Entretanto, várias condições técnicas precisam ser analisadas em relação à inserção de GDs, de forma a identificar os impactos causados na rede elétrica. Uma dessas condições é o ilhamento que pode ser classificado em ilhamento intencional, quando a fonte de geração é desconectada da rede e o ilhamento não intencional, quando problemas de curto-circuito e falhas nos dispositivos são detectados na rede de distribuição.

O ilhamento não intencional deve ser detectado pelo sistema de proteção da GD, pois pode causar a deterioração da qualidade de energia, risco de vida para as equipes de manutenção, bem como problemas na proteção do sistema de distribuição ilhado. Por outro lado, a detecção indevida pode ter como consequência a instabilidade do sistema interligado em casos de forte dependência de GDs, diminuição da qualidade da energia, atenuação da qualidade do fornecimento, bem como a redução da confiabilidade do sistema de distribuição, além do incremento dos custos operacionais.

Para identificar o evento de ilhamento várias técnicas foram propostas na literatura para garantir que os sistemas operem sob os requisitos de segurança e qualidade.

As técnicas de proteção anti-ilhamento podem ser classificadas em função das suas características operativas, e podem ser classificadas em técnicas remotas e locais.

As técnicas remotas são mais confiáveis e eficientes na detecção de ilhamento do que as técnicas locais. Porém, as técnicas remotas são pouco utilizadas devido ao alto custo operacional e a necessidade de uma rede de comunicação sem falhas, e tem por princípio funcional a comunicação entre a concessionária, os dispositivos de proteção, os dispositivos de manobra da rede de distribuição e a GD [5].

As técnicas locais são divididas em três classes: passivas, ativas e híbridas [1],[2]. Dentre as técnicas ativas típicas, as que mais se destacam são: Active Frequency Drift (AFD), Sandia Frequency Shift (SFS), Slupe Mode Frequency Shift (SMS) e método de medição de impedância. Essas técnicas introduzem no sistema de distribuição uma instabilidade que é normalizada pela conexão com o sistema principal, ou provocam uma perturbação que é absorvida pelo sistema interligado. A ocorrência do ilhamento, surti

a partir da perda de conexão com o sistema interligado e os parâmetros das gerações distribuídas como tensão, frequência, impedância sofrem uma variação que é utilizada para a detecção do ilhamento. Essas técnicas apresentam deterioração da qualidade da energia elétrica e estão associadas aos geradores que utilizam inversores para a conexão com a rede elétrica, levando à falha de detecção de ilhamento [6].

As técnicas passivas têm como princípio a detecção de uma anomalia na amplitude, frequência e fase da tensão no ponto de acoplamento comum (PCC) entre o inversor e a rede de distribuição. Sendo assim, essas cessam a conversão de energia da GD quando ocorrem mudanças a partir das condições normais especificadas. As técnicas passivas têm um desempenho notável quando existe uma perceptível incompatibilidade entre a carga e a geração do sistema ilhado. No entanto, se essa incompatibilidade for pequena, a superioridade das técnicas passivas é reduzida [5].

As técnicas híbridas reúnem baixas zonas de não detecção (ZND) dos métodos ativos e a não interferência na qualidade da energia elétrica dos métodos passivos. Geralmente, os métodos híbridos utilizam uma técnica passiva para realizar uma primeira avaliação do estado do sistema de distribuição. Quando uma anormalidade é detectada, um método ativo é empregado para forçar o sistema a uma condição que caracterize o ilhamento.

Como anteriormente mencionado, a detecção de faltas é outra parte importante da detecção de interconexão da DG. As normas operativas das DGs requerem a desconexão imediata no início de qualquer falta. Dentre os tipos faltas, as que envolvem curto-circuito são as mais notáveis, tendo como destaque a falta de curto-circuito monofásico linha-terra que corresponde a 70 % desse fato.

Portanto, este artigo propõe um relé inteligente (RI) com múltiplas funções para sistemas baseados em inversores, utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada de 4 Valores, que permiti efetuar tratamentos de sinais inconsistentes, indeterminado ou indefinidos. A análise de sinais utilizando a LPA4v permite que vários problemas ocasionados por situações contraditórias, imprecisas ou indefinidas possam ser tratados de maneira a detectar a falta ou a falha mais próxima de sua realidade, além de analisar o comportamento dos especialistas no decorrer do tempo. Este método deu origem ao algoritmo denominado “Para– Especialista” implementado no RI.

Este artigo está dividido nas seguintes seções: A seção 2 apresenta o desenvolvimento e a implementação do relé inteligente multifunção; A seção 3 mostra a simulação em tempo real e análise dos resultados; A seção 4 apresenta as conclusões obtidas do RI.

## 2 | METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO E A IMPLEMENTAÇÃO DO RELÉ INTELIGENTE MULTIFUNÇÃO

### 2.1 A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA)

O RI – LPA4v tem como princípio de funcionamento uma lógica não clássica chamada de Lógica Paraconsistente Anotada (LPA). Que trata contradições, indefinições e imprecisões de dados ou sinais, oriundos de uma mesma fonte ou de fontes diferentes, solucionando essas inconsistências. Pois, para cada proposição, que são as sentenças simbólicas que definem algo como verdadeiro ou falso, são associados dois graus, o grau de evidência favorável ( $\mu$ ) e o grau de evidência desfavorável ( $\lambda$ ). A análise dos graus produz uma saída denominada estado lógico resultante.

#### 2.1.1 Algoritmos da LPA4v lógica

Os algoritmos da Lógica Paraconsistente de 4 Valores estão fundamentados nos Nós de Análise Paraconsistente (NAP). Esses quando interligados compõem a rede neural paraconsistente de análise de tomada de decisão.

Os NAP's são algoritmos extraídos da Lógica Paraconsistente e formam as redes de análise paraconsistente, constituindo o tratamento do evento de ilhamento. Com as suas entradas sendo alimentadas pelos Graus de Evidências retirados de base de dados de conhecimento incerto, os NAP utilizam as equações obtidas da metodologia da LPA e obtêm os resultados finais na forma de Graus de Certeza Real ( $\mu_{ER1}$ ). Esses valores de podem ser normalizados transformando-se em Grau de Evidência resultante.

A normalização de valores de graus de evidência favorável e desfavorável nos algoritmos da LPA produz na saída do NAP um grau de evidência resultante e um valor de Intervalo de Evidência, ambos pertencentes ao conjunto dos números reais. A representação simbólica de um NAP é exibida na Figura 1.

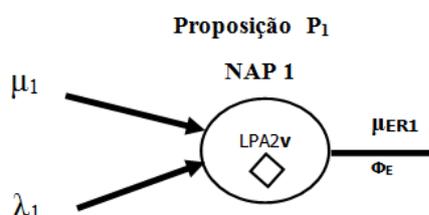


FIGURA 1 - Representação de um NAP – Nó de Análises Paraconsistente.

No NAP o valor do Grau de Evidência de Saída representa o valor da evidência resultante a respeito da Proposição Analisada, e o Intervalo de Evidência informa o quanto o valor do sinal de evidência obtido pode variar, com o mesmo Grau de contradição

apresentado pelas informações de evidência aplicadas nas entradas [10][11].

A finalidade do algoritmo do NAP é analisar os valores dos graus de *evidência favorável* e de *evidência desfavorável* conforme a Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores (LPA2v).

O Algoritmo básico de um NAP descrito a seguir:

### 1. Entre com os valores de Entrada

$\mu$  # Grau de evidência favorável [0,1]  
 $\lambda$  # Grau de evidência desfavorável [0,1]

### 2. Calcule o Grau de Contradição normalizado

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu + \lambda}{2}$$

### 3. Calcule o Intervalo de Evidência resultante

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1|$$

### 4. Determine o sinal da Saída

Se  $\varphi_E \leq 0,25$  então faça:  $S1 = 0,5$  e  $S2 = \varphi_{E(\pm)}$  e vá para o item 12  
Senão vá para o próximo item

### 5. Calcule o Grau de Certeza

$$G_c = \mu - \lambda$$

### 6. Calcule o Grau de Contradição

$$G_{ct} = (\mu + \lambda) - 1$$

### 7. Calcule a distância D

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2}$$

### 8. Determine o Grau de Certeza real

Se  $G_c > 0$  então faça:  $G_{CR} = (1 - D)$   
Se  $G_c < 0$  então faça:  $G_{CR} = (D - 1)$

### 9. Calcule o Grau de Evidência resultante real

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$$

### 10. Determine a sinalização do Intervalo de Evidência resultante

Se  $\mu_{ctr} < 0,5$  então faça:  $\varphi = \varphi_{E(-)}$  # Sinalize negativo  
Se  $\mu_{ctr} > 0,5$  então faça:  $\varphi = \varphi_{E(+)}$  # Sinalize positivo  
Se  $\mu_{ctr} = 0,5$  então faça:  $\varphi = \varphi_{E(0)}$  # Sinalize zero

### 11. Apresente os resultados na saída

Faça:  $S1 = \mu_{ER}$  e  $S2 = \varphi_{E(\pm)}$

## 12. Fim

Se o sistema perceber um alto grau de informações contraditórias ou inconsistentes poderá solicitar mais informações através de seus especialistas que vão analisar as evidências através dos graus de especialidades ( $e$ ), o grau de especialidade máximo ( $e_{máx} = 1$ ) e o grau de especialidade mínimo ( $e_{min} = 0$ ) conhecido como neófito. Os especialistas tem o papel de tomada de decisão de forma coerente com o mínimo de indecisão ou desconhecimento de causa.

O grau de especialidade mínimo ( $e_{min}$ ) neófito devido sua inexperiência, adquire a experiência à medida que a variável tempo ( $t$ ) transcorre. Desta forma, sua especialidade aumenta para assim, definir dois estados lógicos Verdadeiro ou Falso. Essa análise pode ser feita para qualquer nível de especialidade. A quarta dimensão “tempo” permiti visualizar o comportamento dos especialistas nas tomadas de decisão do sistema tornando o extremamente sensível. Portanto, a Lógica Paraconsistente Anotada de 4 Valores é representada pela quádrupla  $(\mu, \lambda, e, t)$ .

Através do processo de treinamento, conforme a configuração do alimentador de distribuição, os eventos deilhamento e de falta são simulados em tempo real. Durante as simulações, as medições de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum (PCC) da DG são capturados e armazenados para serem analisados pelo sistema chamado de Nó de Análise Paraconsistente (NAP). Com base nos dados obtidos, os recursos possuem padrões ou características de variação que durante as condições de ilhamento e falta são calculadas, como por exemplo a frequência, taxa de mudança de frequência, potências ativa e reativa. Após os dados serem processados a lógica proposta é utilizada para encontrar as melhores características com altos índices de confiança e segurança que serão incorporadas no relé inteligente (RI).

### 2.2 A Extração das Características

As principais características selecionadas no PCC da DG são utilizadas para formar os modelos de tomada de decisão conforme a Tabela 1, onde pode-se notar vinte e sete parâmetros associados a grandezas medidas e/ou calculadas, as quais são utilizadas pelo algoritmo extrator a fim de serem utilizadas pela rede de neural paraconsistente.

Parâmetro	Variável	Descrição	Dimensão
$X_1$	$F$	Frequência	Hz
$X_2$	$\Delta F$	Desvio de frequência	Hz
$X_3$	$dF/dt$	ROCOF	Hz/s
$X_4$	$V$	Tensão	pu
$X_5$	$\Delta V$	Desvio de tensão	pu
$X_6$	$dV/dt$	ROCOV	pu/s
$X_7$	$I$	Corrente	pu
$X_8$	$\Delta I$	Desvio de corrente	pu
$X_9$	$dI/dt$	Taxa de mudança da corrente	pu/s
$X_{10}$	$P$	Potência ativa de saída	pu
$X_{11}$	$\Delta P$	Desvio da potência ativa de saída	pu
$X_{12}$	$dP/dt$	Taxa de mudança da potência ativa de saída	pu/s
$X_{13}$	$Q$	Potência reativa de saída	pu
$X_{14}$	$\Delta Q$	Desvio da potência reativa de saída	pu
$X_{15}$	$dQ/dt$	Taxa de mudança da potência reativa de saída	pu/s
$X_{16}$	$\cos \phi$	Fator de potência	
$X_{17}$	$\Delta \cos \phi$	Desvio do fator de potência	
$X_{18}$	$d \cos \phi / dt$	Taxa de mudança de fator de potência	
$X_{19}$	$\varphi$	Ângulo de fase	rad.
$X_{20}$	$\Delta \varphi$	Desvio do ângulo de fase	rad.
$X_{21}$	$d\varphi/dt$	Taxa de mudança do ângulo de fase	rad./s
$X_{22}$	$V_{THD}$	Distorção total harmônica da tensão	
$X_{23}$	$\Delta V_{THD}$	Desvio da distorção total harmônica da tensão	
$X_{24}$	$dV_{THD}/dt$	Taxa de mudança da distorção harmônica total da tensão	
$X_{25}$	$I_{THD}$	Distorção total harmônica da corrente	
$X_{26}$	$\Delta I_{THD}$	Desvio da distorção total harmônica da corrente	
$X_{27}$	$dI_{THD}/dt$	Taxa de mudança da distorção harmônica total da corrente	

TABELA 1 – Parâmetros de entrada do extrator de características.

### 2.3 A Função de Detecção de Ilhamento

Na função de detecção de ilhamento, a lógica do relé é treinada a partir de inúmeros cenários de carregamento do sistema, a fim de cobrir diferentes condições do sistema e minimizar sua zona de não detecção pela escolha das melhores características. Os eventos de abertura dos disjuntores e faltas também podem ser reconhecidos pela função de ilhamento. Além disso, a função de detecção de ilhamento também pode evitar o desarme indevido, já que todos os eventos possíveis que não sejam de ilhamento, como redução de carga, aumento de carga, o chaveamento de capacitores, fazem parte dos cenários de treinamento. Portanto, a lógica de detecção de ilhamento é construída com informações suficientes para distinguir as condições de ilhamento e não ilhamento.

### 2.4 A Função Detecção de Faltas e Funções de Reconhecimento do Tipo de Falta

Esta função detecta todos os tipos de faltas simétricas e assimétricas dentro de suas zonas de proteção empregando diferentes combinações de recursos/parâmetros da DG. Através da Rede de Análise Paraconsistente (NAP) que fornece a informação segura sobre quais as proposições com maior ou menor grau de contradição. Com essas informações o sistema tem condições de tomar decisões mais confiáveis, além de ter os valores para atuar no controle dos sinais de entrada, enfraquecendo ou fortalecendo

evidências para diminuir as contradições para produzir um sistema de decisão robusto e capaz de trazer resultado com alto grau de confiabilidade.

Essa função é capaz de identificar quatro tipos de faltas: falta linha-terra (LG), falta linha-linha (LL), falta trifásica de fase (LLL) e falta linha a terra linha a terra (LLG). Além disso, para faltas à terra, as faltas de impedâncias variáveis são consideradas no período de treinamento do relé proposto para melhorar a adaptabilidade da função de detecção de faltas.

## 2.5 A Função de bloqueio seletivo de FRT

A função de bloqueio seletivo de falta proposta é obtida por meio da análise da NAP, usando as informações obtidas pelas funções de detecção de ilhamento, faltas e reconhecimento do tipo de falta se dará o bloqueio.

A Figura 2 mostra o diagrama funcional do RI – LPA4v proposto. Indicando para eventos de ilhamento, faltas, bloqueio e identificador de faltas. A lógica de falha é supervisionada pela lógica de bloqueio seletivo através de uma lógica E.

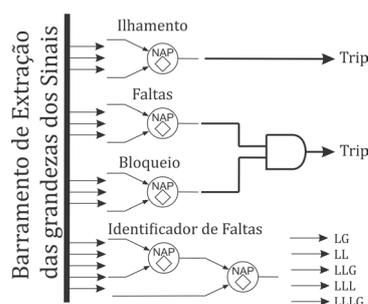


FIGURA 2 - Representação de um NAP – Nó de Análises Paraconsistente.

## 3 | SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fim de avaliar o desempenho RI-LPA4v foram simuladas em tempo real no equipamento Typhoon-HIL a rede de teste do IEEE 34 barras com duas situações de ilhamento, através da abertura da linha que interliga as barras 800 e 802 (Ilhamento 1) e a linha entre 830 e 854. (Ilhamento 2) conforme mostra a Figura 3, onde cada uma das GD's possuía um RI-LPA4v. Foram consideradas duas condições de carga, 100% e 50%. Na primeira a carga do sistema é igual à carga do sistema teste original IEEE 34 barras, na segunda a carga é reduzida em 50%. Os testes também compreenderam dois níveis de penetração da geração distribuída: 2,5 MW e 1,0 MW, resultando assim em oito situações diferentes. Dessas oito simulações foram incorporadas as faltas nas barras 802, 830, 852 e 842 e também foram consideradas duas impedâncias de falta, de 0  $\Omega$  e 60  $\Omega$ , duas condições de carga, 50% e 100% e no dois níveis de penetração da geração distribuída. Sendo um total de 2160 casos simulados dos quais 50 % foram utilizados para o treinamento da rede neural paraconsistente e os 50% restantes foram utilizados para o

reconhecimento dos padrões de ilhamento, faltas, tipos de faltas e bloqueio seletivo.

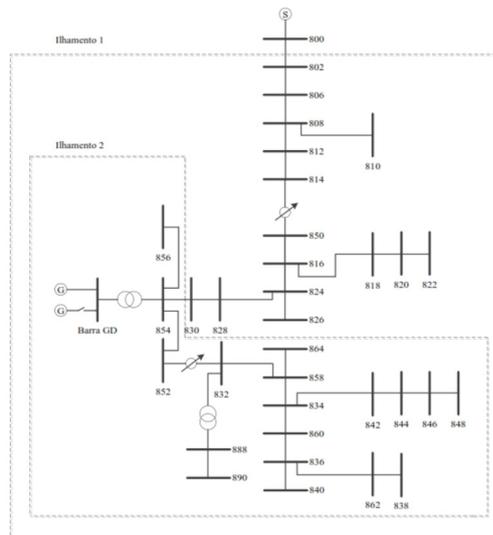


FIGURA 3 - Ilhamentos testados no sistema teste IEEE 34 barras [6].

Na Figura 4 pode-se notar que o ambiente de simulação em tempo real é realizado no equipamento Typhoon-HIL, o qual serve de acoplamento para o controle real do Relé Inteligente utilizado no sistema teste IEEE 34 barras.

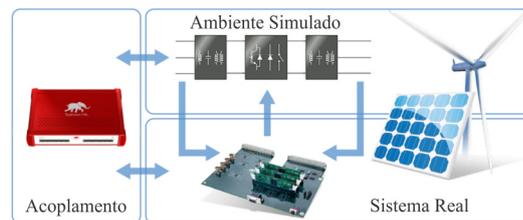


FIGURA 4 - Diagrama de funcionamento do sistema em tempo real.

As formas de onda apresentadas na Figura 5 caracterizam duas situações. A primeira situação, representada pelas Figuras 5a e 5b, demonstram a frequência e a tensão de linha da fase “a” quando a barra 802 é aberta, respectivamente. Esses sinais foram extraídos da barra DG, que por sua vez, demonstra a capacidade de penetração do RI-LPA4v. A segunda situação, exibida pelas Figuras 5c e 5d, demonstram a frequência e a tensão de linha da fase “a” Quando ocorre um curto-circuito monofásico LG na barra 802, onde é possível ver a capacidade de penetração do RI.

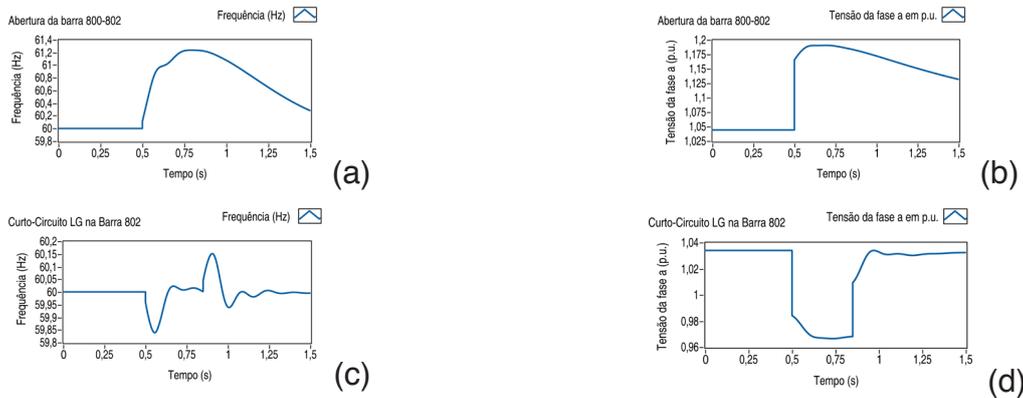


FIGURA 5 - Características dos Sinais Extraídos na Barra GD. (a) Característica da frequência durante a abertura da barra 802; (b) Característica da tensão de linha da fase “a” durante a abertura da barra 802; (c) Característica da frequência durante a curto-circuito monofásico LG na barra 802; (d) Característica da tensão de linha da fase “a” durante a curto-circuito monofásico LG na barra 802;

Uma Rede Neural Paraconsistente (RNP) foi desenvolvida com base no algoritmo Para-especialista NAP. O algoritmo formado por 52 NAP's é capaz de analisar a condição de ilhamento baseada na classificação dos desvio e o grau de pertinência de cada um dos desvios. Esses graus de pertinência foram divididos em 3 grandes grupos, o que relaciona tensão, corrente e frequência, o que relaciona as potências com o e o que relaciona o ângulo com as THD's (tensão e corrente). A Figura 6 apresenta a rede neural paraconsistente. Cabe resaltar, que mais 3 algoritmos foram construídos a fim de completar as funções do RI. Nesse trabalho apenas é demonstrado o algoritmo principal. Portanto, os eventos de faltas, bloqueio e identificador de faltas não são exibidos, mas para o funcionamento foram incorporados do controlador.

Após o treinamento da rede neural paraconsistente, com base na lógica proposta, são apresentados os seguintes resultados na Figura 7, onde pode-se notar as comparações de desempenho entre o relé inteligente proposto e a atuação dos relés ROCOF e ROCOV. Na Figura 7a compara o RI-LPA4v com o relé ROCOF na DG1 com os ajustes de 0,1 Hz/s e 0,25 Hz/s mediante a variação da potência ativa dada em p.u., nota-se que o resultado do RI em qualquer variação da potência ativa corresponde a 100 % dos acertos. Na Figura 7b a comparação o RI-LPA4v com o relé ROCOV na DG1 com os ajustes de 0,07 V/s e 0,1 V/s mediante a variação da potência reativa dada em p.u., nota-se que o resultado do RI em qualquer variação da potência reativa corresponde a 100 % dos acertos. Na Figura 7c compara o RI-LPA4v com o relé ROCOF na DG2 com os ajustes de 0,1 Hz/s e 0,25 Hz/s mediante a variação da potência ativa dada em p.u., nota-se que o resultado do RI em qualquer variação da potência ativa corresponde a 100 % dos acertos. Na Figura 7d a comparação o RI-LPA4v com o relé ROCOV na DG2 com os ajustes de 0,07 V/s e 0,1 V/s mediante a variação da potência reativa dada em p.u., nota-se que o resultado do RI em qualquer variação da potência reativa corresponde a 100 % dos acertos. A consolidação da comparação do Relé Inteligente Multifuncional com o relé ROCOF é exibida na Figura

7e e finalizando, a Figura 7f revela a comparação consolidada entre o RI-LPA4v com o relé ROCOF onde a taxa de confiabilidade foi de 100 %.

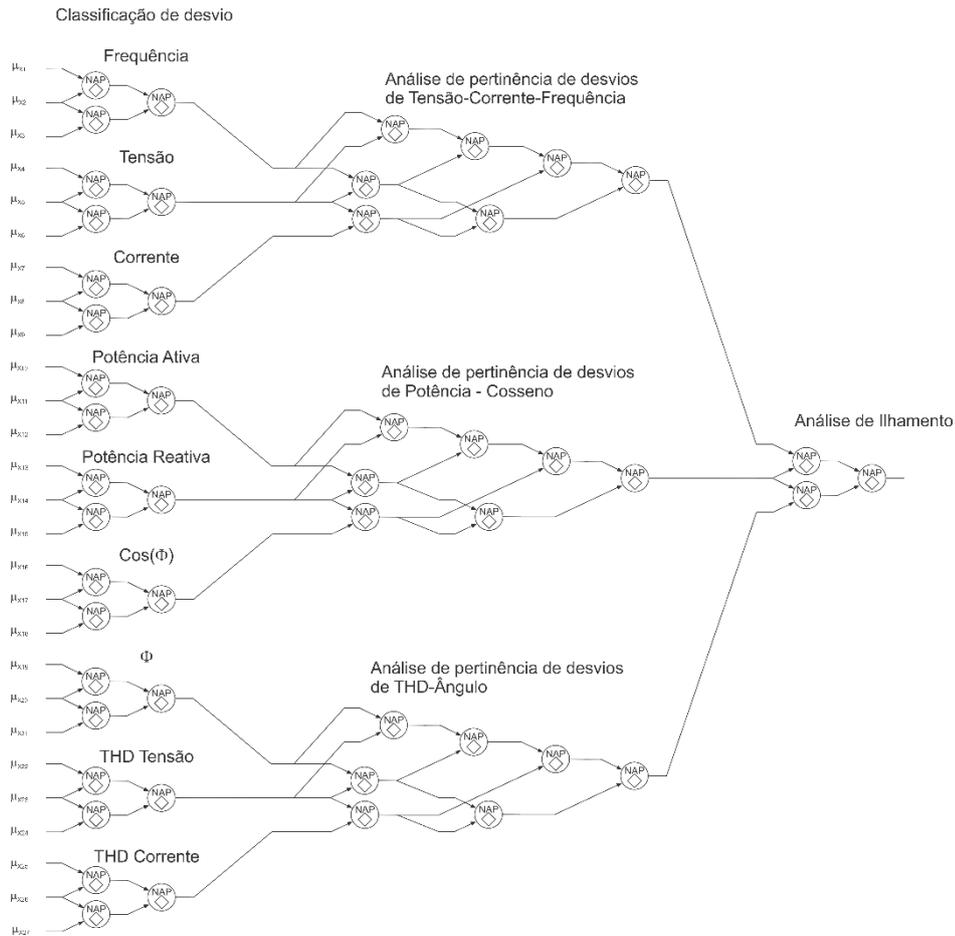


FIGURA 6 - Diagrama da Rede Neural Paraconsistente aplicada no reconhecimento de ilhamento.

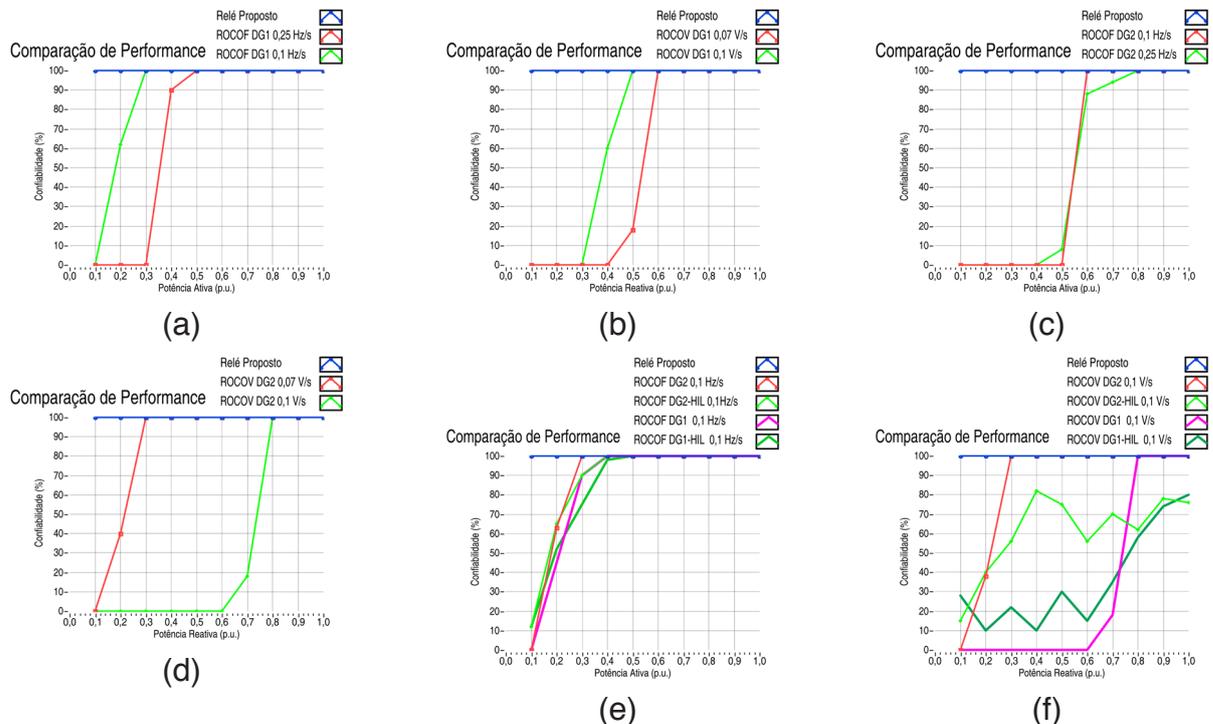


FIGURA 7 - Comparação de desempenho do relé proposto. (a) Comparação do RI-LPA4v com o relé ROCOF na DG1; (b) Comparação do RI-LPA4v c.om o relé ROCOV na DG1; (c) Comparação do RI-LPA4v com o relé ROCOF na DG2; (b) Comparação do RI-LPA4v c.om o relé ROCOV na DG2; (e) Comparação do RI-LPA4v com o relé ROCOF na DG1 e DG2; (f) Comparação do RI-LPA4v com o relé ROCOV na DG1 e DG2.

## 4 | CONCLUSÃO

O relé RI-LPA4v se mostrou eficiente quando comparado a métodos de reconhecimento de ilhamento tradicional ROCOF e ROCOV. É observado que os relé ROCOF e ROCOV falharam no reconhecimento de ilhamento sempre que a potência ativa ou reativa eram baixas, na ordem de 0,1 a 0,5 p.u.. O relé RI-LPA4v em qualquer operação de potência respondeu de forma bastante relevante, pois obteve 100% dos acertos. Devido a natureza do NAP a velocidade de processamento de reconhecimento de ilhamento e faltas é rápida, da ordem de 10,3 a 45,8 %. Outra é que o custo computacional do algoritmo é muito baixo, pois envolvem operações matemáticas simples podendo ser aplicados em processadores digitais de sinal.

## REFERÊNCIAS

- (1) KHAMIS, A.; SHAREEF, H.; BIZKEVELCI, E. and KHATIB, T. “A Review of islanding Detection Techniques for Renewable Distributed Generation Systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 483–493, 2013
- (2) REIGOSA, D. *et al.* “Active Islanding Detection Using High-Frequency Signal Injection”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 5, pp. 1588–1597, 2012.
- (3) LAGHARI, J. *et al.* “Computational Intelligence based techniques for islanding detection of distributed network: A review”, *Energy conversion and Management*, Elsevier, v. 88. P. 139 – 152, 2014.
- (4) de CARVALHO, M. S. C., “A Análise de Técnicas de Detecção de Ilhamento Ativas em Sistemas de Geração Distribuída Baseados em Inversores Fonte de Tensão”, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.
- (5) BITTENCOURT, A. A. “Proteção adaptativa de alimentadores de distribuição de energia elétrica considerando a geração distribuída”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- (6) MARCHESAN, G. “Detecção de ilhamento em sistemas de distribuição com geração síncrona distribuída”. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.
- (7) MENON, V.; NEHRIR, M. H. “A hybrid islanding detection technique using voltage unbalance and frequency set point”. *IEEE Transactions on Power Systems*, [S.l.], v.22, n.1, p.442–448, 2007.67.
- (8) LAGHARI, J.; MOKHLIS, H.; KARIMI, M.; BAKAR, A.; MOHAMAD, H. “An islanding detection strategy for distribution network connected with hybrid DG resources”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v.45, p.662–676, 2015.
- (9) da SILVA FILHO, J. I. “Algorithms based on paraconsistent annotated logic for applications in expert systems”. In: Segura JM, Reiter AC (eds) *Expert system software: engineering, advantages and applications*. Nova Science Publishers, Hauppauge. ISBN 978-1-61209-114-3. 2011.
- (10) da SILVA FILHO, J. I.; ABE J. M.; TORRES, G. L. “Inteligência Artificial com Redes de Análise Paraconsistentes” editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.

(11) MARTINS, H. G.; TORRES, G. L.; POTIN, L. F. "A Lógica Paraconsistente Anotada". Editora Comunicar, Santos, 2007.

(12) KAR, S. and SAMANTARAY, S. R. "Data-mining-based intelligent anti-islanding protection relay for distributed generations," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 4, pp. 629-639, April 2014. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0494.

## OPEN SOURCE MODULAR DIDACTIC PLATFORM FOR POWER ELECTRONICS TEACHING

*Data de aceite: 01/06/2020*

*Data de submissão: 08/04/2020*

### **Lucas Koleff**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5167858934468422>

### **Gustavo Soares Valentim**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6872230180960349>

### **Luciana da Costa Marques**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/7686227063224065>

### **Victor Praxedes Rael**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1651882180363152>

### **Adrian D'Lucas Cardoso Gonçalves**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/7841802683454785>

### **Wilson Komatsu**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4334947955332966>

### **Lourenço Matakas Junior**

Laboratório de Eletrônica de Potência da Escola  
Politécnica da USP  
São Paulo, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9555732863182477>

**ABSTRACT:** This work shows the development of a modular platform for power electronics teaching applications. Its importance and the motivations for its conception are presented. The platform consists in several modules that can be interconnected to build different static converter topologies used in power electronics. Through this platform, it is possible to perform studies and experimental classes in technical schools, undergraduate and graduate courses. Several application examples are presented. This allows to improve the teaching of relevant technologies in the present context, with potential to create a positive impact in the society, given that the whole project is freely available under an open source license.

**KEYWORDS:** Power electronics, static converters, teaching.

# PLATAFORMA DIDÁTICA MODULAR ABERTA PARA O ENSINO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

**RESUMO:** Neste trabalho, o desenvolvimento de uma plataforma modular destinada ao ensino de eletrônica de potência é detalhado. A sua importância e as motivações para a sua concepção são apresentadas. Esta plataforma consiste em diversos módulos que podem ser interconectados entre si para formar diversas topologias de conversores estáticos usadas em eletrônica de potência. Através desta plataforma, é possível realizar estudos e aulas experimentais em escolas técnicas, cursos de graduação e pós-graduação. Vários exemplos de aplicação são apresentados. Isso permite melhorar o ensino de tecnologias relevantes no contexto atual, com potencial para criar um impacto positivo na sociedade, dado que todo o projeto está disponível gratuitamente sob uma licença de código aberto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eletrônica de potência, conversores estáticos, ensino.

## 1 | INTRODUCTION

### 1.1 WHAT IS POWER ELECTRONICS?

Power Electronics is the field of Electrical Engineering which studies equipment that convert electrical energy (with a given amplitude, frequency, number of phases) into electrical energy (but with different amplitude, frequency and number of phases) with high energetic efficiency. They are classified in four categories, depending on the type of conversion performed: i) DC (direct current) to DC, ii) DC to AC (alternating current), iii) AC to DC and iv) AC to AC converters. The flow of electric power is controlled by such equipment through semiconductor devices (transistors, diodes, thyristors, etc.) and passive elements (capacitors, inductors, resistors). (MOHAN, ROBBINS, UNDELAND, 2007)

### 1.2 APPLICATIONS OF POWER ELECTRONICS

The participation of Power Electronics equipment in our lives is increasing day by day. They are presently found in all steps of the energy supply chain, that includes electrical energy production, its transmission, its distribution and its final use. A list of applications, according to the classification of the converters given in Section 1.1 is presented next:

- **AC to DC Converters (Rectifiers):** generate a Direct Current (DC) output waveform from an Alternating Current (AC) source waveform (with an arbitrary number of phases). They can be used in: i) battery chargers (BOROYEVICH et al., 2010) (electric vehicles, cell phones, notebooks, uninterruptible power supplies-UPS, energy storage systems, etc.), arc soldering machines (CHAE et al., 1998), rectifying substations for railways and subway systems fed by DC (VERDICCHIO et al., 2018); power supplies for electronic equipment (computers, fluorescent and LED

lighting systems, cooling systems, communication systems, medical equipment, etc.);

- **DC to DC Converters:** generate one DC voltage level output from another DC voltage source and provides its regulation. Some examples are: i) internal power supply of a cell phone or a notebook (BOROYEVICH et al., 2010) (generates the many required voltage levels from the main battery); ii) speed control in electric vehicles or trains based on DC motors (MOHAN, ROBBINS, UNDELAND, 2007); iii) electronic devices with integrated circuits working with different DC voltage levels (BOROYEVICH et al., 2010); iv) solid-state power transformers in future DC microgrids (RODRIGUES et al., 2016); etc.
- **DC to AC Converters (Inverters):** generate an AC output waveform (with an arbitrary number of phases) from a DC source. Examples include: i) connection of a photovoltaic PV panels to the AC grid (NAIK, MOHAN, 1995); ii) feeding the AC motor of an Electric Vehicle with variable voltage and frequency from its battery (CHAU, 2015); iii) feeding an AC industrial motor from a DC voltage produced by a rectifier (NOVOTNY, LIPO, 1996); iv) providing connection between DC and AC grids (VAN HERTEM, GOMIS-BELLMUNT, LIANG, 2016); v) mitigation of grid disturbances (harmonic voltages, harmonic currents, reactive power, unbalances) (AKAGI, 2005); etc.
- **AC to AC Converters:** generate an AC output waveform (arbitrary voltage level, frequency and number of phases) from an AC supply (with different voltage level, frequency and number of phases) (TRZYNADLOWSKI, 2016). In spite of the possibility of the direct AC/AC conversion (RASHID, 2017), it is usually implemented by an AC/DC converter followed by a DC/AC converter, with common DC bus. They can be used: i) for connecting two power systems with different frequencies (e.g. 60 Hz and 50 Hz) (HORWILL et al., 2011); ii) for high voltage DC transmission systems, where converter stations are connected by a DC transmission line (mainly used in long distance power transmission and for connecting remote renewable sources, such as off-shore wind farms, to the grid) (PADIYAR, 1990); etc.

### 1.3 MOTIVATION FOR THE STUDY OF POWER ELECTRONICS

According the U.S. Department of Energy, in 2030 80% of the electrical energy is going to be processed by Power Electronics systems (TOLBERT, 2005). This is due to the growing use of Power Electronics in: i) energy generation, transmission and distribution systems (BOROYEVICH et al., 2010) (TOLBERT, 2005) (renewable energy, storage, HVDC, active filters, etc.); ii) transportation electrification (railways (BOORA et al., 2007), electric vehicles (RAJASHEKARA, 2013), hybrid vehicles (EMADI, LEE, RAJASHEKARA, 2008) (RAJASHEKARA, 2014), full electric airplanes (NEUMAN, 2016) and more electric airplanes (RAJASHEKARA, 2014), electric ships (WANG et al., 2015), etc.); iii) industrial motor drives and robot actuators (FINCH, GIAOURIS, 2008) (BOSE, 2009); iv) smart grids (ZHENGYOU, 2017); v) DC grids (JOSEPH et al., 2018); vi) consumer products (MISHRA, 2019); vii) wireless power transfer (HUI, 2013); viii) IoT applications, etc.

Power Electronics is a multidisciplinary area that requires knowledge about electrical circuits analysis, digital and analog electronics, control theory, signal processing, digital

simulation, microprocessors, real time processing, programming, switching power devices, electrical energy conversion topologies, electromagnetic devices (transformer and inductors) electromagnetic interference and compatibility (EMI/EMC), etc. (MOHAN, ROBBINS, UNDELAND, 2007).

So, it is a challenging and motivating professional area for the Electrical Engineers, who will be able to engage in projects related to emerging topics. Additionally, they will be able not only to apply almost all the knowledge they learned in the Electrical Engineering Course but will have to learn more during their careers. Undergraduate students, however, don't have this comprehensive view. Power electronics classes are usually restricted to the theory of the open loop operation of power converters, and do not cover all the aspects listed above. Therefore, didactic tools are needed to provide the students more experience in this area. They should provide them with a solid knowledge base, including experimental practices.

#### **1.4 IMPORTANCE OF THE DEVELOPMENT OF A DIDACTIC PLATFORM**

The proposal of the didactic kit is the development of a low-cost modular open source didactic platform that allows an easy implementation of different applications used in power electronics, enabling the learning and practical verification of the theoretical concepts needed in this area. This work shows a platform for pulse-width modulated DC-AC, AC-DC and DC-DC converters with digital control (BUSO, MATTAVELLI, 2015).

This kit can be used in experimental and project disciplines in technical schools, undergraduate and graduate courses, as well as in the initial development (“kick-start”) of undergraduate research projects, undergraduate final works, master's dissertations and doctoral theses. In addition, it can be used by the “maker” community to achieve functional prototypes with a high chance of success, as well as serving as a training tool for the development of new projects.

Another interesting aspect is that all project files, including schematics, board layouts, bills of materials, tutorial and source code necessary to build and operate the platform are freely available under a public open source/hardware license at (GitHub, 2020). Therefore, interested students can acquire the necessary components for the construction and create their version of the platform at home, being motivated to start the assembly of their own laboratory with the acquisition of the main equipment. This will for sure motivate them, improving their learning during the classes.

#### **1.5 ENTREPRENEURSHIP AND INNOVATION STIMULATION**

The dissemination of knowledge linked to the kit allows young people, enthusiasts and other interested parties to know about the existence of this technology and its applications and to be interested in being future innovators and entrepreneurs in activities that use these technologies. Therefore, it is important to have the means to accelerate the growth

of this local innovation ecosystem, with such as frameworks (this didactic kit and other (BATISTA et al., 2009) similar developments), which can be freely used by everyone.

In this way, it is possible to accelerate the production of knowledge, since the agents involved have ready and accessible tools available, thus not needing to start the whole process from scratch. Through the knowledge, training, skills and experience acquired, a community of agents is created, being able to participate in the innovation and entrepreneurship processes efficiently.

## 2 | PLATFORM DESCRIPTION

### 2.1 DESIGN SPECIFICATION

This modular open source didactic power electronics platform should be able to allow students (either in undergraduate or graduate courses), research assistants and even hobbyists in this area to perform experiments and develop their own projects. It is expected that the users of this platform will have different levels of experience in the field. So, safety and operation easiness are considered priority. According to this concept, the following specifications are outlined:

- Low voltage operation, according to the European Union 2014/35/EU Low Voltage Safety Directive and the Brazilian NR-10 Safety Regulatory Standard, allowing handling and operation without safety equipment.
- Usage of components easily found for immediate purchase in the local market of developing countries, when possible, to avoid expensive shipping costs and import taxes.
- Avoid complicated soldering techniques, using components which are more adequate for amateur soldering (with higher success ratio and easy maintenance).
- Have a modular construction, allowing straightforward and rapid interconnection of the modules. Also, not all modules need to be built at once, they can be produced gradually according to the user demands.
- Be less expensive and more flexible than other commercial teaching platforms found in the market.
- All project files are freely available under a public open source/hardware license.

### 2.2 FUNCTIONAL DESCRIPTION

Using this platform, it is possible to build several static converters topologies, including:

#### a) Voltage Source Inverters

The voltage source inverters use electrical switches (such as power transistors) to be able to convert (or exchange) energy between a DC source and an AC source (MOHAN, ROBBINS, UNDELAND, 2007). In order to perform this conversion in a controlled fashion,

current and voltage measurements are needed at the inputs/outputs of the inverters. Those measurements are used by a central controller (or processing unit) to control the switches adequately. However, the switches generate unwanted harmonic components that compromise the stable operation of the inverter and the compliance with the harmonic emission standards (ERICKSON, MAKSIMOVIĆ, 2001). Thereafter, proper filtering of such harmonics must be performed. Possible applications of voltage source inverters are shown in Section 4.1, 4.2 and 4.4.

## b) DC-DC Converters

Again, electrical switches (such as power transistors) are used, but now to convert (or exchange) energy between two DC sources (BASSO, 2014). This is useful when conversion between different DC voltage levels is needed. Energy storage elements such as inductors and capacitors are used as energy storage elements in DC-DC converters (MAMMANO, 2017). Once more, to perform this energy conversion in a controlled fashion, current and voltage measurements are needed at the inputs/outputs of the converters. Those measurements are used by a central controller (or processing unit) to control the switches adequately. Possible applications of DC-DC inverters are shown in Section 4.3.

Modern approaches for education in power electronics use both simulations and experiments to facilitate the learning process. Through the usage of this platform, for the topologies being studied, it is possible to:

- Study the theoretical background of a given power converter and develop the necessary control strategies for their operation (including their numerical simulation).
- Build the studied converter topologies using the modules available.
- Verify their operation experimentally, validating the theories and simulations involved.
- Evaluate the designed controllers, raising eventual opportunities for improvements.

## 2.3 OVERVIEW OF THE MODULES FROM THE PLATFORM

This platform consists in the following separate modules:

- **Processing Module:** routes signals (including power supply pins) between the microcontroller board, which is responsible for the operation of the platform, and the other modules.
- **Voltage Sensor Module:** uses four isolated Hall effect sensors to measure voltage signals needed for the converter control.
- **Current Sensor Module:** uses three isolated Hall effect sensors to measure current signals needed for the converter control.
- **Inverter Module:** incorporates four independent inverter half-bridges, opto-couplers, an isolated DC-DC converter and the DC link capacitance.
- **Filter Module:** comprises an inductor and a capacitor board, which are combined

to build different harmonic filter topologies.

- **Resistive Load and Transformer Module:** provide means to test the converters connected to passive loads and to the grid.
- In Section 3, the modules of the platform are specifically detailed and in Section 4 their interconnection in different topologies and applications is presented.

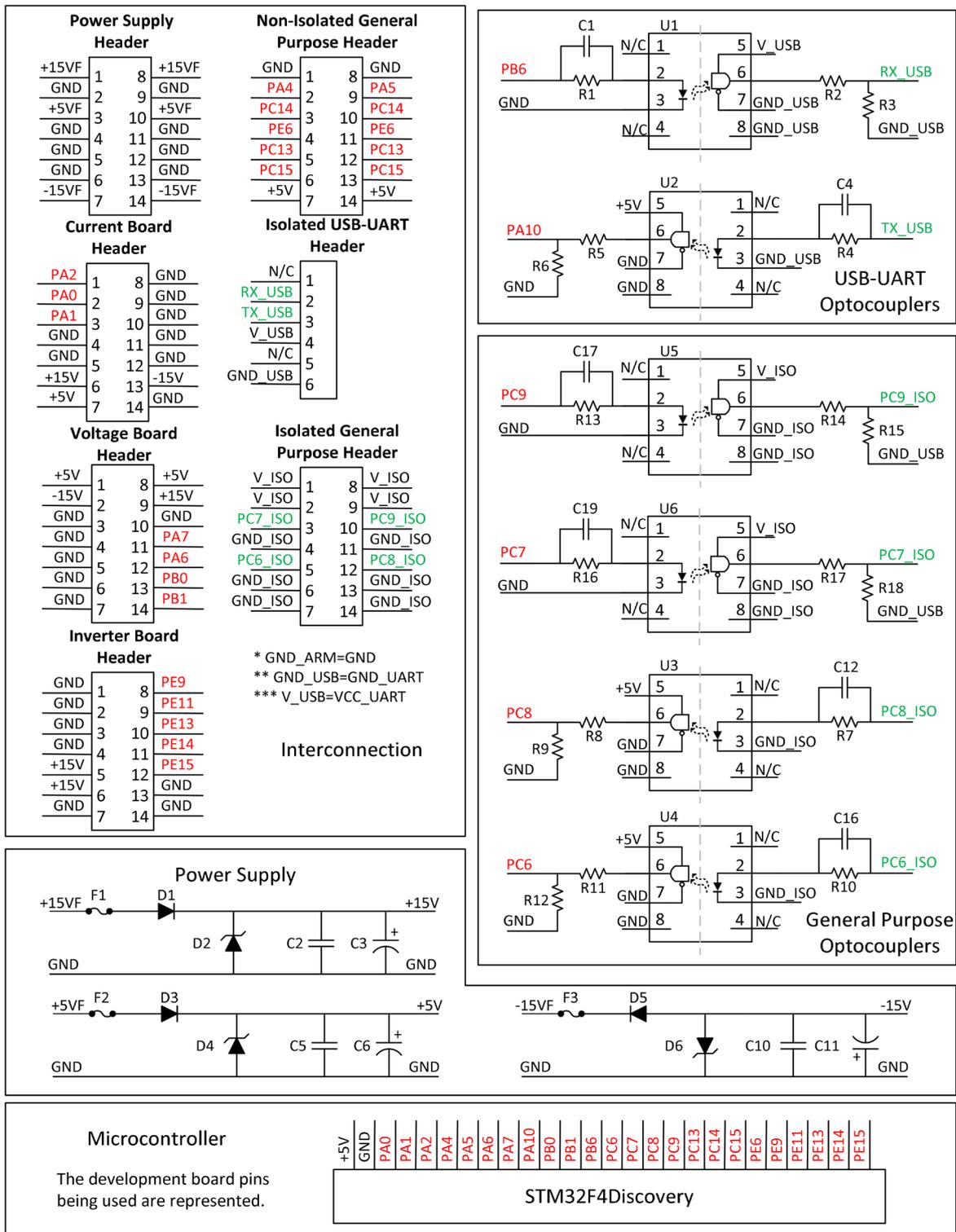
### 3 | DESCRIPTION OF THE MODULES

This item will describe each of the Modules by using simplified schematic diagrams. This approach presents easy to understand figures, but still showing enough details for the comprehension of the board's operation based on their internal electronic components, including the power supply and signals interconnections. The complete schematics and their corresponding bills of materials are available under a public open source/hardware license in (GitHub, 2020). Photographs and some initial experimental results using this platform were previously reported in (KOLEFF et al., 2019). A complete description of the Modules is presented in this paper.

#### 3.1 PROCESSING MODULE

The **Processing Module** schematic is shown in Figure 1. The **Processing Module** is responsible for connecting the pins of the **STM32F4DISCOVERY** microcontroller development kit to the pins of six board-to-board (**B2B**) connectors.

Those connections are described next. The B2B connectors "**Current Board Header**" and "**Voltage Board Header**" receive measurement signals coming from the **Current Sensor Module** (pins "**TC\_OUT1, 2, 3**") and the **Voltage Sensor Module** (pins "**TP\_OUT1, 2, 3, 4**"), respectively. The **Processing Module** routes the analog measurements (voltage level between 0 to 3,3V) to the **STM32F4DISCOVERY**, so that they can be processed. Once those signals are processed, the **STM32F4DISCOVERY** generates digital trigger signals (voltage levels of 0 to 3,3 V) transmitted to the **Inverter Module** (pins "**IN\_A, B, C, N**" and "**IN\_EN**") through the "**Inverter Board Header**" B2B connector. These four signals will command the switching of the eight inverter transistors. The signal on the inverter pins "**IN\_A, B, C, N**" command the switching of the inverter transistors, while the signal on the "**IN\_EN**" pin enables the inverter operation.



Note: all microcontroller pins are indicated in **red**, and all isolated pins are indicated in **green**

Figure 1 –Processing Module Schematic

The correspondence between the B2B connector pins of the processing module and the other modules is presented in Table 1.

Header Name	Processing Module		Target Module		
	Pin Name	in/out	Pin Name	in/out	Module
<b>Current Board Header</b>	1 - PA2	in	1 - TC_OUT1	out	<b>Current Sensor Module</b>
	2 - PA0	in	2 - TC_OUT2	out	
	3 - PA1	in	3 - TC_OUT3	out	
<b>Voltage Board Header</b>	11 - PA7	in	11 - TP_OUT1	out	<b>Voltage Sensor Module</b>
	12 - PA6	in	12 - TP_OUT2	out	
	13 - PB0	in	13 - TP_OUT3	out	
	14 - PB1	in	14 - TP_OUT4	out	
<b>Inverter Board Header</b>	8- PE9	out	8- IN_A	in	<b>Inverter Module</b>
	9 - PE11	out	9- IN_B	in	
	10 - PE13	out	10- IN_C	in	
	11 - PE14	out	11- IN_N	in	
	12- PE15	out	12- IN_EN	in	

Table 1 – Correspondence of the Pin Connections

The **Processing Module** allows the optically isolated serial communication between a computer and the **STM32F4DISCOVERY**. This communication is done by **USB/UART** converter module board (powered by the computer), connected to the “**Isolated USB-UART Header**” B2B connectors. This feature is useful for implementing Human-Machine Interfaces, facilitating the sage of this platform during experimental classes, freeing students from learning system hardware and software details and focusing on the power electronics topic under study.

There are six optocouplers in the **Processing Module**, named U1 to U6. They provide the galvanic isolation between the B2B connectors and the Processing Module, necessary to avoid damages to this Module and to the external computer in the case of inadvertent operation. The pair U1 and U2 isolates the computer from the **Processing Module**. The other optocouplers are used to isolate the “**Isolated General-Purpose Header**” B2B connector. They provided optically isolated access to further input-output pins of the **STM32DISCOVERY**.

The “**Non-Isolated General-Purpose Header**” is not optically isolated by optocouplers and provides access to further **STM32F4DISCOVERY** pins. Three from its six pins can be only used as digital signals, while the other can be used either as digital or as analog signals.

A single external DC source, with voltage levels +15 V, +5 V, -15 V and GND feeds the processor board by the “**Power Supply Header**” B2B connector. These voltage levels are distributed through the **Processing Module** to the other modules. It also powers the +5V supply pins from the **STM32F4DISCOVERY** board and the optocouplers.

### 3.2 CURRENT SENSOR MODULE

The **Current Sensor Module** consists of three Hall effect current transducers, LEM LTS 6NP, capable of measuring DC, AC and pulsed currents, with full galvanic isolation.

They are represented as U2, U3 and U5 in the board schematic shown in Figure 2.

The output signal of the LEM sensors has a voltage ranging between 0 to 5V, which is higher than the 3.3V range tolerated by the microcontroller. Therefore, each signal is processed by a conditioning circuit.

At the output of the LEMs, the resistor pairs R2-R4, R6-R8 and R10-R12 form voltage dividers to attenuate the signals. The capacitors C2, C4 and C5 are used to create low-pass filters for the signals. A TL074 operational amplifier, represented as U4x (x=A, B, C) in the schematics, is used as buffer for the output signal to prevent over- and undervoltages that can damage the microcontroller. The resistors R1, R5 and R9 are adjusted to compensate for the input impedance of the amplifier circuit. to adjust the signal amplitude. R15, R17 and R11 are used to load the output of the amplifiers and finally R3, R7 and R11 serve to limit the amplifier output current. The diodes D1, D2, D4, D5, D6 and D7 are used to clamp the output signal.

The output signals ("TC\_OUT1", "TC\_OUT2" and "TC\_OUT3") go to the "Current Board Header" B2B connector. This connector also receives the power supply inputs +15V and -15V used to power the amplifier and 5V to power the current transducers. The 5V input is regulated to 3.3V through the voltage regulator U1 for use in the signal clamping circuit.

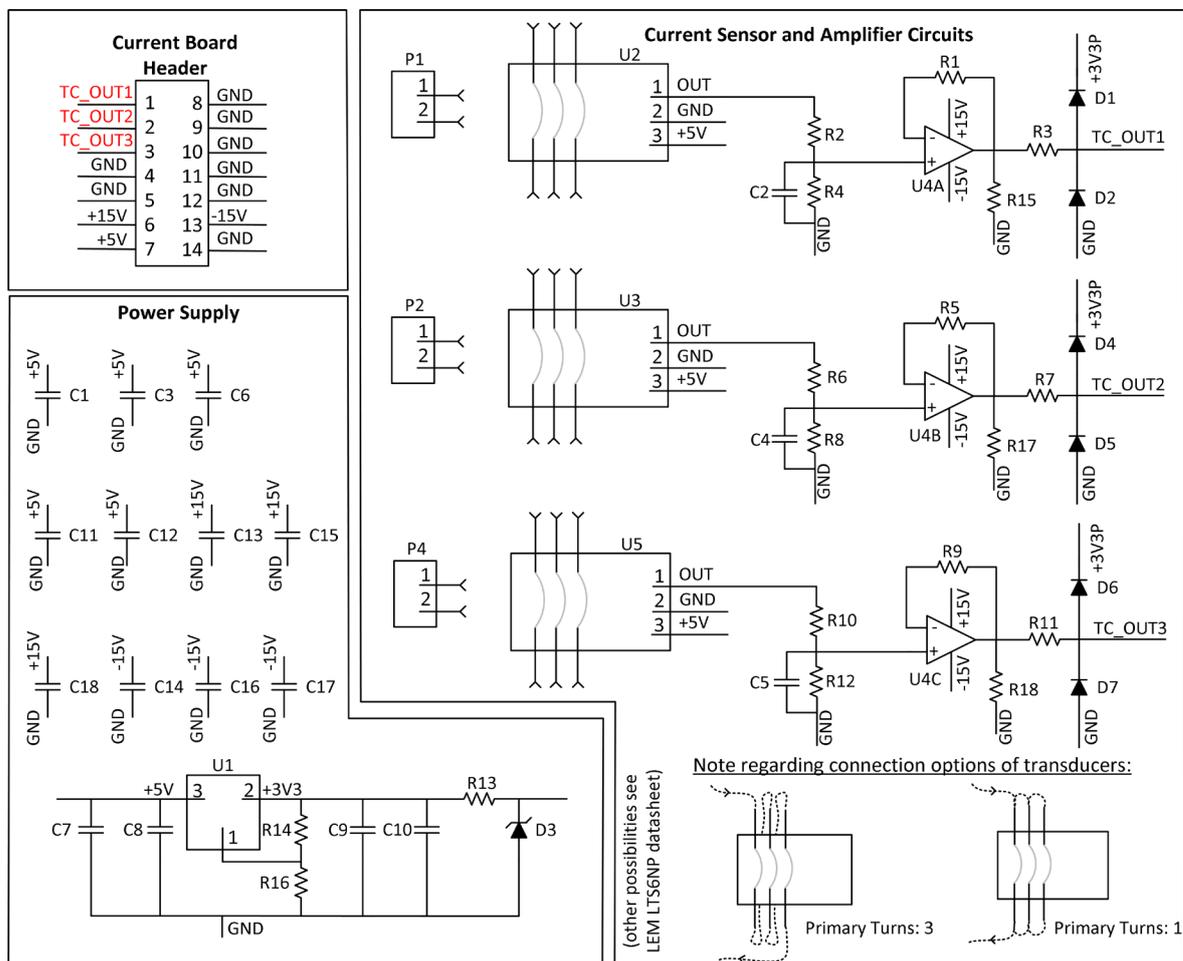


Figure 2 -Current Sensor Module Schematic

### 3.3 VOLTAGE SENSOR MODULE

The **Voltage Sensor Module** uses 4 Hall effect transducers, LEM LV25-P, with full galvanic isolation. In the schematic of Figure 3, each Voltage Sensor Unit (VSU<sub>x</sub> with x=1, 2, 3, 4) features one transducer that measures the difference of potential between the input pins “+V<sub>x</sub>” and “-V<sub>x</sub>” of the P2<sub>x</sub> connectors. In the primary side of the LV25-P, the proper choice of the shunt resistors R8<sub>x</sub>, R9<sub>x</sub>, R11<sub>x</sub>, R17<sub>x</sub>, R20<sub>x</sub> and R21<sub>x</sub> allows to adjust the voltage measurement range. In the secondary side, R16<sub>x</sub> is the burden resistor.

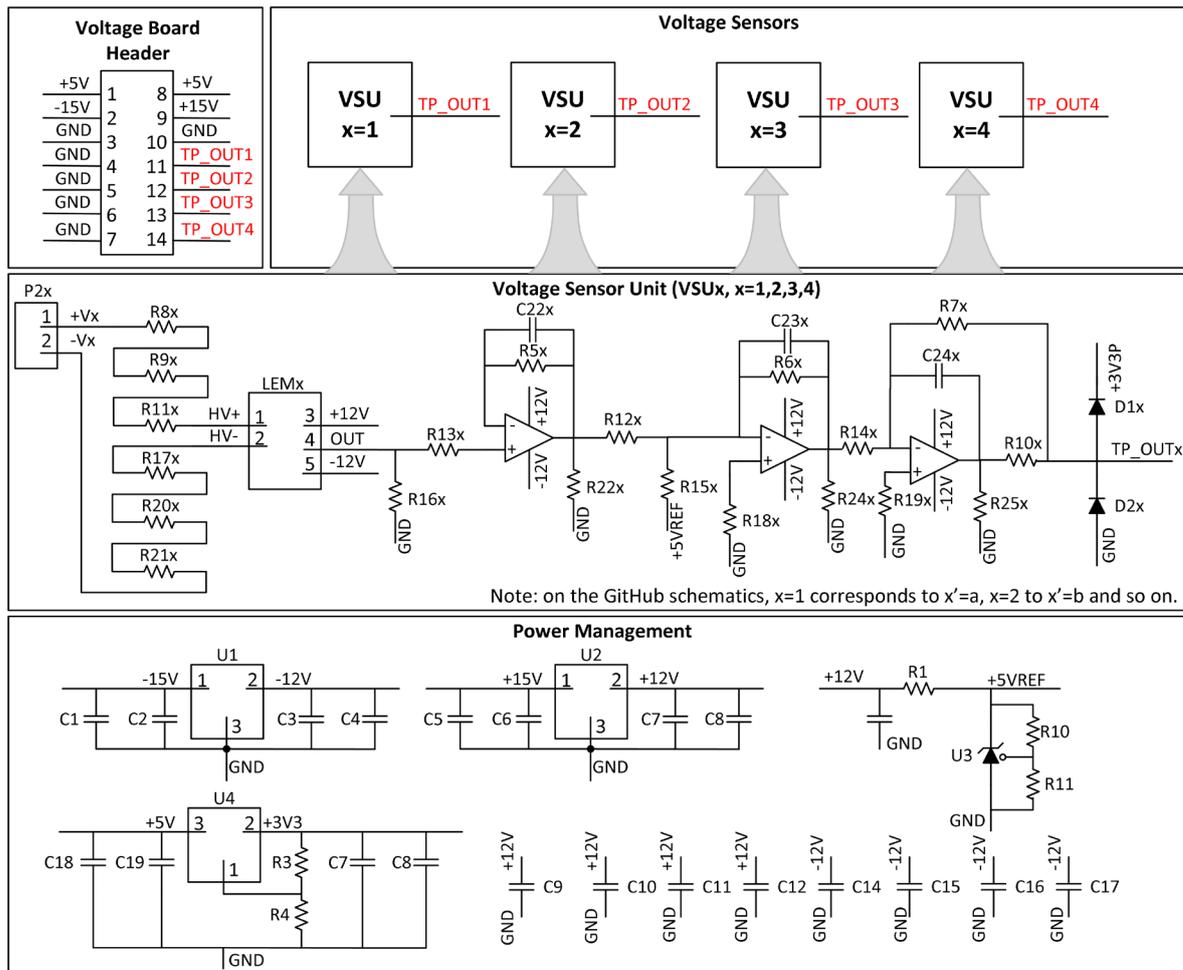


Figure 3 – Voltage Sensor Module Schematic

The output signal of the transducer ranges between -12V and +12V, therefore it needs to be adjusted to the voltage range tolerated by the microcontroller. This is done by the three stage of amplifier circuit described next:

- I. The first stage is a unitary gain non-inverting circuit, with R13<sub>x</sub> equal to R5<sub>x</sub> connected to the non-inverting input. The capacitor C22<sub>x</sub> is used for low-pass filtering in this stage. R22<sub>x</sub> is used to load the amplifier output.
- II. The second stage is an inverting adder circuit, with R12<sub>x</sub> connected to the output of the first stage and R15<sub>x</sub> connected to the +5V reference. In the feedback loop, R6<sub>x</sub> is in parallel with the capacitor C22<sub>x</sub> is used for low-pass filtering in this

stage. R18x is adjusted to compensate for the input bias current and R24x to load the amplifier output.

- III. The third stage is in the inverting configuration. An attenuation is provided by the resistor pair R14x-R7x. The resistor R10x is used to protect the output of the amplifier from overcurrents. The capacitor C24x is used for low-pass filtering in this stage. R25x is used to load the amplifier output and R19x is adjusted to compensate for the input bias current. D1x and D2x are used to clamp the output signal between 0V and 3.3V for protection.

The outputs signals “**TP\_OUTx**” go to the “**Voltage Board Header**” B2B connector, which includes inputs from the +15V, -15V e +5V supply voltages. This board also has three voltage regulators for the +12V and -12V supplies to feed the operational amplifiers and the LV-25P and for the 3.3V supply that is used in the signal clamping circuit. These are represented as U1, U2 e U4 respectively. At last, a precision shunt regulator, represented as U3, provides the +5V voltage reference for the amplifier circuits.

### 3.4 INVERTER MODULE

The **Inverter Module** (see schematic shown in Figure 4) features the four transistor pairs (half-bridges) responsible for converting DC input voltage into AC output voltages, resulting in a three phase, four wire, four legs converter. Each of the integrated circuits U1 and U2 (L6203 Full-Bridge Driver) contain 2 half-bridges and the corresponding gate driver circuits. Each pair of transistors (half-bridge) operates complementarily, producing two level output voltages on the output pins “**OUT\_A, B, C, N**”. They are commanded by the gating signals provided by the **Processing Module**, which are inputted in the “**Inverter Board Header**” through the “**IN\_A**”, “**IN\_B**”, “**IN\_C**” and “**IN\_N**” pins. The “**IN\_EN**” enables the inverter operation. These control signals are all referred to the same ground (“**GND**”) and connected to five different optocoupler units (OcU). Each of those units contains an HCPL 2200 optocoupler (named U3, U4, U5, U6 and U7) with a speed-up capacitor (C1, C2, C3, C4, C5) and a resistor (R1, R2, R2, R4, R5) connected to its input. The OcUs provide optical insulation between the input signals environment (**Processing Module** and **Sensor Modules**) and the power circuit.

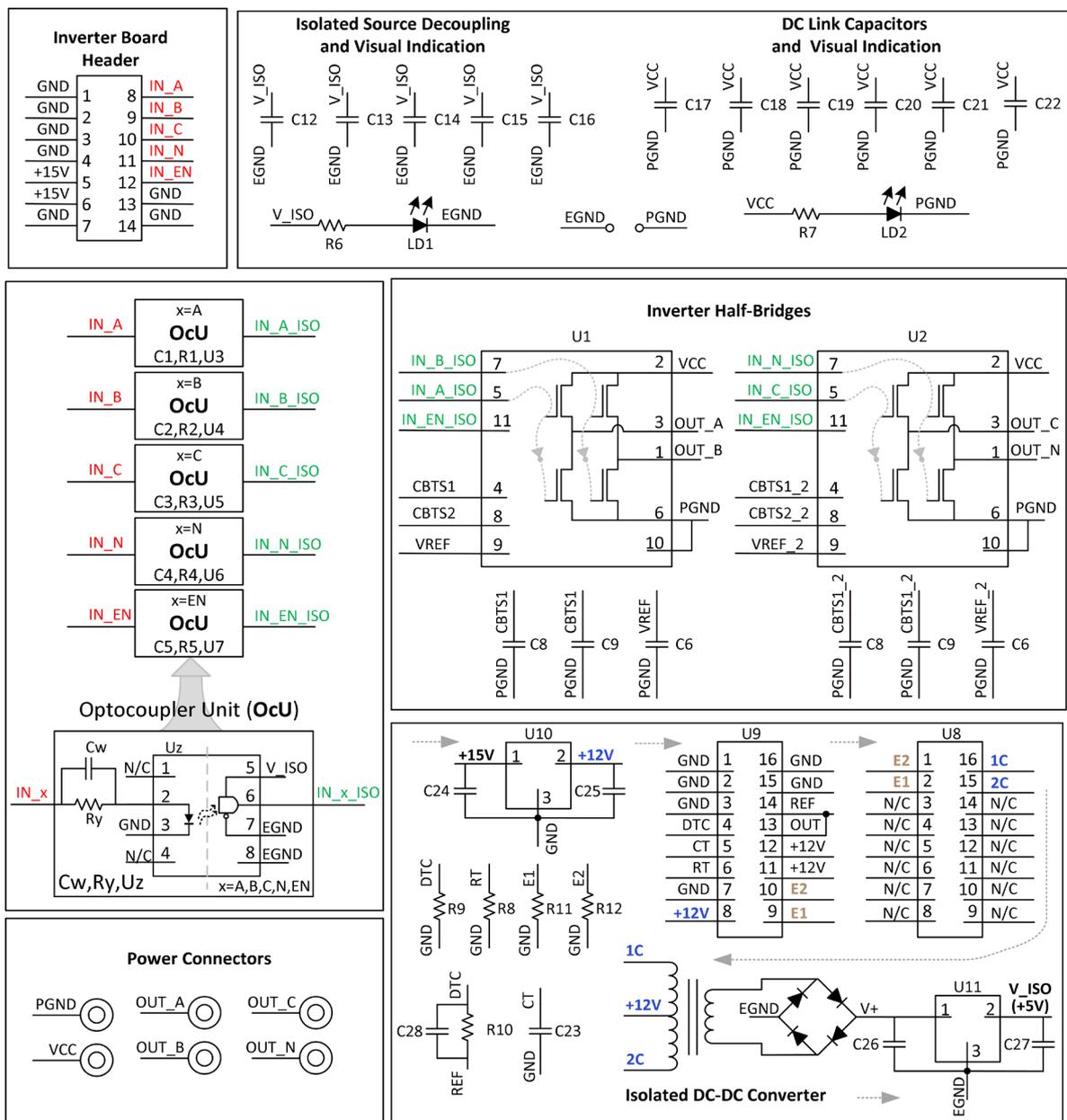


Figure 4 – Inverter Module Schematic

The output side of the optocouplers is powered by an isolated DC-DC converter unit. This unit is used to convert the +15V voltage supplied by the Processing Module to a +5V isolated DC voltage, which is then used to power the optocouplers. The DC-DC converter consists internally in a voltage regulator 7812 (U10), a PWM generator TL494 (U9), a current buffer ULN2004A (U8), a 12V:9V transformer, a rectifier circuit and a voltage regulator 7805 (U11). The voltage regulator U10 ensures a regulated input voltage of 12V for the DC-DC converter. The PWM generator together with the current buffer constitutes an inverter with square wave output voltage that is applied to a 12V:9V transformer. Its output is then rectified and finally adjusted to 5V by the regulator U11. The input pins share the reference pin “GND” (same potential as the Processing Module). The inverter circuit has as reference pins: “EGND” (ground pin for the electronic part of the **Inverter Module**) and “PGND” (ground pin for the power processing part of the Module). “EGND”

and “PGND” must be interconnected (see jumper point at figure 4) but are isolated from the “GND” pin by the optocouplers.

The output signals from the optocoupler units (“IN\_A\_ISO”, “IN\_B\_ISO”, “IN\_C\_ISO”, “IN\_N\_ISO” and “IN\_EN\_ISO”) are directly connected to the L6203 Inverter Half-Bridges (U1 and U2).

On the power circuit of the board, it is possible to see the Inverter Half Bridges U1 and U2, the Isolated Source Decoupling capacitors (C12, C13, C14, C15 and C16) and the DC Link Capacitors (C17, C18, C19, C20, C21 and C22). The L6203 Half Bridges operate at a nominal voltage (VCC) of 30V. Their output signals (“OUT\_A”, “OUT\_B”, “OUT\_C” and “OUT\_N”) are connected to the **Filter Module** of the educational platform.

### 3.5 FILTER MODULE

This **Filter Module** is composed by three separate boards: two identical **Inductors Boards** and one **Capacitor Board**. These boards can be connected to build the following filter topologies: L, LC, LCL, 2L and 2LC. Their schematics are shown in Figure 5.

Each **Inductor Board** contains four identical inductors (one for each phase A, B, C and one for the neutral wire, which can be short-circuited by a switch). Their nominal inductance is of 3.315 mH, while their nominal peak current is of 1 A and their quality factor Q is of 4.96.

The **Capacitor Board** is made of six capacitors and three resistors (one capacitor in parallel to a capacitor and a resistor in series for each phase to neutral). The resistor can be short-circuited to perform experiments related to active damping. The individual capacitance is  $C=4.7\mu\text{F}/100\text{V}$  (film) and the resistance  $39\ \Omega/2\ \text{W}$ .

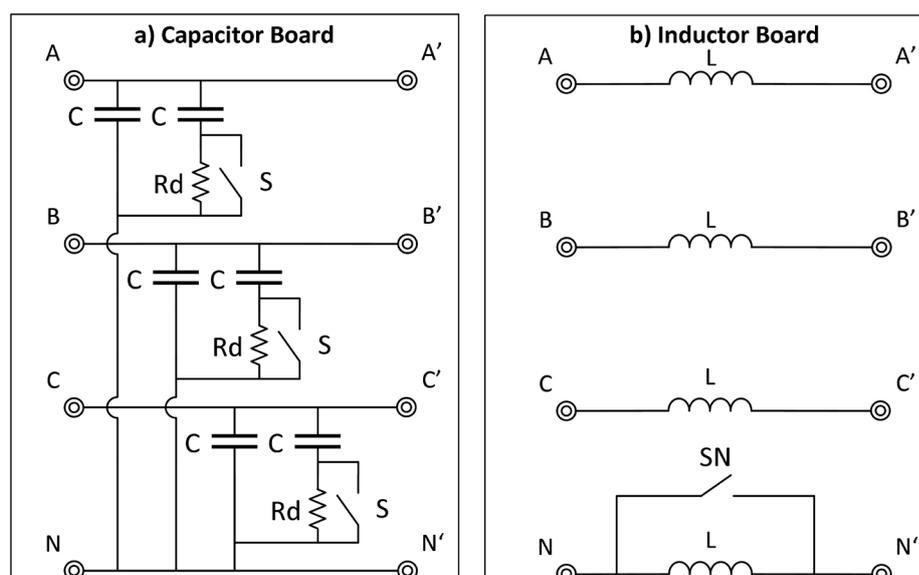


Figure 5 – Filter Module Schematics: a) Capacitor Board, b) Inductor Board

### 3.6 LOAD AND TRANSFORMER MODULES

The resistive **Load Module** is of very simple construction and comprises three wye-connected power resistors, identified as R in the schematics shown in Figure 6. It is also possible to see the banana plugs used for interconnection with other boards. The resistors can be connected to perform experiments where an electrical load needs to be simulated, as they convert energy into heat (which is then dissipated).

Conversely, the **Transformer Module** allows the platform to exchange energy with the electric grid. However, as the usual RMS grid voltage is of 127V/220V, and the didactic platform operates at low-voltage, transformers need to be used to step-down the grid voltage for adequate operation of the system. Also, the transformers can also ensure complete galvanic isolation of the platform from the grid if the neutral switch (identified as SN in the schematics) is set to be opened. A three-phase switch SG allows for complete connection/disconnection of the grid phases.

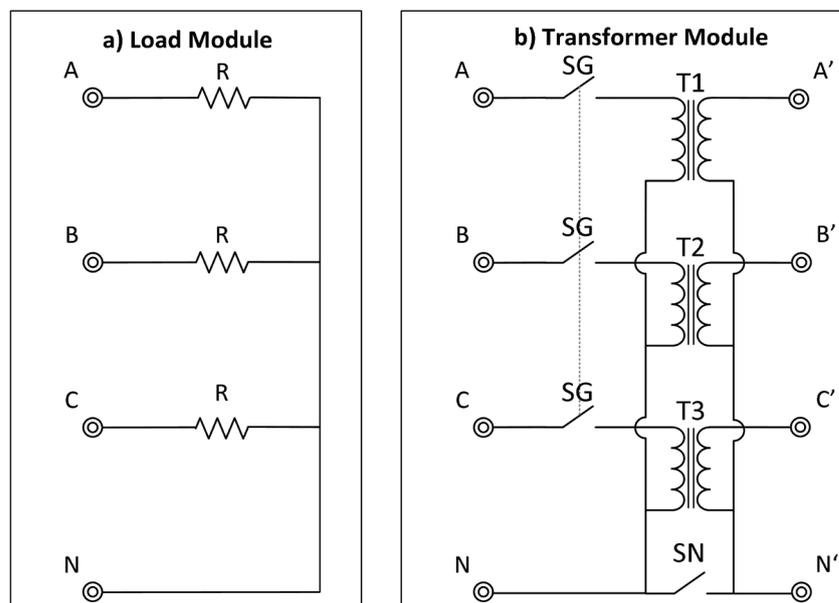


Figure 6 – Schematics: a) Load Module, b) Transformer Module

## 4 | SOME APPLICATIONS FOR THE DIDACTIC PLATFORM

This section lists some experiments that can be performed using the Didactic Platform. Current applications in renewable energy systems and electrical vehicles are emphasized to motivate students. Each case is briefly explained, showing how the modules are interconnected to perform the experiment. Possibilities of variations in the basic setup are discussed for each case. In all schematics shown in this section, the cables that interconnect the B2B connectors are shown in blue. The wires for the voltage measurements are shown in red, green and orange. Additionally, the wires used in power stage are represented in black.

## 4.1 GRID CONNECTED CONVERTERS

### 4.1.1 CONNECTING A PHOTOVOLTAIC PANEL TO THE AC GRID

The connection of Photovoltaic (PV) panels to the AC grid is not a straightforward task. A DC/AC conversion is required (RASHID, 2017) to interface the DC voltage produced by the PV cell and the grid AC voltage. The controller will be responsible for injecting AC side currents with sinusoidal waveform and keep them with the same phase angle of the grid voltage (NAIK, MOHAN, 1995) for active power injection. Figure 7 presents the schematic of the power stage, identifying each of the platform modules and their interconnection to implement a single-phase case. This is the most used configuration for residential PV systems.

For experimental classes it is more convenient to substitute the photovoltaic panel by a DC power supply. The description of the existing control strategies (WALLBANK, SINGH, WALTERS, 2017) and their implementation in a microcontroller is out of the scope of this work.

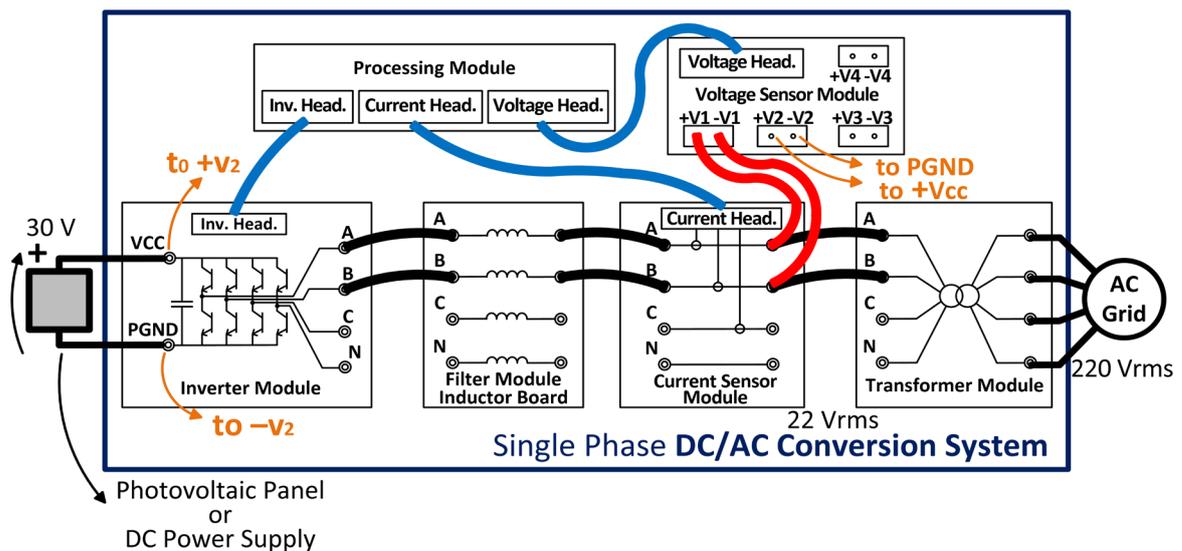


Figure 7 - Photovoltaic Panel connected to the single-phase AC Grid

Some variations can be easily achieved with this experimental set up:

- A three-phase converter is easily achieved by connecting the phase C pin of the **Inverter Module** to the phase C pin of the **Transformer Board**, requiring changes in the controller strategy (RASHID, 2017).
- The series inductive “L” filter can be substituted by a “LCL” filter (CHANNEGOWDA, JOHN, 2010), which is utilized in real applications to cope with Power Quality Standards (DUGAN et al., 2012), but presents a more complex model, requiring learning of improved controllers (PARKER, MCGRATH, HOLMES, 2014).

### 4.1.2 CHARGING OF ELECTRIC VEHICLE (EV) BATTERIES AND BATTERY

## *ENERGY STORAGE (BES)*

The increasing usage of Electric Vehicles (EV) makes the battery charging process an important topic, addressing aspects like: i) duration of the charging; ii) implementation, energetic efficiency and cost of the charger and iii) impact of the charger on the battery life and on the grid power quality (JIANG et al., 2014). Among many possibilities of circuits used for battery charging, the “DC-AC conversion system” presented in Figure 7 can be employed. In this case the PV panel is substituted by the vehicle battery pack. It is important to emphasize that this converter enables bidirectional power flow. For higher power ratings, the three-phase converter will be a preferred option.

The capacity to implement bidirectional power flow makes it a good candidate for the implementation of Battery Energy Systems (BES) (ATCITTY, GRAY-FENNER, RANADE, 1998). Soon, those will be necessary in substations to provide the required power levelling to cope with the increasing use of renewable energy, which are power sources inherently with intermittent generated power.

One can notice that the electrical vehicle with a bidirectional charger is itself a small BES (TANG, ZHANG, 2017). In the future, when a dynamic energy pricing system will be available, vehicle owners will be able to buy energy in periods of low price and sell in convenient periods (WANG, ZHANG, SHEN, 2016). They will also be able to feed their homes during energy system blackouts (BOLLEN, 2000).

### *4.1.3 HIGH VOLTAGE TRANSMISSION SYSTEM (HVDC LIGHT)*

The usage of DC transmission (HVDC - High Voltage DC Transmission Systems) is an adequate option for carrying high amounts of electrical energy for long distances. The reasons are the lower costs of the transmission line and the possibility of interconnecting two power systems with different operating frequencies (PADIYAR, 1990). HVDC systems can also be used to send energy produced by offshore wind farms, through a DC submarine cable, to onshore AC consumers (VAN HERTEM, GOMIS-BELLMUNT, LIANG, 2016).

Two experimental setups identical to the “DC-AC Conversion System” shown in Figure 7 can be interconnected according to Figure 8 to implement a small scale HVDC system. The real system DC transmission line is substituted by two short wires in this small-scale setup. Considering the bidirectional behavior of both converters, energy can be drawn from grid 1, converted to DC by using the conversion system 1 and sent to grid 2, by the conversion system 2, and vice versa.

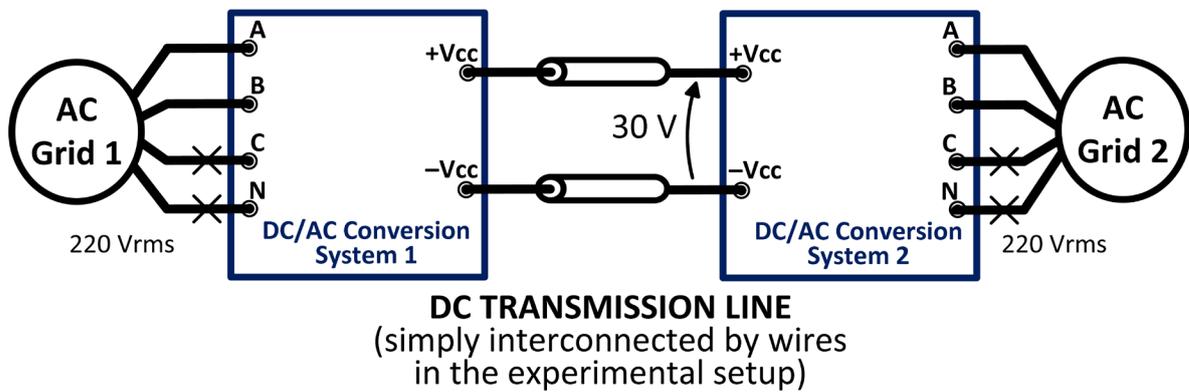


Figure 8 - HVDC and Back to Back system (single phase)

The system shown in Figure 8 is too complex, requiring many modules. Another possibility, that uses half of the number of modules is to use the circuit of Figure 7, where converter phases A and B are used as the conversion system connected to grid 1 (phases A and B or the transformer board) and converter phases C and N are considered as the conversion system 2 (connected to phases A and B of the transformer board). The interconnection of both conversion systems is done through the common DC link (Vcc).

#### 4.2 VARIATION OF THE SPEED OF AN AC ELECTRIC MOTOR

The AC three-phase motors are nowadays the main choice for electric and hybrid vehicles (CHAU, 2015). The DC voltage supplied by the vehicle battery must be converted to a three phase, variable amplitude, variable frequency set of voltages that feed the AC motor, resulting in variable speed and torque (MOHAN, 2012). Figure 9 presents the basic setup for obtaining motor speed variation. A conventional DC power supply is connected to the CC/CA converter. A low power induction motor can be rewound to be able to operate with the low amplitude voltages produced by the **Inverter Module** (<30V peak).

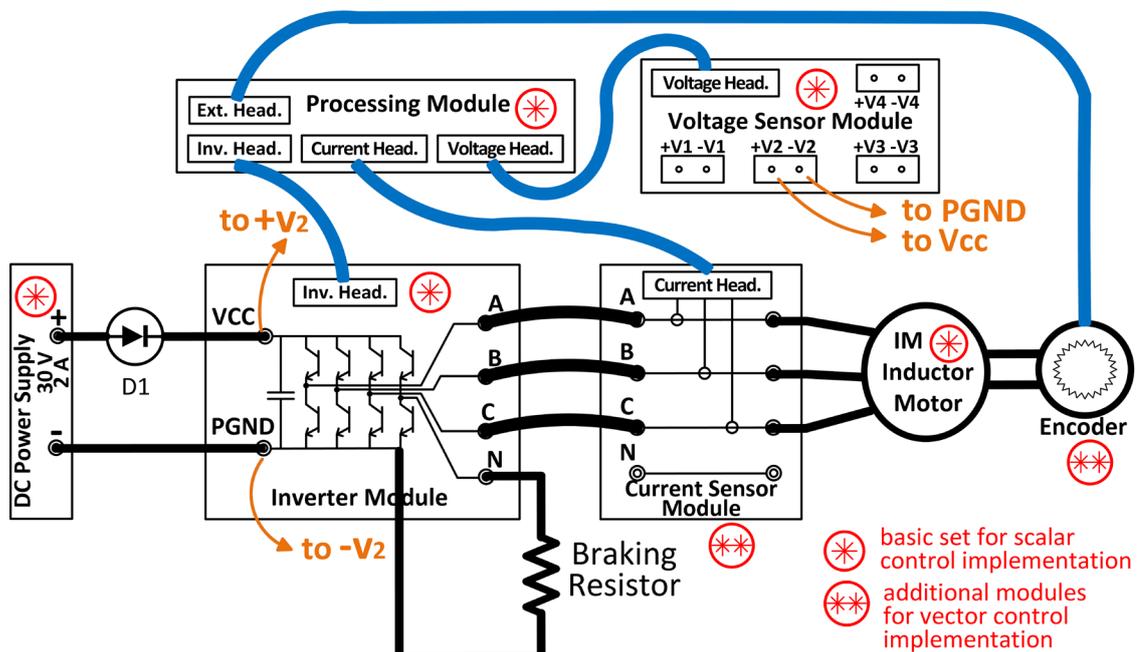


Figure 9 - Three Phase AC Drive

It is suggested to include the diode D1, to avoid power supply damage during motor deceleration, when DC side capacitor voltage will increase, due to the inability of the conventional power supply to absorb the motor and mechanical load kinetic energy. Additionally, a braking resistor must be connected to the phase N of the converter, to adequately dissipate this energy. Many control strategies can be employed for this motor drive, including the scalar and vector ones (NOVOTNY, LIPO, 1996). For the scalar control the parts indicated by the symbol (\*) are needed. For the vector control the parts with a (\*\*) symbol are included.

An industrial AC drive would require a AC/DC stage, which can be a simple and low cost diode bridge without regeneration capacity, or a full AC/DC like the one presented in Figure 7, where braking energy can be returned to the power grid.

### 4.3 DC-DC CONVERSION

#### 4.3.1 MATCHING PV CELL AND PV INVERTER DIFFERENT VOLTAGES

The circuit presented in Figure 7 is not the most adequate solution for connecting a photovoltaic panel, whose output voltage depends on incident light, to the grid. The DC/AC converter works well for small variation of the DC voltage amplitude, that must be kept slightly above the peak value of the AC grid voltage. The matching of the two different voltages can be achieved by intercalating the DC/DC buck-boost converter (Figure 10) between the photovoltaic cell and the DC/AC converter (Figure 7).

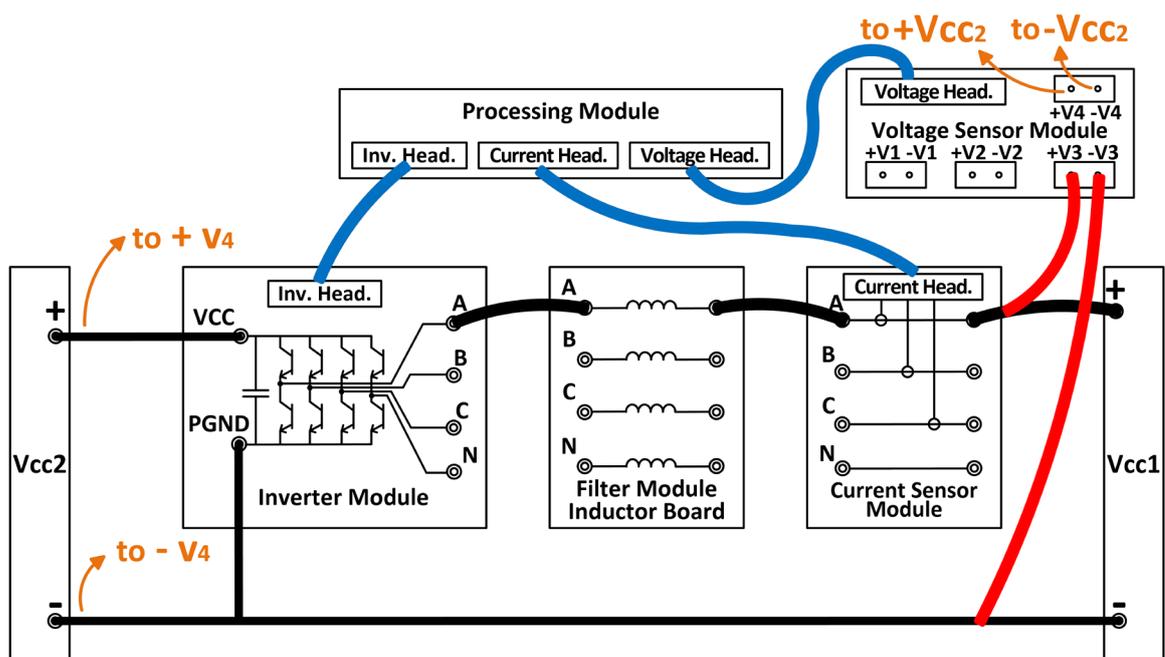


Figure 10 - Experimental Setup for DC-DC Converter Experiments

The block Vcc1 in Figure 10 is the PV panel, that can be substituted by a DC power supply for laboratory experiments. The block Vcc2 is the DC side of the DC/AC converter and can be substituted by a resistor for a simpler experiment.

The buck boost converter operates in boost mode, because the DC bus voltage of the DC/AC converter is always kept higher than the PV panel voltage. The DC-DC converter must be controlled so as to match both DC voltages (LI, HE, 2011) and to drain the maximum possible power from the PV panel for any level of incident light (MPPT-maximum power point tracking control) (NARENDIRAN, 2013). The controller of the DC/AC converter has two main tasks (OBI, BASS, 2016): i) to regulate the DC bus voltage and ii) to inject sinusoidal currents into the grid, with unitary power factor.

### **4.3.2 CHARGING THE AUXILIARY BATTERY OF ELECTRIC VEHICLES**

Electric and Hybrid Electric Vehicles have a main high voltage battery package for traction and a 12V auxiliary battery for supplying control circuits, lights, small motors, etc. The setup of Figure 10 can be used for experiments regarding the charging of such auxiliary battery from the main battery. In this experiment, Vcc2 is the high voltage battery (a 24V battery or a DC power supply can be used) and Vcc1 is the auxiliary battery (a 12V battery can be used). If two batteries are used in the experiment, bidirectional power flow can be imposed.

### **4.3.3 VARIATION OF THE SPEED OF A DC MOTOR (DC SERVO MOTOR)**

The DC servo motor drives are composed by a brushed DC motor and a bidirectional DC/DC converter. They are used in applications that require speed, position or torque control with low cost and simplicity. (MOHAN, 2012) In its most simple topology, the setup of Figure 10 can be used, where Vcc2 will be a 12 or 24V battery and Vcc1 will be the DC brushed motor. Two quadrant operation can be achieved, that means, rotation direction cannot be reversed but regenerative braking (negative torque) can be imposed. If the negative terminal of the DC motor is connected to terminal B of the converter module, four quadrant operation is obtained. Then, the motor can rotate in both directions with regenerative braking.

## **4.4 AC UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)**

The AC Uninterruptible Power Supplies are required in events of energy supply shortage, where AC loads can be fed by an DC/AC converter supplied by a battery. A three phase four wire UPS is presented in Figure 11. The converter output voltage waveforms are filtered by a LC filter and a resistive load is used.

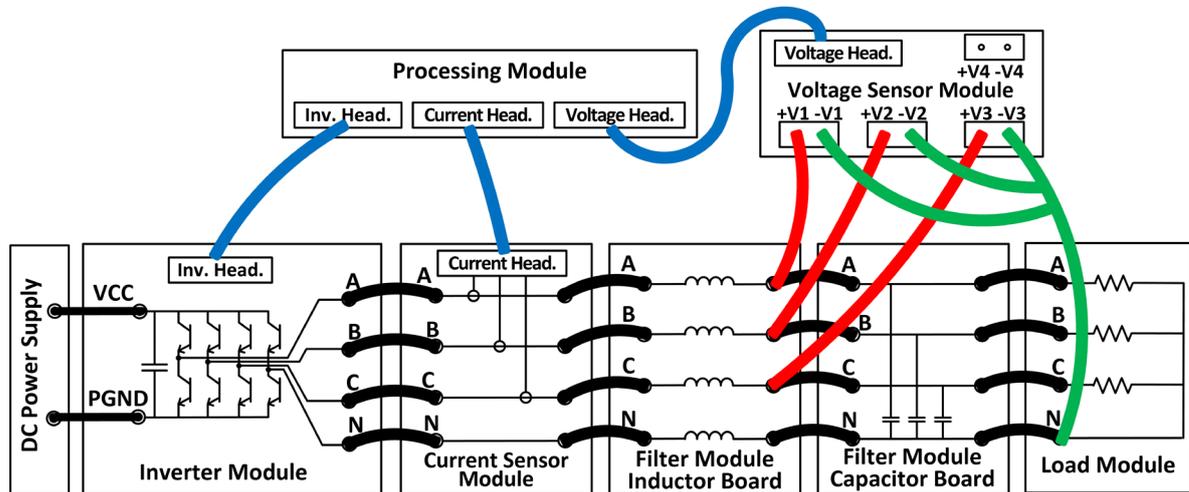


Figure 11 - DC-AC Stage of an Uninterruptible Power Supply

## 5 | BENEFITS OF THIS PLATFORM FOR THE SOCIETY

Having presented the structure of this educational platform and some of its possible applications, it is imperative to notice the social benefits of developing this platform and making it openly available.

The first possible benefit is enabling its users to learn advanced technology of energy conversion by providing a low-cost kit with easy usage. A similar phenomenon can be seen in the usage of popular boards such as Arduino and Raspberry Pi. The low cost of such boards made possible to a high number of students to get in touch with robotics, internet of things and other technologies. It is expected that this platform will obtain a similar result in the field of electrical energy conversion. We also believe that students will be stimulated to learn and develop themselves in more advanced concepts after using this boards for different projects.

Therefore, this development has a great impact in public education. Initiatives like this empowers professors from Brazilian technical schools and universities to create or improve their laboratories, which has a direct impact in scientific and technological productivity inside the country. Students that work in such laboratories or take specific practical classes in which this product may be used will certainly benefit from it.

The usage of such devices also encourages entrepreneurship and innovation in key sections of high technology, which are essential for the economic and scientific development of a country. Using this kit could inspire professional engineers, students and amateurs to build products and businesses, whether by starting with a low cost minimum product value or by making them get in touch with the earlier cited fields (robotics, internet of things, mechanics, energy and others). This consequently enables the development of more advanced hardware and software that can be used in many other fields, and also creates more job positions for specialists in the longer term.

At last, the open source/hardware concept of this project is to make it highly available for every possible interested person in the field, professional or amateur. In addition to it, open source/hardware also implies collaborative development. We are open and hope to receive contributions from other enthusiasts of the project, and to inspire other similar initiatives to broaden the open source hardware community inside Brazil.

## 6 | SUMMARY

In this work, the concept and importance of power electronics is discussed first. This contextualizes the motivation for the development of the didactic platform presented. It is composed of seven modules: Processing Module, Voltage Sensor Module, Current Sensor Module, Inverter Module, Filter Module, Load Module and Transformer Module. Each module is briefly described, and its schematic is shown right after its description.

Following the presentation of the didactic platform, the interconnection of its modules for the study of several applications is presented. Those applications include, but are not limited to: Connecting a Photovoltaic Panel to the AC Grid, Charging Of Electric Vehicle (EV) Battery and Battery Energy Storage (BES), High Voltage Transmission System (HVDC Light), Variation of the Speed of an AC Electric Motor (e.g. for hybrid and electric vehicles), DC-DC Conversion, Charging the Auxiliary Battery of an Electric Vehicle - EV, Variation of the speed of a DC motor (DC Servo Motor), AC Uninterruptible Power Supply (UPS).

If the reader is interested, then more information about this didactic platform can be found in the following URL: [github.com/LEP-PEA-EPUSP](https://github.com/LEP-PEA-EPUSP). All design files, including schematics, board layouts and source code files are available under a public open source/hardware license.

## REFERENCES

AKAGI, H. **Active Harmonic Filters**. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 12, p. 2128–2141, 2005.

ATCITY, S.; GRAY-FENNER, A.; RANADE, S. **Summary of State-of-the-Art Power Conversion Systems for Energy Storage Applications**: Sandia National Laboratories, 1998.

BASSO, Christophe P. **Switch-mode power supplies: SPICE simulations and practical designs**. New York: McGraw-Hill Education, 2014. xix, 972 pages. ISBN 978-0071508582.

BATISTA, Flabio A. B.; PETRY, Clovis A.; SANTOS, Everton L. F.; ALMEIDA, Bruno R. **Didactic system for digital control of power electronics applications**. *Brazilian Power Electronics Conference. COBEP 2009*, p. 1093–1098, 2009.

BOLLEN, Math H. J. **Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press, 2000. ISBN 978-0780347137.

BOORA, Arash A.; ZARE, Firuz; GHOSH, Arindam; LEDWICH, Gerard. **Applications of power electronics in railway systems**. *2007 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, p. 1–9, 2007.

BOROYEVICH, Dushan; CVETKOVIC, Igor; DONG, Dong; BURGOS, Rolando; WANG, Fei; LEE, Fred. **Future electronic power distribution systems a contemplative view.** *12<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, p. 1369–1380, 2010.

BOSE, B. K. **Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 2, p. 581–588, 2009.

BUSO, Simone; MATTAVELLI, Paolo. **Digital Control in Power Electronics, 2<sup>nd</sup> Edition.** *Synthesis Lectures on Power Electronics*, v. 5, n. 1, p. 1–229, 2015.

CHAE, Y.-M.; GHO, J.-S.; CHOE, G.-H.; SHIN, W.-S.; CHOI, J.-Y. **PWM converter-inverter arc welding machine using new type NCT.** *Power Electronics Specialist Conference - PESC'98*, p. 1636–1641, 1998.

CHANNEGOWDA, Parikshith; JOHN, Vinod. **Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 12, p. 4106–4114, 2010.

CHAU, K. T. **Electric vehicle machines and drives: Design, analysis and application.** Singapore: IEEE, 2015. ISBN 978-1118752524.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electrical power systems quality.** New York: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0071761550.

EMADI, A.; LEE, Young Joo; RAJASHEKARA, K. **Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 6, p. 2237–2245, 2008.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. **Fundamentals of power electronics.** 2. ed. Boston, Mass., Great Britain: Kluwer Academic Publishers, 2001. ISBN 978-0792372707.

FINCH, John W.; GIAOURIS, Damian. **Controlled AC Electrical Drives.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 2, p. 481–491, 2008.

GITHUB. **LEP-PEA-EPUSP:** <https://github.com/LEP-PEA-EPUSP>.

HORWILL, C.; MACLEOD, N. M.; BONCHANG, R. E.; CASTAGNA, D.; ARTENSTEIN, M.; CROCE, M. **A new 500MW frequency converter station to exchange power between Uruguay and Brazil.** *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, p. 1–6, 2011.

HUI, S. Y. R. **Wireless power transfer: A brief review & update.** *5<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, p. 1–4, 2013.

JIANG, Chen; TORQUATO, Ricardo; SALLES, Diogo; XU, Wilsun. **Method to Assess the Power-Quality Impact of Plug-in Electric Vehicles.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 2, p. 958–965, 2014.

JOSEPH, Sigi C.; MOHAMMED, Ajlif A.; DHANESH, P. R.; ASHOK, S. **Smart Power Management for DC Nanogrid Based Building.** *2018 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, p. 142–146, 2018.

KOLEFF, LUCAS; VALENTIM, G.; RAEI, V.; MARQUES, L.; KOMATSU, W.; PELLINI, E.; MATAKAS JR., L. **Development of a Modular Open Source Power Electronics Didactic Platform.** *IEEE 15<sup>th</sup> Brazilian Power Electronics Conference and 5<sup>th</sup> IEEE Southern Power Electronics Conference*, 2019.

LI, Wuhua; HE, Xiangning. **Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 4, p. 1239–1250, 2011.

- MAMMANO, Robert A. **Fundamentals of power supply design: Technology from Unitrode/Texas Instruments Power Supply Design Seminars.** [Dallas, Texas]: Texas Instruments, 2017. 333 p. ISBN 978-0998599403.
- MISHRA, Santanu. **Power Supplies for Consumer Electronic Devices.** *IEEE Potentials*, v. 38, n. 1, p. 8–13, 2019.
- MOHAN, Ned. **Electric machines and drives: A first course.** Hoboken, NJ: Wiley, 2012. ISBN 978-8126542307.
- MOHAN, Ned; ROBBINS, William P.; UNDELAND, Tore M. **Power electronics: Converters, applications, and design.** 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2007. 802 p. ISBN 978-0471226932.
- NAIK, R.; MOHAN, N. **A novel grid interface for photovoltaic, wind-electric, and fuel-cell systems with a controllable power factor of operation.** *Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, p. 995–998, 1995.
- NARENDIRAN, S. **Grid tie inverter and MPPT - A review.** *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, p. 564–567, 2013.
- NEUMAN, Tom. **Fly the electric skies.** *IEEE Spectrum*, v. 53, n. 6, p. 44–48, 2016.
- NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. **Vector control and dynamics of AC drives.** Oxford: Clarendon, 1996. ISBN 978-0198564393.
- OBI, Manasseh; BASS, Robert. **Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems – A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 1082–1094, 2016.
- PADIYAR, K. R. **HVDC power transmission systems: Technology and system interactions.** New York, Chichester: Wiley, 1990. ISBN 978-1906574772.
- PARKER, Stewart Geoffrey; MCGRATH, Brendan P.; HOLMES, Donald Grahame. **Regions of Active Damping Control for LCL Filters.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 50, n. 1, p. 424–432, 2014.
- RAJASHEKARA, Kaushik. **Parallel between More Electric Aircraft and Electric/Hybrid Vehicle Power Conversion Technologies.** *IEEE Electrification Magazine*, v. 2, n. 2, p. 50–60, 2014.
- RAJASHEKARA, Kaushik. **Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies.** *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 1, n. 1, p. 3–10, 2013.
- RASHID, Muhammad H. **Power electronics handbook: Devices, circuits, and applications handbook.** Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2017. xviii, 1389. ISBN 978-0128114070.
- RODRIGUES, W. A.; SANTANA, R. A. S.; COTA, A. P. L.; OLIVEIRA, T. R.; MORAIS, L. M. F.; CORTIZO, P. C. **Integration of solid state transformer with DC microgrid system.** *IEEE 2<sup>nd</sup> Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, p. 1–6, 2016.
- TANG, Wanrong; ZHANG, Ying Jun. **Optimal charging control of electric vehicles in smart grids.** Cham, Switzerland: Springer, 2017. ISBN 978-3319458618.
- TOLBERT, L. M. **Power Electronics for Distributed Energy Systems and Transmission and Distribution Applications: Assessing the Technical Needs for Utility Applications: Department of Energy from the United States of America,** 2005.
- TRZYNADLOWSKI, Andrzej. **Introduction to modern power electronics.** Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2016. ISBN 978-1119003212.

VAN HERTEM, Dirk; GOMIS-BELLMUNT, Oriol; LIANG, Jun. **HVDC grids: For offshore and supergrid of the future.** Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2016. ISBN 978-1118859155.

VERDICCHIO, Andrea; LADOUX, Philippe; CARON, Herve; SANCHEZ, Sebastien. **Future DC Railway Electrification System - Go for 9 kV.** *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, p. 1–5, 2018.

WALLBANK, Joseph Vella; SINGH, Steve; WALTERS, Simon. **An introduction to the implementation of digital control – Leading to the control of electrical power systems.** *52<sup>nd</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, p. 1–5, 2017.

WANG, Fei; ZHANG, Zheyu; ERICSEN, Terry; RAJU, Ravisekhar; BURGOS, Rolando; BOROYEVICH, Dushan. **Advances in Power Conversion and Drives for Shipboard Systems.** *Proceedings of the IEEE*, v. 103, n. 12, p. 2285–2311, 2015.

WANG, Miao; ZHANG, Ran; SHEN, X. **Mobile electric vehicles: Online charging and discharging.** Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3319251288.

ZHENGYOU, Ma. **Study on the application of advanced power electronics in smart grid.** *Sixth International Conference on Future-Generation Communication Technologies - Dublin, Ireland.*, 2017.

## AUTOMAÇÃO DA CABINE DE LIMPEZA DE IMPRESSÃO 3D BINDER JETTING

Data de aceite: 01/06/2020

Data da submissão: 28/02/2020

### **João Batista Machado Silva**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU  
jbjao92@hotmail.com

### **Leonardo Bevilaqua dos Santos**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU  
leovique1@gmail.com

### **Lucas Leandro Gomes**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU  
lucasleandrogomes96@gmail.com

### **Mariana Silva do Nascimento Gonçalves**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU  
marianasng@live.com

### **Vinícius de Moares Barboza**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU  
vini.foltran@hotmail.com

### **Rogério Luis Spagnolo da Silva**

Departamento de Engenharia, Faculdades  
Metropolitanas Unidas – FMU Professor nos  
cursos de Engenharia Elétrica e de Controle e  
Automação  
Avenida Brigadeiro Luiz Antônio, 917, Bela Vista,  
São Paulo, SP  
rogerio.spagnolo@fmu.br

**RESUMO:** Atualmente, para limpeza dos modelos ortodônticos por impressoras em 3D (Binder Jetting), os equipamentos comerciais oferecem o jateamento em grande escala de peças que exigem intervenção manual de operadores. A limpeza eficiente em pequenas escalas de peças ocorre através de um processo de limpeza manual e repetitivo que até atingir a eficiência total na limpeza, podem ocorrer perdas das peças pelo manuseio do operador. A tecnologia apresentada é um modelo para otimização da etapa de limpeza dos modelos ortodônticos com foco na análise de eficiência da limpeza total dos modelos em pequenas escalas sem intervenção de operadores. A pesquisa acadêmica deste projeto tem como objetivo buscar conhecimento nas áreas de estudo da impressão em 3D, estudo e construção de placas de construção, aplicação de sistema de jateamento, montagem e elaboração de dispositivos, dimensionamento da estrutura, projeto teórico e aplicação prática.

**PALAVRAS-CHAVE:** Automação, Impressão 3D, Jateamento.

**ABSTRACT:** Nowadays, for cleaning of orthodontic models by 3D printers (Binder Jetting), commercial equipment offers the large-scale blasting of parts requiring manual intervention of operators. Efficient cleaning of small scales of parts occurs through a manual and repetitive cleaning process until the total cleaning efficiency can lead to loss of parts by operator handling. The presented technology is a model for optimization of the cleaning stage of the orthodontic models with focus on the analysis of the efficiency of the total cleaning of the models in small scales without operator intervention. The academic research of this project aims to seek knowledge in the areas of study of 3D printing, study and construction of building boards, application of blasting system, assembly and elaboration of devices, structure design, theoretical design and practical application.

**KEYWORDS:** Automation, 3D Printing, Blasting.

### 1 | INTRODUÇÃO

Para o processo de confecção de modelos ortodônticos na empresa que foi aplicado o projeto, utiliza-se a tecnologia denominada *Binder Jetting*. A tecnologia *Binder Jetting* consiste no uso de dois materiais: material de base em pó (metal ou pó de gesso) e um agente líquido. Segundo Godoy (2018), a tecnologia binder foi desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1993 e em 1995 a AZ Corporation obteve uma licença exclusiva.

A linha de produção estudada nesse artigo consiste de uma impressora em 3D que deposita uma camada de pó de gesso na placa de construção e a cabeça de impressão a jato de tinta jorra o *binder* que é o agente de ligação, para unir as camadas formando os modelos ortodônticos.

A vantagem desse processo é que permite que as impressoras trabalhem com impressão 3D em grandes lotes, desde que estejam dentro da área placa de construção. Em média, são impressos 16 modelos ortodônticos em uma impressão de quatro horas, totalizando 8 pares de modelos ortodônticos (maxilar e mandíbula), porém, a desvantagem é o grande excesso de pó de gesso que fica ao redor destes modelos.

A partir disto, vários outros objetivos foram surgindo: minimizar o tempo do processo de limpeza, reduzir a quebra de modelos, aumentar a produtividade da linha de produção, evitar o comprometimento da saúde do operador durante o processo e melhorar a qualidade final do produto.

Em função do aumento da demanda por modelos ortodônticos, constatou-se que o processo de limpeza é demorado e que também haviam perdas de peças pelo manuseio do operador. Assim, iniciou-se um estudo de viabilidade do projeto para automatizar este processo de limpeza com impressora em 3D e tecnologia *Binder Jetting*

## 2 | A EVOLUÇÃO DA IMPRESSÃO 3D

Segundo WISHBOX (2018), a primeira impressora 3D surgiu em 1980 e, apesar dos diferentes tipos de impressão, todas se baseiam no mesmo princípio de deposição de camadas. Portanto, a diferença entre os tipos é caracterizada pela maneira que ocorre a distribuição da matéria prima. A **Tabela 1** apresenta a Evolução da Impressora 3D:

Ano	Fato
1984	Criado por Chuck Hull o primeiro método de impressão por prototipagem rápida, (estereolitografia), ou seja, uma fabricação aditiva que utiliza recipiente de foto polímeros líquidos de resina que é solidificada através da exposição de raios ultravioleta.
1988	Após quatro anos da criação é feita a comercialização da impressora SLA – 250, com método FDM ( <i>Fused Deposition Modeling</i> ) modelagem por fusão e deposição, este é o método mais utilizado de fabricação aditiva por sobreposição apesar de ser mais lento que a estereolitografia, a empresa Scott Scrup foi a desenvolvedora.
2005	Lançamento de impressoras mais compactas como a Spectrum Z510, da corporação Z, que evoluiu também a resolução e melhor qualidade em cores.
2014	A iBox Nano inova na produção de objetos pequenos gerando custo benefício para projetos de produtos menores, até hoje é a menor impressora e mais leve no mercado.
2016	A empresa HP lançou a 3D Multi Jet Fusion, não utiliza laser, funciona com uma técnica em aplicar camada de pó seguido por uma matriz térmica de tinta que introduz um agente químico e funde o material, com este equipamento é possível utilizar até três materiais diferentes simultaneamente.
2018	pode considerar a “inovação da inovação”, uma impressora dez vezes mais rápida foi desenvolvida por engenheiros do instituto de tecnologia de Massachusetts – MIT. Enquanto as impressões tradicionais levam uma hora para imprimir uma peça Lego, a inovadora faz em questão de minutos, fato que ocorre devido o cabeçote compacto e duas ferramentas que aceleram o processo de “derreter” o material através de laser proporcionando maior rapidez.

Tabela 1 – Evolução da impressora 3D.

Fonte: DANTAS, et al., 2018.

## 3 | DESENHO TÉCNICO INICIAL

Devido a fragilidade dos modelos ortodônticos, todas as partes mecânicas do sistema foram projetadas especificamente para uma limpeza mais suave, para que não venha quebrar ou apresentar fissuras no gesso. O esboço do protótipo inicial mostrado é ilustrado na **Figura 1**:

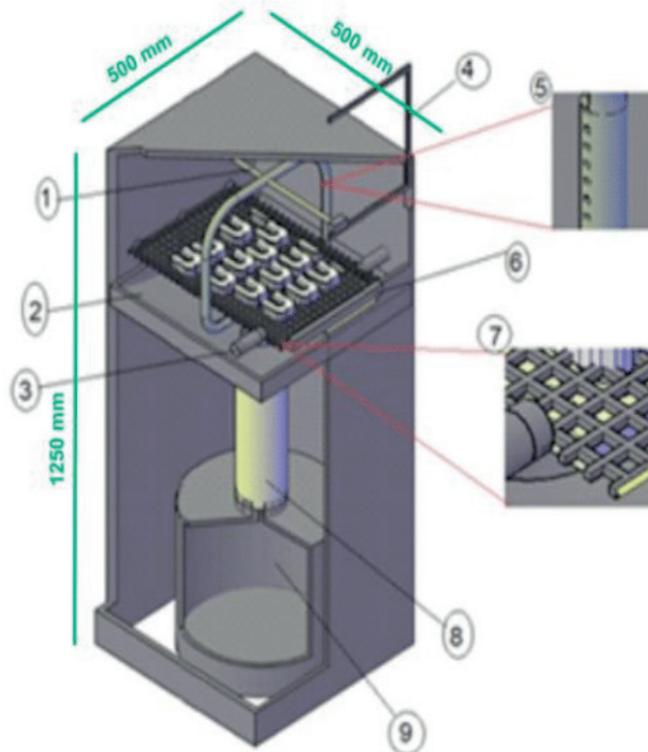


Figura 1 – Desenho do Protótipo Inicial.

Fonte: próprio autor.

Onde:

1. Eixo Giratório (Fuso) de Locomoção
2. Base para tubulação de sucção;
3. Suporte de fixação;
4. Porta;
5. Arco para jateamento;
6. Suporte para remoção de placa de construção;
7. Placa perfurada de perfil quadrado;
8. Tubulação para o motor de sucção;
9. Recipiente para armazenamento de pó com resíduos;

#### 4 | FABRICAÇÃO DA PLACA DE CONSTRUÇÃO

A área de impressão dos modelos é denominada placa de construção. Sendo assim, além dos modelos que são formados na área onde estão os desenhos em 3D, ao redor e no interior da base destes é gerado um grande excesso de pó de gesso em função da impressora empurrar o material para toda área da placa de construção. Entretanto, somente na área que se encontram os desenhos em 3D, através de um reagente, os

desenhos são realizados pelo software da impressora.

Para remoção do pó de gesso acumulado entre os modelos e dentro das bases, uma nova placa de construção foi fabricada, composta por dois componentes: uma chapa de aço inox de tipo moeda e placa de construção (que para prototipagem usou-se madeira, substituindo a placa de construção original de metal), como ilustra a **Figura 2**:



Figura 2 – Vista Frontal da nova Placa de construção com a capa de aço inox.

Fonte: próprio autor.

Na parte inferior desta base de placa de construção foi necessário fazer furos para encaixar nos pinos dentro da impressora e ficar corretamente posicionada para não influenciar na hora da impressão, como ilustrado na **Figura 3**:

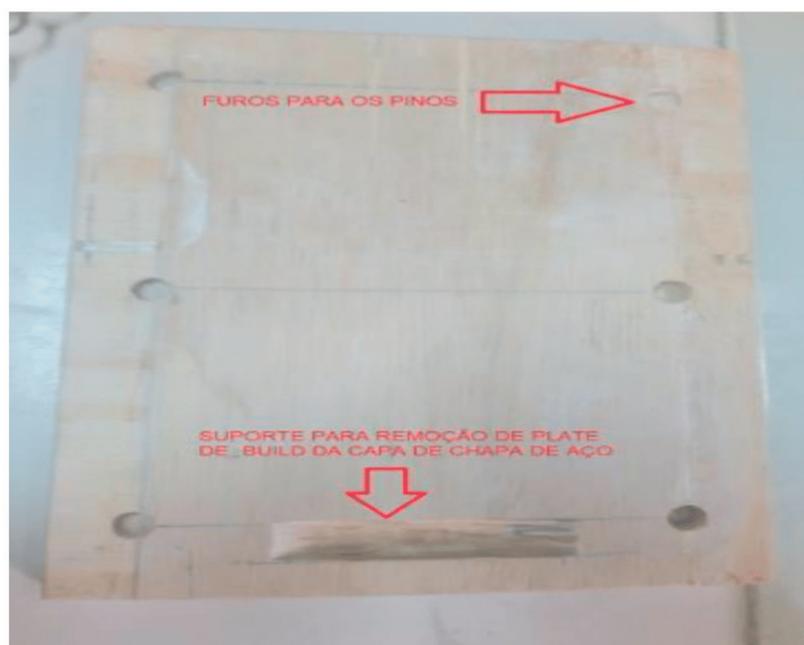


Figura 3 – Vista Inferior da nova placa de construção

Fonte: próprio autor.

#### 4.1 TESTE PLACA CONSTRUÇÃO NA CABINE

A cabine possui um sistema que trava a capa de aço inox para que o operador consiga puxar a placa de construção para fora da máquina, diminuindo o acúmulo de pó de gesso e, para a remoção pelo operador, foi construído um suporte na parte inferior da placa de construção.

A placa de construção encaixou perfeitamente na impressora e realizou a impressão corretamente conforme ilustra a **Figura 4**:



Figura 4 – Teste da nova placa de construção na impressora.

Fonte: próprio autor

A **Figura 5** ilustra, como comparativo, o acúmulo de pó de gesso na placa de construção original após finalizar o ciclo de confecção dos modelos ortodônticos:



Figura 5 – Resultado da impressão com a placa de construção original.  
Fonte: próprio autor.

A **Figura 6** ilustra o resultado da impressão nos modelos ortodônticos com a nova placa de construção na impressora:



Figura 6 – Resultado da impressão com a placa de construção original.  
Fonte: próprio autor.

Como pode ser observado na **Figura 6**, no teste com a nova placa de construção, o

pó de gesso da lateral esquerda onde não foram desenhados os modelos e no interior da base dos modelos, foram removidos, como esperado.

## 5 | MONTAGEM ESTRUTURA DA CABINE

Para facilitar a montagem e desmontagem da cabine, a cabine foi construída em três partes (inferior, central e superior).

Na parte inferior está o sistema de sucção; na parte central ocorre o processo de limpeza dos modelos e na parte superior os sistemas de eletrônicos e de controle da cabine de limpeza juntamente com o painel para comunicação do operador com a cabine.

Para agilizar o acesso à manutenção e para que não ocorra contaminação com o pó de gesso, os sistemas eletrônicos e de controle foram instalados somente na parte superior. A **Figura 7**, ilustra a vista frontal da cabine:

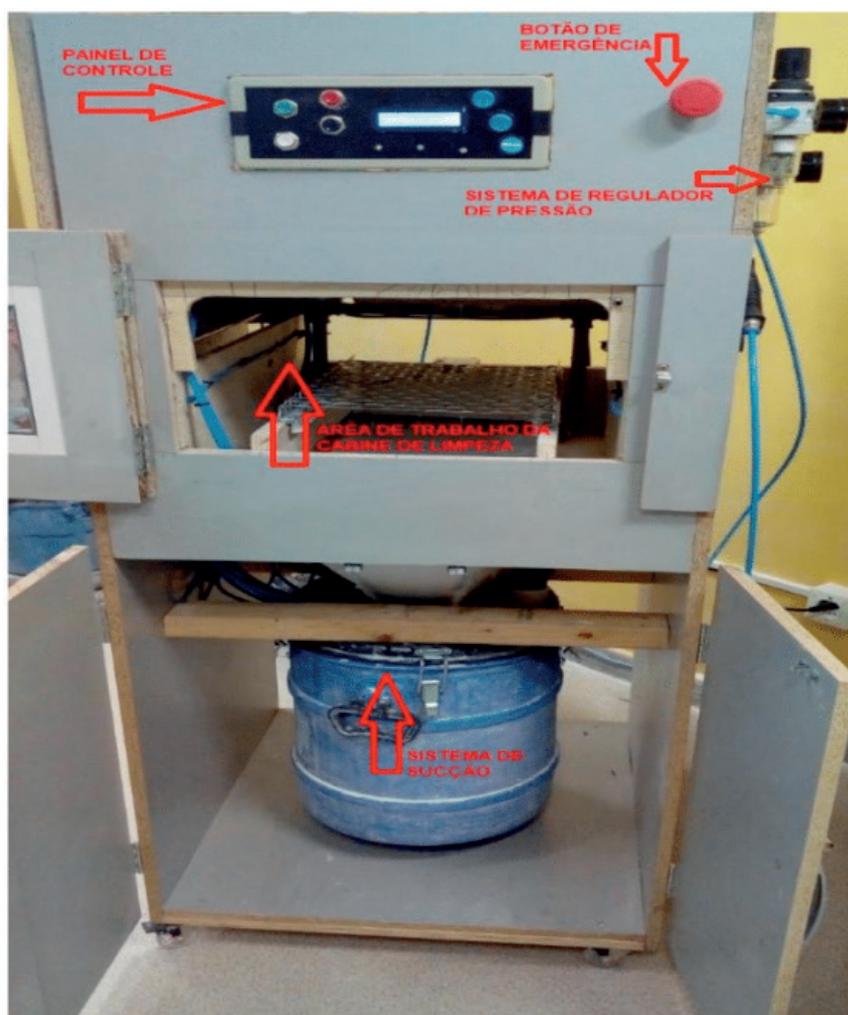


Figura 7 – Vista frontal da cabine.

Fonte: próprio autor.

## 6 | SISTEMA DE SUCÇÃO

Para o projeto foi utilizado um sistema reservatório de aspiração ciclone, que consiste de um separador de pó e ar usando a física da força centrípeta. Segundo Junior (2014), os ciclones são equipamento classificados como separadores ciclônicos e são utilizados na remoção de partículas sólidas contidas em um gás.

A partir da definição acima, verifica-se que a mistura de pó e ar entra em alta velocidade dentro de um recipiente, gerando um ciclone dentro deste, o que faz com que o pó (a parte mais densa da mistura) se deposite nas paredes e o ar (por ser menos denso) permaneça no centro separando-os.

A **Figura 8** ilustra o sistema de sucção tipo ciclone:

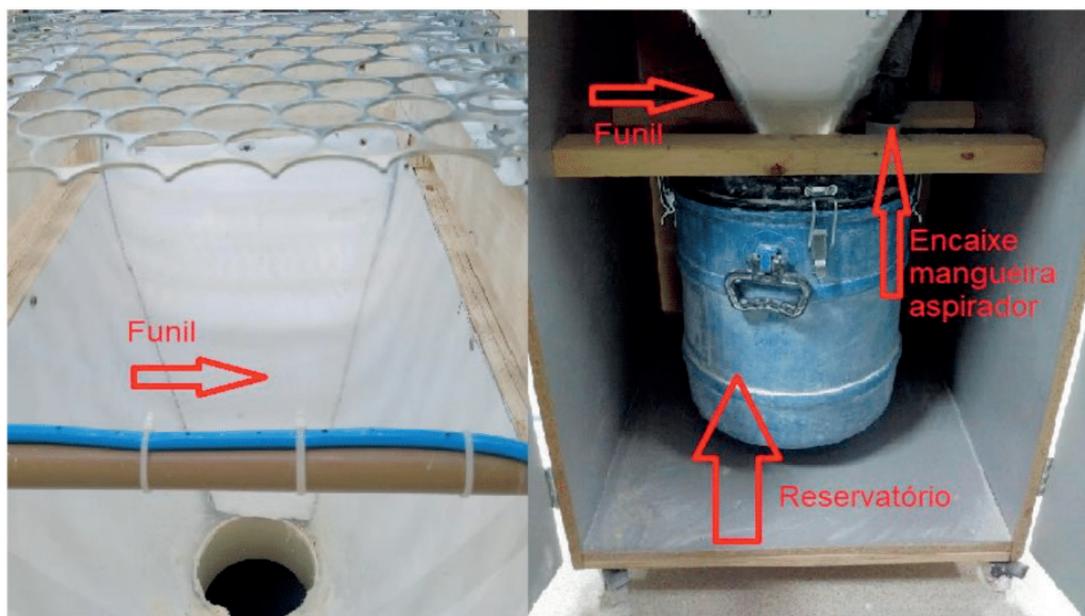


Figura 8 - Sistema de sucção tipo ciclone.

Fonte: próprio autor.

## 7 | SISTEMA DE JATEAMENTO

Para exemplificar a estrutura do jateamento, fez-se em duas partes o sistema de jateamento da cabine de limpeza: a primeira que acompanha um mesmo movimento linear horizontal e a segunda fixa nas laterais acompanhando o suporte da placa de construção. A **Figura 9** ilustra esta estrutura do jateamento:

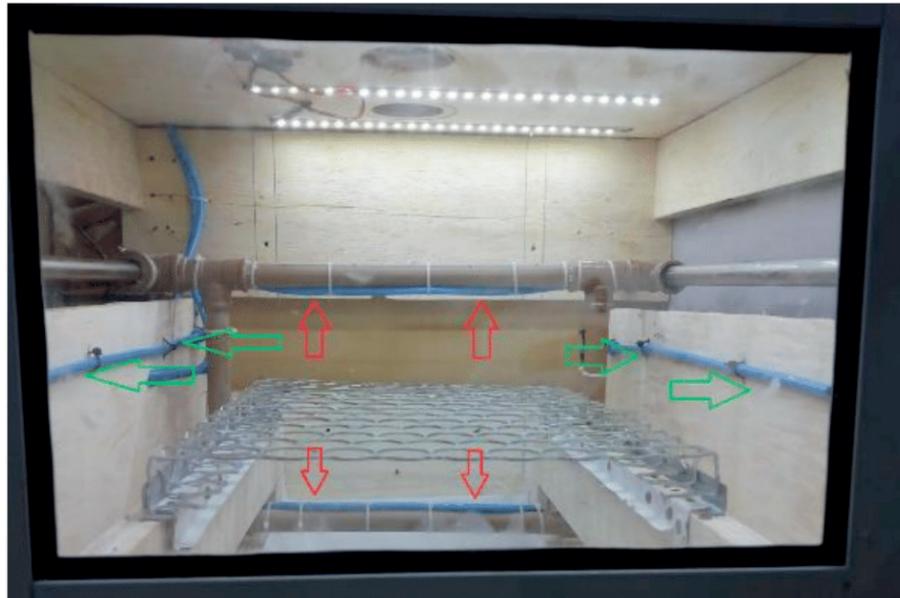


Figura 9 – Estrutura do jateamento.

Fonte: próprio autor.

Como pode ser observado na **Figura 9** nas flechas vermelhas, o suporte que está envolvendo os modelos sob a chapa de aço inox em forma de um arco foi fixado à mangueira pneumática para realizar o jateamento na parte superior e inferior.

A parte inferior do arco trabalha com jatos verticais de baixo para cima diretamente na parte inferior dos modelos. Já a parte superior do arco, trabalha com jatos verticais de cima para baixo diretamente na parte superior dos modelos.

Nas laterais, as mangueiras representadas pelas flechas verdes, foram fixadas na própria lateral da cabine de limpeza com jatos laterais nos modelos simultaneamente.

Durante os testes foi observado que na saída de pressão para a limpeza nas etapas do ciclo houve pressões diferentes, sendo a superior e inferior com 50psi e as laterais com 15psi. A alternância de pressão se justifica pela diferença de excesso de acúmulo de pó de gesso nos modelos.

Um ciclo de limpeza é composto por uma repetição de jateamento na parte inferior dos modelos, no qual o arco percorre toda a extensão da placa de construção. Ao terminar o jateamento inferior será iniciado o jateamento superior fazendo novamente o arco percorrer toda a extensão da placa de construção com uma repetição de jateamento e quando finalizado vem os dois últimos jateamentos laterais que ocorre de forma simultânea.

## 8 | ACIONAMENTO DOS SISTEMAS

O motor e as válvulas são acionados através de relés, que por sua vez são acionados pela plataforma Arduino®. As válvulas são ligadas com polo **GND** diretamente na fonte de 12V AC/DC e o seu polo **VCC** é ligado no relé em seu terminal normalmente aberto.

O motor por sua vez é ligado ao polo **GND** e o polo **VCC** é ligado em outro rele ambos na posição comum e ambos os reles estão ligados numa ligação **X**, assim possibilita quando o sistema ative N/A de um dos relés e N/F do outro e vice-versa é possível alterar o sentido de rotação do motor.

A **Figura 10** ilustra o esquema de ligações descrito para o acionamento dos sistemas:

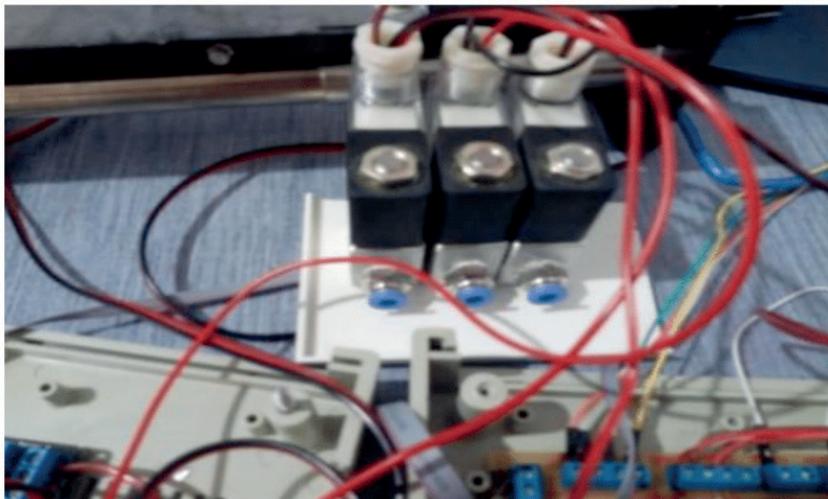


Figura 10 – Válvulas Solenoides

Fonte: próprio autor.

## 9 | PLACA DE INTERFACE

Para facilitar a acomodação dos cabos e a ligação dos mesmos nos demais periféricos foi projetada e desenvolvida uma placa de interface com borneiras para conexão rápida de seus cabos, facilitando também na manutenção do sistema. Na placa, estão instalados resistores para leitura dos sinais que os botões e sensores transmitem para a plataforma do Arduino® conforme ilustra a **Figura 11**:

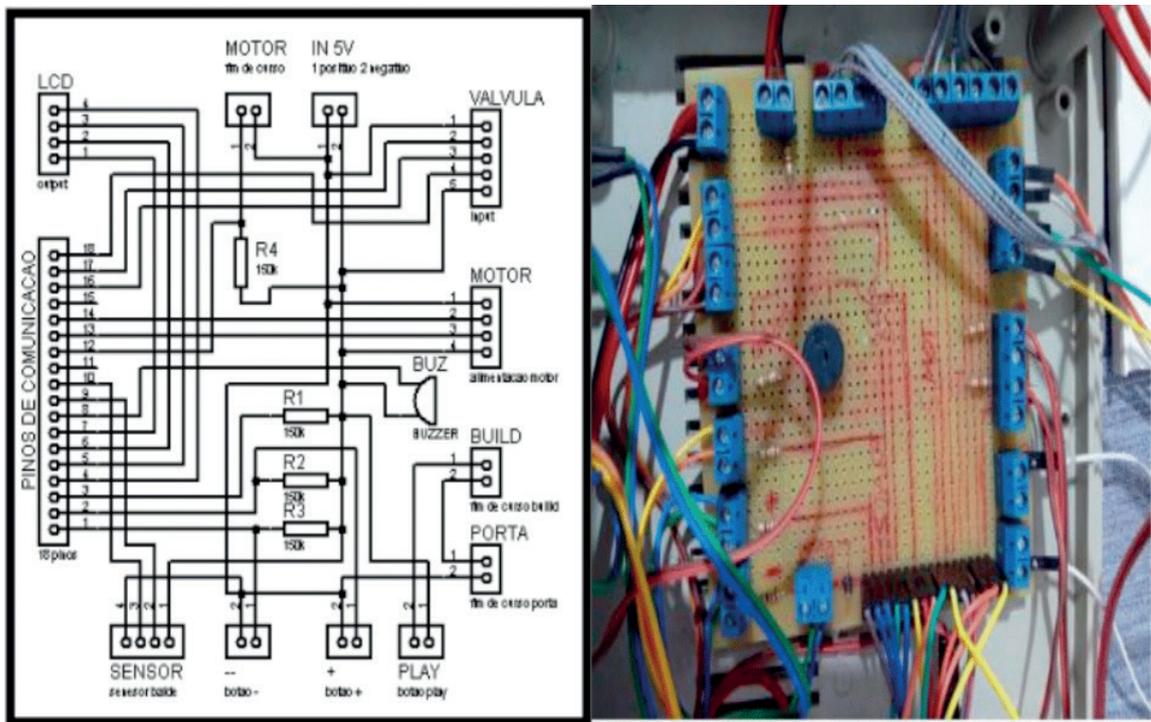


Figura 11– Placa de Interface projetada e conexões.

Fonte: próprio autor.

## 10 | INTERFACE DE COMUNICAÇÃO

A fim de proporcionar uma interface de comunicação bem intuitiva entre o operador e a cabine de limpeza, foi implementado uma LCD 16x2, onde o usuário pode observar quantos ciclos foram determinados para que os modelos ortodônticos estejam limpos e quantos ciclos ainda faltam para completar.

Os botões são usados para definir as funções do processo tais como o acionamento geral da cabine, ascender e apagar a iluminação interna, ligar e desligar o sistema, quantidade de ciclos e início do processo. Foi implementando também um botão de emergência com a finalidade de paralisar o procedimento realizado e proteger a qualquer imprevisto existente no processo.

A **Figura 13** ilustra o fluxograma de funcionamento da máquina:

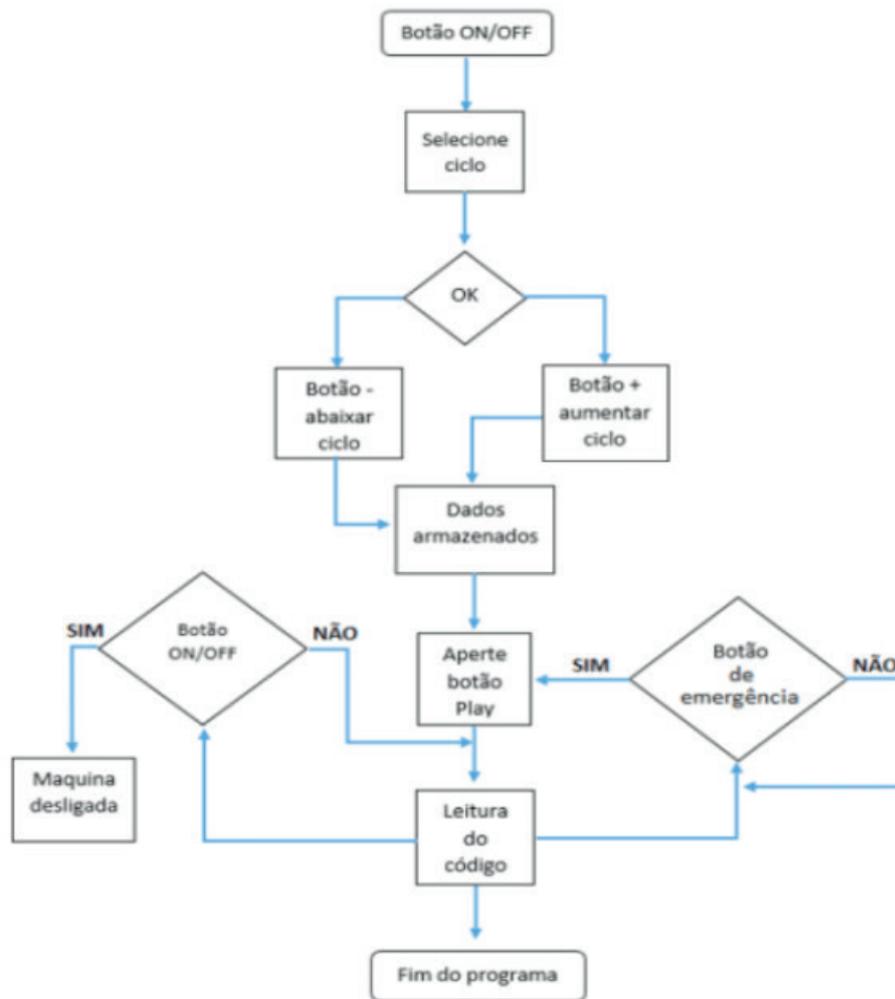


Figura 12 – Fluxograma do Processo de Trabalho da Máquina.

Fonte: próprio autor.

Na **Figura 12** observa-se que ao ligar a cabine de limpeza será solicitado ao operador selecionar um valor de ciclos, através disso, o controlador irá armazenar os dados e preparar para início, assim que os dados forem armazenados o usuário poderá dar início ao processo apertando ao botão **PLAY**, ao ler o código de programação o sistema sempre estará atento caso ocorra um imprevisto e seja acionado o botão **RESET** ou o próprio botão designado para emergência. Ao finalizar o código de programação o operador será informado do fim e será acionado o alarme de sinalização de fim de processo e consequentemente poderá retirar os modelos limpos da estação de limpeza.

## 11 | CONCLUSÃO

Neste processo de fabricação e testes, concluiu-se ser possível e viável a automação do processo de limpeza dos modelos ortodônticos. Os resultados apresentaram alta taxa de limpeza das peças, já que até a fase atual, estas obtiveram uma limpeza total de até 90%, com margem de melhora dependendo da dimensão e quantidade de peça. Entretanto,

devido ao projeto encontrar-se em fase de prototipagem, pode-se rever alternativas para garantir uma melhor eficácia na limpeza.

A redução de danos e quebras demonstrou uma excelência ótima no processo de produção, já que a pressão de jateamento e as características físicas da máquina foram calculadas e projetadas para evitar ao máximo a quebra do modelo.

Tais características podem ser assim consideradas como aumento na produtividade com um fator determinante pela decisão de automatizar o processo de limpeza: maior garantia nos modelos ortodônticos e maior correspondência com a impressão original, atenuando as ocorrências de desvios e falhas.

Observou-se também, uma organização no processo de produção mais clara e definida, gerando uma estimativa de tempo para término da limpeza em grande escala, desatrelando o tempo a subjetiva qualidade de cada operador.

Por fim, este projeto proporcionou também maior segurança de trabalho, com a presença de um sistema de segurança mais eficaz com um botão especialmente destinado para qualquer emergência que possa ocorrer com a máquina.

## REFERÊNCIAS

JUNIOR J. C., **Avaliação do desempenho de um ciclone *Stairmand* adaptado com bicos injetores de água**, 2014. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4144/6116.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13.02.2018.

GODOY, A., **Quais são os tipos de impressão 3D**, 2018. Disponível em: <<https://blog.escoladeimpressao3d.com.br/quais-sao-os-tipos-de-impressao-3d+227476>>. Acesso em: 13.02.2018.

**WISHBOX TECHNOLOGIES**, Evolução das impressoras 3D, 2016. Disponível em: <<http://blog.wishbox.net.br/2016/03/31/a-evolucao-das-impressoras-3d/>>. Acesso em: 13.02.2018.

DANTAS, I.M., PACHECO, L.N., SILVA, R.F., SANTOS, S.L., BOTELHO, W.C.. **Implantação de impressão 3D: melhoria no processo de projetos no grupo aço tubo**. Disponível em: <[https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/impressora\\_3d-artigo\\_final225-5-18.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/impressora_3d-artigo_final225-5-18.pdf)>. Acesso em: 13.02.2018.

## USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA OBTENÇÃO DE UM SENSOR AR/COMBUSTÍVEL VIRTUAL APLICADO A UM MOTOR MONOCILÍNDRICO

Data de aceite: 01/06/2020

### Leonardo Faure Nardini Paschoa

Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT)

### Sergio Ribeiro Augusto

Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT)

**RESUMO:** Este trabalho visa a construção de um estimador neural (sensor virtual) utilizando uma rede do tipo PMC (perceptron multicamada) para a determinação da relação ar/gasolina (valor lambda), em uma dada faixa de regime de operação, de um motor monocilíndrico de baixa cilindrada. Através da medida de parâmetros do motor, como, por exemplo, rotação, fluxo de ar, temperatura, largura do pulso de injeção, entre outras, obtém-se um mapeamento não linear que determina o valor da relação normalizada (lambda). Com isso, pretende-se diminuir os custos de motores ao consumidor final, visto que seria realizado a troca de um sensor físico pelo virtual.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor de combustão interna; injeção eletrônica; redes neurais; sensor lambda.

**ABSTRACT:** This paper aims to study a neural estimator (virtual sensor) using a PMC (multilayer perceptron) type network to determine the normalized air/fuel ratio ( $\lambda$  value), in a given operation range, of a single cylinder engine. By measuring working parameters of the engine, a non-linear NARX model of a wideband oxygen sensor is obtained, allowing the replacement of a real sensor by a virtual one, lowering production costs.

**KEYWORDS:** Internal combustion engine; electronic fuel injection; neural networks; lambda sensor.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os motores a combustão funcionam utilizando o princípio que havendo faísca e combustível uma explosão é gerada liberando energia. Tal energia é transformada em rotação do eixo do motor (virabrequim), permitindo que a mesma seja utilizada por exemplo para tração mecânica. O gerenciamento desses fatores, faísca e combustível, os quais garantem o funcionamento do motor, é realizado através de sistemas de injeção e ignição eletrônicas (Young, 2010).

Os sistemas de injeção e ignição

eletrônicas foram desenvolvidos para se obter um maior controle sobre o funcionamento do motor, visto que diversas variáveis envolvidas no sistema são monitoradas e consideradas para cálculo, em tempo real, da quantidade de combustível e o instante de explosão da mistura, permitindo o perfeito funcionamento do motor, em qualquer situação. Conseqüentemente, isso permite com que tenhamos um funcionamento perto do ideal do motor: a mistura estequiométrica. Quando temos para um motor a quantidade exata da mistura Ar/Combustível, dizemos que a mistura é estequiométrica (pois temos exatas partes de combustível para comburente), ou que o valor de lambda ( $\lambda$ ) é 1 (Amato et al., 2005).

O valor de lambda é definido pela equação:

$$\lambda = \frac{\text{ar/combustível}}{\text{ar/combustível estequiométrica}} \quad (1)$$

O valor indica, de maneira mais direta, se a mistura está rica ( $\lambda < 1$ , com combustível acima do ideal), ou se a mistura está pobre ( $\lambda > 1$ , com combustível abaixo do ideal). O controle desse parâmetro, além de garantir o perfeito funcionamento do motor, gera economia de combustível e menor quantidade de emissões de poluentes à atmosfera, visto que o combustível não é “desperdiçado”. O sistema de injeção eletrônica foi implementado em massa por volta dos anos 80 e 90 pelas montadoras ao redor do mundo (Young, 2010). Para o sistema determinar se a mistura está rica ou pobre é utilizado um sensor de oxigênio, chamado de sonda lambda, na saída de escape dos motores, o qual faz a leitura da quantidade de oxigênio presente após a queima do combustível, indicando ao sistema de injeção se todo o combustível foi queimado, não foi, ou se faltou. Este estudo se refere a emulação de um sensor  $\lambda$  utilizando-se redes neurais artificiais (Haykin, 1999; Turkson, 2016).

As redes neurais são uma analogia ao sistema nervoso central de um animal, pois podem aprender e observar padrões, para posteriormente os repetir e generalizar. Muitas vezes, são utilizadas para observar padrões em funções e problemas do dia a dia, para que possam ajudar a resolver algo que seria trabalhoso demais se realizado de maneira mais manual, tais como visão computacional e reconhecimento de voz (Haykin, 1999).

Outros trabalhos na literatura utilizaram redes neurais para modelagem de sensores lambda, tais como Salehi (2010) e Richter (2009). Em Salehi (2010) o mesmo utilizou redes neurais para analisar o desgaste de catalisadores, utilizando uma sonda lambda antes do catalisador e prevendo o valor de lambda após o catalisador. Em Richter (2009) uma rede neural do tipo perceptron multicamadas (Haykin, 1999) foi utilizada para realizar a predição de um passo à frente do valor de lambda em função de vários parâmetros de funcionamento do motor, e utilizando um elevado conjunto de treinamento. Neste trabalho, diferentemente da literatura citada, utiliza-se um modelo não linear do tipo NARX (*non linear auto-regressive network with exogenous inputs*) (Aguirre, 2000; Narendra e

Parthasarathy, 1990), ilustrado na Figura 1, cuja função não linear  $f(\cdot)$  é realizada através de uma rede neural artificial do tipo perceptron multicamada, treinada utilizando o método da regularização Bayesiano (Lampinen e Vehtari ,2001).

A equação de um modelo NARX é dada pela equação (Narendra e Parthasarathy, 1990):

$$Y_p(k + 1) = f[ Y_p(k), Y_p(k - 1), \dots, Y_p(k - n + 1); u(k), u(k - 1), \dots , u(k - m + 1)] \quad (2)$$

A Figura 1 ilustra o modelo NARX:

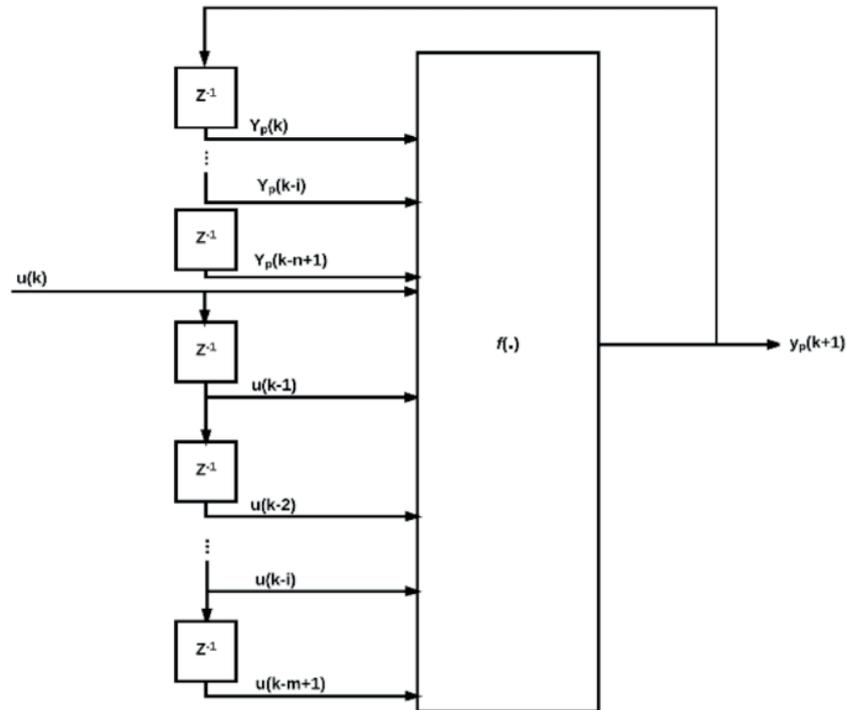


Figura 1 - Diagrama do modelo NARX

A Figura 2 ilustra uma rede neural perceptron multicamadas (PMC) com uma camada escondida, consistindo de vários neurônios interconectados.

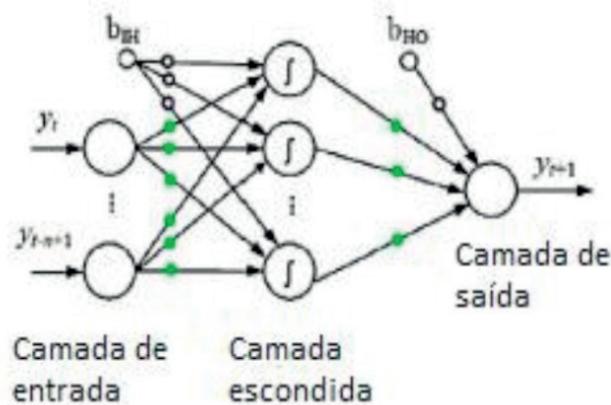


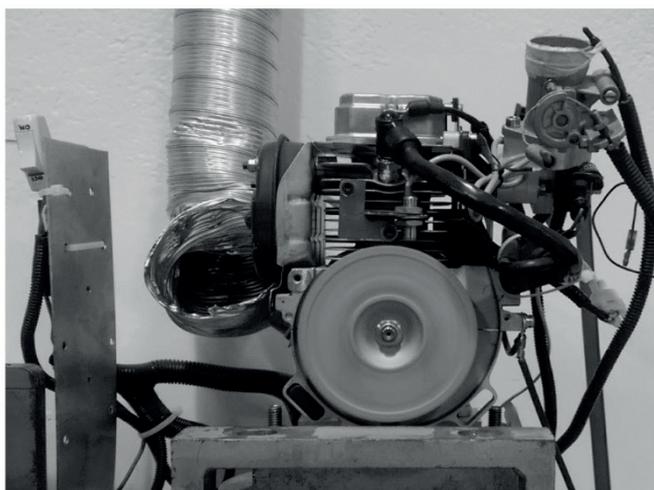
Figura 2 - Rede tipo PMC

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foi utilizado um motor monocilíndrico Honda Gx35 (Honda, 2017), motor pequeno de aplicação em roçadeiras. A escolha do motor foi feita devido à facilidade de acesso e pelo mesmo ser utilizado em competições acadêmicas.

O motor utilizado vem de fábrica com sistema de carburação para alimentação do motor e para realizarmos este estudo foi necessária a instalação e configuração de um kit de injeção e ignição eletrônica. Optou-se pela aquisição de um kit fabricado pela empresa norte americana Ecotrons (Ecotrons, 2017), voltado a motores monocilíndricos. O kit é composto dos itens necessários para a conversão do sistema de alimentação do motor, incluindo bicos injetores, coletor de admissão, sensor de oxigênio, entre outros. Alguns de seus itens requerem atenção especial para a montagem, como a linha de combustível e seus periféricos, bomba e filtro. A linha de combustível necessita constante atenção, já que se houver, por exemplo, algum ar na linha, o funcionamento correto do motor é prejudicado, fazendo com que o mesmo sequer possa ser ligado.

A Figura 3 ilustra o motor utilizado e o sistema de injeção e ignição instalados.



*Figura 3 - Motor com os periféricos, injeção e ignição.*

O sistema de injeção inclui um software, denominado EcoCal, ilustrado na Figura 4, que permite o ajuste e calibração de diversos parâmetros do mesmo, assim como um registro de ações do sistema, e página para observação de comportamentos de variáveis. Os dados monitorados para testes foram: temperatura de admissão, temperatura do motor, rotação do motor, pressão do coletor de admissão, posição da borboleta, tempo da faísca, largura de pulso de injeção e o valor de Lambda. O valor de  $\lambda$  é a saída do modelo NARX, e as demais variáveis compõem o vetor de entrada  $u(k)$ .



Figura 4 - Software EcoCal

O kit original da injeção eletrônica utiliza em seu sistema uma sonda lambda do tipo banda estreita (*Narrowband*) (Richter, 2009), tais sondas possuem uma variação de tensão de saída muito abrupta em função da relação ar/combustível, fornecendo apenas se a mistura é rica ou pobre. O objetivo de nosso estudo é de estimar sensores do tipo *wideband* (Richter, 2009), mais precisos e também de custo mais elevado. Embora mais precisos, tais sensores não são normalmente utilizados em veículos devido ao seu custo.

A Figura 5 ilustra os dois tipos de sensores:

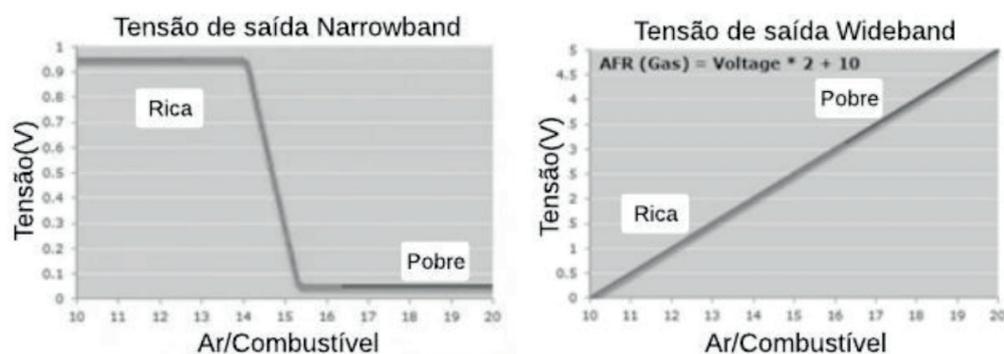


Figura 5 - Comparação Narrowband vs Wideband

Para obtenção de dados para treinamento e teste do modelo NARX, dados foram capturados para uma dada faixa de regime de operação do motor (500 rpm a 4500 rpm), com carga constante. A taxa de captura dos mesmos foi de 100ms, suficiente para as variações de interesse das variáveis envolvidas. Entre as variáveis capturadas foram selecionadas as que mais influenciaram o valor de I durante pré-testes. Estas variáveis

foram selecionadas como entradas do modelo. Como função não linear do modelo utilizou-se uma rede neural PMC com uma camada escondida. Na camada escondida a função de ativação foi do tipo sigmoidal tangente (Haykin, 1999) e na camada de saída utilizou-se função de ativação linear.

Para facilitar o treinamento da rede neural, os dados de entrada da mesma foram normalizados entre -1 e 1. Os dados obtidos pelo *software* da injeção foram exportados para o Excel, onde foram realizadas as normalizações e outras operações de maneira a preparar os dados para uso no ambiente MATLAB.

Para treinamento da rede foi utilizado o modelo série-paralelo proposto por Narendra e Parthasarathy (1990). A vantagem de uso deste modelo é que os dados reais da variável estimada são utilizados como entrada do modelo NARX, de modo que se possibilita o treinamento da rede neural PMC utilizando-se métodos convencionais do algoritmo de retro propagação do erro aplicáveis a redes estáticas, sem realimentação (Haykin, 1999). A estimativa de um passo à frente utilizando esta filosofia é dada pela equação (3),

$$\hat{Y}_p(k+1) = f[Y_p(k), Y_p(k-1), \dots, Y_p(k-n+1); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \quad (3)$$

onde  $\hat{Y}_p(k+1)$  é a estimativa de um passo à frente. A figura 6 ilustra a diferença entre o modelo série-paralelo e o modelo paralelo (em malha fechada). Tal filosofia é utilizada apenas para o treinamento, utilizando-se posteriormente o sistema NARX em malha fechada. Entretanto, a predição de um passo à frente pode ser interessante, quando temos disponível a variável de saída real e queremos realizar apenas uma predição da mesma.

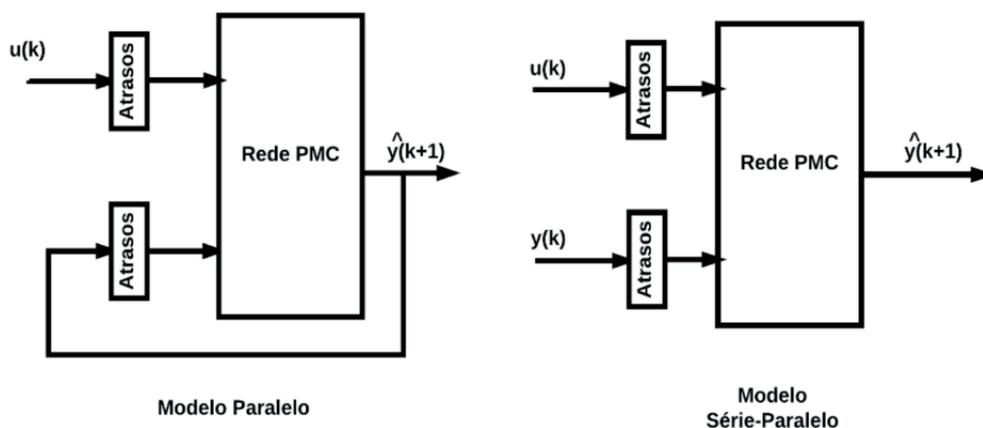


Figura 6 - Diagrama de redes paralelo e série-paralelo.

Para treinamento e verificação da rede PMC utilizada, e do próprio modelo NARX, foi utilizado o ambiente MATLAB, realizando a importação do arquivo gerado no Excel, com as variáveis medidas. No ambiente MATLAB foram usadas principalmente as funções *nnstart* e *nntool*, de forma a reduzir o trabalho manual de programação para criação e

teste das redes neurais.

Como citado anteriormente foram realizados diversos testes no motor, com regimes alternados de rotação e posição da borboleta, porém sempre mantendo a carga constante do mesmo, assim como monitorando as variáveis envolvidas. Para determinação da rede neural, e portando do modelo NARX, sempre foram realizados os treinamentos com uma faixa de dados diferente da utilizada para validação e testes, de modo a verificarmos a aprendizagem e generalização da rede e do modelo.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apenas de maneira ilustrativa, a Figura 7 mostra as variáveis monitoradas e os valores da sonda  $\lambda$ . A ideia é apenas mostrar a variabilidade no tempo das grandezas envolvidas, objetivando ressaltar a dificuldade de aprendizagem do modelo.

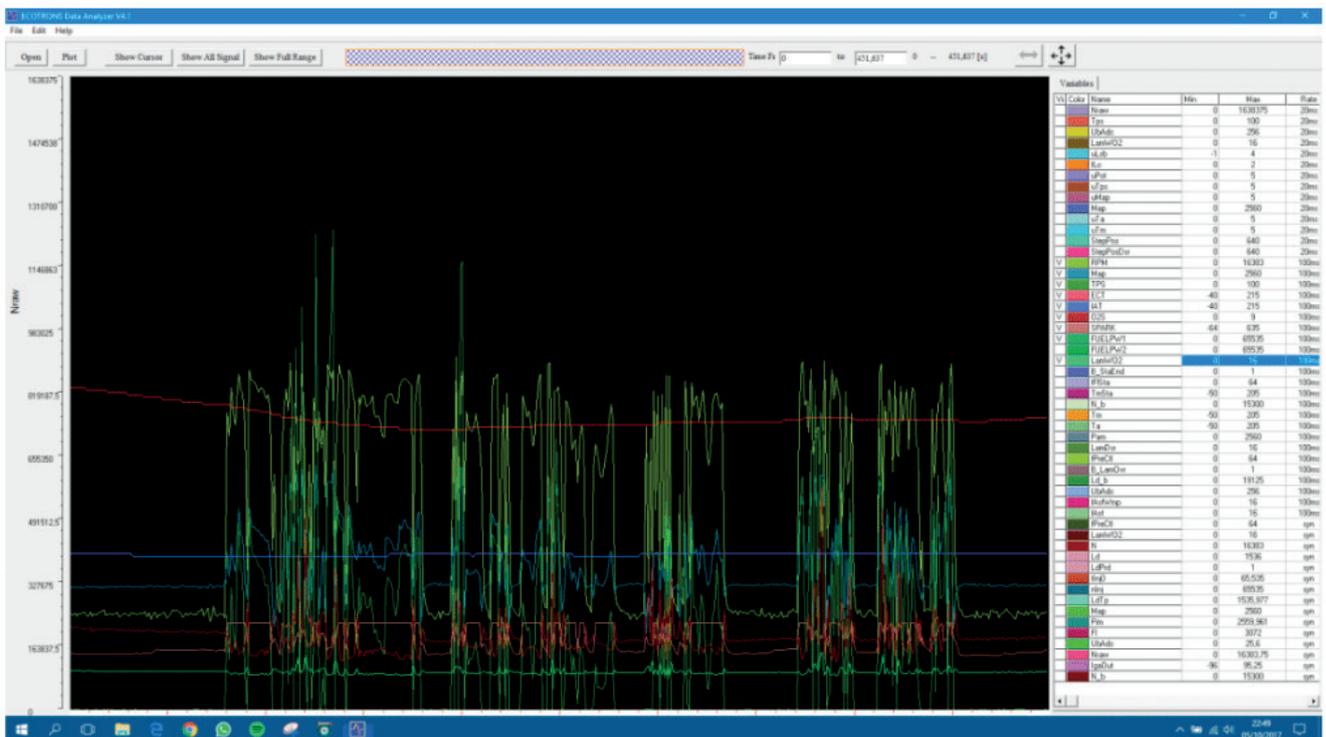


Figura 7 - Software EcoCal: Datalogger

Tais dados, normalizados, foram usados para determinação do modelo. O modelo, não-linear, possui vários parâmetros a escolher, como a ordem dos atrasos nas variáveis de entrada e saída e o número de neurônios da camada escondida da rede neural. Escolheu-se a função sigmoideal tangente como função não linear pela mesma fornecer bons resultados em problemas envolvendo redes neurais (Duda et al., 2012) e uma função linear na saída para ter uma melhor faixa para os valores de  $\lambda$ .

Para a determinação do número de atrasos e número de neurônios da camada escondida, vários treinamentos e testes foram realizados de maneira a se encontrar um

resultado satisfatório. Inicialmente buscou-se uma configuração do modelo série-paralelo com uma boa predição de um passo à frente. Resultado satisfatório foi obtido com uma rede de 10 neurônios na camada escondida e com atrasos de ordem 4 nas entradas da rede ( $n=m=4$  na equação 3). A Figura 8 ilustra o modelo utilizado no MATLAB usando a ferramenta *nnstart*.

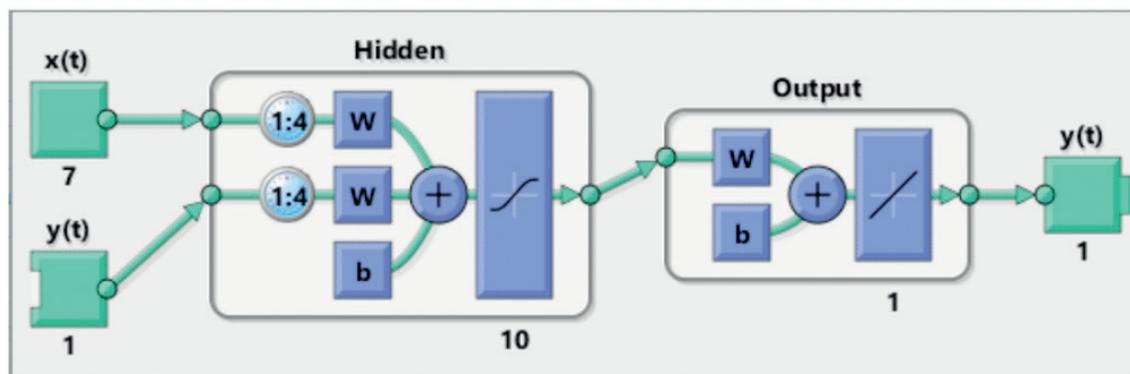


Figura 8 - Diagrama da rede série-paralelo (*nnstart*).

Com tais parâmetros o modelo foi treinado usando o método Bayesiano e utilizando-se uma parte dos dados obtidos. O processo de regularização Bayesiana minimiza uma combinação dos erros quadráticos e pesos da rede de maneira a melhorar a generalização. Como método de parada para o treinamento utilizou-se o de parada antecipada (Haykin, 1999). Testando-se tal modelo em outra faixa de operação do motor obteve-se um erro médio quadrático de 0,0011 e regressão de 0,962 entre os dados reais e os obtidos pelo modelo. Tais resultados foram considerados satisfatórios para predição de um passo à frente.

A Figura 9 ilustra os dados reais e do modelo sobrepostos e a Figura 10 apresenta os mesmos dados só que com o valor simulado deslocado de 1 unidade para facilitar a visualização. Nota-se que a rede/modelo forneceu uma boa generalização.

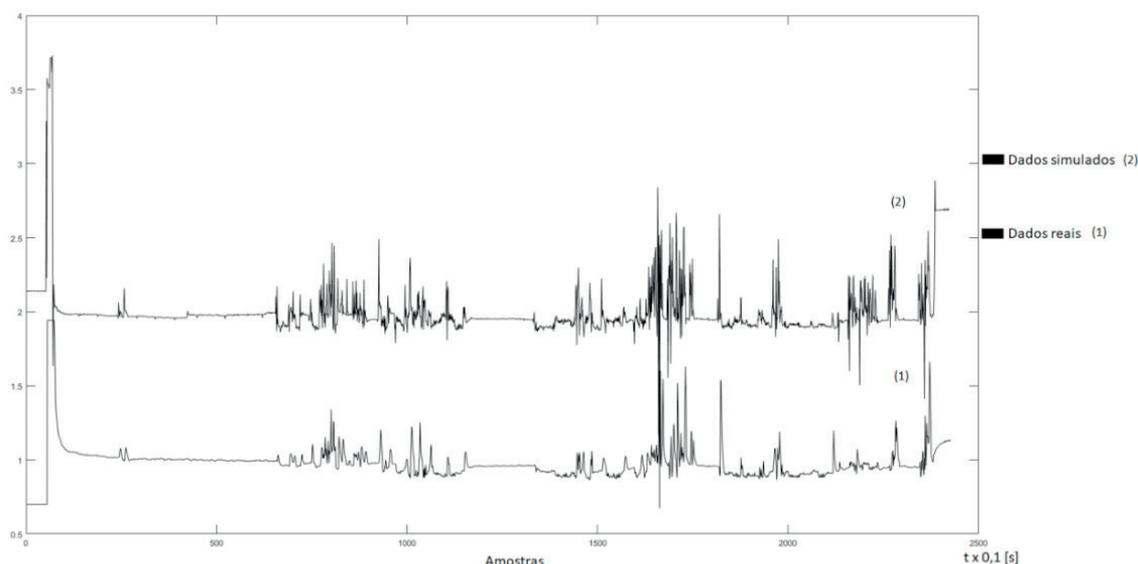


Figura 10 - Dados reais e simulados deslocados

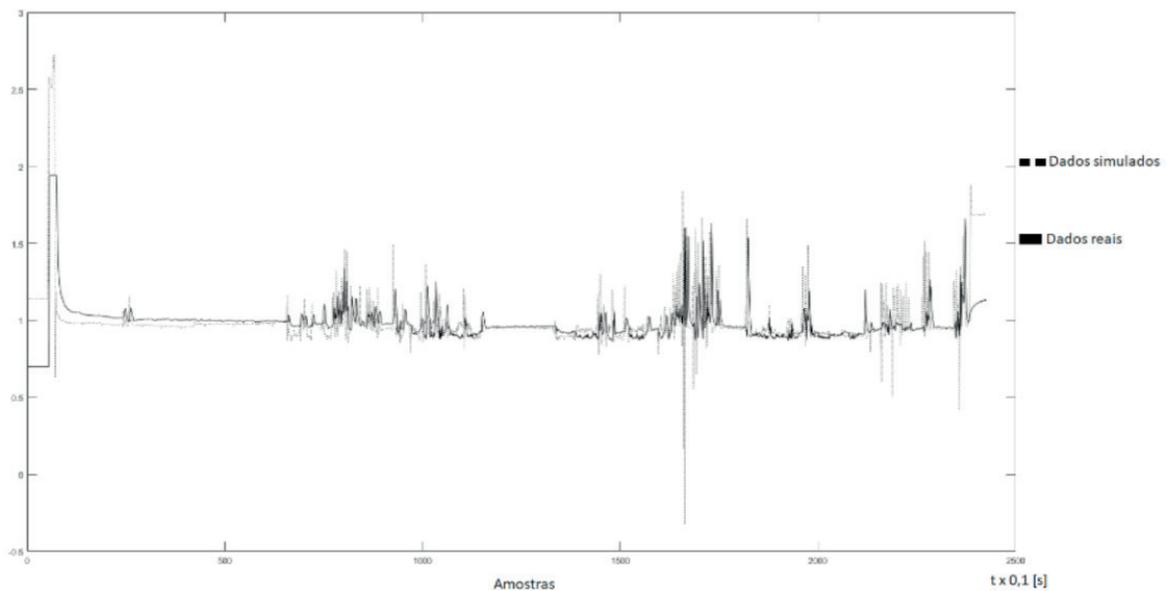


Figura 9 - Dados reais e simulados sobrepostos

Com a rede obtida, fechou-se a malha, como na Figura 11:

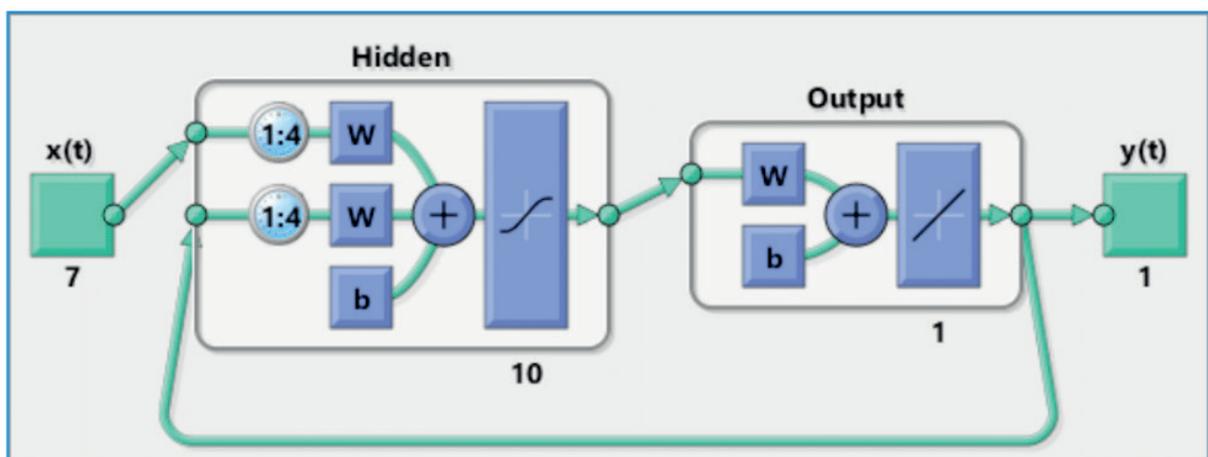


Figura 11 - Diagrama da rede fechada

Escolheu-se outra faixa de dados, não utilizados no treinamento, e verificou-se o uso do modelo em malha fechada para essa nova faixa. Note-se que neste caso não se tem mais dados reais na entrada da rede, sendo o próprio dado gerado pelo modelo sendo realimentado no mesmo. Nesse caso, de maior dificuldade que o anterior, o modelo forneceu um erro médio quadrático de 0,0067 e uma regressão de 0,319.

A Figura 12 ilustra os dados do modelo e do sensor real nessa nova faixa. Também, como indicado na figura, aplicou-se o modelo de um passo à frente nessa mesma faixa, para ilustração. Nota-se que mesmo em malha fechada o modelo obteve resultados satisfatórios.

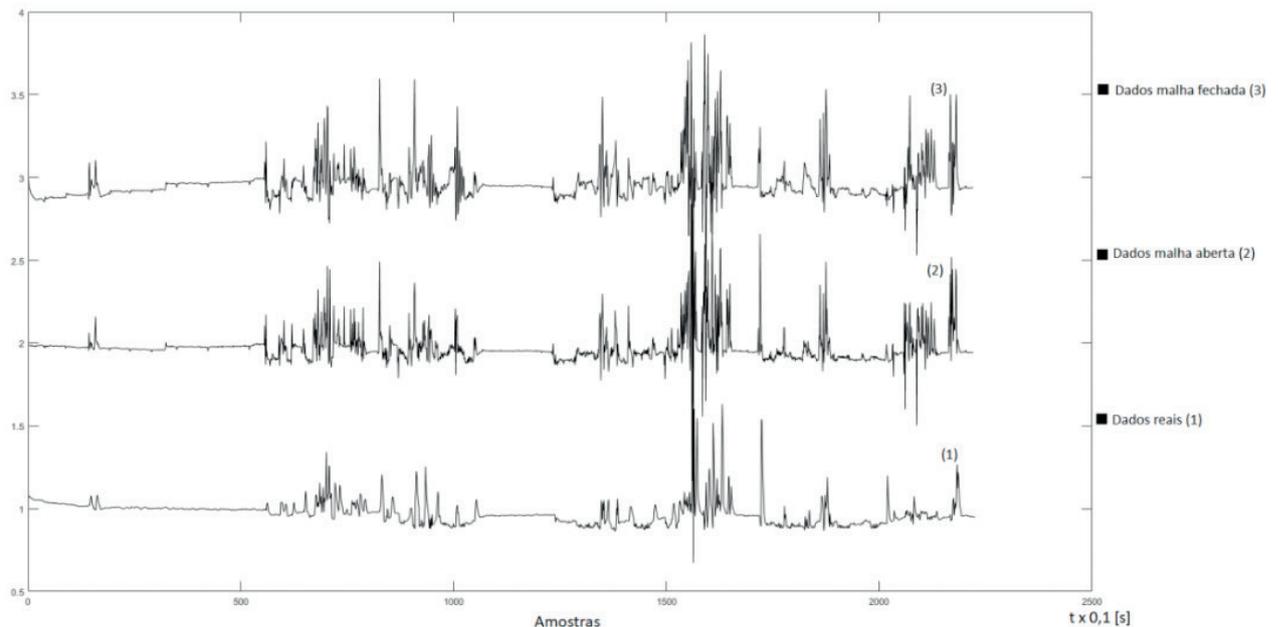


Figura 12 - Dados reais e simulados deslocados, com menor faixa de amostra

A disparidade em algumas amplitudes obtidas pelos modelos acredita-se que possa ser eliminada aumentando o conjunto de treinamento, o qual não foi elevado (por volta de 2400 amostras) para a dificuldade do problema proposto. Nota-se que o modelo em malha aberta (série-paralelo) e em malha fechada forneceram resultados similares, o que mostrou ser efetivo o uso do modelo série-paralelo para treinamento, podendo-se, portanto, utilizar métodos de treinamentos de redes estáticas, muito mais simples que os para redes com realimentação. Salienta-se também que as diferenças entre o modelo obtido e o sensor real ocorreram em regiões de grandes transitórios. Em regiões sem grandes variações abruptas (regimes de aceleração mais constantes), o modelo forneceu melhores resultados.

#### 4 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O modelo proposto mostrou-se promissor quanto ao uso de um sensor lambda virtual, permitindo redução de custos de produção e melhoria na obtenção da relação  $\lambda$ , visto que na prática são utilizados sensores de banda estreita tipo *on-off* (mistura rica/pobre) menos precisos que os de banda larga.

Quanto a trabalhos futuros, pretende-se obter mais dados para treinamento, inclusive em condições de carga variável. Para tal, uma modificação no volante do motor foi projetada e está em fabricação para permitir que o mesmo possa ser conectado a um dinamômetro que controle o torque exigido do motor. Outro passo futuro é a substituição do sensor real obtido implementado em uma plataforma microprocessada, como o Arduino (Arduino, 2017), e verificar o funcionamento da injeção com o sensor virtual.

## REFERÊNCIAS

Aguirre, Luis Antonio. (2000) Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. Ed. UFMG. 554 p. Belo Horizonte, MG.

Amato, Paolo & Cesario, Nicola & di meglio, Maurizio & Pirozzi, Francesco. (2005). *Realization of a Virtual Lambda Sensor on a Fixed Precision System*. 192-197.

ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

Duda, R.; Hart, E.; Stork, D. (2012) *Pattern Classification*. 2a edição. John Wiley & Sons.

ECOTRONS. Disponível em: <[www.ecotrons.com](http://www.ecotrons.com)>. Acesso em: fevereiro de 2017.

HONDA ENGINES. Disponível em: <<http://engines.honda.com/models/model-detail/gx35>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

Haykin, Simon. (1999) *Neural networks: a comprehensive foundation*. 2a edição. New Jersey: Prentice Hall.

Lampinen, J. ; Vehtari, A. (2001) Bayesian Approach for *Neural Networks* – Review and Case Studies. *Neural Networks*, **14**, n. 3, 257-274.

Narendra, K.S ; Parthasarathy, K. (1990) Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **1**, 4-27.

Richter, T. *Arquitetura de sistema inteligente para sensoriamento virtual de oxigênio em veículos bicombustíveis com injeção eletrônica*. 2009. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009.

Salehi, R; Alasti, A; Vossoughi, G; Boroushaki, M. (2010) Nonlinear Oxygen Sensor Output Voltage Estimation in a Gasoline Engine Using NARX Model. *The journal of engine research*, **22**. 13-20.

Turkson, R. (2016) Artificial neural network applications in the calibration of spark-ignition. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **19**, 1346-1359.

Young, R. *Utilization of a Neural Network to Improve Fuel Maps of an Air-Cooled Internal Combustion Engine*, 2010. 75p. Dissertação de mestrado - Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, 2010.

## INVESTIGAÇÃO DOS MÉTODOS NORMATIVOS PARA O CÁLCULO E ESTIMAÇÃO DA TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Data de aceite: 01/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

### **Daniel Carrijo Polonio Araujo**

Treetech

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/1537435469399482>

### **Gabriel De Souza Pereira Gomes**

Treetech

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/8939339011412533>

### **Mateus Batista De Moraes**

Treetech

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/7679523540529839>

### **Rafael Prux Fehlberg**

Treetech

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/8374623802071665>

**RESUMO:** Nos dias atuais, uma boa parte dos transformadores possui monitoramento de temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento. O monitoramento dessas temperaturas torna possível a aplicação de sobrecargas nos transformadores sem ocasionar defeitos, falhas e suas nefastas consequências, por meio dos dados do sistema

de monitoramento.

Uma notável aplicação é o cálculo e análise on-line da eficiência do sistema de resfriamento de um transformador de potência comparando-se a temperatura do topo do óleo medida diretamente com a calculada. Para que essas análises sejam válidas, o cálculo da temperatura do topo do óleo deve ser preciso e exato. Para realização desses cálculos, existem métodos normativos. Aqueles apresentados pela comunidade nacional são, em geral, os mesmos da comunidade internacional, e nem sempre refletem a realidade climática e de perfil de carregamento do Brasil, onde a temperatura ambiente pode variar mais de 20 °C em apenas um dia e o carregamento de 20 a 110 %. Assim sendo, é de suma importância que a temperatura ambiente utilizada nos cálculos seja sempre medida e não um apenas um parâmetro de entrada fixa, evitando assim erros que venham a comprometer este caro e importante ativo.

Como nos métodos vigentes e normativos são indicadas duas abordagens de análise - uma através de equações exponenciais e outra através de equações diferenciais - este artigo mostra o resultado de ambas quando aplicadas nos mais diversos contextos do Brasil, desde as baixas temperaturas da região sul às temperaturas mais altas da região nordeste,

além de situações de alto e baixo carregamento. Também é proposta de uma nova abordagem em desenvolvimento, que possa corresponder a nossa realidade e servir de ferramenta útil para os operadores de sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Temperatura do Topo do Óleo; Imagem Térmica; IEC 60076-7; Eficiência do Resfriamento; Carregamento de Transformadores de Potência;

**ABSTRACT:** Nowadays, there are many transformers with top oil and hot-spot winding temperature monitoring. The monitoring of these temperatures makes it possible to apply overloads to the transformers without causing failures and their serious consequences, through the data of the monitoring system.

A notable application is the online calculation and analysis of the power transformer cooling system efficiency by comparing the measured top oil temperature directly with the calculated top oil temperature. For these analyses to be valid, the calculation of the oil top temperature must be precise and accurate. In order to perform these calculations, there are normative methods. Those presented by the national community are, in general, the same as those presented by the international community. These normative methods do not always reflect the climate and loading profile of Brazil where the ambient temperature can vary more than 20 °C in just one day whilst the loading can vary from 20 to 110 %. Therefore, the ambient temperature used in the calculations must be always measured and not just a fixed input parameter, thus avoiding errors that may compromise this expensive and important asset.

In the current normative methods, two analytical approaches are indicated - one using exponential equations and the other using differential equations. This article shows the result of both when applied in the most diverse contexts in Brazil, from the lowest temperatures in the south to the highest temperatures in the northeast region, in addition to high and low loading situations. It is also proposed a new developing approach, which can correspond to Brazilian reality and suit as a useful tool for system operators.

**KEYWORDS:** Top Oil Temperature; Thermal Image; IEC 60076-7; Cooling Efficiency; Power Transformer Loading.

## 1 | INTRODUÇÃO

No cenário do sistema elétrico brasileiro é cada vez mais essencial que os transformadores que o compõem sejam bem manuseados operacionalmente, uma vez que cada falha operacional em um transformador gera prejuízos exorbitantes tanto do ponto de vista do sistema, pela indisponibilidade do ativo, possivelmente sobrecarregando outros ativos e podendo levar a outras falhas consecutivas ou degradação (PREVOST, 2006, p.28-35) acelerada desses, quanto do ponto de vista econômico, pela multa cobrada pelo órgão regulador brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Visando reduzir esses riscos, a ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016, p.1-6) estipula procedimentos e diretrizes obrigatórias para a colocação

de ativos em operação, como a instalação de relés de proteção, para segurança ante a faltas no sistema ou no ativo, e de sistemas de monitoramento contínuo por meio do uso de sensores como o termômetro digital ou analógico. A utilização desses sensores, quando construídos baseados nas normas brasileiras e mundiais, se adequa aos mesmos critérios balizadores da construção do próprio ativo, permitindo que este seja utilizado em seu máximo potencial sem danos ou prejuízos de curto ou longo prazo.

Dentre os diversos fatores que se podem monitorar de um transformador, a temperatura é tida como uma das mais importantes, sendo o fator preponderante para a determinação da vida útil restante de um transformador. Geralmente, a temperatura do topo do óleo é medida utilizando um sensor de temperatura (composto por um transdutor e um sistema de condicionamento) e então a partir do cálculo de imagem térmica estima-se a temperatura do ponto mais quente do enrolamento.

Uma notável aplicação é o cálculo e análise on-line da eficiência do sistema de resfriamento de um transformador de potência comparando-se a temperatura do topo do óleo medida diretamente com a calculada. Ademais, em alguns casos especiais a temperatura do topo do óleo é calculada e não medida diretamente. O motivo geralmente advém de alguma dificuldade ou mesmo impedimento mecânico para a instalação do transdutor de temperatura.

É nesse âmbito que este artigo propõe investigar os modelos presentes nas três principais normas sobre transformadores isolados a óleo: IEEE C57.91, IEC 60076-7 e NBR 5416/NBR 5356-7, bem como trazer simulações e análises matemáticas considerando o impacto que cada variável no cálculo traz no modelamento térmico, quando comparado com a realidade, e trazer a comparação entre cada método das normas.

## **2 | O CONTEXTO DE APLICAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DA TEMPERATURA DE TOPO DO ÓLEO**

Atualmente, transformadores de potência necessitam de um monitoramento contínuo de certas variáveis que indicam o seu estado operacional, como temperatura do óleo, temperatura do enrolamento, isolação das buchas, gases e umidade no óleo e funcionamento de ventiladores e bombas. Monitorando esses e outros fatores, os responsáveis pela operação obtêm subsídios para tomar decisões operativas de desligamento ou de manutenção preventiva e preditiva, baseando-se na condição observável pelos equipamentos de monitoração. Além disso, o transformador conta com sistemas de proteção no caso de falhas internas, para impedir o dano dos equipamentos adjacentes e o agravamento da falha do próprio ativo.

A monitoração da temperatura do enrolamento de um transformador é mais custosa se for realizada diretamente por meio de fibra ótica, uma vez que as fibras de medição

são inseridas na construção do ativo e são muito mais difíceis de serem mantidas, especialmente na ocorrência de danos na parte interna dessas fibras. Por isso, a solução mais utilizada para o monitoramento da temperatura do enrolamento é o cálculo feito pelo método da imagem térmica. Esse método baseia-se em ensaios de fábrica que determinam os parâmetros térmicos do transformador e, assim, tendo os valores de temperatura ambiente e do óleo, multiplicado por um fator que considera que o enrolamento possui pontos de maior aquecimento, é possível calcular a temperatura do enrolamento. A Figura 01 ilustra o modelo térmico mais básico utilizado para o cálculo das temperaturas do transformador.

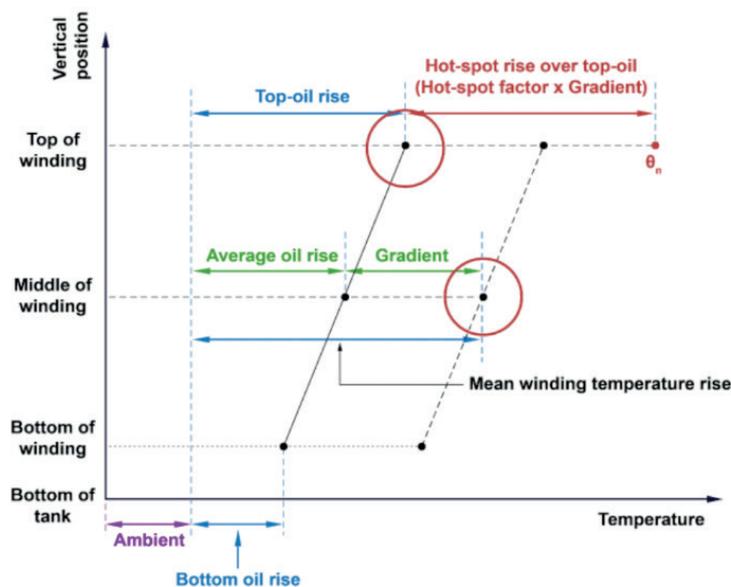


Figura 01: Diagrama básico do modelamento térmico do transformador (IEC 60076-7:2018)

O modelamento acima é realizado considerando a carga máxima em regime permanente, que são os valores utilizados no ensaio para determinação do gradiente óleo-ambiente, gradiente enrolamento-óleo entre outros valores construtivos do transformador. Entretanto, de modo geral, as cargas de um transformador variam ao longo do dia, assim como a temperatura ambiente, onde numa janela de 24 horas, podem haver variações maiores que 20 °C, dependendo da região do Brasil. Somado ao fato de que, fisicamente, o transformador é um corpo maciço que possui uma constante de tempo térmica (inércia), ou seja, os efeitos de propagação do calor no transformador são retardados, faz-se necessário lançar mão de um modelamento térmico temporal, que possa descrever o comportamento do transformador em tempo real levando em conta as variações do ambiente e da carga. As normas propõem um modelamento bem similar para os cálculos do transformador, como pode-se ver nas respectivas equações para o cálculo de temperatura do óleo a partir da temperatura ambiente medida (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2018, p.1-94), (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.1-92),

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p.1-78), em cada uma delas.

O modelamento matemático das normas apresenta a elevação de temperatura do topo do óleo como sendo uma função da carga no transformador e outros parâmetros de ensaio, como perdas, tipo de resfriamento e o gradiente óleo-ambiente nominal para carga nominal. Com um modelamento bem apurado e com constantes determinadas corretamente, as temperaturas calculadas do transformador irão se assemelhar muito às temperaturas reais do ativo. Nesse sentido, considerando o modelamento das normas e comparando a temperatura do óleo medida com a temperatura do óleo calculada, é possível inferir se o sistema de resfriamento do ativo, composto pelos radiadores, ventiladores e bombas estão operando corretamente, uma vez que a temperatura calculada depende apenas da carga e temperatura ambiente, medida diretamente. Por exemplo, considerando uma carga constante, ao fechar-se um registro do radiador, o que se espera é que a temperatura do óleo medida comece a aumentar, enquanto a calculada permanece constante.

Considerando então a temperatura do óleo como objeto do monitoramento no ponto de vista do resfriamento, para que o cálculo e a comparação de temperaturas funcionem corretamente, é necessário que a temperatura do óleo seja medida por um transdutor de temperatura, como o RTD (*Resistance Temperature Detector*). Dentre os RTDs existentes, destacam-se o Pt100 (feito de platina, com uma resistência de 100 ohms a 0 °C), o mais comum em aplicações de potência é o Pt100.

## 2.1 O detalhe: A temperatura ambiente

Outro ponto a ser observado é a temperatura ambiente. Uma vez que a temperatura do óleo é obtida a partir da temperatura ambiente, somando-se a ela o gradiente óleo-ambiente para uma determinada carga, é imprescindível que esse valor de temperatura ambiente seja também medido, para não ocorrer uma sobrestimação ou subestimação da temperatura do óleo, dado que o gradiente já é uma parcela da equação que é calculada. Apesar de existir a possibilidade de se considerar a temperatura ambiente fixa para o cálculo, a norma IEEE C57.91 apresenta a estimativa da temperatura ambiente considerando dados meteorológicos anuais para uma melhor estimativa da temperatura ambiente em um determinado mês ou período do ano, mas encoraja esse uso apenas para previsões de carregamentos relativas ao planejamento seguro da operação do transformador, e não para a monitoração on-line (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011, p.1-112). Considerar a temperatura ambiente fixa para o cálculo dificilmente aplicar-se-ia no contexto do Brasil, uma vez que as variações diárias em cada estação do ano e em cada região do país podem ser bem distintas.

Ainda sobre a temperatura ambiente, vale apontar que, para um cálculo realmente

expressivo da temperatura do topo do óleo do transformador, a medição de temperatura do ambiente deve ser em um ponto mais próximo ao transformador, para que seja considerado o lugar em que o transformador está da maneira mais fiel possível à realidade. Entretanto, mesmo assim, o cálculo da temperatura do topo do óleo deve ser utilizado apenas para diagnosticar possíveis defeitos no sistema de resfriamento do transformador. Para o cálculo da imagem térmica do enrolamento, a temperatura do topo do óleo deve ser medida, minimizando os erros de cálculo que serão discutidos posteriormente.

### 3 | DOS EQUACIONAMENTOS POSSÍVEIS PARA O CÁLCULO DA TEMPERATURA DE TOPO DO ÓLEO: EXPONENCIAL E DIFERENCIAL

As normas mais antigas, como a NBR-5416 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p.1-92), IEEE C57.91 de 1995 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1995, p.1-112) e IEC 60076-7 de 2005 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005, p.1-94), tratam o equacionamento de temperatura de forma exponencial, em que qualquer variação no gradiente óleo-ambiente ou na temperatura ambiente é refletida no topo do óleo por meio de uma curva exponencial que leva em conta a constante térmica do transformador. A Figura 02 exemplifica esse fenômeno.

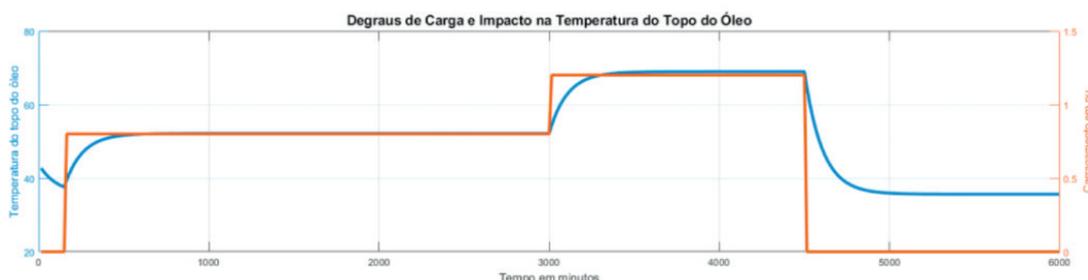


Figura 02: Um degrau na carga e o respectivo impacto na temperatura do topo do óleo

Aplicando a um transformador real, temos a seguinte resposta, mostrada na Figura 03.

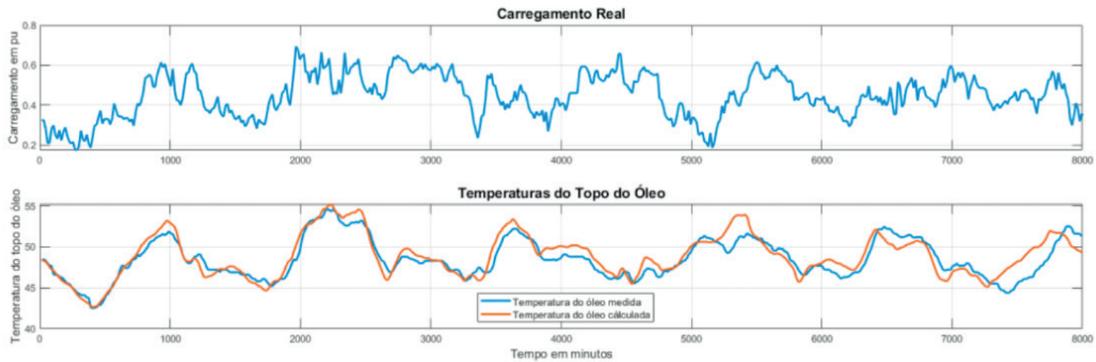


Figura 03: Carregamento real de um transformador e o respectivo impacto na temperatura do topo do óleo

Recentemente, a norma NBR 5356-7 de 2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p.1-72) trouxe uma abordagem já mencionada na IEC 60076-2005 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2005, p.1-94) para o cálculo temporal da temperatura do óleo e do enrolamento por meio de equações de diferenças, que é um método numérico para calcular a resposta de equações diferenciais, enquanto a nova IEEE C57.91 de 2011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2011, p.1-112) manteve seu método exponencial. Essas equações diferenciais, quando resolvidas analiticamente, recaem no método das equações exponenciais. Aplicando-se o método das equações de diferenças, comparando com o método exponencial, tem-se o seguinte resultado, mostrado na Figura 04.

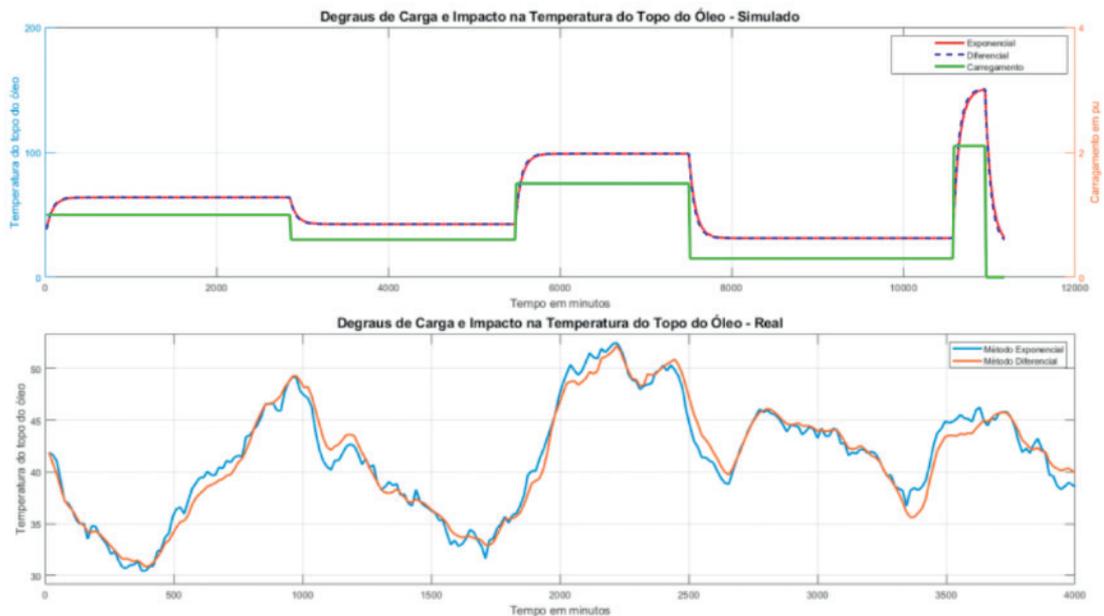


Figura 04: Comparação entre o método exponencial e diferencial para diferentes perfis de carregamento

Como é possível observar, o método das equações de diferenças apresenta um cálculo um pouco mais filtrado. Isso se dá devido a melhor dinâmica (provida pela

derivada) da equação de diferenças em relação ao método das exponenciais, como pode ser percebido no diagrama de controle mostrado a seguir, na Figura 05.

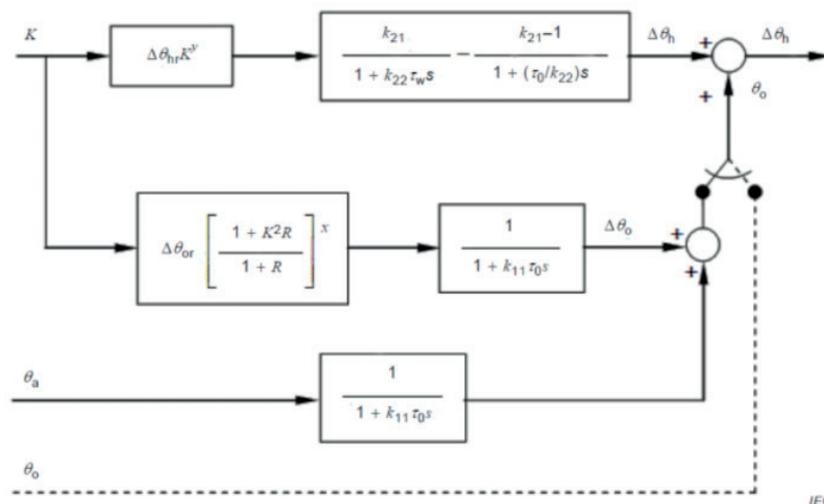


Figura 05: Fluxograma das equações da IEC 60076-7:2018, mostrando as duas origens possíveis para a temperatura do topo do óleo, medida ou calculada

Como se pode ver na Figura 05, os blocos têm um modelamento semelhante a um filtro de primeira ordem. Esse efeito de filtragem representa a resposta inercial do óleo a variações rápidas de carga. Também é possível notar a chave de seleção do diagrama, que indica a possibilidade de realizar o cálculo da temperatura do enrolamento a partir da temperatura do óleo oriunda do cálculo, considerando-se para tal a temperatura ambiente, ou por medição direta, por meio do transdutor de temperatura. Note que, na opção pelo cálculo a partir da temperatura ambiente, se esta não for medida, mas estimada ou fixa, o modelo dificilmente irá refletir as condições reais de óleo e enrolamento, um sério limitante para efeitos de operação em tempo real.

#### 4 | VALIDAÇÃO DOS MODELOS: A APLICAÇÃO EM TRÊS CASOS REAIS

Para validar esses modelos, foram utilizados dados de três transformadores no período de uma semana. Esses dados, são de transformadores em condições normais de operação, com o sistema de resfriamento funcionando perfeitamente. Com a temperatura do óleo medida, o carregamento e a temperatura ambiente de cada transformador, foi possível estudar o comportamento de cada método da norma e comparar com a temperatura do óleo medida. Para isso, também foram levantados os resultados do ensaio de temperatura destes transformadores, a fim de que fosse possível o correto funcionamento dos modelos. A Tabela 01 apresenta estes dados de ensaio.

	T1	T2	T3
Potência (MVA)	100	25	250
Perdas CC (kW)	320	216	610
Perdas em vazio (kW)	45	17	65
Refrigeração	ONAF	ONAF	ONAF
GOA (do último estágio de resfriamento)	30	35,1	36,7

Tabela 01: Dados dos transformadores (T1, T2, T3) analisados

Abaixo, na Figura 06, temos os resultados das simulações dos modelos exponencial e diferencial para cada um dos transformadores. A Tabela 02, a seguir, mostra a distribuição das diferenças entre as temperaturas medida e calculada para cada simulação.

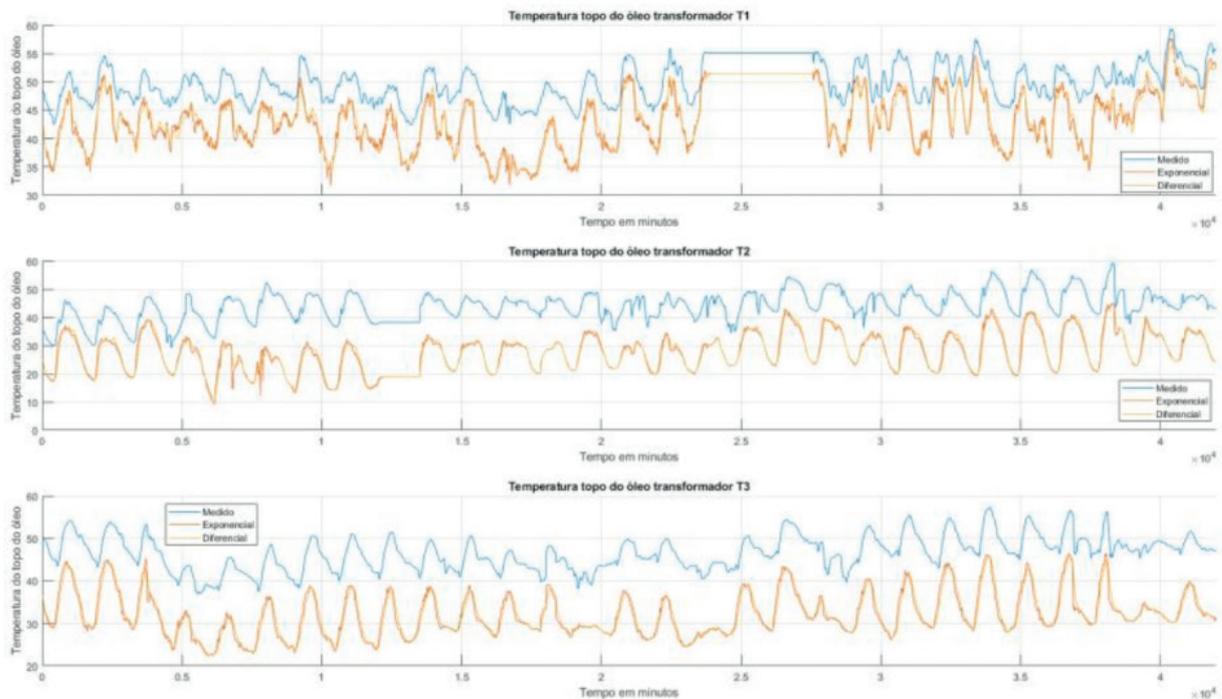


Figura 06: Resultados do modelo diferencial e exponencial para cada transformador estudado

T1	Exponenci al	Diferenci al	T2	Exponenci al	Diferenci al	T3	Exponenci al	Diferenci al
Máxim o	15,3	13	Máxim o	34,26	26,26	Máxim o	21,33	19,32
Mínim o	0,30	1,75	Mínim o	3,33	3,88	Mínim o	5,31	7,36
Média	6,27	6,26	Média	16,33	16,33	Média	14,35	14,35
Desvio Padrã o	2,40	2,22	Desvio Padrã o	4,05	3,94	Desvio Padrã o	3,18	2,60

Tabela 02: Resultados analíticos condensados para cada transformador estudado

Observando os gráficos, nota-se que para cargas baixas (abaixo de 40 %), existe uma diferença de temperatura aproximadamente constante, como um offset em torno de 10 °C, utilizando-se puramente o modelo proposto nas normas. Isso pode ocorrer devido a alguns fatores não considerados, como correntes de ar, chuvas, imprecisões nos ensaios entre outros. Estes fatores, além de alterarem a temperatura ambiente, alteram a quantidade de calor trocada pelo tanque e o ambiente. Na tabela 03, retirada da própria norma, é possível observar uma diferença de 11,5 °C com 0,3 de fator de carga (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2018, p.1-94).

Tempo (min)/Fator de carga	Temperatura do topo do óleo (°C)		Temperatura do ponto mais quente do enrolamento (°C)	
	Calculado	Medido	Calculado	Medido
190/1,0	61,8	58,8	83,8	82,2
365/0,6	44,4	47,8	54,9	58,6
500/1,5	89,7	80,8	127,5	119,2
710/0,3	35,3	46,8	39,5	49,8
735/2,1	67,0	65,8	138,2	140,7
750/0,0	59,5	68,2	59,5	82,4

Tabela 03: Erro de cálculo estimado pela norma IEC 60076-7:2018

Outra maneira possível para o cálculo da temperatura de topo do óleo, é através da estimação de parâmetros em condições saudáveis do transformador, utilizando métodos como o gradiente descendente estocástico. Porém, isso implica que no momento da estimação dos parâmetros, o transformador deve estar em condições operacionais perfeitas, sem nenhum tipo de deficiência em seu resfriamento ou condições anormais

em seu ambiente, a fim de minimizar os erros durante o período posterior de cálculo da temperatura do topo do óleo.

A Figura 07 considera um período de uma semana para estimar os parâmetros do transformador e depois aplica os parâmetros encontrados no restante dos dados. Observe o comportamento do erro.

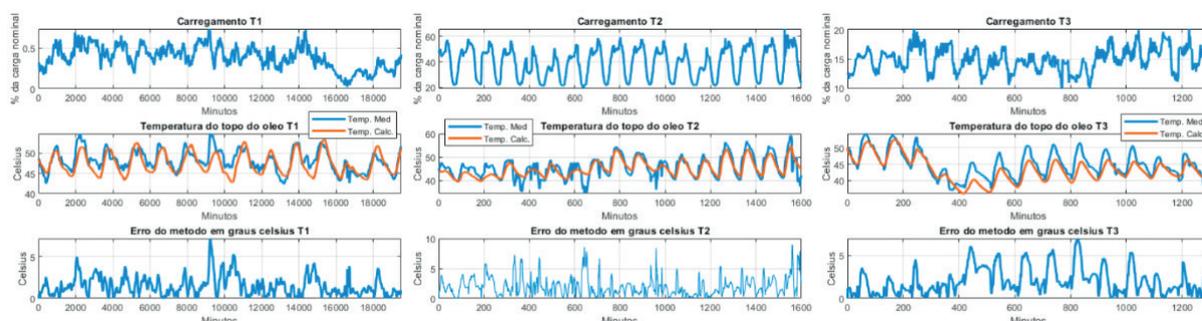


Figura 07: Resultados do método de estimação de parâmetros

## 5 | O IMPACTO DA VISCOSIDADE NA ACURÁCIA DO MODELO

Uma explicação plausível para o efeito de baixas cargas pode ser encontrada em (ROSLAN, 2017, p. 1843), onde a viscosidade do óleo varia de acordo com a temperatura. Como a viscosidade do óleo influencia na convecção deste dentro do transformador, a troca de calor com o tanque e posteriormente com o ambiente é afetada, ocorrendo com maior ou menor velocidade. Isso, em termos de modelo, impacta diretamente nos parâmetros térmicos do transformador.

Considerando-se o efeito convectivo, em baixas temperaturas, o óleo encontra-se mais viscoso, e sua “mobilidade” dentro do tanque do transformador é menor, trocando menos calor com o ambiente ao passar pelos radiadores. Já em temperaturas mais altas, a viscosidade diminui, fluindo mais facilmente pelo tanque e, conseqüentemente, trocando mais calor com o ambiente. Modelando esse efeito, é possível realizar alterações nas equações propostas nas normas e obter um cálculo mais apurado. A Figura 08 compara os resultados obtidos pelo modelo diretamente retirado da norma e pelo modelo considerando a viscosidade do óleo.

Pela Figura 09, é possível perceber, para esses dados analisados, a melhora significativa no método, com a diminuição significativa do erro das estimativas. Isso embasa o fato da influência da viscosidade no modelamento térmico dos transformadores, principalmente para perfis de carregamentos e temperatura ambiente do Brasil, que podem possuir variações grandes ao longo de um dia.

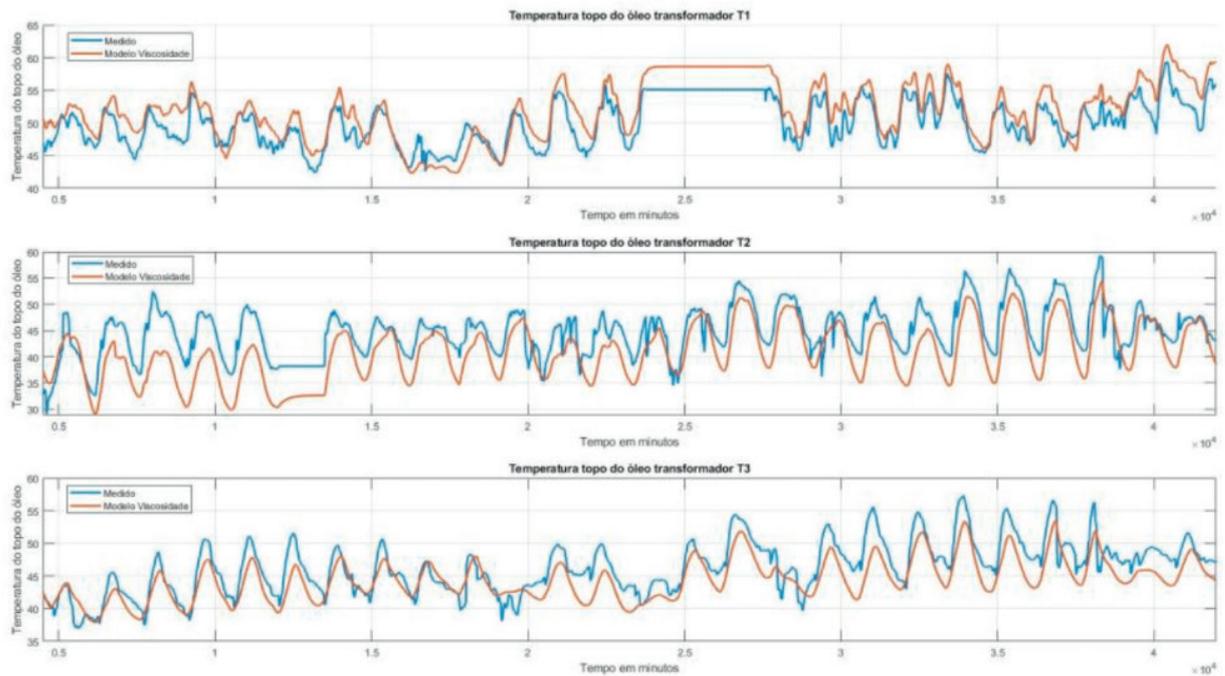


Figura 08: Resultados do modelo diferencial considerando-se os efeitos da variação da viscosidade do óleo com a temperatura, para os três transformadores estudados

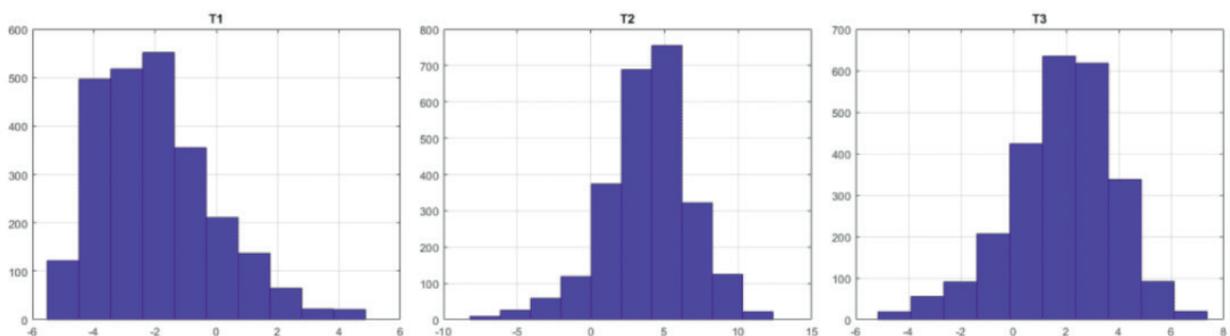


Figura 09: Erro médio do modelo diferencial considerando-se os efeitos da variação da viscosidade do óleo com a temperatura, para os três transformadores estudados

## 6 | CONCLUSÃO

Neste artigo foram discutidos os métodos hoje existentes para cálculo da temperatura do topo do óleo, evidenciando as questões mais relevantes para o cenário brasileiro, como grande variação de temperatura ambiente e carregamento ao longo de um dia. Devido a essa variação, conclui-se que o melhor a ser feito para o cálculo da temperatura do enrolamento é iniciar o cálculo com a temperatura do óleo medida, pois a temperatura do óleo calculada pode contar com um erro inerente ao próprio cálculo proposto pela norma, por não levar em consideração fatores que fogem do controle do modelo matemático.

Também pode-se concluir que a temperatura ambiente, deve ser medida e, de preferência, o mais próximo do ativo monitorado, para melhor representar as condições do ambiente em que ele está. Estimar a temperatura ambiente em um valor fixo gera um cálculo pouco representativo, especialmente no cenário do Brasil.

Por fim, foram exibidas as limitações no cálculo hoje existente modelado pelas normas atuais. As normas exibem no texto normativo diferenças de até 10 °C para carregamentos baixos, diferença essa que foi observada maior nos transformadores utilizados para as simulações. Com isso, foram apresentadas possíveis soluções para melhor descrever os cálculos térmicos de um transformador, dentre os quais está um método que considera a viscosidade do óleo, fator este que influencia grandemente no modelamento térmico do transformador. Pelos resultados obtidos, foi detectado que o erro diminuiu consideravelmente. Todas essas melhorias devem ser observadas, especialmente na aplicabilidade das normas para transformadores no Brasil, a fim de se obter um melhor monitoramento do ativo e a efetiva proteção e melhor estimativa e controle de sua vida útil.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa ANEEL n. 729. Brasília, p. 1-6, 2016.
- PREVOST, Thomas A.; OOMMEN, T. V. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I-history and development. IEEE electrical insulation magazine, v. 22, n. 1, p. 28-35, 2006.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C57.91 IEEE guide for loading mineral-oilimmersed transformers. New York, p. 1-112, 1995.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-7: Power transformer-Part7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Geneva, p. 1-94. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5416: Aplicação de cargas em transformadores de potência - Procedimento. Rio de Janeiro, p. 1-92. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-7: Transformadores de potência Parte 7: Guia de carregamento para transformadores imersos em líquido isolante. Rio de Janeiro, p. 1-78. 2017.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C57.91 IEEE guide for loading mineral-oilimmersed transformers. New York, p. 1-112, 2011.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-7: Power transformer-Part7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Geneva, p. 1-94. 2005.
- ROSLAN, Muhammad Hakirin et al. A simplified top-oil temperature model for transformers based on the pathway of energy transfer concept and the thermal-electrical analogy. Energies, v. 10, n. 11, p. 1843, 2017.

## MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM A UTILIZAÇÃO DE MANTA TÉRMICA: ESTUDO DE CASO DE UMA INJETORA DE PEÇAS PLÁSTICAS

*Data de aceite: 01/06/2020*

**Ivo Carlos Guarato Júnior**

Universidade de Uberaba

Uberaba – Minas Gerais

**Lúcio Rogério Júnior**

Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Elétrica

Uberaba – Minas Gerais

**Antônio Manoel Batista da Silva**

Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Elétrica

Uberaba – Minas Gerais

**Guilherme Henrique Alves**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica

Uberlândia – Minas Gerais

**RESUMO:** Este projeto consiste em um estudo sobre a eficiência energética em um setor de injeção de peças plásticas, onde foi proposto e implementado um sistema de proteção térmica capaz de reduzir as perdas de calor no aquecimento do canhão de injeção, além de propor uma melhor proteção ao operador, que fica exposto à radiação térmica quando próximo da máquina injetora. O sistema de proteção térmica consiste em uma manta térmica de fibra de vidro, que envolve todo o corpo do

canhão de injeção, oferecendo uniformidade no aquecimento. Após sua instalação, foram realizados dois testes, onde no primeiro teste foi feita uma comparação da radiação térmica emitida com e sem a aplicação da manta, a uma distância de aproximadamente um metro, onde fica o operador da máquina injetora, durante a produção. O Segundo teste faz uma análise da economia de energia elétrica teórica e real obtido com esse sistema durante 6 horas de trabalho e, por fim foi feita uma média do consumo mensal, para analisar a vantagem da implementação do sistema e o tempo de retorno do investimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, Máquina Injetora, Proteção Térmica, Manta Térmica.

### IMPROVING ENERGY EFFICIENCY WITH THE USE OF THERMAL BLANKET: CASE STUDY OF A PLASTIC PARTS INJECTOR

**ABSTRACT:** This project consists of a study on energy efficiency in a plastic parts injection sector, where a thermal protection system was proposed and implemented capable of reducing calorie losses in the heating of the injection gun, in addition to proposing better protection to the operator, who is exposed to thermal radiation

when close to the injection machine. The thermal protection system consists of a fiberglass thermal blanket, which surrounds the entire body of the injection gun, offering uniform heating. After its installation, two tests were carried out, where in the first test a comparison of the thermal radiation emitted with and without the application of the blanket was made, at a distance of approximately one meter, where the operator of the injection machine is, during production. The second test makes an analysis of the theoretical and real electricity savings obtained with this system during six hours of work and, finally, an average of the monthly consumption was made, to analyze the advantage of the system implementation and the return on investment.

**KEYWORDS:** Thermal Radiation, Injection Machine, Thermal Protection, Thermal Blanket.

## 1 | INTRODUÇÃO

Com o crescente consumo de energia elétrica nas indústrias, se torna importante aumentar a eficiência energética dos processos de produção. Dessa forma, um aumento da eficiência energética de máquinas e equipamentos industriais, se torna importante na perspectiva de sustentabilidade das atividades industriais, e conseqüentemente, refletindo no maior desenvolvimento do país (CAPELLI, 2013).

De acordo com Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2019), a globalização resultou no modo de integração mundial e acarretando no aumento da competição entre as empresas, refletindo na busca por uma maior produtividade de forma pontual, sendo fundamental, que esforços na pesquisa e desenvolvimento sejam realizados no intuito de se usar os recursos disponíveis (matéria prima, mão de obra, energia e capital), de forma racional, a fim de se atingir elevados níveis de produção com a maior produtividade, melhorando a eficiência dos processos.

De acordo com Santos (2013), as fontes de energia se tornaram cada vez mais essenciais, pois elas são imprescindíveis em todos os lugares como: setores industriais, residências, agricultura e até nos meios de transporte. Considerando dessa forma, a geração de energia pode ser classificada em fontes primárias e secundárias para cada setor da economia.

As fontes de energia primária são extraídas de recursos naturais, podendo ser de duas formas básicas, as renováveis (a energia hidráulica dos rios ou marés, solares e eólicas) e não renováveis (o petróleo, gás natural, combustíveis radioativos e carvão mineral). Já as fontes de energia secundárias são obtidas através de um processamento de conversão, que resulta na transformação de um ou mais tipos de energias primárias como: Calor, movimento e a elétrica (SANTOS, 2013).

Dentre essas fontes de energias citadas, destaca-se a energia elétrica, pela sua facilidade e eficiência no processo de transmissão a longas distâncias através de linhas condutoras, e a sua indispensável importância nos processos industriais em geral.

Sua utilização influencia diretamente no custo do processo e no valor final do produto (CAPELLI, 2013).

Como a eficiência energética é uma ferramenta aplicada na redução das perdas de energia ao longo do processo produtivo, a sua utilização ocasiona a redução dos custos, portanto seu emprego no setor industrial implicará em ganhos, refletindo numa maior produtividade e em lucros maiores (FILIPPO FILHO, 2018).

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019), pelo menos 37,7 % da energia elétrica do Brasil é utilizada por indústrias. Incluindo a indústria de plástico que também está entre as que mais utilizam esse recurso energético nos processos de produção.

Diversos estudos já foram realizados com objetivo de aumentar a eficiência energéticas de máquinas e equipamentos, como é o caso de Ferreira (2016) que realizou um estudo de caso de duas máquinas de injeção de plástico com a intenção de reduzir o consumo energia. Por meio da instalação de mantas térmicas no sistema de aquecimento do cilindro de injeção, foi verificada a diminuição de aproximadamente 45% da potência térmica dissipada para o ambiente.

A utilização de mantas térmicas isolantes, pode ser uma ótima solução para isolação de partes quentes de máquinas injetoras. A manta térmica é um material de fácil instalação, pois se adapta ao formato de partes aquecidas do processo, impedindo que calores provenientes de um meio passe para outro meio que se deseja isolar. Isso pode ser feito com aplicação de um material de baixa condutividade térmica que diminua sensivelmente a propagação do calor (CUNHA e NEUMANN, 1979).

Em consonância com essas premissas, o objetivo desse projeto é analisar as vantagens da implementação de um sistema de proteção térmica em um sistema de injeção, onde este deverá proporcionar um aumento considerável na eficiência do consumo de energia, além da diminuição da radiação térmica emitida pelo sistema de aquecimento do canhão.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Para os ensaios de teste, foi utilizado uma injetora de plásticos da marca Romi, modelo PRIMAX 600R. A linha primax R é uma versão hidráulica, com bomba de vazão variável e um inversor de frequência para controle. As partes mecânicas principais da injetora são compostas por (ROMI, 2019):

- Conjunto de fechamento de molde: composto por uma placa móvel, uma placa fixa e a coluna, que são hastes que servem como guia das placas. Nesse tipo de sistema, a placa que recebe o plástico do sistema de injeção é a placa fixa, e a parte do molde e da extração fica na parte móvel. Durante a injeção, o molde se fecha e precisa estar bem travado, mantendo as duas faces do molde bem encostadas, para não ocorrer vazamento de material e não criar rebarbas na peça.

- **Conjunto de injeção:** a injeção do material é feita por uma rosca helicoidal, que gira empurrando o material até o bico de injeção. Cada ciclo de injeção pode confeccionar uma ou mais peças, o que dependerá do tipo de molde utilizado.
- **Extração:** conjunto de hastes que fazem um movimento de avanço e recuo, responsáveis pelo desprendimento da peça no molde. Após o ciclo de injeção, a peça moldada é liberada com a abertura do molde e o acionamento da extração, que faz com que a peça caia na calha de saída.

As partes elétricas principais da injetora são compostas pelos itens a seguir:

- **Bomba hidráulica:** composta por um motor que aciona uma ou mais bombas hidráulicas, responsável pela pressão e vazão de óleo, que realiza os movimentos principais da máquina como abertura e fechamento do molde, injeção de material e movimento da extração.
- **Sistema de aquecimento do canhão:** composto por resistências do tipo coleira, que envolvem todo o corpo do canhão, geralmente separados por 5 zonas de aquecimento que são aquecidas e controladas independentemente. Cada zona possui um termopar que monitora a temperatura do local. Relés de estado sólido são responsáveis pelo controle dessa temperatura, pois são eles que recebem o sinal de controle do CLP (Controlador Lógico Programável) de 24V, e enviam um sinal resultante de tensão alternada para as resistências.
- **CLP:** Responsável pela execução do programa automático da máquina injetora e do controle PID (Controlador proporcional integral derivativo), do sistema de aquecimento, trabalha de acordo com os sinais recebidos pelos micros e sensores existentes na injetora.
- **IHM:** Interface homem máquina, ela é responsável pela comunicação entre o operador e o CLP, onde o operador pode ajustar e monitorar funções como controle de temperatura e pressão hidráulica, tempo de atuação de cada ciclo, sinais de I/O (sinal de input e output), comprimento de abertura e fechamento de molde e de extração.
- **Sistema de aquecimento de molde:** composto por resistências alocadas internamente no molde, separadas por zonas de aquecimento que são controladas por placas modulares de controle PID. Essas placas são montadas em um módulo de controle que fica na parte externa da máquina, fora do molde. Sua função é manter o material no estado líquido, desde o bico do canhão de injeção até o canal de entrada na cavidade do molde. A figura 1 mostra a injetora utilizada nos testes.



Figura 1. Injetora Romi PRIMAX 600R (a) Canhão de aquecimento (b) Cabine de injeção

Na injetora Primax 600R, foi implementado um sistema de proteção térmica, utilizando mantas térmicas com isolamento de fibra de vidro, tecido de sílica, sendo fibra cerâmica com silicone e com fivelas de aperto de aço cromado. O uso da manta térmica reduz os custos com energia elétrica, prolongando a vida útil das resistências elétricas da máquina e proporcionando mais segurança para o operador da máquina (CASA DAS RESISTÊNCIAS, 2019).

As mantas foram montadas em torno de todo o canhão de aquecimento da máquina injetora, fazendo uma isolamento térmica que mantém o canhão aquecido por mais tempo, evitando que as resistências fiquem ligadas durante todo o tempo, para manter a temperatura de set point estabelecida. A manta oferece uma proteção extra para o operador da máquina, pois ela protege contra queimaduras por contato direto e diminui a temperatura de radiação.

Segundo a Casa das resistências (2019), as mantas térmicas geram uma economia de até 40% de energia elétrica e aumenta a vida útil dos aquecedores industriais em até 3 vezes. A manta suporta uma temperatura máxima de 500°C, sem alterar suas características. A figura 2 mostra a manta térmica montada no canhão da máquina injetora.

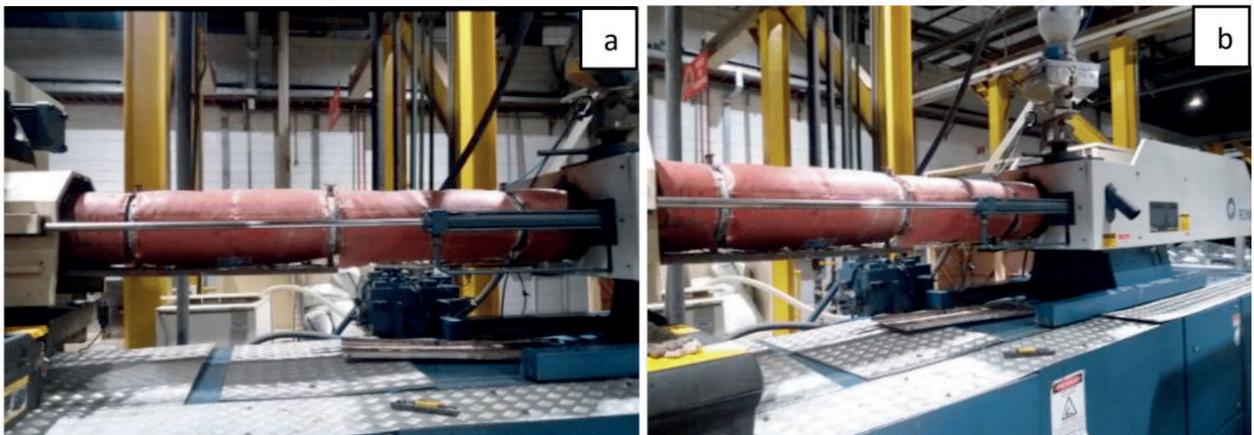


Figura 2. Manta térmica (a) Vista lateral do canhão (b) Vista em lateral em ângulo

O canhão da injetora é dividido em 5 zonas de aquecimento, em todas as zonas foi estabelecido um set point de 200°C, mantendo a mesma temperatura em todo o corpo do canhão para realização dos testes. O primeiro teste realizado compara a radiação térmica emitida pelo canhão com e sem a utilização da manta térmica, a uma distância de 1 metro, onde fica o operador da máquina durante a produção.

Para os testes de comparação de radiação térmica foi utilizado uma câmera termográfica da marca FLIR, modelo E50. Esta câmera é capaz de registrar imagens térmicas que detectam diferenças de temperaturas, atualmente a ferramenta mais utilizada em manutenções preditivas em indústrias (FLIR, 2019). A figura 3 mostra a

câmera utilizada para registrar as fotos digitais e de análise de termografia.

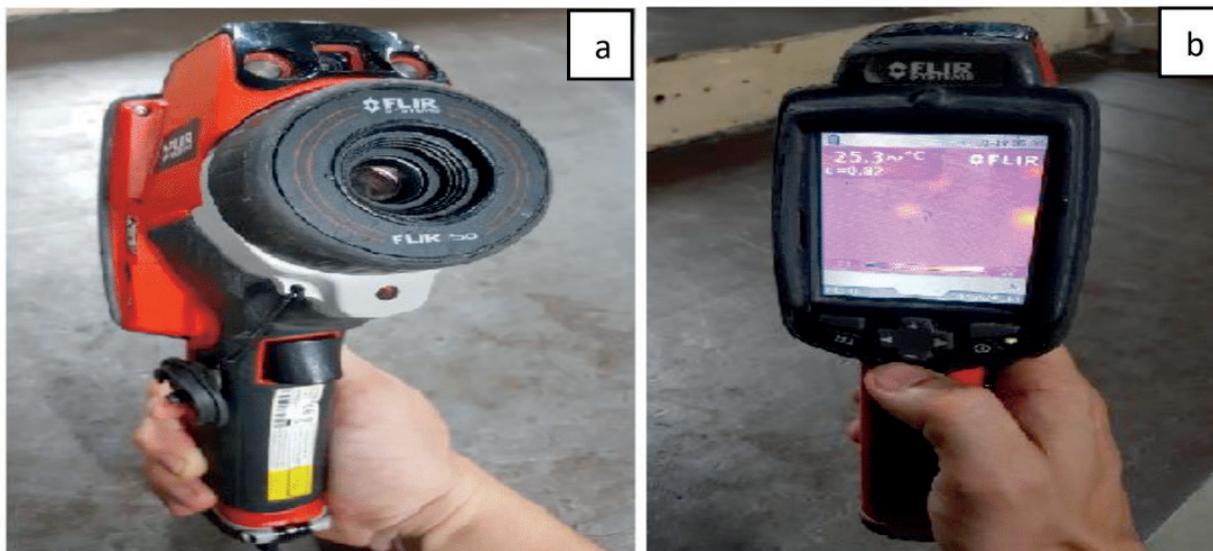


Figura 3. Câmera termográfica FLIR E50 (a) Vista da lente térmica (b) Vista do visor gráfico

O Segundo teste faz uma análise da economia de energia elétrica teórica e real obtido com esse sistema durante 5 horas e 20 minutos de trabalho. Para medir o consumo do teste foi utilizado um instrumento analisador de energia da marca Minipa, modelo ET-5061C.

O instrumento analisa os diversos parâmetros da energia elétrica em ambientes industriais, comerciais e residências, possibilita a exibição instantânea de medição de tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, além de funcionar como um osciloscópio que gera gráficos dessas variáveis medidas. Os dados das medições podem ser salvos no armazenamento de dados em sua memória interna ou através de um dispositivo de armazenamento removível (MINIPA, 2019). A Figura 4 mostra o instrumento utilizado na análise de energia.

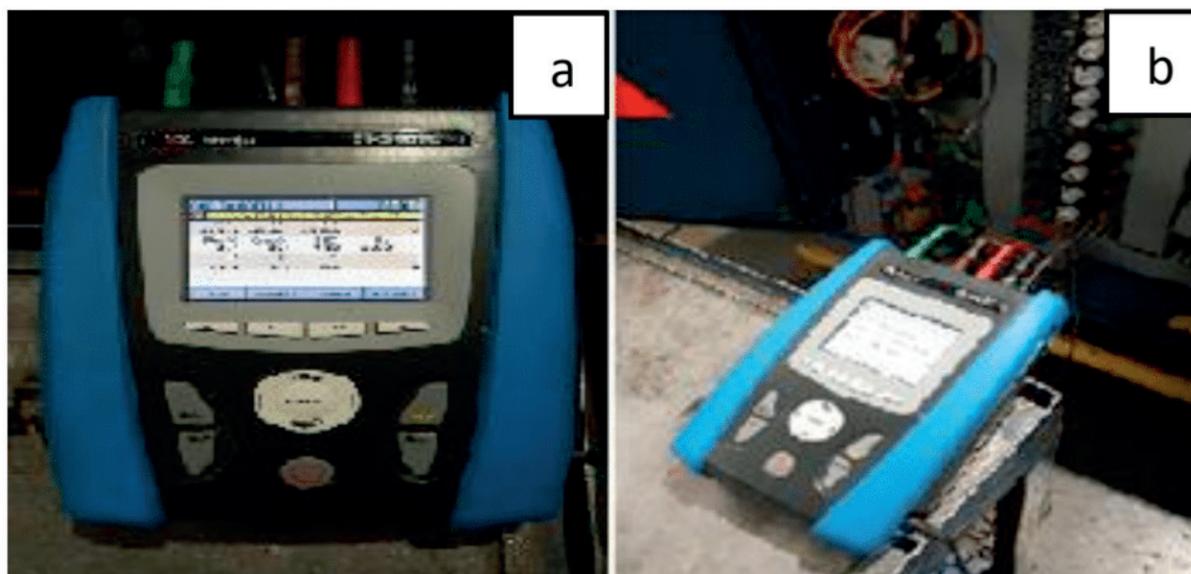


Figura 4. Analisador de energia Minipa ET-5061C (a) Vista (b) Vista

### 3 | RESULTADOS

O primeiro teste referente à análise termográfica demonstra a importância da manta térmica para proteção por contatos diretos na superfície quente do canhão de injeção e a proteção do operador exposto à radiação. O resultado foi satisfatório, pois o sistema de proteção térmica possibilitou uma redução de temperatura em torno de 50%, se comparado com a temperatura antes da implementação do sistema. As figuras 5 e 6 mostram os resultados das análises feitas pela câmera termográfica FLIR E50 no primeiro ponto de inspeção.

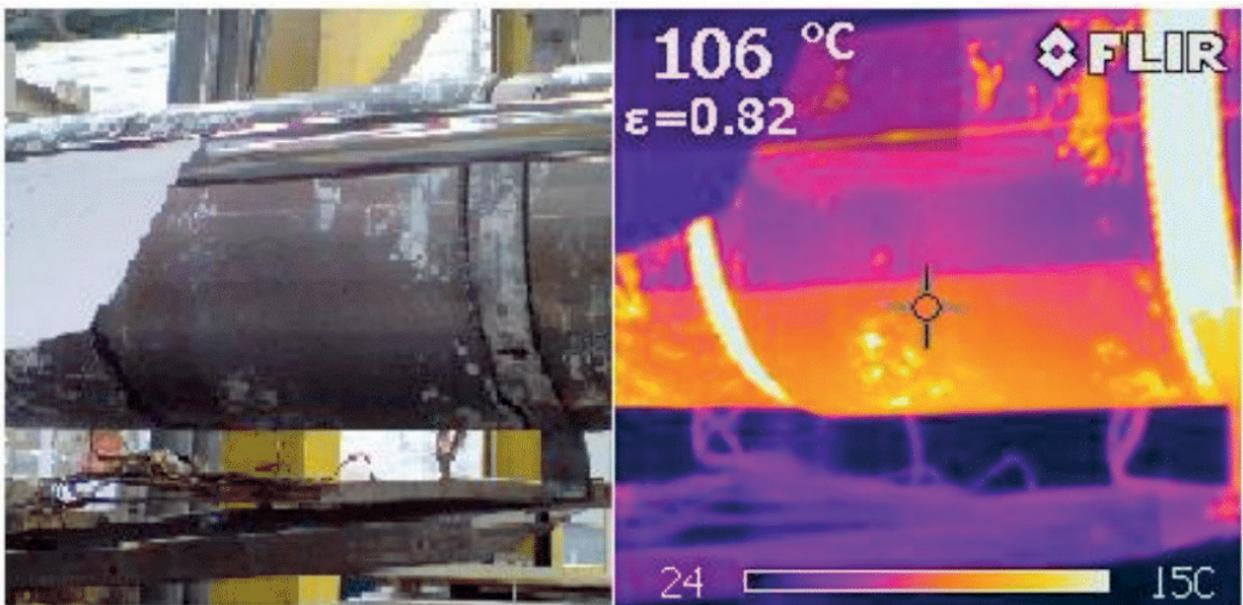


Figura 5. Análise termográfica do ponto 1 – Canhão sem o revestimento da manta térmica

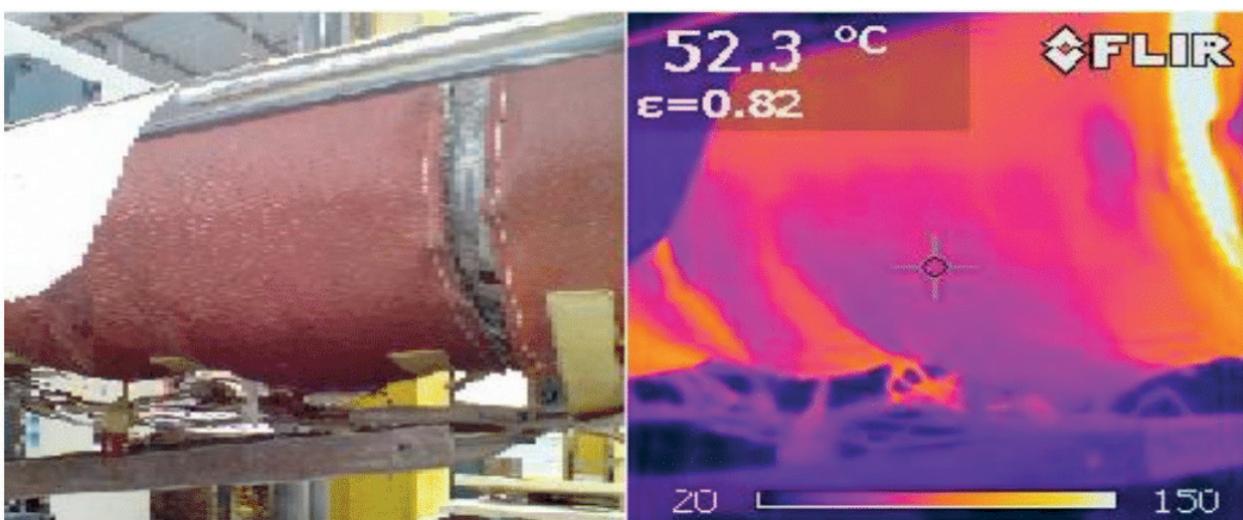


Figura 6. Análise termográfica do ponto 1 – Canhão com o revestimento da manta térmica

As figuras 7 e 8 mostram os resultados das análises feitas pela câmera termográfica FLIR E50 no segundo ponto de inspeção, com isolamento térmico e sem o uso da manta

térmica.

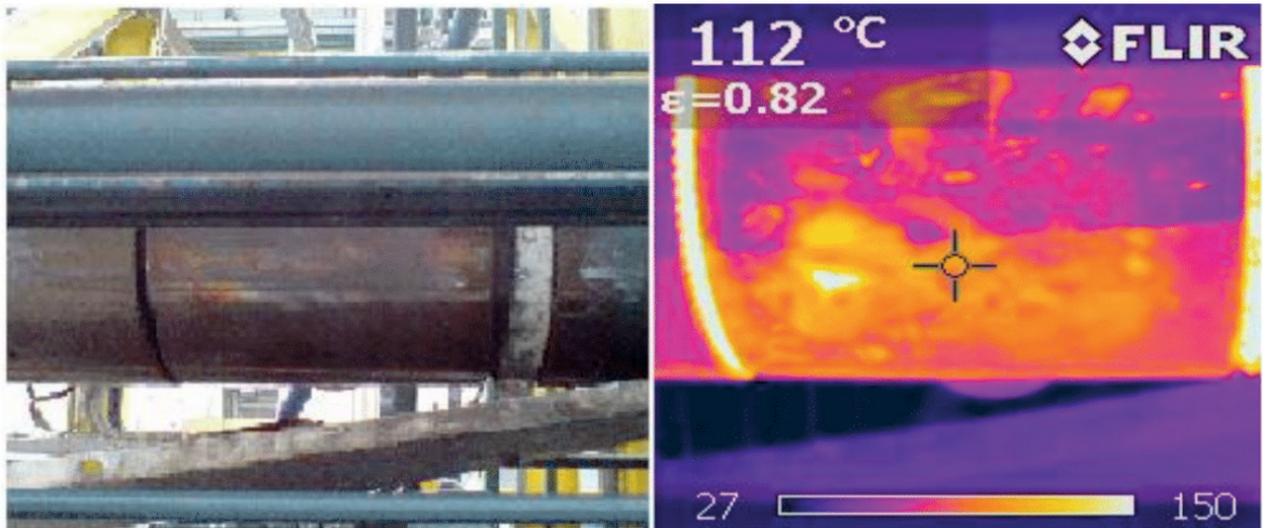


Figura 7. Análise termográfica do ponto 2 – Canhão sem o revestimento da manta térmica

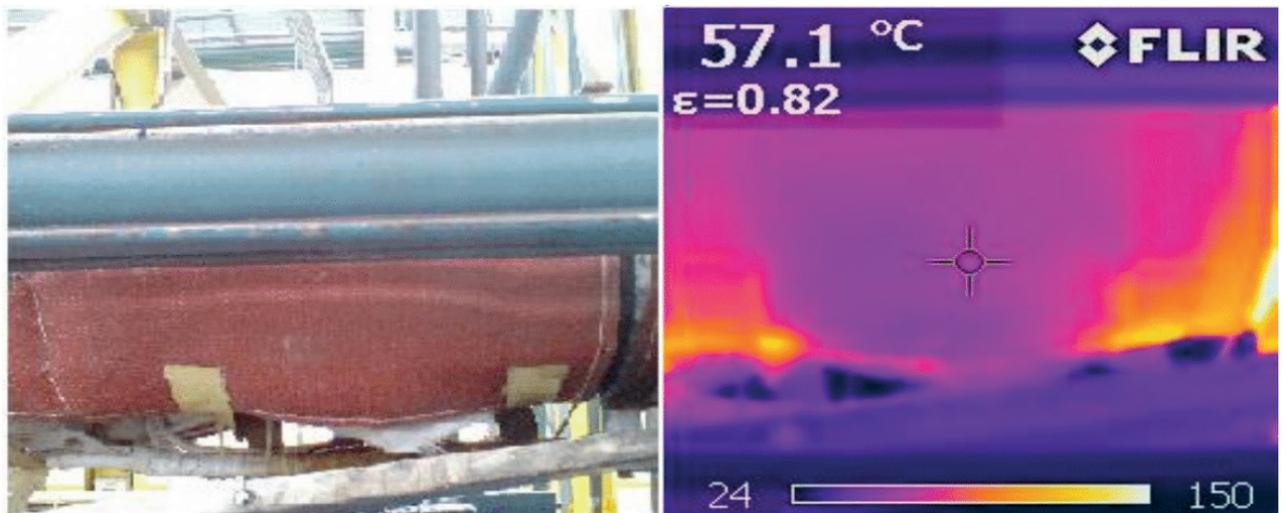


Figura 8. Análise termográfica do ponto 2 – Canhão com o revestimento da manta térmica

Uma análise comparativa entre os testes realizados foi efetuada para obter a porcentagem referente à diminuição da radiação térmica gerada pelo aquecimento do canhão em uma distância de 1 metro, local onde fica o operador da máquina durante o processo de injeção de peças. O percentual de diminuição da radiação térmica no ponto 1 pode ser encontrado pela equação 3.1:

$$RT = \left( \frac{\text{Temp1} - \text{Temp2}}{\text{Temp1}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$RT = \left( \frac{106 - 52,3}{106} \right) \times 100$$

$$RT = 50,66\%$$

O percentual de diminuição da radiação térmica no ponto 2 também pode ser

encontrado pela equação 3.1:

$$RT = \left( \frac{\text{Temp1} - \text{Temp2}}{\text{Temp1}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$
$$RT = \left( \frac{112 - 57,1}{112} \right) \times 100$$
$$RT = 49,01\%$$

Utilizando-se do resultado dos cálculos, conclui-se que a instalação da manta térmica gera uma redução de temperatura de aproximadamente 50% em relação à temperatura da radiação gerada pelas resistências do canhão de injeção, realmente protegendo o operador contra queimaduras por contatos diretos acidentais e pela radiação térmica. Para a temperatura do teste foi estabelecido um set point de 200°C para todas as 5 zonas de aquecimento. O quadro 1 mostra os valores reais das temperaturas obtidas nos resultados dos experimentos.

	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>
<b>Temperatura ambiente</b>	30°C	30°C
<b>Temperatura desejada (Set point)</b>	200°C	200°C
<b>Temperatura sem manta</b>	106°C	112°C
<b>Temperatura com manta</b>	52,3°C	57,1°C
<b>Diminuição da radiação (%)</b>	50,66%	49,01%

Quadro 1: Resultado das medições de radiação térmica

O segundo teste realizado referente à análise do consumo de energia demonstra a importância da instalação da manta térmica, para melhor eficiência energética no sistema de aquecimento do canhão. O resultado foi satisfatório, pois o sistema de proteção térmica possibilitou uma redução do consumo de energia de 28,74%, se comparado com o consumo sem a implementação do sistema. O quadro 2 mostra os resultados das medições das correntes por fase, medidos empregando o Analisador de energia Minipa ET-5061C.

Tempo (min)	Corrente medida sem manta (Amperes)			Corrente medida com manta (Amperes)		
	Fase R	Fase S	Fase T	Fase R	Fase S	Fase T
20	20,55	22,88	17,71	8,64	15,40	21,38
40	22,48	25,79	28,36	20,88	16,28	32,16
60	19,29	25,74	24,61	13,01	18,49	32,16
80	22,44	16,26	28,33	12,95	18,49	25,50
100	16,63	16,28	21,50	20,79	15,68	25,08
120	24,04	36,02	32,17	12,05	18,34	25,25
140	25,97	25,73	28,19	17,16	12,87	24,36
160	37,00	25,63	40,41	12,86	18,35	25,25
180	28,04	25,66	28,14	12,85	15,74	25,26
200	27,21	25,72	28,22	16,80	15,78	25,25
220	30,26	33,16	33,87	20,46	18,45	27,84
240	31,01	36,08	38,61	16,90	13,84	22,67
260	27,11	28,47	28,53	12,86	18,41	25,26
280	26,66	26,05	28,57	19,90	11,52	27,21
300	26,22	23,86	28,51	20,71	15,79	31,84
320	31,20	34,19	38,71	18,75	12,79	25,74
<b>Média</b>	26,01	26,72	29,65	16,10	14,87	26,39

Quadro 2: Resultado das medições de corrente elétrica por fase

Após a análise de 5 horas e 20 minutos de cada teste, foi feito um comparativo dos resultados para obter os cálculos de porcentagem real de economia de energia gerada pelo sistema de proteção térmica, através da média de potência consumida. Todos os valores obtidos no teste de energia foram gerados pelo analisador de energia Minipa ET-5061C, que foi montado diretamente na entrada da alimentação do sistema de aquecimento do canhão.

Nos resultados dos testes houve um desbalanceamento das fases devido ao fato de cada fase ser correspondente a uma zona de aquecimento, portanto nem todas as fases são utilizadas ao mesmo tempo, dependendo da temperatura de set point estabelecida.

Podemos encontrar o valor da potência média consumida da máquina injetora durante o período de teste, operando sem a manta térmica e com a manta de isolamento do canhão de aquecimento, utilizando a equação 3.2:

$$P_{\text{media (SM)}} = V_{\text{linha}} \times (I_{R\text{med}} + I_{S\text{med}} + I_{T\text{med}}) \quad (3.2)$$

$$P_{\text{media (SM)}} = 440 \times (26,01 + 26,76 + 29,65)$$

$$P_{\text{media (SM)}} = 36264,8W$$

$$P_{\text{media (CM)}} = V_{\text{linha}} \times (I_{R\text{med}} + I_{S\text{med}} + I_{T\text{med}}) \quad (3.2)$$

$$P_{\text{media (CM)}} = 440 \times (16,10 + 14,87 + 26,39)$$

$$P_{\text{media (CM)}} = 25238,4W$$

Os resultados obtidos no segundo teste mostram uma economia de 30,41% de energia utilizando o sistema de proteção térmica, o que comprova a promessa de eficiência energética do fabricante, que estabelece uma economia de 20 a 40% de energia.

#### 4 | DISCUSSÃO

Analisando os resultados obtidos, podemos observar a importância do estudo de métodos capazes de gerar economia e aumentar a eficiência de máquinas e equipamentos. O resultado de 30,41% é uma economia um tanto considerável e a diminuição da perda de calor para o ambiente torna esse sistema ideal para ambientes climatizados como o local onde a máquina usada nos testes está instalada.

Além da economia de energia proporcionada pelo sistema, a máquina pode ter sua partida mais rápida, pois a menor perda de temperatura diminui o tempo de aquecimento para alcançar a temperatura desejada (Set Point), resultando em maior produtividade da máquina e maior eficiência do equipamento.

O sistema também contribui diretamente para a economia de energia dos climatizadores do setor, pois com a menor troca de calor com o ambiente, por consequência os climatizadores trabalham irão operar em menores intervalos de tempo para manter a temperatura do ambiente industrial.

A manta térmica de fibra de vidro se mostrou eficiente na isolação do canhão de aquecimento, porém de acordo com Cunha e Neumann (1979), podemos utilizar outros materiais isolantes térmicos como a lã de rocha, poliestireno expandido, poliestireno extrudado, espuma de poliuretano, aglomerados de cortiça, entre outros.

O estudo comprova que é possível ter ganhos econômicos e ambientais com a implantação da eficiência energética, além de trazer para discussão da sociedade a cultura da conservação de energia, assunto este que deverá ser estudado com muita relevância pois seus benefícios são de grande proveito para toda a sociedade.

#### 5 | CONCLUSÃO

Os resultados mostram que o sistema de proteção térmica é realmente eficiente, contribuindo para uma redução significativa no consumo de energia elétrica em 30,41% e diminuindo consideravelmente a radiação térmica liberada pelo processo de aquecimento do canhão de injeção, que teve a temperatura reduzida em aproximadamente 50% de seu valor real. Analisando as medições é possível afirmar que a redução energética está dentro da média fornecida pelo fabricante, que apresenta valores de economia entre 20 e 40%, respectivamente.

Após ser analisada na prática a real economia de energia que esse sistema proporciona, torna-se interessante a ideia de investir em outras máquinas injetoras, pois

a empresa possui várias delas que ainda não possuem esse equipamento montado nos sistemas de aquecimento.

## REFERÊNCIAS

CAPELLI, A. Energia Elétrica: Qualidade e eficiência para aplicações industriais, 1. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2013. 272 p.

CASA DAS RESISTÊNCIAS – Manta térmica. Disponível em:

<<https://casadasresistencias.com.br/manta-termica.html>> Acesso em: 21 nov. 2019.

CUNHA, A. G.; NEUMANN, W. Manual de impermeabilização e isolamento térmico, 2. Ed. Chapecó: Editora Argus, 1979. 156 p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional. 2019 Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoesdados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019> >. Acesso em: 18 nov. 2019.

FERREIRA, C. M. A. Estudo energético de uma máquina de injeção de plástico. Dissertação de Mestrado, Porto, Portugal, 2016.

FILIPPO FILHO, G. Gestão da energia: Fundamentos e aplicações, 1. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2018. 224 p.

FLIR – Câmera Termográfica – FLIR E50. Manual do usuário. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/products/Flir-E50-8752828.html>> Acesso em: 26 nov. 2019.

MINIPA – Analisador de energia ET-5061C – Catálogo técnico. Disponível em:

< [http://www.minipa.com.br/images/proposta\\_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf](http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf)> Acesso em: 26 nov. 2019.

ROMI – Máquinas injetora para Plástico. Balanço energético nacional. Disponível em: < <http://www.romi.com/produtos/linhas-primax-e-velox/>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

SANTOS, M. A. Fontes de energia nova e renovável, 1. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013. 200 p.

## DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA PARA PESQUISA DE PRODUTOS DE SUPERMERCADO

*Data de aceite: 01/06/2020*

*Data de submissão: 05/03/2020*

**Marcelo Garcia Palma**

Centro Universidade Estácio de Ribeirão Preto  
Ribeirão Preto – SP  
<http://lattes.cnpq.br/8077973376648276>

**RESUMO:** Neste artigo propomos o desenvolvimento e análise de um sistema para pesquisa de produtos de supermercado, com capacidade de proporcionar de forma rápida e econômica a realização de pesquisas, compras de produtos e extração de conhecimento da base de dados com o algoritmo Apriori. Através de um formulário online iniciamos uma pesquisa para entender a real necessidade dos clientes desse segmento, os resultados foram triados para remoção do viés, selecionando apenas os responsáveis pelas compras diárias. Como resultado, foi elaborado um aplicativo web promovendo facilidade ao realizar uma compra e analisado a base de dados trazendo todo o seu conhecimento de compras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Supermercado: Pesquisa de Produtos.

### DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A SYSTEM FOR RESEARCH OF SUPERMARKET PRODUCTS

**ABSTRACT:** In this article we propose the development and analysis of a system for researching supermarket products, with the ability to quickly and economically provide research, product purchases and knowledge extraction from the database with the Apriori algorithm. Through an online form we started a survey to understand the real need of customers in this segment, the results were sorted to remove the bias, selecting only those responsible for the daily purchases. As a result, a web application was developed promoting ease when making a purchase and analyzed the database bringing all your shopping knowledge.

**KEYWORDS:** Supermarket: Product Search: Online Shopping.

### 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente a vivência em grandes cidades tem ocasionado um aumento no estresse dos moradores. Diariamente a população, para chegar ao trabalho, faz uso de metrô, ônibus ou até mesmo de veículo próprio, o que pode demandar horas de

viagem. No escritório, o estresse continua com a cobrança por resultados e metas. Esse estilo de vida que a população das grandes cidades é incumbida acaba deixando marcas na saúde dos seus habitantes (CASTRO, 2014).

O avanço da tecnologia trouxe facilidades para o nosso cotidiano, por exemplo, realização de serviços bancários, conversar com pessoas ao redor do mundo, fazer compras no exterior, cursar uma graduação a distância e permitir que pequenas e grandes empresas disponibilizem seus produtos na internet para levar seus produtos a milhares de clientes.

Utilizando o avanço que a tecnologia pode proporcionar, pretende-se construir uma aplicativo Web que possa minimizar o deslocamento dos moradores com relação a compras de produtos de supermercado, e conseqüentemente diminuir o estresse dos mesmos.

É interessante observar que o computador não é mais o principal meio de acesso a internet, outros dispositivos começaram a ganhar relevância, na qual o telefone celular, a partir de 2014, tornou-se o principal meio de acesso a internet (IBGE, 2015 p.43).

Diante da importância que os dispositivos móveis vêm apresentando, como principal meio de acesso a internet, pretende-se desenvolver um aplicativo híbrido, para os dispositivos móveis, integrado com o aplicativo Web.

Em 1998 três estudantes de engenharia da computação e um de administração, iniciaram uma busca por ideias para a inserção de novos projetos para o mercado. Durante o processo de busca no segmento on-line perceberam que nenhum site ofertava uma lista de um mesmo produto com os preços praticados por diversas lojas e seria inviável passar horas na frente do computador abrindo diferentes páginas de sites de diferentes lojas. A partir desta premissa foi criada a empresa Buscapé que conquistou milhares de consumidores ao redor do mundo e se tornou um portal líder da América Latina em comparação de preços. (KOHN, 2012).

Fazendo uma analogia com a inviabilidade encontrada por esses estudantes, pretende-se estudar um nicho de mercado específico e criar um sistema similar ao portal de pesquisa Buscapé. O sistema proposto contemplará os produtos existentes em supermercado seja ele de pequeno, grande ou médio porte. Ao realizar uma busca no portal do Buscapé, este apresenta como resultado as ofertas disponíveis para aquele produto e ao clicar sobre o mesmo o cliente é direcionado para o site da oferta anunciada. De modo análogo deseja-se construir um sistema que realiza uma busca de determinado produto, e possibilite ao usuário comparar uma lista de produtos de um supermercado com os seus concorrentes, finalizar a compra e aguardar a mensagem do supermercado informando que a compra já pode ser retirada ou que já saiu para entrega.

Este estudo também busca beneficiar os empresários e consumidores. Para os empresários direcionar ofertas instantaneamente para um número maior de pessoas de acordo com o perfil do cliente, assim, potencialmente aumentar suas vendas e diminuir o

gasto com panfletagem como estratégia de propaganda. Para o consumidor o benefício será agregar uma economia diante das opções expostas pela aplicação, diminuir a necessidade de deslocamento e pesquisa que antes era necessário, e ter a comodidade de receber a compra no aconchego de sua casa.

## 2 | MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento da sociedade humana tornou-se intenso a partir da revolução industrial, o que tem acelerado o processo de crescimento das cidades, tornando-se metrópoles (MIRANDA, 2006). A sobrevivência nessas metrópoles tem causado um aumento no estresse dos moradores por conta das dificuldades encontradas no seu cotidiano.

Tendo em vista uma das dificuldades encontradas pela sociedade, será desenvolvida uma automação para o processo de compra de produtos de supermercado, de modo que possa assegurar o mínimo de deslocamento para o supermercado, seja para pesquisa ou compra de produtos, proporcionando uma melhora de qualidade de vida, economia de tempo e dinheiro.

O advento da tecnologia motivou o aumento no armazenamento dos dados, a manipulação desses dados, através de técnicas de Mineração de dados, transforma esses dados em conhecimento, como a identificação de padrões, correlações e tendências entre as informações, proporcionando as empresas posicionar-se com relação a concorrência e atender as expectativas dos clientes.

## 3 | OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema com aplicativos Web e mobile capazes de proporcionar, de forma rápida e econômica, a realização de pesquisas e compras de produtos encontrados em supermercados, sugestões de produtos através de relacionamento de produtos com receitas cadastradas na base de dados.

Este trabalho também tem como objetivo secundário contribuir com o meio ambiente e simplificar o dia a dia dos habitantes e proprietários de empresa, uma vez que os proprietários de empresa terão a oportunidade de realizar o marketing através do sistema a partir da identificação de seus clientes, economizando com a produção de panfletos e geração de resíduos para o meio ambiente.

Para alcançar tais objetivos, serão aplicadas técnicas de desenvolvimento de software, Mineração de dados e será adotada uma metodologia para a idealização do sistema constituído nas plataformas Web e móvel.

## 4 | FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão abordadas as tecnologias e técnicas de Mineração de Dados utilizadas para o desenvolvimento do aplicativo Web e móvel deste trabalho. Este estudo teve início com livros, apostilas, e artigos com assuntos relacionados ao conceito das tecnologias e técnicas que serão utilizadas para o desenvolvimento deste projeto.

### 4.1 LINGUAGEM JAVA

A linguagem de programação Java foi anunciada pela Sun em uma conferência do setor em maio de 1995, logo uma comunidade de negócios para a Web se interessou por ela. Desde então a Java está sendo utilizado para construir aplicativos corporativos de grande porte, melhorar o desempenho de servidores na Web e fornecer aplicativo para dispositivos móveis (Harvey e Paul, 2015).

### 4.2 ENTERPRISE JAVABEANS

A tecnologia Enterprise JavaBeans (EJB) é a arquitetura de componente da plataforma JavaEE, executa em um contêiner no servidor (ORACLE, 2017).

A especificação Enterprise JavaBeans está sendo utilizada por muitos sistemas corporativos pois permite um desenvolvimento rápido e simplificado de aplicativos, distribuídos, seguros, portáteis e transacionais baseado na tecnologia Java EE (K19, 2015).

### 4.3 TRANSAÇÕES

Uma transação é caracterizada por uma sequência de passos que devem ser executados em uma ordem específica para que uma determinada tarefa seja realizada (K19, 2015).

A arquitetura dos componentes EJB para transações é fortemente integrada com a JTA (Java Transaction API) e o JTS (Java Transaction Service), oferecendo a possibilidade de realizar transações distribuídas, o que simplifica bastante o trabalho dos desenvolvedores (K19, 2015).

Na arquitetura do EJB existem dois modos de transação que a arquitetura pode gerenciar, sendo eles, *Container Managed Transactions* (CMT) e *Bean Managed Transactions* (BMT).

### 4.4 CONTAINER MANAGED TRANSACTIONS

Quando utilizado o gerenciamento *Container Managed Transactions* (CMT), o contêiner EJB é responsável por abrir, confirmar ou abortar transações, mas a aplicação deve indicar ao contêiner por meio de configurações quando ele deve abrir, confirmar ou

abortar transações (K19, 2015, p.116).

#### 4.5 BEAN MANAGED TRANSACTIONS

Quando utilizado o gerenciamento *Bean Managed Transactions* (BMT), a aplicação é responsável por abrir, abortar e confirmar transações, ficando a critério do desenvolvedor especificar o modo BMT para cada Session Bean da aplicação.

#### 4.6 PERSISTÊNCIA

A forma de comunicação de aplicações Java com o banco de dados se dá pelo JDBC, que necessita de algumas informações como usuário, senha e base de dados a ser utilizada. Existem duas formas de realizar conexões com o JDBC, através das aplicações no qual faça uso do arquivo 'persistence.xml', quando se deseja trabalhar com um framework ORM, ou realizar a implementação do JDBC para obter as conexões e através do contêiner, realizando as configurações do JDBC.(K19, 2015, p.95).

Segundo K19 (2015, p.95) a desvantagem em realizar as conexões através das aplicações fica por conta de que somente as aplicações poderão utilizar, opostamente as vantagens em realizar as conexões através dos servidores de aplicação é a de que, podem ser utilizadas por diversas aplicações.

De acordo com (K19, 2015, p.95) as configurações JDBC realizadas em um servidor de aplicação é definida em um componente chamado Data Source. Esse Data Source é responsável por permitir que uma única configuração do JDBC seja utilizada por diversas aplicações e, também promove facilidades para utilizar os serviços dos provedores de persistência que seguem as especificações JPA.

#### 4.7 GERENCIAMENTO DE OBJETOS

Mecanismos de injeção de dependência e controle de ciclo de vida são oferecidos aos objetos de uma aplicação EJB. O mecanismo de controle de ciclo de vida pode garantir a escalabilidade de uma aplicação (K19, 2015, p.1).

A injeção de dependência permite realizar a inversão de controle, garantindo um baixo acoplamento em uma cadeia de classes, aliada a uma manutenção simples e um sistema com ótima evolução (ORACLE, 2013).

#### 4.8 HIBERNATE

O Hibernate é um framework ORM (*Object Relational Mapping*) criado para suprir a necessidade de diminuir a codificação de consultas SQL. O objetivo do Hibernate é aliviar o desenvolvedor em 95% de dados comuns de persistência relacionados a tarefas de programação. Para aplicações centradas em dados, das quais apenas usam procedimentos armazenados para implementação das lógicas comerciais no banco de dados o Hibernate não é a melhor solução, sendo necessário o emprego do SQL puramente (HIBERNATE,

2017).

Além de sua própria API “nativa”, o Hibernate também implementa a especificação Java Persistence API (JPA), portanto pode ser utilizado facilmente em qualquer ambiente que suporte JPA. Ainda, o Hibernate é configurável, extensível e bastante conhecido por sua excelente estabilidade e qualidade (HIBERNATE, 2017).

#### 4.9 SPRING MVC

O Spring é um framework MVC com potencial para simplificar a programação em Java por ser modular e permitir utilizar apenas as peças necessárias para o projeto, por exemplo, gerenciamento de objetos ou transações (SPRING, 2017).

Durante o desenvolvimento de aplicações Web com Java EE percebeu-se que o trabalho com Servlets e JSPs puros era pouco produtivo e organizado. Diante dessa questão a própria Sun começou a fomentar o uso do padrão MVC e de padrões como o Front Controller, mas mesmo assim o retrabalho era muito grande de projeto para projeto (CAELUM, 2017).

O processo de reimplementar o padrão todo a cada projeto começou a ficar inviável, diante desta situação começaram a surgir frameworks MVC com a ideia de se criar um controlador reutilizável entre projetos. Uma das principais soluções no mercado foi por muito tempo o Struts, mas com o avanço da plataforma Java EE, hoje, ele é visto como um framework que demanda muito trabalho. Com o passar do tempo a comunidade Spring entendeu que o Struts era ultrapassado e começou a criar um framework MVC próprio (CAELUM, 2017).

#### 4.10 SERVIÇOS WEB

Para Harvey e Paul (2015, p.1019) Serviços Web permite que empresas colaborem sem se preocupar com a compatibilidade de hardwares, softwares e tecnologias de comunicação, pois os serviços não dependem de nenhuma plataforma ou linguagem.

A máquina na qual um serviço Web reside é chamada host de serviços Web. O host de serviços Web recebe uma solicitação do aplicativo cliente através da rede, processa a solicitação e responde ao aplicativo utilizando a mesma rede. Esse tipo de aplicação distribuída beneficia os sistemas de vários modos. Por exemplo, um aplicativo sem acesso direto a dados em outro sistema poderia ser capaz de recuperar os dados via um serviço Web. De forma análoga um aplicativo que não dispõe de capacidade de processamento suficiente para realizar cálculos específicos poderia utilizar um serviço Web para tirar vantagem dos recursos superiores de outro sistema (Harvey e Paul, 2015, p.1020).

Segundo W3C (2004), um serviço Web é um sistema de software construído para suportar interoperabilidade e interação máquina a máquina através de uma rede. Ele tem uma interface descrita em um formato processável pela máquina (WSDL). Os serviços Web permite que outro sistema tenha uma interação utilizando o protocolo HTTP com

uma serialização de documentos XML em conjunto com outros padrões relacionados à Web.

#### 4.11 REPRESENTATIONAL STATE TRANSFER

O Representational State Transfer (REST) refere-se a um estilo de arquitetura para comunicação baseada na Web. Esses serviços são conhecidos como serviços Web RESTfull, apesar que o próprio REST não ser um padrão, esses serviços são implementados utilizando padrões Web. Cada método em um serviço Web RESTfull é identificado por um URL único, dessa forma quando o servidor recebe uma solicitação, ele sabe imediatamente que operação realizar. Esses serviços Web podem ser utilizados a partir de um programa ou diretamente de um navegador Web (Harvey e Paul, 2015, p.1020).

#### 4.12 Engenharia de Software

A engenharia de software está vinculada a todos os aspectos da produção de software, desde os primeiros passos para construção do sistema até a sua manutenção. A partir de um problema busca-se de forma seletiva aplicar teorias, métodos e ferramentas de modo a solucioná-los mesmo quando não existem teorias e métodos aplicáveis (SOMMERVILLER, 2011, p.5).

Segundo Pfleeger (2004) a comunicação entre o cliente e os desenvolvedores é um ponto chave para o desenvolvimento de software e se a comunicação entre os dois lados falhar o sistema também falhará. O desenvolvimento do sistema deverá ser iniciado após total compreensão da necessidade do cliente, pois dessa forma é possível construir com eficácia e eficiência uma solução que atenda a necessidade do cliente.

De acordo com SOMMERVILLER (2011), de forma geral os engenheiros de softwares não podem ser perfeccionistas mas devem adotar uma metodologia organizada e sistemática para o seu trabalho, selecionar métodos adequados para um conjunto de circunstância e obter os resultados de qualidades requeridos.

#### 4.13 PADRÃO MVC

Segundo Gonçalves (2007), o MVC (Model-View-Controller) é um padrão de desenvolvimento que tenta separar uma aplicação em três partes distintas, Modelo, Visão e Controlador. A Visão está relacionada a mostrar informações ou dados que estão no modelo, o Modelo representa o contexto atual que a aplicação administra e o Controlador é o responsável por receber as requisições da Visão executando algum trabalho que a aplicação precisa completar.

Para Gonçalves (2007) o modelo MVC é um padrão de desenvolvimento de fácil manutenção, e muito aceito no desenvolvimento de aplicações Java, principalmente

naquelas destinadas a Web.

É muito comum o desenvolvimento de aplicações Web com código HTML e código servidor em uma mesma página, criando uma embaraçosa confusão. Essa prática de embutir a lógica de negócio ao resultado final é condenada pelos desenvolvedores, principalmente os que escrevem suas aplicações em JSP. A partir dessa condenação o padrão MVC foi incorporado ao desenvolvimento de aplicações escritas em Java, criando dois modelos: Model 1 (Modelo 1) e Model 2 (Modelo 2), ambos baseados no padrão MVC (GONÇALVES, 2007).

O Model1, chamada de *page-centric*, é bem comum na criação de aplicações Web por fornecer um modo mais fácil e reunir uma aplicação Web, pois envolve simplesmente o desenvolvimento de uma aplicação como um conjunto de páginas JSP (GONÇALVES, 2007).

Na figura 1 o usuário solicita uma página Web, através do browser, o container processa a requisição que pode conter dados provenientes do banco de dados ou outras funções que satisfaça à lógica de negócio. O JavaBeans fornece as representações de dados dentro da página JSP. Após o processamento da lógica de negócios da página, serão confeccionadas e apresentados o HTML ao usuário (GONÇALVES, 2007).

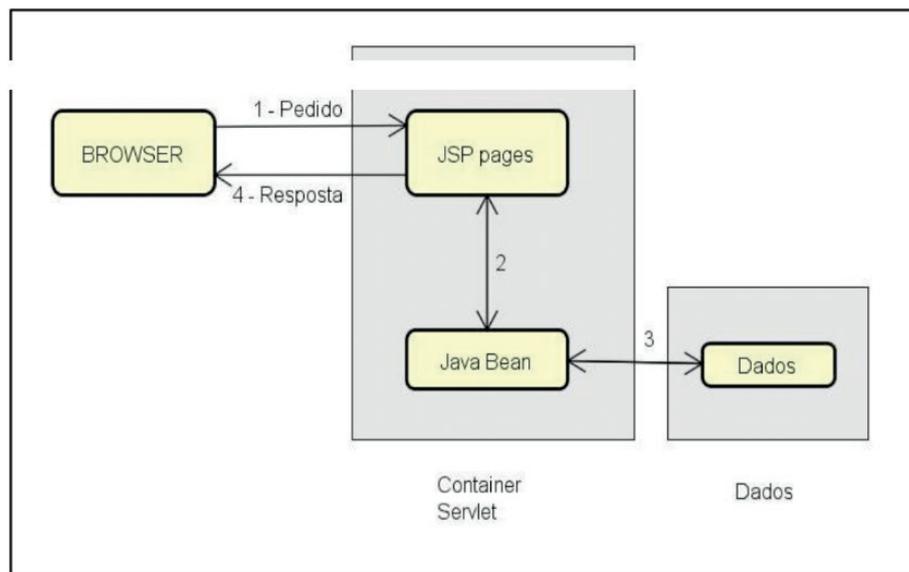


Figura 1. Arquitetura Model 1

Fonte: GONCALVES Edson

O Model 2 foi criado a partir da identificação de algumas desvantagens do Model 1, que é limitado a poucos usuários e pouca lógica de negócios. Para aplicações que necessitam de uma lógica de negócio mais detalhada e tem uma lógica de exibição significativamente grande, esta arquitetura fará que os códigos fiquem um tanto desorganizado, à medida que a quantidade de código aumenta. Os desenvolvedores identificaram uma arquitetura mais sofisticada que usa Servlets e páginas JSP, que está baseada em uma adaptação da

arquitetura MVC. Nessa implementação o Servlet representa o Controlador, que recebe pedidos do usuário e altera o Modelo e fornece a Apresentação ao usuário (GONÇALVES, 2007).

Na figura 2 o usuário, através do browser, solicita a URL de um Servlet, essa URL representa um determinado trabalho a ser executado. O Servlet recebe o pedido e determina o trabalho baseando-se no pedido, o serviço solicitado executa chamadas ao modelo que compreende a lógica do negócio exigido. Após executar a lógica necessário a camada Controlador, usando o despachante de pedido, fornece a lista de objeto para a camada de apresentação selecionada.

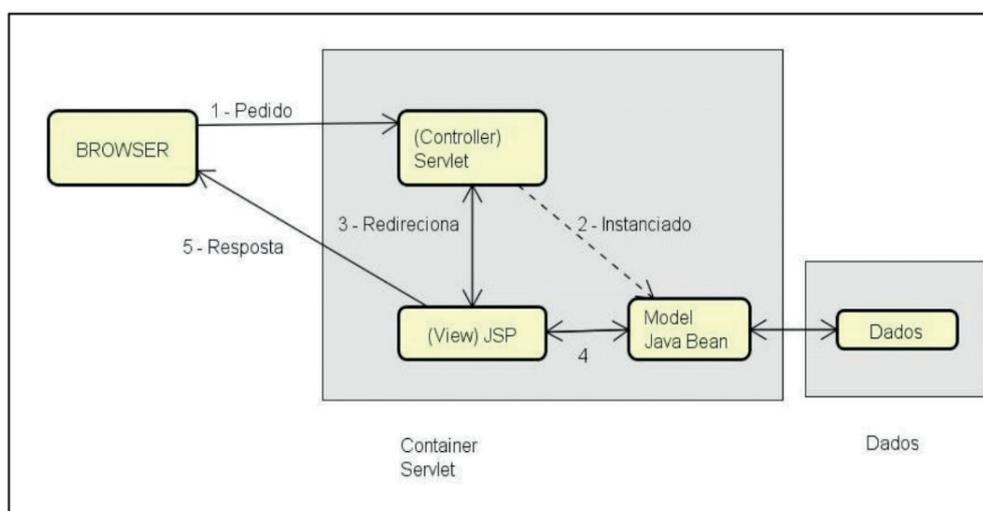


Figura 2. Arquitetura Model 2

Fonte: GONCALVES Edson

#### 4.14 MINERAÇÃO DE DADOS

Segundo Vasconcelos e Carvalho (2007), mineração de dados ou data mining é considerado o núcleo de processo de descoberta de conhecimento em banco de dados (Knowledge Discovery in Databases – KDD). Ela consiste no processo de analisar grandes volumes de dados sob diferentes perspectivas, a fim de descobrir informações úteis que normalmente não estão visíveis ou que dificilmente são encontradas.

#### 4.15 Técnicas de máquina de aprendizado simbólico

Nesta etapa serão descritas técnicas de Aprendizado de Máquina simbólico, com ênfase em indutores cujas linguagens de representação de hipóteses consistem em árvores de decisão, regras ordenadas e regras não ordenadas.

Um sistema de aprendizado simbólico busca aprender construindo representações simbólicas de um conceito através da análise de exemplos e contraexemplos deste conceito. Essas representações simbólicas são representadas na forma de expressão

lógica seja elas, árvores de decisão, regras de produção ou rede semântica (BATISTA, 1997).

As representações simbólicas mais estudadas atualmente são árvores e regras de decisão. O trabalho com indução de regras de decisão surgiu com a simples tradução das árvores de decisão para regras, com podas realizadas sobre regras (BATISTA, 1997).

Essas técnicas tiveram origem a partir da dificuldade de compreensão de métodos numéricos e estatístico, onde essa dificuldade implica na compreensão do funcionamento dos métodos utilizados. A partir desses problemas pesquisadores procuraram por sistemas de aprendizagem capazes de induzir conceitos que pudessem ser representados por uma linguagem compreensível por um ser humano (BATISTA, 1997).

Uma maneira fácil de representar os conceitos de forma compreensível é através da lógica de regras de decisão associativa, onde essas regras são simples combinações de proposições que podem ser avaliadas em verdadeiro ou falso. Cada regra será associada com uma classe particular e quando uma regra é avaliada como verdadeiro, indica uma classe em particular por exemplo: Se X é verdade e Y é falso, conclua classe C (BATISTA, 1997).

#### 4.16 REGRAS DE ASSOCIAÇÃO

As regras de associação buscam encontrar elementos que implicam na presença de outros elementos em uma mesma transação, ou seja, encontrar relacionamentos ou padrões frequentes entre conjunto de dados. Tradicionalmente, regras de associação representam padrões existentes em transações armazenadas. Por exemplo, partindo do princípio que os itens adquiridos por clientes são armazenados em uma base de dados, uma estratégia de mineração com regras de associação, poderia gerar a seguinte regra: {cinto,bolsa}  $\rightarrow$  {sapato}, a qual indica que o cliente que compra cinto e bolsa com um determinado grau de certeza, compra também sapato (VASCONCELOS e CARVALHO, 2004).

As bases de dados envolvidas nestes processos são muito grandes. Assim é necessário que sejam utilizados algorítmicos rápidos e eficientes (VASCONCELOS e CARVALHO, 2004).

O algoritmo Apriori foi selecionado por ser um dos algoritmos mais utilizados para construção de itens frequentes.

Segundo Vasconcelos e Carvalho (2004) O algoritmo Apriori emprega busca em profundidade e gera conjunto de itens candidatos (padrões) de k elementos a partir de conjunto de itens de k – 1 elementos. Os padrões não frequentes são eliminados e toda a base de dados é rastreada e os conjuntos de itens frequentes são obtidos a partir dos conjuntos de itens candidatos.

## 5 | MATERIAIS E MÉTODOS

Foram usadas no desenvolvimento da plataforma tecnologias do estado da arte para aplicações Web, tais como: JavaEE, PostgreSQL, HTML5, CSS3, JavaScript e Weka. Para entender a necessidade do usuário, um formulário online para coleta dos requisitos foi elaborado, o mesmo foi distribuído por meio de redes sociais.

Após a coleta, os resultados foram triados para remoção de viés, selecionando apenas os pertinentes, a figura 3 apresenta o resultado da triagem.

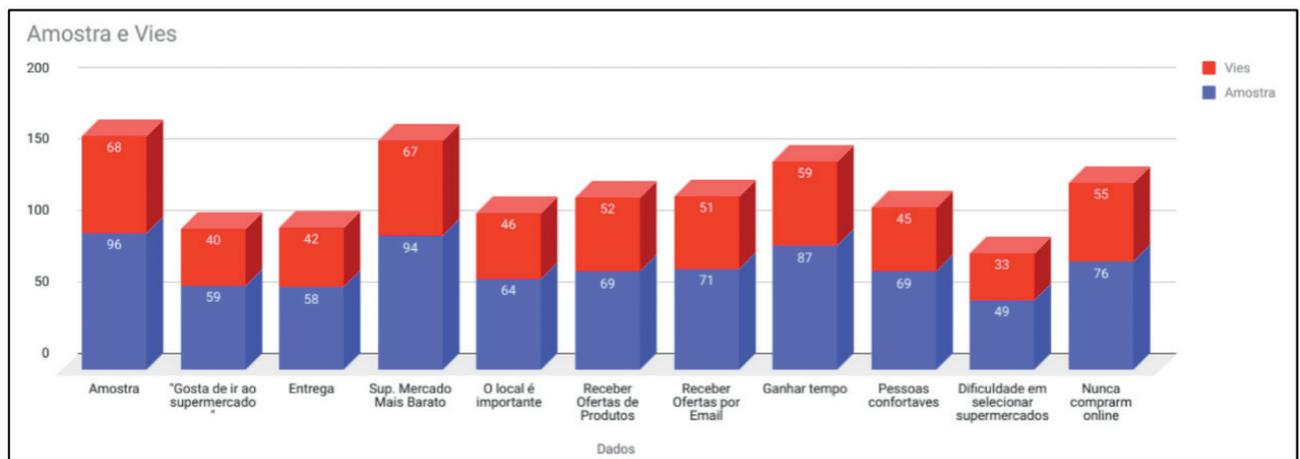


Figura 3 – Resultado da Coleta de Requisitos, separando coletas triadas pelo viés

Fonte: Produzido pelo Autor

Foram realizados o levantamento dos requisitos de softwares para determinar o que será desenvolvido e qual a melhor forma de fazê-lo. O aplicativo Web foi construído na plataforma JEE, composta de páginas Web e Web Services realizando a integração com aplicações externas. O armazenamento usa o gerenciador de banco dados relacionais, de código aberto, PostgreSQL, que apresenta o desempenho necessário para a aplicação.

O algoritmo Apriori de Mineração de Dados, será usado para classificar dados gerados pela plataforma, usando regras de associação para identificar a frequência que determinado produto é comprado e sua relação com outros produtos

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta o diagrama de caso de uso da aplicação e a figura 5 a arquitetura da aplicação.

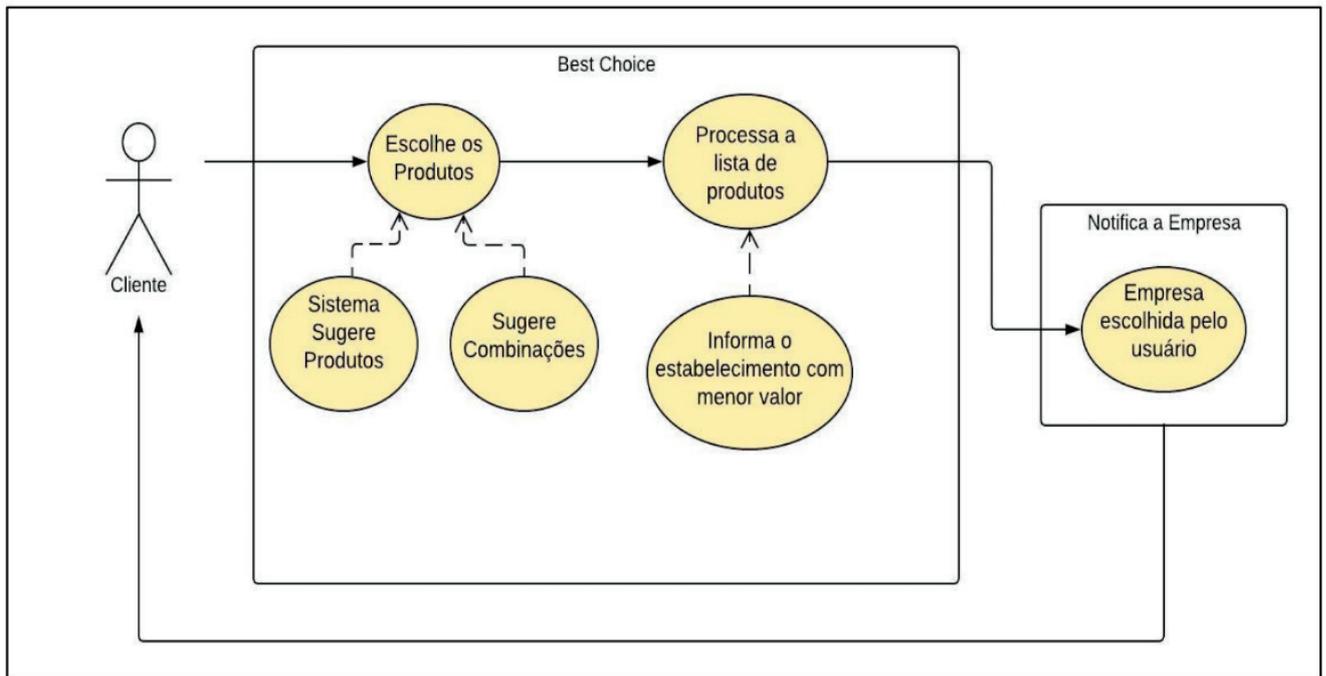


Figura 4 – Diagrama de Caso de Uso, compra de produto  
 Fonte: Produzido Pelo Autor

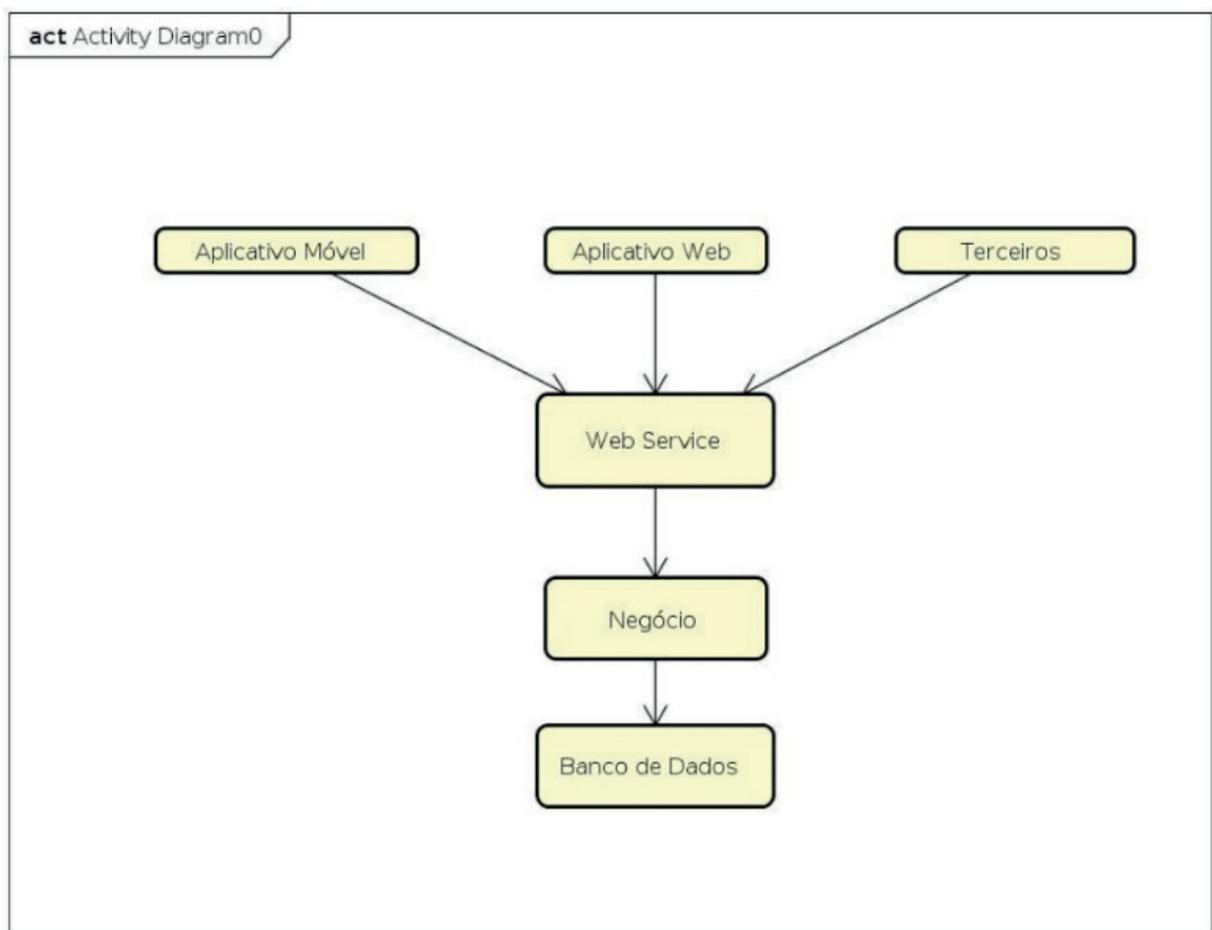


Figura 5 - Arquitetura da Aplicação abstraído em alto nível  
 Fonte: Produzido Pelo Autor

Pode-se observar que, à medida que o cliente adiciona produtos a sua lista, o sistema realiza sugestões de produtos a partir de receitas cadastrada na base de dados e quando

a compra é finalizada o sistema notifica a Empresa que um determinado cliente registrou uma compra.

A figura 5 apresenta a arquitetura da aplicação abstraído para um alto nível, tornando a interpretação clara e objetiva. A camada de aplicativo web é composta pelas tecnologias Html5, CSS3 e JavaScript, o qual possibilitou a criação da interface mostrada na figura 6 e 7. A figura 6 representa a principal página da aplicação, a figura 7 mostra o carrinho de compras com os supermercados cadastrados seguido do preço final da compra.

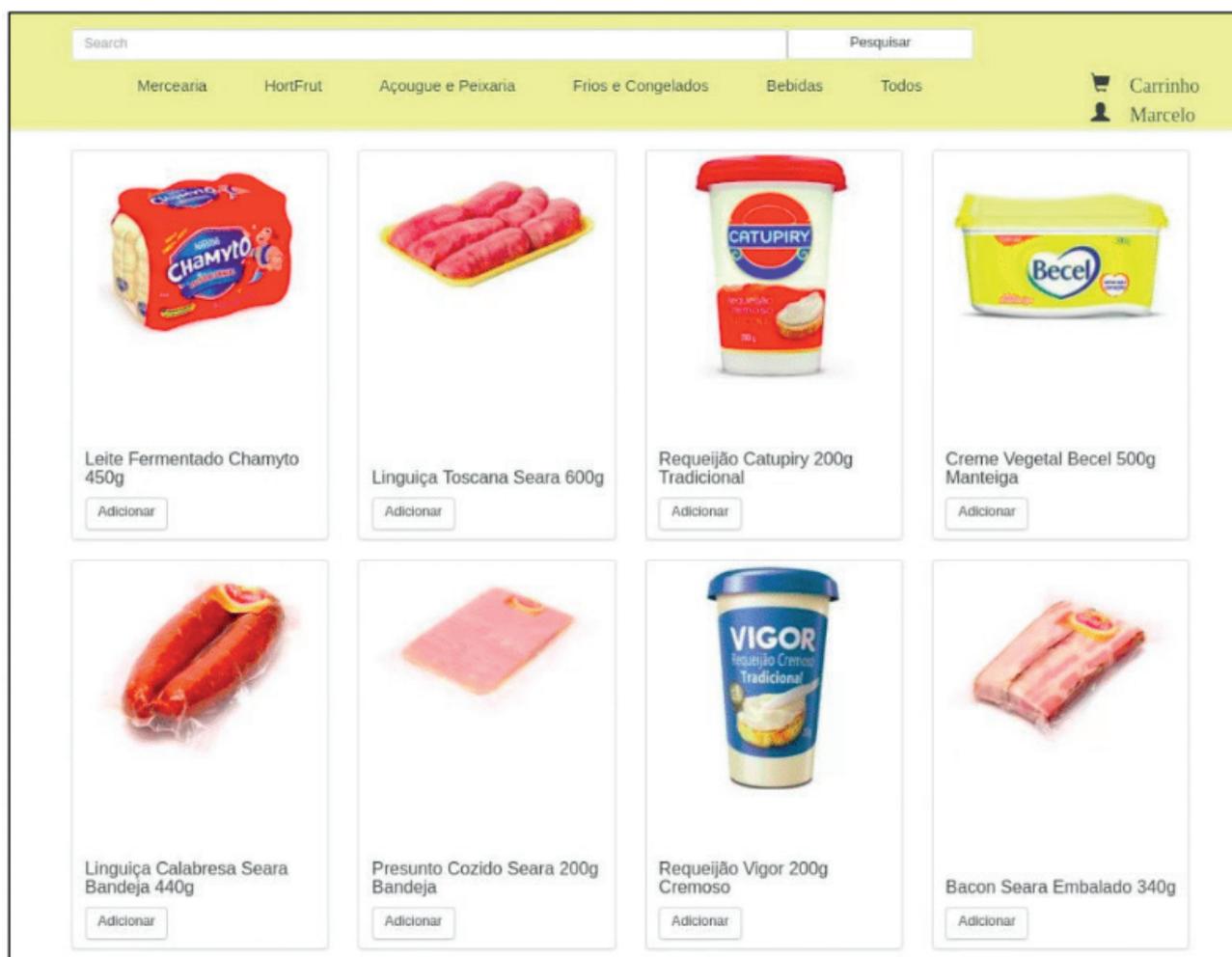


Figura 6 – Tela principal da aplicação com os produtos

Fonte: Produzido Pelo Autor

BestChoice		Carrinho de Compra	
#	Nome	Quantidade	Excluir
278	Requeijão Catupiry 200g Tradicional	1	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
263	Leite Fermentado Chamyto 450g	1	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
279	Creme Vegetal Becel 500g Manteiga	1	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
283	Bacon Seara Embalado 340g	1	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
281	Presunto Cozido Seara 200g Bandeja	1	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
83	Farinha Trigo Dona Benta 1kg Tradicional	2	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
37	Leite Longa Vida Piracanjuba 1l Integral	2	<input type="button" value="✕ Excluir"/>
#	SuperMercado	Total da Compra	Finalizar
	Savegnago	R\$ 38.21	<input type="button" value="✓ Finalizar"/>
	Carrefour	R\$ 36.21	<input type="button" value="✓ Finalizar"/>
	Amarelinha	R\$ 36.43	<input type="button" value="✓ Finalizar"/>

Figura 7 – Tela do aplicativo web mostrando o carrinho de compras

Fonte: Produzido Pelo Autor

A camada de WebService e negócio foi desenvolvida com a tecnologia JavaEE, onde sua finalidade é atender as requisições realizadas pela aplicação e de sistemas de terceiros, mantendo a mesmas em pleno funcionamento. A última camada, Banco de Dados, utiliza como tecnologia o PostgreSQL, com o propósito de armazenar todas as informações proveniente do sistema sendo acessado pela camada de negócio.

Ao final do trabalho aplicou-se Mineração de Dados utilizando o algoritmo Apriori através da biblioteca Weka, para encontrar padrões de compra, como apresenta a figura 9, onde o suporte representa a porcentagem de transações da base de dados que contém o conjunto de itens que estão sendo analisados, a confiança representa em porcentagem, a quantidade de transações aferida pela regra. Por exemplo, quem compra Pão Pullman com 100% de confiança compra feijão. A figura 6 apresenta os dados gerados pelo sistema.

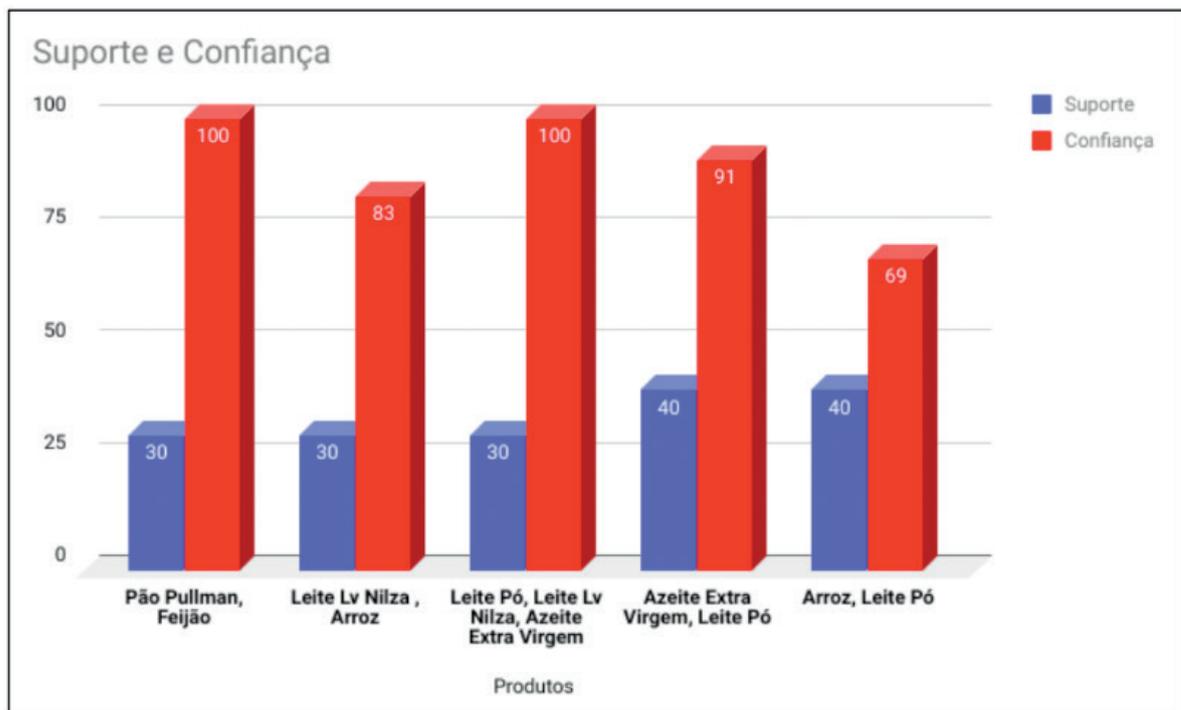


Figura 8 – Resultado do Apriori mostrando a relação entre confiança e suporte

Fonte: Produzido Pelo Autor

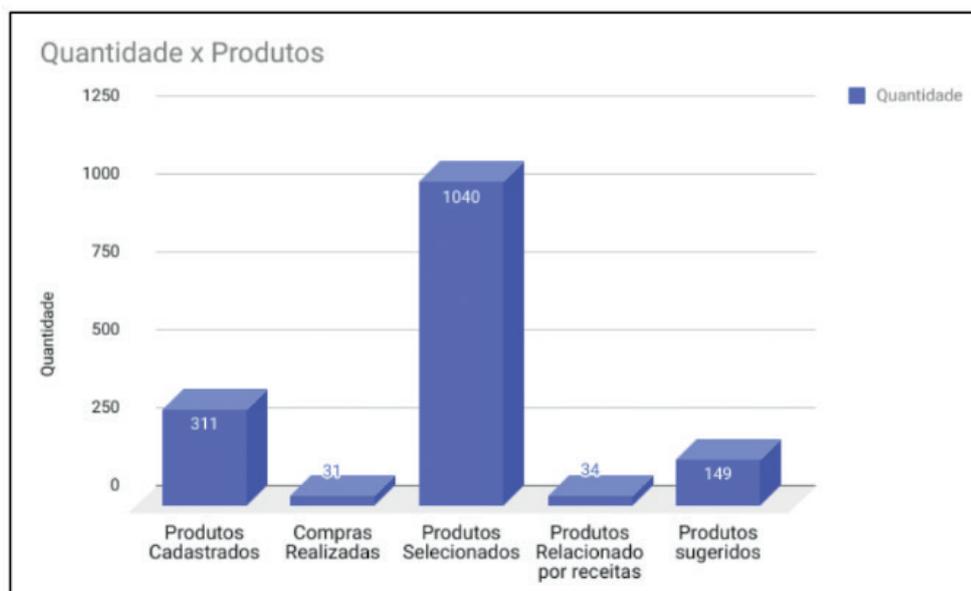


Figura 9 – Dados produzidos pelo sistema

Fonte: Produzido Pelo Autor

## 7 | CONCLUSÕES

Este projeto permitiu com que os usuários realizassem de forma rápida e econômica suas compras diárias, deixando a experiência no fluxo de compra mais fácil por conta do algoritmo utilizado que facilita não só as buscas, mas também a escolha do estabelecimento, seja por preferência de supermercado ou pelo custo benefício.

O armazenamento de compras realizadas pelos clientes tende a crescer cada

vez mais e utilizando as regras de associações, com a aplicação do algoritmo Apriori, conseguimos identificar padrões e trazer esse conhecimento para gestores, o qual poderá tomar decisões para melhorar as vendas do estabelecimento.

## REFERÊNCIAS

AMO, Sandra. **Técnicas de Mineração de Dados**. Disponível em <<http://www.deamo.prof.ufu.br/arquivos/JAI-cap5.pdf>>. Acesso em: 15 de Out 2017.

BATISTA, Gustavo E. A. P. A. **Um ambiente de Avaliação de Algoritmo de Aprendizado de Máquina Utilizando Exemplos**, USP – São Carlos, Set. 1997.

CASTRO, Carol. **Entenda porque a vida nas grandes cidades faz você ficar mais doente**. Disponível em:< <https://noticias.uol.com.br/saude/ultimas-noticias/redacao/2014/03/26/poluicao-e-estresse-das-grandes-cidades-aumentam-desenvolvimento-de-doencas.htm>>. Acesso em: 26 de Fev. 2017 .

CAELUM, **Spring MVC – Java para desenvolvimento web**. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.caelum.com.br/apostila-java-web/spring-mvc/#11-3-configurando-o-spring-mvc>>. Acesso em 08-Abril. 2017.

CAELUM, **Uma introdução prática ao JPA com Hibernate - Java para desenvolvimento Web**. [S.l.]. Disponível em : <<https://www.caelum.com.br/apostila-java-web/uma-introducao-pratica-ao-jpa-com-hibernate/>>, Acesso em 13-Abril. 2017.

DEITEL, Harvey M.; DEITEL, Paul J. **Java Como Programar**. 10.ed. São Paulo: Person Education do Brasil, 2017.

DEITEL, Harvey M.; DEITEL, Paul J. **Java Como Programar**. 8.ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010. p.1019-1020.

GONÇALVES, Edson. **Desenvolvendo Aplicações Web com JSP, SERVLETS, JAVASERVER FACES, HIBERNATE, EJB3 PERSISTENCE E AJAX**. Rio de Janeiro: Ciencia Moderna Ltda, 2007 .p 385-393.

K19: **Treinamentos. Desenvolvimento Web Avançado com JSF2, EJB3.1 e CDI**. 2015. [S.l.]. P.1-201

KOHN, Sthepanie. **Conheça a história do Buscapé um dos maiores cases de sucesso de startups do Brasil**. [S.l.]: 2012. Disponível em:< <https://olhardigital.uol.com.br/noticia/conheca-a-historia-do-buscapede-um-dos-sites-brasileiros-de-maior-sucesso-na-rede/23574>>. Acesso em 02-Fev. 2017.

MIRANDA, Angelo Tiago. **Urbanização do Brasil: Consequências e características das cidades**. Disponível em:< <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/urbanizacao-do-brasil-consequencias-e-caracteristicas-das-cidades.htm>>. Acesso em: 14 de Maio. 2017.

ORACLE, Java. **Fusion Middleware Understanding Oracle WebLogic Server**. Disponível em: <[https://docs.oracle.com/cd/E24329\\_01/web.1211/e24446/ejbs.htm#INTRO255](https://docs.oracle.com/cd/E24329_01/web.1211/e24446/ejbs.htm#INTRO255)>. Acesso em: 17 de Março. 2017.

ORACLE. **Tecnologia Enterprise JavaBeans**. Disponível em:< <http://www.oracle.com/technetwork/java/index-jsp-140203.html>>. Acesso em: 25 de Março. 2017.

ORACLE. **Visão Geral do CDI**. Disponível em:< <http://docs.oracle.com/javaee/6/tutorial/doc/giwhl.html>>. Acesso em: 23 de Junho. 2017.

PFLEEGER, Shary Lawrence. **Engenharia de Software Teoria e Prática**. 2.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004. p2

SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de Software**. 9.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. p5.

SPRING, **Spring Framework Reference Documentation**. [S.l.] Disponível em: <<http://docs.spring.io/spring/docs/current/spring-framework-reference/htmlsingle/#spring-introduction> >. Acesso em 15 de Maio. 2017.

VASCONCELOS, Lívia Maria Rocha.; CARVALHO, Cedric Luiz. **Aplicação de Regras de Associação para Mineração de Dados na Web**. Disponível em:<[http://www.inf.ufg.br/sites/default/files/uploads/relatorios-tecnicos/RT-INF\\_004-04.pdf](http://www.inf.ufg.br/sites/default/files/uploads/relatorios-tecnicos/RT-INF_004-04.pdf)>. Acesso em 15 de Outubro, 2017.

THOMÉ, Antonio C. G. **Redes Neurais uma Ferramenta para KDD e Data Mining**. Disponível em: <[http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat\\_didatico/apostila\\_kdd\\_mbi.pdf](http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat_didatico/apostila_kdd_mbi.pdf)>. Acesso em 20 de Outubro, 2017.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**JOÃO DALLAMUTA** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**MARCELO HENRIQUE GRANZA** - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Eletrônico. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Doutorando em Engenharia Elétrica. Trabalha com os temas: conversores estáticos com alto fator de potência, acionamento e controle de motores e geradores elétricos de indução.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Automação 10, 64, 94, 120, 133, 165, 204, 216, 256

### C

Compulsória 1, 12

Confiabilidade 2, 18, 43, 45, 47, 94, 95, 133, 163, 166, 167, 173, 176

### E

Eficiência energética 10, 242, 243, 244, 250, 252

Energética 10, 1, 2, 3, 8, 13, 37, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 58, 59, 242, 243, 244, 250, 252, 253

### G

Geração 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 55, 56, 57, 59, 61, 64, 67, 83, 166, 167, 168, 173, 177, 243, 256

Geração distribuída 28, 31, 42, 45, 166, 173, 177

Grau 1, 4, 5, 10, 30, 32, 65, 66, 137, 162, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 263

### I

Ilhamento 149, 150, 161, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177

Impressão 3D 10, 204, 206

Intermitência 2, 8, 15, 16, 17, 31, 40, 43, 45, 47, 49, 50

### J

Jateamento 204, 207, 212, 213, 217

### M

Manta térmica 10, 242, 244, 246, 248, 249, 250, 251, 252, 253

Máquina injetora 242, 245, 246, 251

Matriz de energia elétrica brasileira 8, 1, 2

### N

Novas fontes 2, 43, 49

## O

Oferta 1, 3, 8, 9, 10, 16, 29, 44, 45, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 57, 59, 167, 255

## P

Paraconsistente 10, 166, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176, 178

Pesquisa 7, 11, 6, 13, 37, 42, 44, 106, 120, 165, 204, 243, 244, 253, 254, 255, 256

Processamento 129, 130, 132, 133, 134, 137, 149, 150, 161, 163, 164, 165, 177, 243, 259, 261

Produtos 11, 44, 50, 206, 253, 254, 255, 256, 264, 265, 266

Proteção 9, 24, 29, 30, 34, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 166, 167, 172, 177, 231, 241, 242, 244, 246, 248, 250, 251, 252

Proteção térmica 242, 244, 246, 248, 250, 251, 252

## R

Rede neural 166, 169, 173, 175, 176, 219, 220, 223, 224

Regularização 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 220, 225

Relé inteligente 10, 166, 168, 169, 171, 174, 175

## S

Sazonalidade 1, 2, 5, 8, 9, 10, 29

Segurança 8, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 25, 26, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 59, 88, 91, 92, 93, 94, 138, 166, 167, 171, 217, 231, 246

Sinais 11, 121, 122, 123, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 148, 149, 150, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 168, 169, 172, 174, 175, 214, 245

Supermercado 11, 254, 255, 256, 268

## T

Térmica 10, 1, 4, 8, 10, 11, 12, 21, 23, 44, 46, 47, 48, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 206, 230, 231, 232, 234, 242, 244, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253

Transformada de Fourier 149, 152

Transformada fracional de Fourier 9, 148, 149, 150, 157, 159, 161, 165

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**