

A close-up photograph of a hand holding a grey probe, testing a component on a circuit board. The background is blurred, showing other electronic components and lights. The image is overlaid with a brown, textured diagonal band.

Lilian Coelho de Freitas
(Organizadora)

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

Lilian Coelho de Freitas
(Organizadora)

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecário

Maurício Amormino Júnior

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Karine de Lima Wisniewski

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

A Atena Editora não se responsabiliza por eventuais mudanças ocorridas nos endereços convencionais ou eletrônicos citados nesta obra.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

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
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
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. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
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 – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
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
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
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. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
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
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves -Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
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
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
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 Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
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
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
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
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

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. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª 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
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília

Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Profª 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
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
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
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
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 Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
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. Lillian 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. Dr. 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. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará

Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal

Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão

Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo

Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana

Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí

Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo

Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecário Maurício Amormino Júnior
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Vanessa Mottin de Oliveira Batista
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadora: Lilian Coelho de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica e de computação: atividades relacionadas com o setor científico e tecnológico 4 / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-459-7

DOI 10.22533/at.ed.597200610

1. Engenharia elétrica. 2. Computação. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A Atena Editora apresenta o *e-book* “*Engenharia Elétrica e de Computação: Atividades Relacionadas com o Setor Científico e Tecnológico 3*”. O objetivo desta obra é mostrar aplicações tecnológicas da Engenharia Elétrica e de Computação na resolução de problemas práticos, com o intuito de facilitar a difusão do conhecimento científico produzido em várias instituições de ensino e pesquisa do país.

O *e-book* está organizado em dois volumes que abordam de forma categorizada e interdisciplinar trabalhos, pesquisas e relatos de casos que transitam nos vários caminhos da Engenharia Elétrica e de Computação.

O Volume III tem como foco aplicações e estudos de atividades relacionadas à Computação, abordando temas variados do *hardware* ao *software*, tais como automação e robótica, arquitetura de redes, Internet, computação em névoa, modelagem e simulação de sistemas, entre outros.

O Volume IV concentra atividades relacionadas ao setor elétrico e eletrônico, abordando trabalhos voltados para melhoria de processos, análise de desempenho de sistemas, aplicações na área da saúde, entre outros.

Desse modo, temas diversos e interessantes são apresentados e discutidos, de forma concisa e didática, tendo como base uma teoria bem fundamentada nos resultados práticos obtidos por professores e acadêmicos.

Boa leitura!

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
DESEMPENHO DE ISOLADORES SOB CHUVAS INTENSAS Darcy Ramalho de Mello DOI 10.22533/at.ed.5972006101	
CAPÍTULO 2	15
TRAVESSIA DO RIO AMAZONAS E SUPERAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA: PROJETO ESTRUTURAL E DESAFIOS CONSTRUTIVOS Juliana Nobre de Mello Motta Roberto Luís Santos Nogueira Luiz Carlos Mendes Mariana Souza Rechtman Renata Cristina Jacob de Jesus DOI 10.22533/at.ed.5972006102	
CAPÍTULO 3	27
PIRTUC: 15 ANOS DEPOIS - AVALIAÇÃO DAS AÇÕES DE INSERÇÃO REGIONAL DA UHE TUCURUÍ Sílvia Maria Frattini Gonçalves Ramos Rosana dos Santos Brandão DOI 10.22533/at.ed.5972006103	
CAPÍTULO 4	41
PLANO DE CORTE MANUAL DE CARGA Anderson Siqueira Nogueira Rodrigo Damasceno Souza Marcelo de Calazans Barcelos Suellen Karine Braga Vieira Walmir de Oliveira Campos DOI 10.22533/at.ed.5972006104	
CAPÍTULO 5	53
PROCEL RELUZ – ILUMINAÇÃO PÚBLICA E SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA EFICIENTES Adjeferson Custódio Gomes Adi Neves Rocha Fabiano Rodrigues Soriano Luís Ricardo Cândido Cortes Taís Mirele Fernandes da Silva Thiago Luís Campos Rodrigues DOI 10.22533/at.ed.5972006105	
CAPÍTULO 6	66
PRODUÇÃO EFICIENTE DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM CUSTO OPERACIONAL REDUZIDO Igor Ferreira do Prado	

Taís Mirele Fernandes da Silva
Marcelo Bento Pisani
Rodrigo Dórea da Silva
DOI 10.22533/at.ed.5972006106

CAPÍTULO 7..... 77

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM: BREVE PANORAMA

Adjeferson Custódio Gomes
Fabiano Rodrigues Soriano
Fábio Alexandre Martins Monteiro
Luís Ricardo Cândido Cortes
Victor Santos Matos
Vinícius de Souza Andrade Wanderley

DOI 10.22533/at.ed.5972006107

CAPÍTULO 8..... 88

REPRESENTAÇÃO DE MODELOS RACIONAIS NO PROGRAMA ATP

Sergio Luis Varricchio

DOI 10.22533/at.ed.5972006108

CAPÍTULO 9..... 100

UMA PROPOSTA PARA A IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DOS FENÔMENOS VTCDS EM INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS SUPRIDAS POR TRANSFORMADORES DELTA-ESTRELA ATERRADA

Adrian Ribeiro Ferreira
José Carlos de Oliveira
Paulo Henrique Oliveira Rezende

DOI 10.22533/at.ed.5972006109

CAPÍTULO 10..... 113

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA BAHIA

Adjeferson Custódio Gomes
Fabiano Rodrigues Soriano
Giovanna Buscatti Gonçalves
Luís Ricardo Cândido Cortes
Victor Santos Matos
Vinícius de Souza Andrade Wanderley

DOI 10.22533/at.ed.59720061010

CAPÍTULO 11..... 129

ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO HIDRO-SOLAR AUXILIADO POR UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA FORMA DE HIDROGÊNIO JUNTO À USINA HIDROELÉTRICA DE MANSO

Juarez Corrêa Furtado Júnior
Ennio Peres da Silva
Vitor Feitosa Riedel
Demóstenes Barbosa da Silva

Diogo Oliveira Barbosa da Silva
Ana Beatriz Barros Souza
Hélio Nunes de Souza Filho

DOI 10.22533/at.ed.59720061011

CAPÍTULO 12..... 146

ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Mateus Camargo Franco
Eduardo Machado dos Santos
Alex Itczak
Arian Rodrigues Fagundes
Artur Henrique Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.59720061012

CAPÍTULO 13..... 160

DESENVOLVIMENTO DE FUNCIONALIDADES COMPUTACIONAIS PARA ATENDIMENTO DOS NOVOS PROCEDIMENTOS DE REDE PARA ESTUDOS DE DESEMPENHO HARMÔNICO

Cristiano de Oliveira Costa
Sergio Luis Varricchio
Franklin Clement Véliz
Fabiano Andrade Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.59720061013

CAPÍTULO 14..... 174

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Guilherme Gomes dos Santos
Paulo Sérgio Zanin Júnior

DOI 10.22533/at.ed.59720061014

CAPÍTULO 15..... 188

APRENDIZADO AUTODIDATA DA LÍNGUA INGLESA

Lucas Eid Ramire Gonçalves
Luiz Eduardo Vieira Montanha
Marco Antonio Nagao

DOI 10.22533/at.ed.59720061015

CAPÍTULO 16..... 193

MODELAGEM DE PROCESSOS: UMA PROPOSTA DE MELHORIA PARA A ATUAÇÃO DAS EQUIPES DE SAÚDE DA ATENÇÃO BÁSICA

Ana Carla do Nascimento Santos
Jislane Silva Santos de Menezes
Almerindo Nascimento Rehem Neto
Adriana de Melo Fontes
Gilson Pereira dos Santos Júnior
Jean Louis Silva Santos

Cristiane Oliveira de Santana

DOI 10.22533/at.ed.59720061016

SOBRE A ORGANIZADORA.....	206
ÍNDICE REMISSIVO.....	207

DESEMPENHO DE ISOLADORES SOB CHUVAS INTENSAS

Data de aceite: 01/10/2020

Darcy Ramalho de Mello

<http://lattes.cnpq.br/5830387195942321>

<https://orcid.org/0000-0003-1253-6032>

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados de diversos estudos realizados para a avaliação do desempenho de isoladores sob chuva padronizada e sob chuva intensa. Para uma melhor compreensão dos resultados decorrentes do estudo realizado pelo Grupo de Trabalho (GT) D1-45 do Cigré quanto à avaliação do desempenho de isoladores quando submetidos a chuvas intensas é necessário entender o ensaio sob chuva com os parâmetros normalizados. O estudo sob chuva intensa foi necessário após relatos de diversas concessionárias sobre a ocorrência de falhas com precipitações superiores a 2 milímetros por minuto e que podem atingir comprovadamente até 10 milímetros por minuto. Como a revisão da IEC 60060.1 fixou a precipitação máxima a ser empregada nos ensaios dielétricos em 1 mm/min, os resultados sobre o desempenho dielétrico obtidos pelo GT serão enviados à IEC para subsidiar uma nova revisão da norma. Este trabalho apresenta também os resultados dos estudos realizados quanto à metodologia de ensaio sob chuva a ser empregada nos ensaios em isoladores para Ultra Alta Tensão (UAT), a influência da chuva na radiointerferência, avaliação da posição de ensaio mais crítica e no desempenho sob poluição, incluindo a influência das chuvas

ácidas, decorrentes dos elevados níveis de poluição.

PALAVRAS-CHAVE: Chuva, Isoladores, Desempenho dielétrico, Ensaio, Poluição.

ABSTRACT: This paper presents the results of several studies made to evaluate the performance of insulators under standardized rain and heavy rain. For a better understanding of the results from the study conducted by the Working Group (WG) D1-45 of Cigré, regarding the evaluation of insulator performance when submitted to heavy rainfall, it is necessary to understand a wet test with the standardized parameters. The study under heavy rain was necessary after reports from several electrical companies about the occurrence of failures with precipitations greater than 2 millimeters per minute and that can reach up to 10 millimeters per minute. As the revision of IEC 60060.1 fixed the maximum precipitation to be used in dielectric tests as 1 mm/min, the results about the dielectric performance obtained by the WG will be sent to the IEC to support a new revision of the standard. This work also presents the results of the studies carried out regarding the rain test methodology to be used in the tests on equipment for Ultra High Voltage (UAT), the influence of rain on radiointerference, evaluation of the most critical test position and the performance under pollution, including the influence of acid rains, resulting from high levels of pollution.

KEYWORDS: Rain, Insulators, Dielectric performance, Test, Pollution.

1 | INTRODUÇÃO

Na revisão da norma IEC 60060-1 [1] foi retirado do procedimento de ensaio sob chuva a opção de seleção da precipitação representando chuvas intensas. Nos últimos anos porém, diversas concessionárias de energia em todo o mundo apresentaram relatos consistentes, a partir de experiências operacionais, indicando que isoladores dimensionados e avaliados pelos padrões normalizados do ensaio sob chuva não apresentavam bom desempenho sob chuvas intensas, ou seja, precipitações superiores a 2 mm/min e que podem atingir comprovadamente até 10 mm/min [3]. Devido a isto, o CIGRÉ decidiu organizar um Grupo de Trabalho para avaliar se os parâmetros e os métodos de ensaio atualmente utilizados nos ensaios sob chuva são suficientes para abranger todos os tipos de ambiente, com destaque para a taxa de precipitação, uniformidade da precipitação – especialmente em UAT – e a resistividade da água usada no ensaio.

Além disso, resultados recentes de pesquisas significativas disponíveis indicam que solicitações combinadas de poluição e chuva devem ser consideradas no projeto de isoladores, especificamente no caso daqueles com superfícies hidrofóbicas, como os compostos, e os recobertos com silicone vulcanizado a temperatura ambiente (RTV) e indicam também a influência das chuvas ácidas, decorrentes da poluição ambiental, no desempenho dielétrico dos isoladores [3 – 6].

Os resultados deste estudo serão encaminhados à IEC (International Electrotechnical Commission) para orientar a revisão da IEC 60060.1 quanto às características da chuva normalizada e aos critérios a serem adotados para a medição da chuva durante ensaios em equipamentos para UAT. No Brasil, a norma brasileira de Técnica de Ensaio em Alta Tensão (ABNT NBR IEC 60060.1 [2]), quando da sua última revisão, já incluiu um anexo contemplando valores de precipitação pluviométrica que podem ser usados nos ensaios sob chuva, mediante prévio acordo entre as partes interessadas, superiores ao valor atualmente normalizado de 1 mm/min. Quanto aos ensaios em equipamentos para Ultra Alta Tensão, novos estudos devem ser realizados de modo a determinar o melhor posicionamento da estrutura de chuva nos ensaios, pois há a possibilidade da ocorrência de uma descarga disruptiva para a estrutura de chuva, caso os valores atuais empregados para garantir a uniformidade da chuva sejam mantidos. Uma possibilidade a ser estudada é a colocação da estrutura de chuva no teto do laboratório resultando em orientação de chuva diretamente na vertical.

Cabe ressaltar que o ensaio sob chuva, devido ao grande número de parâmetros envolvidos como precipitação, resistividade, característica do sistema de bombeamento, tipo de bico, tempo de condicionamento e medição junto ao item sob ensaio pode apresentar grande dispersão.

As atividades deste grupo de trabalho são de grande importância para o Brasil pelo histórico de ocorrência de chuvas consideradas intensas de até 5 mm/min em regiões onde já existem partes importantes do sistema elétrico de potência brasileiro, bem como para estudos, projetos e especificações de isoladores visando a expansão do sistema em regiões do país também susceptíveis a tais condições de chuva [3].

2 | DESEMPENHO EM CAMPO SOB SEVERAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Um estudo realizado nos Estados Unidos com isoladores de porcelana mostrou que a chuva foi responsável por aproximadamente 12% das 568 descargas disruptivas registradas, como pode ser visto na Figura 1 [3]. Um dos problemas observados neste estudo reside no fato que existem poucas informações sobre o desempenho de sistemas elétricos instalados nas regiões tropicais sob diversas condições ambientais. O mapa da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, sigla do inglês Food and Agriculture Organization), mostrado na Figura 2, indica os níveis de precipitação média total anual mundial medidos 1997, onde pode-se ver que a região brasileira apresenta níveis elevados de precipitação.

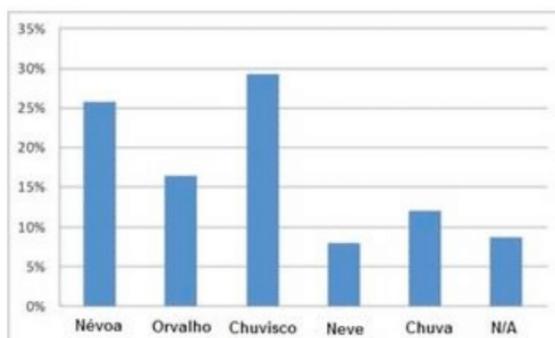


FIGURA 1 – Percentual de descargas disruptivas em função das condições ambientais [3]

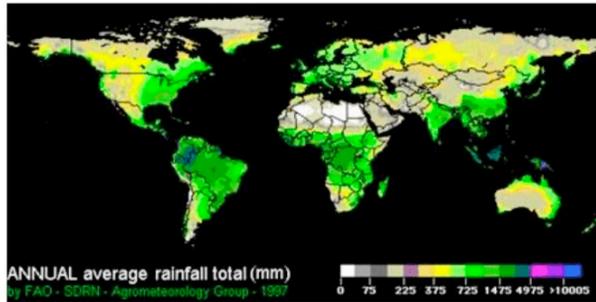


FIGURA 2 – Mapa da precipitação anual emitido pela FAO [3]

Os dados para áreas tropicais e semitropical verificados na literatura [3] indicam que enquanto uma intensidade de chuva de 1,5 mm/min ainda pode representar a chuva natural de alta intensidade, com elevadas taxas de repetibilidade anual, intensidades de chuva de 5-10 mm/min não são incomuns, como relatado pela China que mediu valores superiores a 9,9 mm/min em cinco províncias diferentes, em 2009. Outro problema observado é a classificação dada por diversos meteorologistas quanto ao tipo de chuva:

- Chuva leve – taxa média de precipitação < 2,5 mm/h;
- Chuva média – taxa média de precipitação entre 2,5 mm/h e 10 mm/h;
- Chuva intensa – taxa média de precipitação entre 10 mm/h e 50 mm/h;
- Chuva violenta – taxa média de precipitação > 50 mm/h.

Para a classificação acima deve-se considerar que muitos dos dados disponíveis sobre precipitação são apresentados em termos de intensidade de precipitação versus duração, para diferentes períodos de retorno do evento. A maioria dos dados disponíveis refere-se aos dados obtidos usualmente sobre as intensidades de chuva medidas em períodos variando de alguns minutos a várias horas, dado que a gravação da intensidade por um tempo muito curto, intervalo de minutos, é muito difícil. Nesse contexto, a comparação de desempenho em campo e em laboratório se torna difícil enquanto não se obtiverem dados meteorológicos em campo no momento de falha do equipamento.

3 I DESEMPENHO DE UM ISOLADOR SOB CHUVA ARTIFICIAL

Além da intensidade e da resistividade da chuva e de sua uniformidade durante um ensaio, o perfil do isolador exerce grande influência no seu desempenho nos ensaios dielétricos.

3.1 Influência dos parâmetros do isolador

A suportabilidade dielétrica de um isolador pode ser influenciada pela formação de fluxos contínuos de água que podem curto-circuitar saias sucessivas, como pode ser visto na Figura 3, resultando em uma redução no valor da tensão disruptiva quando comparado com o valor obtido na condição a seco [3, 7 a 9].

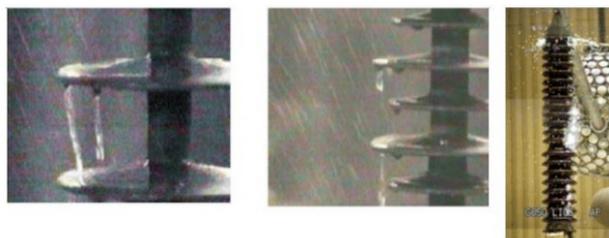
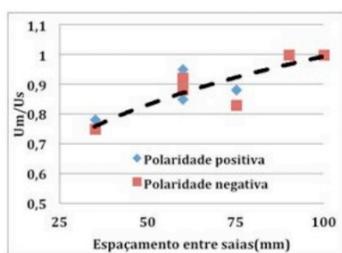
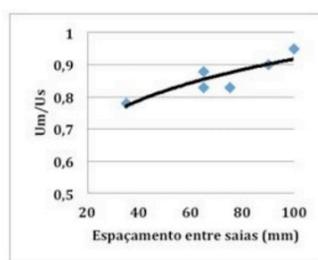


FIGURA 3 – Curto-circuito entre saias devido ao fluxo de água durante ensaio [3]

A importância do espaçamento entre saias pode ser vista na Figura 4, tanto para ensaios com impulso de manobra quanto para ensaios em frequência industrial, e pode-se verificar que a relação entre a tensão disruptiva sob chuva (U_m) e a tensão disruptiva a seco (U_s) é diretamente proporcional ao aumento do espaçamento entre as saias, indicando que os valores de U_m e U_s tendem a se igualar. Outro parâmetro que interfere na relação entre U_m e U_s é o diâmetro da saia do isolador (D). Nesse caso, deve-se tomar cuidado porque a necessidade de aumentar a distância de escoamento para melhorar o desempenho sob poluição pode fazer com que se aumente o diâmetro das saias do isolador, mas o aumento do diâmetro da saia é inversamente proporcional à variação da relação U_m/U_s , indicando um pior desempenho sob chuva do isolador, como pode ser visto na Figura 5. A influência do diâmetro da saia independe do tipo do isolador, como pode ser visto na Figura 6, seja ele de porcelana ou polimérico.

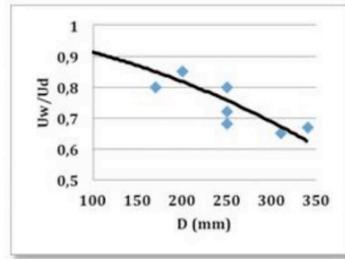
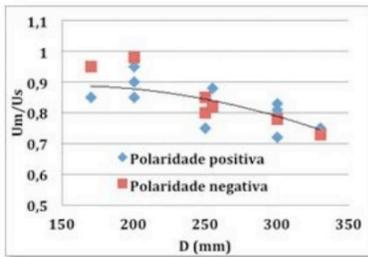


(a) Ensaios com impulso de manobra



(b) Ensaios em frequência industrial

FIGURA 4 – Avaliação da influência da distância entre saias [3]



(a) Ensaios com impulso de manobra

(b) Ensaios em frequência industrial

FIGURA 5 – Avaliação da influência do diâmetro da saia [3]

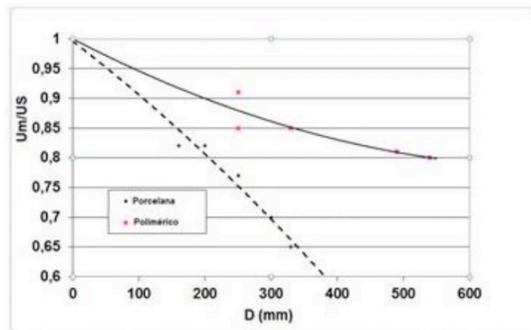


FIGURA 6 – Avaliação da influência do diâmetro da saia entre isolador de porcelana e polimérico [3]

Pode-se observar também na Figura 6 que a redução no valor da relação U_m/U_s é menor no isolador polimérico que no isolador de porcelana e tende para uma certa estabilização.

3.2 Influência da chuva nos ensaios de impulso de manobra

A influência da intensidade da chuva nos ensaios de impulso de manobra pode ser vista na Figura 7 para isoladores tipo suporte, com diversas formas de eletrodos. Foi encontrada pouca variação no valor da tensão com 50% de probabilidade de descarga (U_{50}) com polaridade positiva com o aumento da precipitação. Maior variação foi observada na polaridade negativa, embora todos os valores obtidos foram superiores aos valores com polaridade positiva. É interessante notar também a influência limitada do eletrodo de blindagem nos isoladores tipo suporte sobre a tensão disruptiva sob a chuva, como, ilustrado na Figura 7, principalmente no caso de polaridade positiva, que é a polaridade mais crítica.

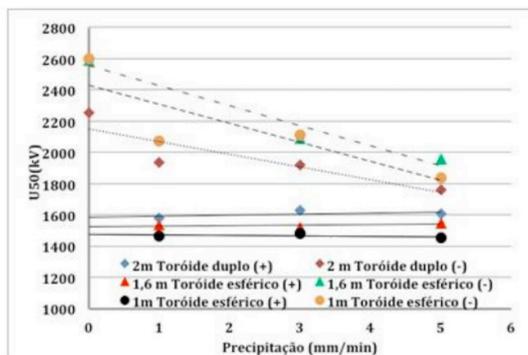


Figura 7 - Avaliação da influência da precipitação em um ensaio de impulso de manobra em isoladores tipo suporte com diversos eletrodos no topo [3]

A influência da condutividade da água sobre a tensão disruptiva é mostrada na Figura 8, para diversos valores de precipitação. A influência é bastante baixa na polaridade positiva até uma condutividade de água de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A influência é maior para a polaridade negativa, sendo interessante notar que a polaridade negativa se torna mais crítica do que positiva para a água com condutividades superiores a cerca de 300 MS/cm .

3.3 Influência da chuva nos ensaios de frequência industrial

A avaliação da precipitação e da resistividade foi realizada em isoladores para 145 kV, tipo suporte de porcelana e polimérico tipo bastão por meio da determinação de U50. Os resultados obtidos, mostrados na Figura 9, indicam que o valor de U50, em frequência industrial, sofre mais influência, tanto da precipitação quanto da resistividade, do que na aplicação de impulso de manobra na polaridade positiva, sendo que esta variação é inversamente proporcional à variação da precipitação e diretamente proporcional à variação da resistividade.

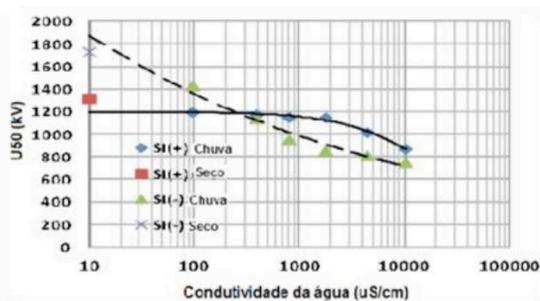
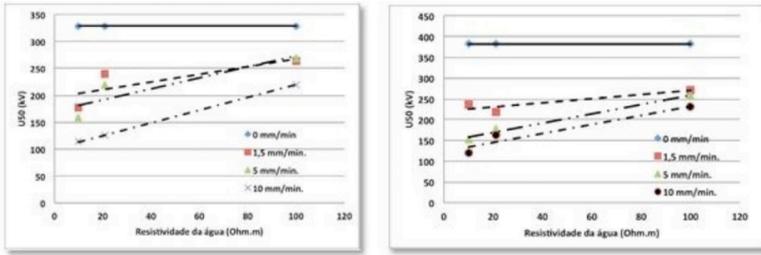


Figura 8 – Avaliação da influência da condutividade em um ensaio de impulso de manobra em uma cadeia com 23 isoladores tipo disco (120 kN) [5]



(a) Isolador tipo suporte de porcelana (b) Isolador composto tipo bastão

Figura 9 – Avaliação da influência da precipitação e da resistividade em frequência industrial em isoladores para 145 kV [3]

3.4 Influência da posição dos isoladores nos ensaios sob chuva

A posição do isolador durante um ensaio sob chuva também tem influência nos resultados, conforme estudos realizados na avaliação do desempenho de um isolador composto tipo bastão (25 saias, distância de arco a seco de 927 mm e distância de escoamento de 2860 mm) durante um ensaio de determinação da tensão disruptiva em frequência industrial, sob chuva [10]. Foram consideradas seis posições de ensaio diferentes, como pode ser visto na Figura 10. Os resultados podem ser vistos na Figura 11 e pode-se constatar que a posição vertical é a mais crítica, devido ao efeito cumulativo das gotas de chuva que formam um fio contínuo, alternativamente, de uma saia para a outra, curto-circuitando algumas saias, como já mostrado na Figura 3.

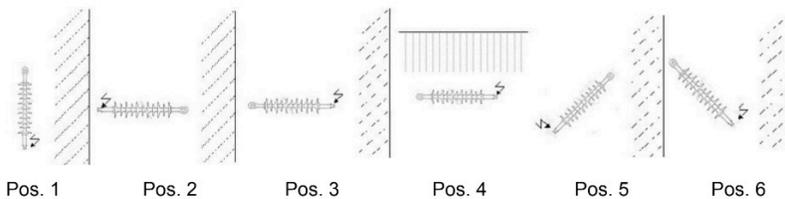


Figura 10 – Posições do isolador e da energização em relação à chuva [12]

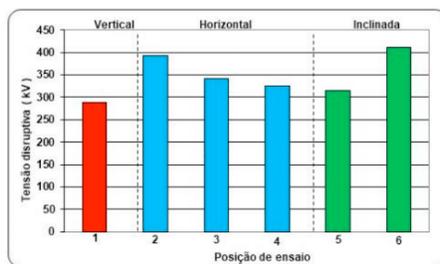
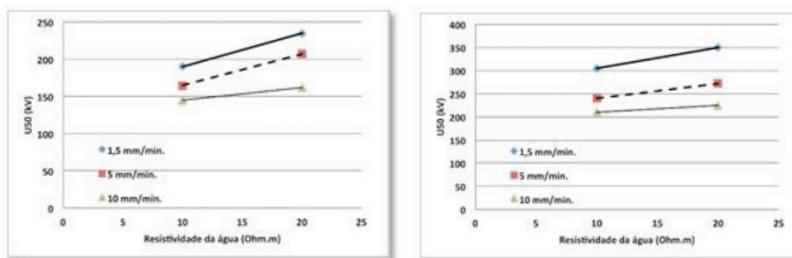


Figura 11 – Resultado do ensaio da determinação da tensão disruptiva em frequência industrial sob chuva [12]

3.5 Influência da chuva nos ensaios com corrente contínua

A avaliação da precipitação e da resistividade foi realizada em isoladores para 145 kV, tipo suporte de porcelana e polimérico tipo bastão por meio da determinação de U50. Os resultados obtidos, mostrados na Figura 12, indicam que o valor de U50, em corrente contínua de polaridade negativa, apresenta as mesmas conclusões observadas em frequência industrial.



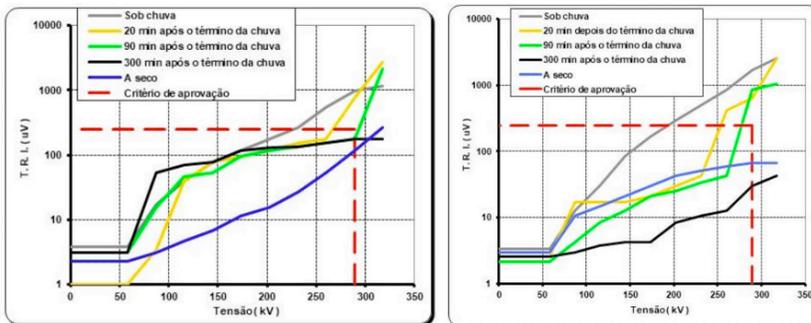
(a) Isolador tipo suporte de porcelana

(b) Isolador composto tipo bastão

Figura 12 – Avaliação da influência da precipitação e da resistividade em corrente contínua de polaridade negativa em isoladores para 145 kV [3]

3.6 Influência da chuva nos ensaios de radiointerferência

Para reduzir o corona e a radiointerferência, os projetos de cadeias de isoladores e isoladores tipo suporte utilizam anéis corona, mas sua eficiência é verificada apenas nas condições limpas e secas, utilizando a ABNT NBR 15121 [11]. Mas pode ser ouvido sob uma linha de transmissão ou perto de uma subestação, durante um dia chuvoso, principalmente logo após o término da chuva, um som de estalo muito alto devido às descargas corona. A atividade corona é fortemente afetada pelas condições climáticas, aumentando em uma ou duas ordens e, conseqüentemente, a radiointerferência é afetada da mesma maneira. Para avaliar o efeito da chuva, foram realizados ensaios de medição da tensão de radiointerferência (TRI) em cadeias de 500 kV, com isoladores de vidro de temperado e com um isolador composto, tanto na condição a seco e sob chuva normalizada segundo a ABNT NBR IEC 60060.1. A medição da TRI também foi realizada durante o período de secagem dos isoladores [12]. As curvas características da TRI obtidas, podem ser vistas na Figura 13, indicando que a chuva aumenta significativamente o valor da tensão de radiointerferência e que o tempo necessário para reduzir os efeitos da chuva sobre a radiointerferência é maior na cadeia com isolador composto do que na cadeia com isoladores de vidro, provavelmente causado pelas gotas mantidas na superfície do isolador composto devido à sua hidrofobicidade.



(a) Com isolador de vidro temperado

(b) Com isolador composto tipo bastão

Figura 13 – Resultado do ensaio de TRI em cadeias [11]

3.7 Repetibilidade do ensaio sob chuva

Uma análise profunda sobre a repetibilidade dos ensaios sob chuva em corrente alternada foi realizada por Riu e outros [13], sendo os resultados de ensaio obtidos a partir de um mesmo laboratório e de diferentes laboratórios. Os resultados obtidos confirmaram a elevada dispersão dos valores. Variações acima de 25% foram encontradas entre ensaios sucessivos, independentemente do laboratório onde os mesmos foram realizados. A mesma conclusão foi obtida em um estudo interlaboratorial envolvendo o CEPEL, o LacTEC e o IEEE/USP [14].

A técnicas de produção da chuva e os instrumentos de sua medição, bem como a natureza química da água, podem, portanto, serem eliminadas como fontes principais de desvio. A distribuição aleatória da intensidade da pulverização ao longo do isolador pode ser considerada como o agente mais significativo a influenciar a tensão disruptiva. Exemplos de pulverização não uniforme e uniforme podem ser vistas na Figura 14.



(a) Distribuição não uniforme

(b) Distribuição uniforme

Figura 14 – Avaliação da distribuição da chuva [3]

3.8 Influência da poluição

A avaliação da influência da chuva no desempenho de isoladores em corrente

contínua foi realizada em diversos isoladores tipo suporte, na polaridade negativa [3]. A Figura 15 apresenta os resultados dos ensaios realizados nos isoladores poluídos pelo método da camada sólida, umidificados por névoa limpa e por chuva com 2 níveis de precipitação. Os resultados obtidos mostraram que o ensaio com umidificação por névoa limpa foi mais crítico que os ensaios sob chuva, exceto para o isolador 3, onde houve uma similaridade entre o resultado com névoa limpa e chuva com 7 mm/min, provavelmente causado pela pequena distância entre saias do isolador.

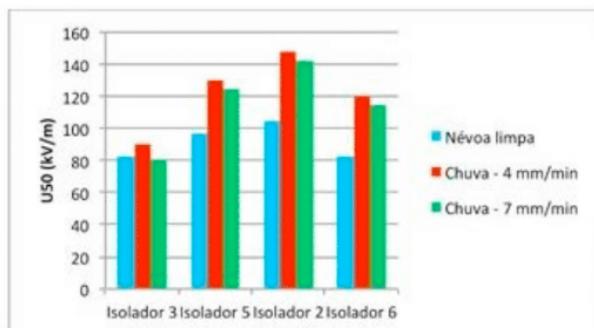


Figura 15 – Avaliação do desempenho de isoladores poluídos pelo método da camada sólida (DDSE = 0,03 mg/cm² e DDNS = 0,18 mg/cm²) [3]

4 I DESEMPENHO DE UM ISOLADOR PARA SISTEMAS EM UAT

A avaliação do desempenho sob chuva para sistemas em UAT está condicionada ao posicionamento da estrutura de chuva. Para evitar a ocorrência de uma descarga disruptiva para a estrutura de chuva, a mesma deverá estar posicionada a uma distância entre 7 m e 15 m do isolador sob ensaio. Nestas distâncias, a possibilidade de se obter uma chuva não uniforme aumenta exponencialmente com o aumento da distância entre a estrutura de chuva e o isolador. Uma possibilidade sugerida por diversos laboratórios é posicionar a estrutura de chuva no teto do laboratório e fazer uma chuva vertical. Neste caso, o problema aparece quando o eletrodo no topo do isolador não é oco. Para avaliar esta condição, foi realizado no Cepel um ensaio de impulso de manobra com chuva vertical em um isolador tipo suporte para 750 kV tendo no seu topo um eletrodo vazado e um eletrodo não vazado (ver Figura 16). Os resultados obtidos, com diversos níveis de precipitação, podem ser vistos na Figura 17 e pode-se observar que os eletrodos apresentam desempenho similar, com ambas as polaridades, até uma precipitação de 3 mm/min. Para precipitações mais elevadas a proteção realizada pelo eletrodo não vazado se torna mais efetiva. É necessário, no futuro, realizar este ensaio com outros tipos de

tensão como corrente alternada e contínua para se ter melhor uma idéia do efeito de proteção do toróide não vazado.



(a) Eletrodo vazado

(b) Eletrodo não vazado

Figura 16 – Tipos de eletrodos usados no ensaio com chuva vertical [3]

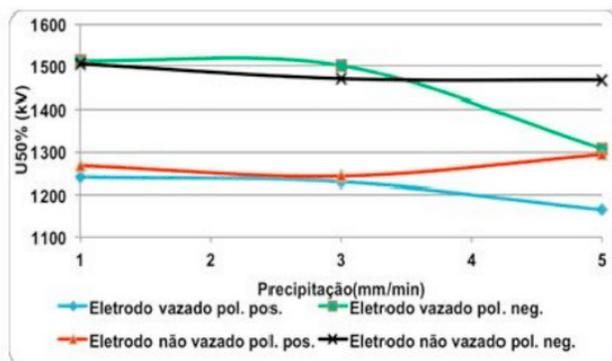


Figura 17 – Resultado do ensaio com chuva vertical em isolador tipo suporte com diferentes eletrodos [3]

5 | CONCLUSÃO

- A experiência de campo tem assinalado que o desempenho de isoladores sob chuva pode ser crítico, especialmente para isoladores tipo suporte na posição vertical.
- A média das condições de chuva natural é bem representada pelos parâmetros da chuva normalizada, mas podem ocorrer chuvas com precipitações instantâneas mais elevadas em condições climáticas especiais.
- Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros da chuva normalizada são adequados para o ensaio de impulso de manobra.

- Os isoladores poluídos têm seu desempenho dielétrico melhor avaliado pelos ensaios determinados pelas normas ABNT NBR 10621 [15] e ABNT NBR 16724 [16] do que pelos ensaios sob chuva.
- Devido ao desempenho observado em frequência industrial e em corrente contínua é aconselhável que a IEC 60060.1 possua um anexo indicando as condições para realização de ensaio sob chuva com valores mais elevados de precipitação e resistividade mais baixa, mediante prévio acordo entre as partes interessadas.
- Há necessidade de realizar mais estudos sobre a metodologia do ensaio sob chuva para equipamentos para UAT.
- A posição vertical é a mais crítica nos ensaios sob chuva.
- A chuva intensifica a radiointerferência, tanto com isoladores de vidro temperado quanto com isoladores compostos.
- O tempo necessário para reduzir os efeitos da condição úmida sobre a raiointerferência é maior em isoladores compostos do que em isoladores de vidro, provavelmente pela manutenção de gotículas na superfície dos isoladores compostos devido à hidrofobicidade.
- É recomendável que sejam consideradas as condições previstas de precipitação em regiões do país onde há histórico de chuvas intensas, superiores a 2 mm/min, para as especificações de ensaios dielétricos nos equipamentos das subestações, linhas de transmissão e redes de distribuição.

REFERÊNCIAS

[1] IEC 60060-1: High-Voltage Test Techniques – Part 1: General definitions and test requirements, Edition 3.0, 2010

[2] ABNT NBR IEC 60060-1: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio, 2013

[3] D. R. de Mello e O. B. de Oliveira Filho: Desempenho de isoladores sob chuva intensa, XXIV SNPTEE, 2017

[4] A. R. Koriavin, O. V. Volkova, V. G. Golovny e A. V. Almazov: Electric strength of Ultra high-voltage post insulating constructions under rain conditions, 7th International Symposium on High Voltage Engineering, 1991

[5] A. Pigni, D. R. de Mello, Z. Jun), R. Houlgate, K. Kondo, B. Kruska, R. Matsuoka, F. Perrot, G. Pirovano, V. Sklenicka, J. Seifert, R. Wesley, D. Wu e M. Yamarkin: Impact of rain on Insulator performance, Brochura Cigré número 634, 10/2015

- [6] A. Pigini, D. R. de Mello, Z. Jun), R. Houlgate, K. Kondo, B. Kruska, R. Matsuoka, F. Perrot, G. Pirovano, V. Sklenicka, J. Seifert, R. Wesley, D. Wu e M. Yamarkin: Impact of rain on Insulator performance - Laboratory and field experience toward guidelines for the selection of insulators under rain condition, including heavy rain, *Electra*, no 283, 12/2015, pp 63 – 69
- [7] D.R. de Mello, O. Oliveira Filho, J. A. Cardoso, R. M. de Azevedo e S. G. Carvalho: Melhoria do desempenho de isoladores utilizados em subestações classe 800 kV sob chuva intensa - XXI SNPTEE, 2011
- [8] O. Oliveira Filho, D. R. de Mello, J. A. Cardoso, R. M. de Azevedo, S. G. Carvalho e W. A. S. Cruz: Flashover Tests Under Wet Conditions on Full and Sectioned UHV Insulators, *Bienal Cigré 2010*, artigo D1-201
- [9] O. Oliveira Filho, J. A. Cardoso, D. R. de Mello, R. M. de Azevedo, S. G. Carvalho: Use of booster sheds to improve the performance of 800 kV multicone type insulators under heavy rain, *Gaodiana Jishu/High Voltage Engineering* 11/2010; ISSN: 1003-6520, CN: 42-1239/TM(11):11502-11509., DOI:10.1109/ICHVE.2010.5640720
- [10] D. R. de Mello e F. J. de O. Corrêa: Wet power frequency tests on composite insulators, XIII ISH, 2001.
- [11] ABNT NBR 15121: Ensaio de radiointerferência em isoladores para alta-tensão, 2004
- [12] D. R. de Mello e J. A. A. S. Cardoso: Evaluation of the Influence of Wet Condition on Radiointerference Measurements, *Primeiro Seminário Cubano de Engenharia Elétrica*, 2008
- [13] J. Riu, B. Hutzler, S. Rowe, J. Huc and P. Maurin: Wet tests under a.c. voltage and switching impulses procedure and significant parameters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 1, 1988
- [14] D. R. de Mello, A. C. F. da Silva, M. A. Ravaglio, J. M. M. e Silva, A. Piantini, A. Pereira, F. H. Kameyama: Inter Comparação Laboratorial de Ensaios Dielétricos sob Chuva, *I Encontro Nacional sobre Técnicas de Ensaio em Alta Tensão*, COBEI/ABNT, 1987
- [15] ABNT NBR 10621: Isoladores - Ensaio sob poluição artificial - Método de ensaio, 10/2005
- [16] ABNT NBR 16724: Isoladores utilizados em sistemas de alta-tensão em corrente contínua – Ensaio de poluição artificial, 12/2018

CAPÍTULO 2

TRAVESSIA DO RIO AMAZONAS E SUPERAÇÃO DA FLORESTA AMAZÔNICA: PROJETO ESTRUTURAL E DESAFIOS CONSTRUTIVOS

Data de aceite: 01/10/2020

Juliana Nobre de Mello Motta

Marte Engenharia

Roberto Luís Santos Nogueira

Isolux Infrastructure

Luiz Carlos Mendes

UFF

Mariana Souza Rechtman

Marte Engenharia

Renata Cristina Jacob de Jesus

Marte Engenharia

RESUMO: Este IT descreve os principais aspectos desafiadores que foram superados tanto no projeto como na construção das Linhas de Transmissão do Sistema Tucuruí - Macapá – Manaus, mais especificamente nas LTs 230 e 500kV Tucuruí – Jurupari – Oriximiná – Macapá, com enfoque na travessia do rio Amazonas, bem como na floresta amazônica e de suas áreas alagadas, tendo em vista a importância desta interligação das principais cidades do norte do país, Manaus e Macapá, antes isoladas eletricamente do Sistema Interligado Nacional (SIN). Serão tratados os aspectos principais de otimização aplicados neste projeto de características exclusivas, como o vão de 2.108 m de extensão e torres de circuito duplo com alturas de 296 m, necessários para se atravessar o rio Amazonas Além disso, as soluções de projeto e construtivas para se transpor o bioma

amazônico, cuja floresta apresenta um dossel com cerca de 40m de altura, e que apresenta extensas áreas permanentemente alagadas, no caso específico da LT, um trecho contínuo de 70 km. A dependência de grandes cidades da região amazônica por geração térmica é superada com a instalação dessas novas LTs. O abastecimento energético por energia provinda de geração hidroelétrica beneficia o meio ambiente, na medida que minimiza a emissão de CO₂. Serão apresentadas as análises do projeto da torre de 296m de altura, incluindo o cálculo de cargas, a seleção da estrutura e o projeto de componentes estruturais e conexões. Em projetos típicos, torres estruturadas em perfis cantoneiras representam a solução mais adequada, porém para a travessia em questão, será mostrada a avaliação técnica/econômica e os benefícios da opção por perfis tubulares. O comportamento estrutural deste tipo de torre, nomeado GTS, será discutido e a razão para a escolha das propriedades estruturais estarão presentes neste estudo. Além disso, a vibração induzida pelo vento e a análise não-linear da estrutura deve ser considerada para este tipo de torre. A definição da estrutura será justificada com a verificação dos efeitos dinâmicos e a visualização das deformações. De forma a assegurar a fabricação e montagem de alta precisão deste tipo de torre, GTS, algumas técnicas principais, os desafios e inovações serão apresentados. Para completar a fabricação das duas torres GTS, foram tomadas as medidas de controle de qualidade do material com ensaios não destrutivos e testes físicos e químicos. Será demonstrado o desafio de fabricar grandes tubos de aço com 28 milímetros

de espessura, sendo necessários testes a fim de se obter a melhor solução na técnica de dobragem dos perfis. Simultaneamente, a tensão residual e sua distribuição foram testadas e medidas para assegurar que as tensões residuais fossem mínimas na fabricação dessas peças. As principais técnicas sobre a construção das duas torres de suspensão serão fornecidas em detalhe no desenvolvimento do IT. Os principais tópicos que serão abordados seguem descritos abaixo:

- Esquema da travessia;
- Definições de carregamento de vento;
- Hipóteses de carregamentos;
- Normas de dimensionamento utilizadas;
- Materiais aplicados;
- Análise estrutural:Pré-dimensionamento,cálculo não linear, indicação do membro mais carregado e ligação mais solicitada, verificação da deformação, análise dinâmica;
- Aproveitamento do elevador industrial na construção como grua;
- Procedimento de construção.

PALAVRAS-CHAVE: Travessias, cálculo estrutural, construção.

1 | INTRODUÇÃO

Torres de Suspensão: Para cruzar a extensão do rio de 2.108 m, o tipo torre de suspensão (GTS) foi escolhido para minimizar a sua carga, como a altura necessária de 296 m (altura da fase inferior 257,5 m). As torres são feitas de aço perfil tubular, cujo membro principal tem as dimensões 1530x28 mm (diâmetro x espessura). O peso total da torre é de 2381 tf e sua base 48 m x 48 m. Como a extensão do rio supera o vão da travessia, uma torre foi instalada em uma ilha e outra na ponta do rio.

Torres de Ancoragens: Para ancorar os condutores especiais, duas torres com um circuito de configuração vertical de fases, chamadas GTA, foram instaladas, antes e após as torres de suspensão de acordo com o esquema mostrado na Figura 1. Estas torres têm 40 m de altura e suportam a diferença longitudinal entre o condutor da travessia especial e o condutor padrão da LT: AAAC 1055 MCM.

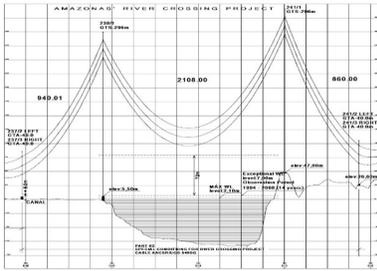


FIGURA 1 - Esquema da Travessia



FIGURA 2 – Imagem das Travessias

Cabo condutor: Com o vão longo da travessia foi necessário utilizar um condutor especial com núcleo de aço de alta resistência (330 MPa) para reduzir a flecha do cabo e altura da torre, e camadas externas de liga de alumínio para atender as especificações elétricas. Vários tipos de cabos foram avaliados e a melhor escolha técnico-econômica foi o condutor AACSR UGS com carga de ruptura de 59.400 kgf.

Cabos para-raios: Dois OPGW (330 mm²) foram instalados, composto por fios de aço revestido de alumínio e tubo de aço contendo 36 fibras ópticas com carga de ruptura de 44.930 kgf.

2 | PRESSÕES DE VENTO

De uma forma geral, as normas internacionais para as linhas de transmissão têm sua precisão restrita a torre com alturas de até 60 metros e extensão de comprimentos de até 800 m. Para superar a situação, foram utilizados fatores de correção nas fórmulas e a norma de vento adotada foi a EN50341.

Alturas dos componentes:

Condutores = 155 m

Para-raios = 175 m

Isoladores = 265 m

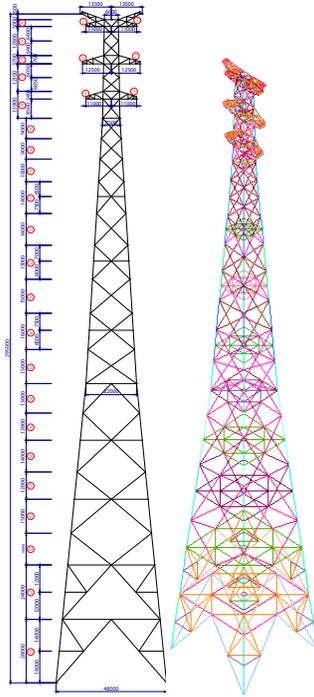


FIGURA 2 – Silhueta da torre GTS

Componente	Vento (kgf/m ²)
Condutor	145
Para-raios	148
Isolador	260

Tabela 1 – Pressões de vento nos cabos

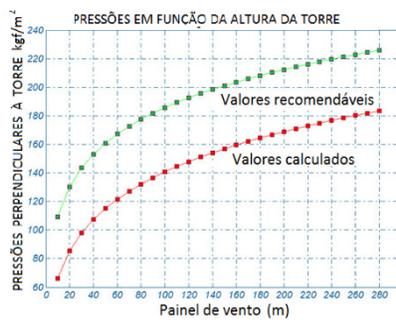


FIGURA 3- Pressões de vento na torre

Fonte:Batávia

3 I DIMENSIONAMENTO

Foi feita a análise não linear da estrutura (Figura2), utilizando dois programas TTA e SAP 2000 foi adotada na análise estrutural global, que é compatível com as estruturas de treliça de grandes alturas submetidas a grandes cargas. Durante a análise, as cargas que atuam sobre cada membro da torre e os deslocamentos correspondentes no topo da torre foram investigados e comparados. O limite de resistência de cada membro da torre foi calculado de acordo com as recomendações da norma ASCE 10-97.

A torre em perfis tubulares de aço foi recomendada para este projeto, pois a torre GTS tinha uma grande altura, grandes cargas. A estrutura de tubular de aço tem boa rigidez e propriedades de alta resistência.

Abaixo pode ser visualizada a diferença de peso entre a torre com a geometria escolhida e a torre com estrutura de cantoneiras:

Tipos	Torre em perfis tubulares	Torre em cantoneiras
Peso em tf	2381	3282

Tabela 2 – Pesos das torres

Os perfis foram calculados com material Q345B (equivalente ASTM A572 GR50). Para as placas de ligação Q235B (equivalente A36).

O dimensionamento da estrutura à flambagem local e às forças globais de estabilidade foi executado de acordo com as normas

ASCE 48-11 e AISC 360-05, listadas com as seguintes equações:

$$\text{ASCE 48-11: } \left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_y}{I_x} + \frac{M_y c_x}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{It} + \frac{Tc}{J} \right)^2 \right]^{1/2} \leq F_t \quad (3.1)$$

$$\text{AISC 360-05: Quando } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.2)$$

$$\text{Quando } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (3.3)$$

Onde: P=força normal; A=seção transversal; V=cortante; Mx=momento fletor no eixo x; My= momento fletor no eixo y; Ix=Inércia no eixo x; Iy= Inércia no eixo y; t=espessura; T=momento torçor. Pr = compressão solicitante; Pc=compressão admitida; Mr=flexão solicitante, Mc=flexão admitida.

Para exemplificar o cálculo da estrutura, é demonstrado na tabela 3 o

montante mais solicitado da estrutura $\phi 1530\text{mm} \times 28\text{H}$ (HTS).

Compressão máxima	31978 kN
Compressão admissível	36339 kN
Utilização	88% - Ok

Tabela 3 – Montante mais solicitado

Na tabela 4 é demonstrada a ligação mais solicitada da estrutura:

T (Tração)	21860 kN
N (Compressão)	32861 kN

Tabela 4 - Esforços na ligação



FIGURA 3 – Montante da Torre

Flange and Bolt Parameters	
D1 (diâmetro externo)	1910 mm
D2 (diâmetro interno)	1530 mm
Espessura do perfil	190 mm
D0 (diâmetro da linha de parafuso)	1720 mm
Diâmetro do parafuso	60 mm
n (numero de parafusos)	28
t (espessura da chapa)	42 mm

Tabela 5 – Parâmetros da chapa de ligação e parafusos

Parafuso (Material 8.8)	
Máxima tração	780.7 kN
Tração admissível	890.9 kN
Utilização	88% - Ok
Chapa (Material Q345)	
Momento máximo	249 N/mm ²
Momento admissível	295 N/mm ²
Utilização	84% - Ok

Tabela 6 – Cálculo da ligação

Quatro tipos de ligações foram adotadas para a estrutura, conforme Figura 4.

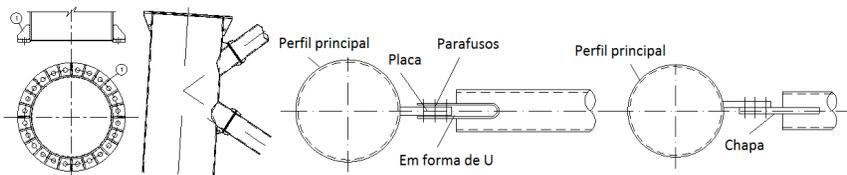


FIGURA 4 - Ligações

Com base na análise da estrutura (Figura 2), os primeiros modos de vibração foram mostrados na Figura 5 abaixo:

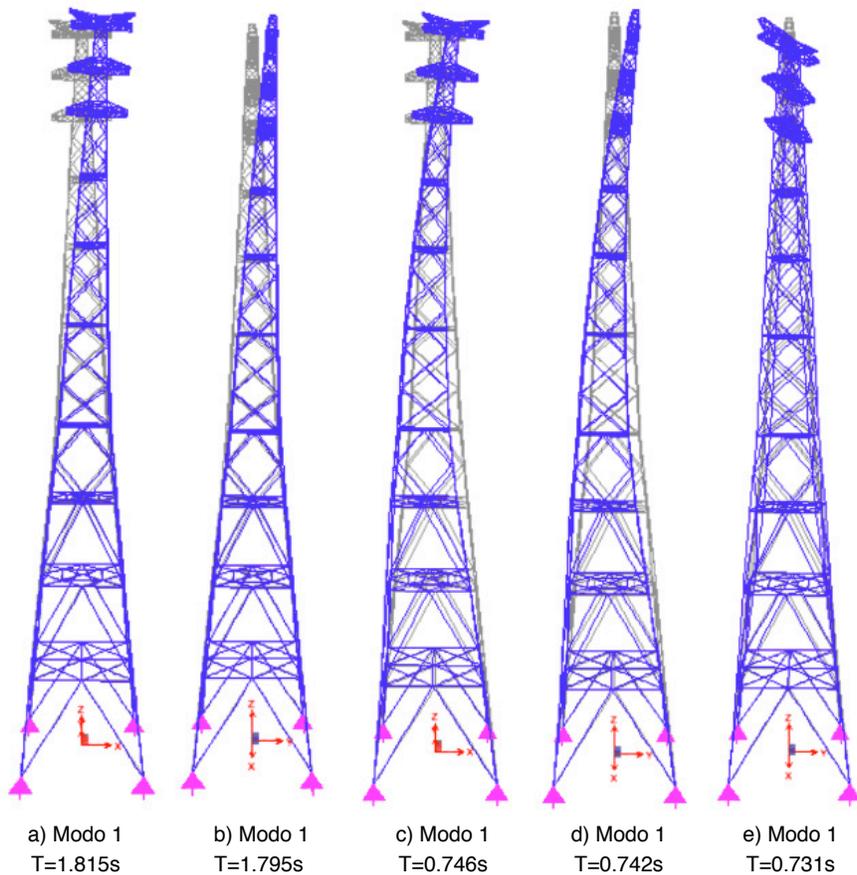


Figura 5 – Análise dinâmica da estrutura

4 | CONSTRUÇÃO



FIGURA 6 – Visão global das torres

Os desafios apareceram desde a fabricação, foi difícil de fabricar uma quantidade enorme de tubos de aço usando placa 28 milímetros de espessura, de modo que testes de foram realizados, a fim de se obter dados para flexão das peças. Simultaneamente, a tensão residual e sua distribuição foram testadas e

medidas para assegurar que as tensões residuais fossem mínimas. Além disso, a manipulação dos membros à vibração foi feita para libertar a tensão residual.

As dificuldades específicas relacionadas com a travessia do Rio Amazonas tiveram que ser vencidas com planejamento de construção, tais como: interrupção total do tráfego fluvial não permitidos, longo vão para suspender os cabos sob alta tensão, um tratamento especial ao cabo para evitar danos, especial cuidado para evitar qualquer contato dos cabos à terra, entre outras características.

Para distância cabo-solo foi necessário manter a altura de 72 m em relação ao nível máximo de cheia do rio. No entanto, durante a montagem dos cabos foi necessário reduzir esta altura para a 30 m para minimizar a tensão para 7900 kgf para cada subconductor. Caso contrário, seria necessário aplicar uma tensão de 9400 kgf.

Outro cuidado refere-se às roldanas para evitar alguma perda de tensão. O processo para suspender o condutor AACSR ao longo da travessia foi executado na seguinte sequência (Figura7):



FIGURA 7 – Lançamento dos cabos

Φ 8 mm corda (através de um barco), Φ 18 mm corda, cabo de aço Φ 20 mm, 2 x Φ 20 mm de cabo de aço, Φ 28 mm de cabo de aço, 2 x Φ 28 mm de cabo de aço, 4 x condutor AACSR.

As aprovações de restrição de trânsito foram autorizadas sob rigoroso cuidado.

A interrupção durante o lançamento limitou-se a 600 m de largura, centrada no rio, enquanto fora desta área apenas embarcações com mastros de até 25 m foram autorizados. À noite, o tráfego para embarcações altura até 40 m de altura

foi permitido. Barcos da polícia foram responsáveis por assegurar a execução do planejamento.

Para a instalação da torre GTS na região alagada, foi necessário instalar uma plataforma com 17000 m³ de concreto, 450 estacas de aço com 50 m de profundidade (Figura8).

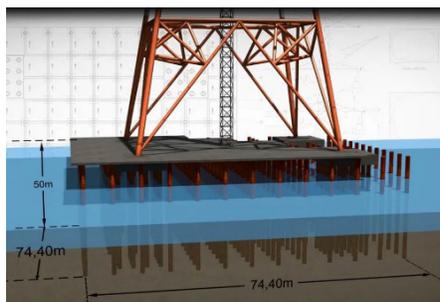


FIGURA 8 – Fundação

Além disso, para cerca de 70 km ao longo de uma extensão contínua da linha, o material só poderia ser transportado através de navios. Foi a melhor escolha para evitar a construção de estradas de acesso no meio da floresta Amazônica.



FIGURA 9 – Transporte de material

FIGURA 10 –
Construção da
torre

O sistema de aterramento foi especialmente projetado para combinar com a alta resistividade do solo. Portanto, foi necessário instalar 5 estacas de aterramento a uma profundidade de penetração mínima de 33 m. O elevador também foi aterrado neste sistema. Uma camada especial de concreto foi aplicada sobre a base de torre para cumprir os requisitos de segurança.

5 | IMPACTOS AMBIENTAIS

Este Projeto Linha de Transmissão em análise possibilitou a conexão das principais cidades de Macapá e Manaus com a Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Antes disso essas cidades eram isoladas do SIN e exclusivamente dependente de usinas termelétricas. A redução estimada nas emissões é o equivalente a 1,3 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

Além disso, para reduzir o impacto sobre a floresta tropical virgem, a Linha de Transmissão foi projetada considerando a catenária do condutor acima do topo das árvores (Figura 11), atingindo até 40 m na temperatura máxima de operação de 70 °C. Além disso, foram adotadas torres autoportantes (em vez de estaiadas) para minimizar a área de desmatamento. Para ter acesso construção e lançar os cabos, a faixa de operação foi restringida a uma largura de 5 m. Além disso, a localização da torre em áreas de preservação protegidas foi proibida sob rigorosa vigilância.



FIGURA 11 – Linha de Transmissão por cima da floresta

6 | CONCLUSÃO

O projeto da LT Tucuruí - Xingu - Jurupari representou um novo paradigma para a Rede Elétrica Brasileira, devido a uma ampla gama de desafios. Em primeiro lugar, por estar no interior da Floresta Amazônica; em segundo lugar, por possuir a torre de transmissão mais alta das Américas (296 m e terceira do mundo); e, por último, o vão mais longo em área plana no Brasil (terceira nas Américas), incluindo técnicas especiais de construção em zonas húmidas.

Com base em estudos estruturais, a estrutura apresentada uma geometria adequada, incluindo vantagens claras quando comparado com outras geometrias

mencionadas neste artigo. O comportamento estrutural está de acordo com as melhores práticas de engenharia, comprovando a eficiência do projeto.

Os aspectos ambientais foram especialmente considerados no projeto, como a Linha atravessa um dos biomas mais importantes e preservados do mundo, a Floresta Amazônica. A construção foi desafiadora devido a aproximadamente 70 quilômetros de extensão contínua sobre zonas húmidas, a ausência de rodovias, lançamento dos cabos dentro de apenas 5 m de faixa, transporte de material através de balsas, estação fluvial de produção de concreto, entre outros.

REFERÊNCIAS

- (1) Hui, Y., Liu, Y. and Zhao, D. – Geometric nonlinear analysis of transmission tower with continuous legs”. Proceedings of International Conference on Advances in Steel Structures, Hong Kong, 1996.
- (2) CAO, J., PACKER, J. A. Design of Tension Circular Flange Joints in Tubular Structures. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction.vol.34, n.1, p.17-25, First Quarter 1997.
- (3) Q/GDW384. The manufacturing code for transmission line steel tubular tower, 2009.
- (4) EN Publication 50341 - Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV, 2012
- (6) R.L.S. Nogueira, E. Cavalcanti, J. Rocha, J.N.M. Motta, S.M.M. Felix, R.M. Souza, A.A. Menezes, Amazon River Crossing and Rainforest Issues in Brazil- The Tucuruí - Jurupari – Macapá- OHTL System - Design Optimization, Sustainability and Overall Challenges, Cigré Canada Conference 2014.
- (7) LIN Zhitian, ZHANG Dachang, DAI Gangping, LI Buhui, WANG Chaosheng, ZHAO Wenbo - Design, Fabrication and Erecting of the Long Span Transmission Tower for Crossing the Amazon River of 500kV TL Tucuruí–Xingu–Jurupari–Oriximiná - Cigré Canada Conference 2014.

PIRTUC: 15 ANOS DEPOIS - AVALIAÇÃO DAS AÇÕES DE INSERÇÃO REGIONAL DA UHE TUCURUÍ

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 18/07/2020

Sílvia Maria Frattini Gonçalves Ramos

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A –
Eletronorte
Brasília – DF
<http://lattes.cnpq.br/8425313423099959>

Rosana dos Santos Brandão

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A –
Eletronorte
Brasília – DF
<http://lattes.cnpq.br/2758366447372624>

RESUMO: Este artigo relata os principais resultados da avaliação feita ao Plano de Inserção Regional da UHE Tucuruí – PIRTUC, que foi iniciado em 2002 e deverá ser concluído em 2017. Foram avaliados: o processo jurídico-administrativo de implantação das ações, o resultado dos projetos, bem como a eficácia dos mesmos na promoção do desenvolvimento sustentável. São abordados aspectos positivos e dificuldades surgidas no decorrer de seus 15 anos de existência. Foram implantados 124 projetos nos sete municípios limítrofes à barragem da UHE Tucuruí, nas áreas de educação, esporte, cultura, qualificação de instituições públicas; saúde, saneamento básico, infraestrutura, infraestrutura urbana e administrativa, renda, trabalho e qualidade de vida.

PALAVRAS-CHAVE: Ação socioambiental, Avaliação de ações socioambientais,

Compensações sociais.

PIRTUC: 15 YEARS LATER – EVALUATION OF REGIONAL INSERTION ACTIONS AT TUCURUÍ HPP

ABSTRACT: This study reports the main results of the assessment made to the Regional Insertion Plan of Tucuruí Hydroelectric Power Plant HPP - PIRTUC, which was started in 2002. The following issues were evaluated: the legal-administrative process for implementing the actions, the results, as well as projects effectiveness in promoting sustainable development. Positive aspects and difficulties arising during its 15 years of existence are addressed. There were implemented 124 projects in the seven municipalities bordering the lake of Tucuruí HPP, in the areas of education, sport, culture, qualification of public institutions; water and sewage, transport infrastructure, urban and administrative equipments, income, work and quality of life.

KEYWORDS: Social and environmental action, Evaluation of social and environmental actions, Social compensation.

1 | INTRODUÇÃO

Em 2002, por necessidade de ampliar rapidamente a oferta de energia elétrica, pois vigorava o racionamento no país, a UHE Tucuruí passou a operar na cota de projeto, a cota 74m, que era dois metros acima da cota usual de operação. Para tanto, o licenciamento ambiental estabeleceu condicionantes que previam a realização de estudos de impactos

ambientais, cenários socioeconômicos, planos de desenvolvimento sustentável para os municípios da região de influência da usina, dentre outros.

Neste contexto, foi formulado o Plano de Desenvolvimento Sustentável da UHE Tucuruí – PDST, em conjunto com os atores regionais. Este Plano estabeleceu metas e diretrizes necessárias ao desenvolvimento desejado, contemplando a melhoria da infraestrutura social e econômica e o fortalecimento das atividades produtivas.

A partir deste planejamento, a SECTAM – Para, órgão de licenciamento da UHER Tucuruí definiu, a época, medidas compensatórias socioambientais objetivando a promoção do desenvolvimento regional e a melhoria das condições de vida da população da área de influência da UHE Tucuruí, atribuindo responsabilidades à Eletronorte. Assim, tendo o PDST como base, a Eletrobras Eletronorte elaborou o Plano de Inserção Regional da UHE Tucuruí - PIRTUC. Documento que pautou a contribuição da Empresa ao desenvolvimento dos municípios a montante da barragem. A avaliação de resultado das ações do PIRTUC é o objeto de análise do presente informe técnico.

2 | O PIRTUC

O Plano de Inserção Regional da UHE Tucuruí – PIRTUC foi iniciado em 2002 e aplicado nos municípios paraenses: Breu Branco, Goianésia do Pará, Itupiranga, Jacundá, Nova Ipixuna, Novo Repartimento e Tucuruí, a montante da usina, no sentido de contribuir com a consolidação socioeconômica e o desenvolvimento sustentável dos mesmos. O recurso de R\$ 200 milhões destinado à formação de parcerias na implantação de projetos, que deveria ter sido aplicado em 20 anos, se esgotará em 15 anos.

Foram realizadas ações nas áreas de educação, esporte, cultura, lazer, saúde, saneamento básico, projetos produtivos, urbanização, infraestrutura produtiva e social. A implementação destas ações foi efetivada através da celebração de convênios entre a Eletrobras Eletronorte e Governo do Estado, prefeituras municipais, associações, instituições de ensino e pesquisa, cooperativas, movimentos sociais. Todos os parceiros entraram com um valor de contrapartida de no mínimo 10% do valor do projeto e com o compromisso de gerenciar e manter em funcionamento as ações planejadas.

Alguns projetos tiveram a abrangência regional, como: o projeto de cooperação técnica fortalecimento de capacidade institucional e da gestão das ações voltadas às populações atingidas pelos empreendimentos da Eletronorte; a implantação e administração de sistema de fornecimento de vales-alimentação em cartão magnético para os atingidos; Cooperação entre a Eletronorte e Cooperativas,

decorrente do Programa Social dos Expropriados da Primeira Etapa de Tucuruí – PROSET; Projeto de Criação de Peixes em tanques-rede no parque Aquícola de Breu Branco III; Implantação de campus avançado da Universidade Federal do Pará-UFPA, com o objetivo da criação de cursos regulares de graduação, com prioridade para o curso de engenharia. Foram investidos cerca de R\$ 35 milhões nos projetos regionais, 17,5% dos recursos do PIRTUC.

No âmbito do PIRTUC, também foram realizadas articulações institucionais e contrapartidas viabilizando a implantação de programas federais e estaduais no atendimento das demandas dos municípios. Foram priorizados: a implantação do Programa Luz para Todos e programas no setor de saneamento básico, proporcionando a ampliando da oferta de água encanada, esgotamento sanitário, drenagem urbana e coleta de lixo.

3 I ASPECTOS HISTÓRICOS E SOCIAIS DOS MUNICÍPIOS

3.1 A microrregião da UHE Tucuruí

A Microrregião de Tucuruí, retratada na Figura 1, está localizada no sudeste do Pará, a montante da barragem, e é formada por sete municípios: Breu Branco, Goianésia do Pará, Itupiranga, Jacundá, Nova IPIXUNA, Novo Repartimento e Tucuruí. Esta Microrregião experimentou, desde a década de 70, intenso dinamismo.

A UHE Tucuruí é um marco na marcha para o oeste brasileiro. À época, a região de influência da usina era uma fronteira de ocupação no Estado do Pará, sendo que quatro dos sete municípios limieiros ao reservatório foram instalados na década de 90, após a construção da primeira casa de força da usina.

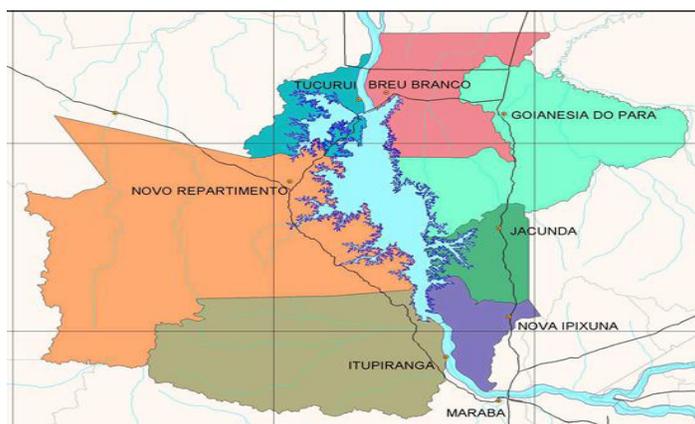


FIGURA 1 – Municípios a montante da UHE Tucuruí

A expansão da fronteira na Amazônia, a partir da década de 1970, caracterizou-se por crescimento da população bem superior ao crescimento da população brasileira, estabelecendo singular dinâmica regional com a ocupação de terras devolutas, implantação de núcleos de assentamento rural e formação de inúmeros novos núcleos urbanos, os quais ainda se encontram em processo de consolidação.

3.2 Processos migratórios em curso na microrregião da UHE Tucuruí

Segundo dados do Censo 2010/IBGE, a população regional é de 359.332 habitantes, apresentando média de densidade demográfica de 15,67 hab/km², e com maioria da população residindo no espaço urbano (68,09%). (ver Tabela 1)

Cabe considerar que em 1991, vários municípios ainda não haviam sido criados. Entretanto, verifica-se que a região do entorno da UHE Tucuruí cresceu o dobro da população paraense no período de 1991 a 2010 e mais do que o triplo da população brasileira.

Município	População			IDHM			
	Rural	Urbana	Total	IDHM-E	IDHM-L	IDHM-R	IDH-M
Breu Branco	23.185	29.308	52.493	0,422	0,781	0,555	0,568
Goianésia	9.354	21.082	30.436	0,404	0,743	0,585	0,560
Itupiranga	30.730	20.490	51.220	0,364	0,746	0,543	0,528
Jacundá	5.677	45.683	51.360	0,509	0,752	0,628	0,622
Nova Ipixuna	6.919	7.726	14.645	0,435	0,766	0,590	0,581
Novo Repartimento	34.100	27.950	62.050	0,376	0,741	0,557	0,537
Tucuruí	4.686	92.442	97.128	0,548	0,800	0,675	0,666
Microrregião Tucuruí	114.651	244.681	359.332	0,437	0,761	0,590	0,580
Estado do Pará	2.389.492	5.191.559	7.581.051	0,528	0,789	0,646	0,646
Brasil	29.830.007	160.925.792	190.755.799	0,637	0,816	0,739	0,727

Tabela 1: População e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal em 2010

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, 2013.

No primeiro quinquênio dos anos 2000, dois fatores contribuíram significativamente para a ativação do fluxo migratório para a região:

- Obras da segunda etapa da UHE Tucuruí e eclusas do rio Tocantins; e
- Projetos de Assentamento agrícola implantados pelo INCRA.

A construção da segunda etapa da UHE Tucuruí empregou no pico das obras civis, ano 2001, 7.146 trabalhadores. As obras da usina foram concluídas em dezembro de 2006 (Tabela 2).

ANO	1998	1999	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Trabalhadores	2.935	3.509	5.892	7.146	5.707	3.600	2.696	2.479	1.356

Tabela 2 – Número Máximo de Trabalhadores contratados para a construção da 2ª etapa da UHE Tucuruí

Fonte: Eletronorte /ETC

Quanto às obras das eclusas do rio Tocantins, estas ocorreram somente após a assinatura do Convênio nº 310-DNIT/DAQ em 29.12.2006. O que propiciou o recrutamento dos trabalhadores provenientes da obra da usina, reduzindo o desemprego da desmobilização da UHE Tucuruí. O efetivo máximo de trabalhadores nas Eclusas foi de 3.736 pessoas, verificado em julho de 2010.

Em relação aos Projetos de Assentamento do INCRA (PA), nos últimos 30 anos, foram criados 102 PAs nos sete municípios do entorno do reservatório da usina, conforme descrito na Tabela 3.

Município	Projetos de Assentamento	Hectares	Famílias Assentadas	População Estimada*
Breu Branco	6	43.662,29	745	3.725
Goianésia	6	46.041,62	882	4.410
Itupiranga	35	288.467,53	5.215	26.075
Jacundá	1	21.000,00	331	1.655
Nova Ipixuna	8	43.523,24	914	4.570
Novo Repartimento	36	575.723,77	7.916	39.580
Tucuruí	10	32.201,91	747	3.735
Total Municípios Montante	102	1.050.620,35	16.750	83.750
Total Região sul do Pará	511	4.679.037,24	72.212	361.060

Tabela 3 – Projetos de Assentamento do INCRA

Fonte: INCRA – [HTTP://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php](http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php) - Relatório de Assentamentos do INCRA SR 27 Pará/Marabá – Atualizado em 21_11_2016.

Foram assentadas 16.750 famílias, cerca de 84 mil pessoas, em 1.050.620,35 hectares. (Ver Tabela 3). Considerando a macrorregião sul do Pará, a ocupação

populacional promovida pelos PAs foi expressiva: 511 projetos criados, com 72.212 famílias assentadas, aproximadamente 360 mil pessoas.

Tal dinâmica tem trazido reflexos no ordenamento do espaço rural e urbano dos municípios, com a elevação das demandas por infraestrutura e equipamentos sociais e significativas alterações ambientais.

4 | METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Como metodologia para a avaliação geral do programa e de seus resultados no propósito da indução ao desenvolvimento regional e da melhoria da qualidade de vida da população foi cotejada a evolução do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal - IDHM - em suas várias dimensões, para os anos de 1991, 2000 e 2010, dos municípios beneficiados.

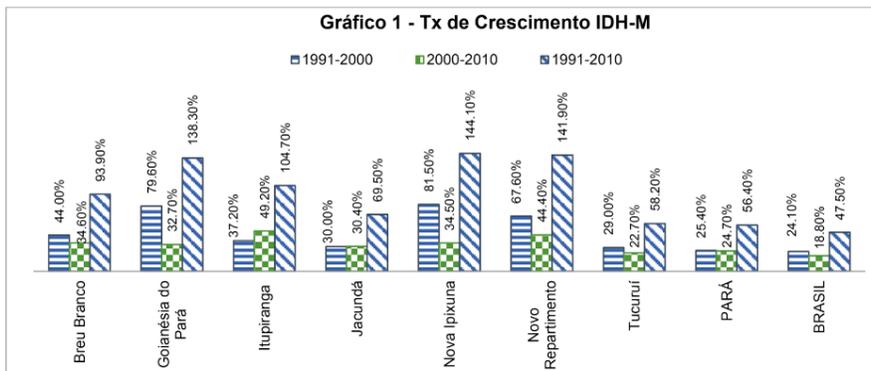
Assim, cada município foi analisado, considerando a sua história de formação, a caracterização do seu território e demografia e a evolução do IDHM em suas três dimensões: Educação, Saúde e Renda. São apresentadas as ações do PIRTUC, classificadas segundo a contribuição a cada dimensão do IDHM:

- Educação, Esporte e Cultura;
- Saúde e Saneamento Básico; e
- Renda, Trabalho e Qualidade de Vida.

Cabe observar que a metodologia não permite quantificar a contribuição de cada stakeholder ou das políticas públicas ao processo de desenvolvimento regional. Não há como considerar a pressão de outra frente de ocupação dos municípios, como o processo migratório alavancado pelos Projetos de Assentamento do INCRA, no desenvolvimento socioeconômico e no comportamento dos indicadores. Tão pouco, a análise dos indicadores leva em conta os ciclos econômicos e o seu rebatimento no território estudado.

5 | AÇÕES DO PIRTUC E A EVOLUÇÃO DOS INDICADORES DE DESENVOLVIMENTO – IDHM

Entre 1991 e 2010, os Indicadores de Desenvolvimento Humano Municipal - IDHM dos municípios ainda são baixos, porém as taxas de crescimento destes Indicadores nos municípios a montante da UHE Tucuruí, de maneira geral, superaram as taxas de crescimento do Estado do Pará e do Brasil, conforme o exposto no Gráfico 1.



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, (PNUD, Ipea, e FJP), 2013.

Em seguida, apresentamos as ações do PIRTUC, classificadas segundo a contribuição a cada dimensão do IDHM (Educação, Longevidade e Renda), bem como os gráficos com as taxas de crescimento de cada dimensão.

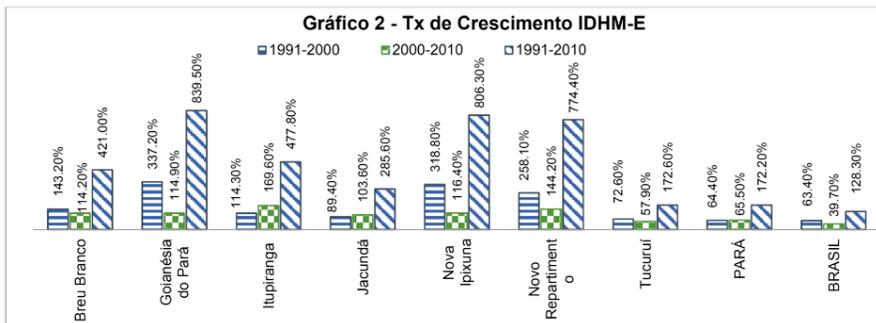
5.1 Evolução do Índice do Desenvolvimento Humano Municipal Educação - IDHM-E

A Eletrobras Eletronorte investiu cerca R\$ 36 milhões, correspondente a 18% da verba destinada ao PIRTUC, em ações nas áreas de educação, esporte e cultura, as quais estão sintetizadas na Tabela 4. Foram construídas 30 novas escolas de diversos tamanhos, outras escolas foram reformadas, ampliadas e equipadas para atendimento às áreas urbanas e rurais. Também, foram construídas e estruturadas secretarias municipais de educação, quadras poliesportivas, complexos esportivos de acordo com as necessidades priorizadas pela municipalidade. Foram estabelecidas, em comum acordo, as contrapartidas municipais aos projetos implantados, sendo que o terreno, o projeto básico e o compromisso de manter e operar as instalações foram as exigências mínimas da contrapartida municipal para a formatação dos convênios.

O Gráfico 2 apresenta as taxas de crescimento do IDHM – E (dimensão Educação) dos municípios estudados, nas décadas de 1991 a 2000, 2000 a 2010 e no período 1991 a 2010, em comparação às taxas de crescimento destes períodos no Estado do Pará e do Brasil. Ressalta-se o crescimento vigoroso da dimensão Educação refletido no IDHM – E dos municípios do entorno da UHE Tucuruí.

Breu Branco	Construção de 2 escolas, Reforma e ampliação da Secretaria de Educação e Cultura, Reforma da Escola Infantil Origem do Saber, Aquisição de equipamentos de informática e ar condicionado para escolas do mun., construção de 04 quadras poliesportivas nas vilas e comunidades da zona rural.
Goianésia	Construção de 3 Escolas no bairro Floresta, no bairro Novo Horizonte e no bairro Novo Horizonte, Construção do Complexo Poliesportivo
Jacundá	Construção de 2 escolas com 12 salas de aula cada uma no bairro Alto Paraíso e no bairro Novo Horizonte
Nova Ipixuna	Construção de 10 escolas em alvenaria mista, Construção de quadra poliesportiva muro/ampliação/ construção de sala de aula da escola Nair Braz Lima, Construção de 2 escolas na Vila Deserto e Maria Divina
Itupiranga	Reforma e ampliação da escola Serafina de Carvalho, Construção da escola Getúlio Vargas, Construção da Secretaria de Educação, Cultura e Desporto, Construção de 5 escolas no bairro 12 outubro, na Vila Califórnia, na Vila Lago Vermelho, na Vila Mangueira, na Vila São Pedro totalizando 14 salas de aula.
Novo Repartimento	Construção de uma escola no bairro Vale do Sol II, Construção da escola Rei dos Reis.
Tucuruí	Construção de escola com 20 salas de aula e quadra poliesportiva no bairro Nova Matinha, Construção de escola com 20 salas de aula e quadra poliesportiva no bairro Getat
TOTAL	R\$ 36 milhões

Tabela 4 - Ações do PIRTUC nas áreas de Educação, Esporte e Cultura



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, (PNUD, Ipea, e FJP), 2013

5.2 Evolução do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Longevidade - IDHM-L

A dimensão Longevidade engloba os segmentos de saúde e saneamento básico. Foram investidos cerca de R\$37 milhões, que corresponderam a 18,5% dos recursos destinados ao PIRTUC.

Breu Branco	Construção de Posto de Saúde com fornecimento de material cirúrgico, Ações de atenção básica a saúde, Execução dos sistemas de abastecimento de água em comunidades do Município, Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, Melhoria e manutenção da infraestrutura de transporte e saneamento.
Goianésia	Execução dos serviços remanescentes do prédio da casa de passagem, Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, Promoção da coleta de lixo e remoção de pacientes, Melhoria e manutenção da infraestrutura de transporte e saneamento, Doação de 01 caminhão coletor e compactador de lixo.
Jacundá	Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica -NUVE, Ações de atenção básica a saúde, Melhoria e manutenção da infraestrutura de transp. e saneamento, Doação de 01 caminhão coletor e compactador de lixo
Nova Ipixuna	Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, Construção de Posto de Saúde com aquisição de mobiliário e equipamentos, Melhoria e manutenção da infraestrutura de transporte e saneamento, Concessão de caminhão coletor e compactador de lixo, Doação de um caminhão coletor e compactador de lixo.
Itupiranga	Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, Melhoria e manutenção da infraestrutura de saneamento, Construção de Posto Avançado de Saúde
Novo Repartimento	Construção de Posto de Saúde na vicinal Catitu, Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, implantação de sistema de abastecimento de água, melhoria e manutenção da infraestrutura de transporte e saneamento básico.
Tucuruí	Execução do Programa Educação em Saúde e Vigilância Epidemiológica - NUVE, Implantação do sistema de abastecimento de água, Melhoria e manutenção da infraestrutura de saneamento.
TOTAL	R\$ 37 milhões

Tabela 5 – Ações do PIRTUC na área de Saúde e Saneamento Básico

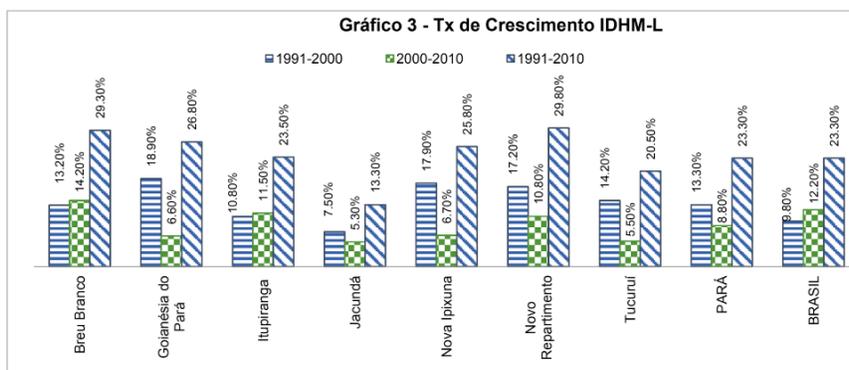
Os recursos foram investidos na construção e manutenção de postos de saúde, educação em saúde, campanhas de vacinação, construção de sistemas de abastecimento de água, implantação de sistema de esgotamento sanitário e recolhimento e tratamento de resíduos sólidos, conforme Tabela 5.

Observa-se que, a despeito dos esforços realizados, o desempenho deste indicador na região, na década 2000 a 2010, não foi elevado.

Por um lado, com a implantação dos NUVES a taxa de sub-registro de óbitos, que o Ministério da Saúde estimava em 50% no Estado do Pará, foi significativamente reduzida na região. Por outro lado, a estruturação da atenção básica à saúde e, principalmente o saneamento básico, nestes municípios ainda é muito precário, frente à dinâmica migratória e o perfil populacional da população que chega na região.

O Gráfico 3 apresenta as taxas de crescimento do IDHM – L (dimensão Longevidade) dos municípios estudados nas décadas 1991 a 2000, 2000 a 2010 no

período 1991 a 2010, em comparação às taxas de crescimento destes períodos do Estado do Pará e do Brasil.



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, (PNUD, Ipea, e FJP), 2013.

5.3 Evolução do Índice - Desenvolvimento Humano Municipal Renda - IDHM-R

Na dimensão Renda do IDHM se enquadram as ações classificadas como Renda, Trabalho e Qualidade de Vida. Estas ações englobaram a implantação de infraestrutura de apoio aos setores produtivos, como recuperação de estradas vicinais, a implantação de projetos produtivos, bem como o investimento necessário à melhoria da qualidade de vida da população como o apoio a obras de urbanização, construção de terminais rodoviários, construção de prédios públicos, etc. Foram gastos cerca de R\$ 60 milhões, aproximadamente 30% dos recursos destinados ao PIRTUC.

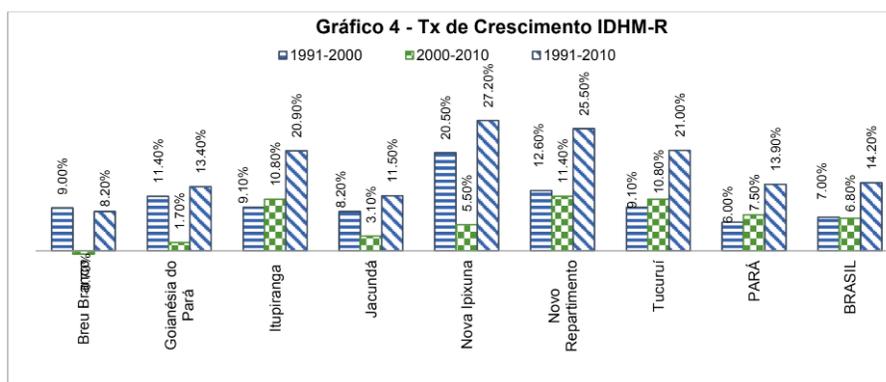
Breu Branco	Recuperação de estradas vicinais, Construção do Terminal Rodoviário, Construção do Complexo Administrativo, Pavimentação em CBUQ, Pavimentação com bloquetes, Doação de maquinários. Fornecimento de cimento p/ execução de 4.310m de calçadas, Execução das obras de pavimentação asfáltica, Execução dos serviços de urbanização da orla,
Goianésia	Construção dos prédios dos Conselhos Municipais., Execução de projeto de urbanização, e obras de limpeza e regularização do sub-leito de ruas, recuperação de estradas vicinais, Desenvolvimento da agricultura familiar, Criação racional de galinha caipira, Fornecimento de mobiliário e equip. de informática p/ os prédios públicos mun., Construção de prédios públicos, Recuperação de 531km de estradas vicinais, Construção de Rodoviária, Pavimentação asfáltica em CBUQ, Doação de 01 trator de esteira.
Jacundá	Implantação do núcleo de secagem e armazenamento de grãos, Recuperação de estradas vicinais, Recuperação de 1.179km de estradas vicinais, Desenvolvimento da agricultura familiar, Pavimentação asfáltica em CBUQ, Construção do Terminal Rodoviário.

Nova Ipixuna	Construção de galpão e aquisição de equipamentos para uma fábrica de bloquetes, Construção da fábrica de blocos, tubos de concreto, Recuperação de estradas vicinais, Desenvolvimento da agricultura familiar, Pavimentação de vias públicas, Construção do Complexo Administrativo, Melhoria da limpeza pública na área urbana e rural, Pavimentação asfáltica em CBUQ.
Itupiranga	Recuperação de estradas vicinais, Pavimentação com bloquetes, Recuperação de estradas vicinais, Melhoria da limpeza pública na área urbana e rural, Construção do Complexo Administrativo, Pavimentação asfáltica em CBUQ.
Novo Repartimento	Construção da Prefeitura, recuperação de estradas vicinais, drenagem e pavimentação asfáltica de ruas, Construção do Fórum Judiciário, Recuperação de 482km de estradas vicinais, Execução dos serviços de drenagem e pavimentação asfáltica e em bloquetes do bairro Vila Tucuruí.
Tucuruí	Drenagem e pavimentação asfáltica dos bairros Bela Vista e Jardim Alvorada, recuperação de ruas/estradas de acesso as comunidades rurais, Recuperação de 771km de estradas vicinais.
TOTAL	R\$ 59 milhões

Tabela 6 – Ações do PIRTUC na área de Renda, Trabalho e Qualidade de Vida

O Gráfico 4 apresenta as taxas de crescimento do IDHM – R (dimensão Renda) dos municípios estudados nas décadas 1991 a 2000, 2000 a 2010 no período 1991 a 2010, em comparação às taxas de crescimento destes períodos do Estado do Pará e do Brasil.

Observa-se que na dimensão Renda, as taxas de crescimento dos indicadores regionais foram superiores às taxas de crescimento do Pará e do Brasil.



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, (PNUD, Ipea, e FJP), 2013.

Complementando os indicadores do IDHM, a Tabela 7 apresenta as estatísticas da evolução dos domicílios com água encanada, com energia elétrica e com coleta de lixo na área urbana nos municípios do entorno da UHE Tucuruí. Entre 2000 e

2010, as condições de habitação da população regional foram significativamente melhoradas. Os indicadores de habitação apontam para a consolidação dos municípios com melhoria da qualidade de vida.

Domicílios com:	Itupiranga		Novo Repartimento		Tucuruí		Nova Ipixuna		Jacundá		Goianésia do Pará		Breu Branco	
	2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010	2000	2010
Água encanada	10%	84%	14%	79%	54%	94%	20%	88%	39%	91%	24%	85%	19%	88%
Energia Elétrica	47%	89%	44%	88%	97%	99%	57%	94%	85%	97%	74%	97%	70%	97%
Coleta de lixo (área urbana)	72%	82%	22%	88%	85%	96%	23%	88%	64%	91%	14%	89%	73%	98%

Tabela 7 - CONDIÇÃO DE HABITAÇÃO

Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, (PNUD, Ipea, e FJP), 2013.

6 | AÇÕES PENDENTES E SUAS CAUSAS

Na concepção original do PIRTUC foi estabelecido o valor de R\$ 200 milhões a ser aplicado em projetos de cunho social, demandados pelos municípios a montante da UHE Tucuruí ao longo de no máximo 20 anos.

A forma de implantação dos projetos foi por meio de convênios que selaram a parceria da Eletrobras Eletronorte com os as prefeituras municipais; órgãos no âmbito do governo estadual e federal; ou ainda organizações não governamentais, como cooperativas e associações.

Os principais óbices à formação de parcerias e celebração de convênios com o Estado e municípios foram:

- Dificuldade na formatação dos convênios considerando a necessidade de contrapartidas, pois há necessidade de previsão orçamentária do órgão público;
- Falta de capacitação da municipalidade para a elaboração de projetos, integração de políticas públicas e captação de recursos adicionais;
- Dificuldade na prestação de contas para encerramento do convênio; e
- Irregularidade jurídica e fiscal, inadimplência os municípios.
- Dificuldade de repasse do projeto concluído para a gestão das diversas instâncias de governo;

Os principais óbices à formação de parcerias e celebração de convênios com

Organizações Não Governamentais foram:

- Observância dos requisitos legais, como identidade jurídica, objetivos sociais sem fim lucrativo;
- Inclusão de capacitação e treinamento técnico e administrativo;
- Capacidade empreendedora para dar continuidade ao Projeto, após o término da vigência do convênio.

A maioria dos convênios recebeu aditamento para a ampliação do prazo de vigência e da alteração do valor conveniado. Razões de diversas ordens justificaram a necessidade de ampliação do prazo, tanto por parte da Eletronorte, devido à demora nos processos de licitação, quanto por parte dos municípios, onde se destaca a dificuldade de realização das contrapartidas, notadamente na elaboração dos projetos executivos das ações.

7 | CONCLUSÃO

O Setor Elétrico, em particular a Eletrobras Eletronorte, ao longo de sua história, tem realizado importantes investimentos nas áreas de influência dos seus empreendimentos hidrelétricos, contribuindo para a reestruturação do espaço regional, internalizando as oportunidades de desenvolvimento sustentável e assim, compensando a sociedade local dos impactos negativos.

A UHE Tucuruí proporcionou a exploração de um potencial energético, que também trouxe visibilidade e oportunidades para a região, viabilizando a ocupação do território e a atração de investimentos públicos e privados.

No contexto do Plano de Desenvolvimento Sustentável, a implementação do PIRTUC reafirmou a parceria da Empresa com atores regionais, contribuindo com a formação da infraestrutura de diversos setores, como: educação, saúde, transporte, saneamento básico, cadeias produtivas, administração pública, cultura, lazer, expansão do atendimento da demanda de energia elétrica, etc.

A despeito da incipiência dos municípios da região a montante da UHE Tucuruí, de acordo com o Atlas do Desenvolvimento Humano, observa-se que, na década de 2000 a 2010, dois municípios atingiram a Faixa de Desenvolvimento Médio do IDHM: Tucuruí e Jacundá.

Observa-se, ainda, em relação à evolução do IDHM dos municípios desta região, que a taxa de crescimento do IDHM dos municípios a montante da UHE Tucuruí é bem superior às taxas de crescimento destes indicadores no Pará e no Brasil.

Cabe destacar o crescimento da dimensão IDHM – Educação, que obteve taxas espetaculares de crescimento na década 2000-2010 em todos os municípios.

Fato que atesta a eficácia do Plano de Inserção Regional a montante da UHE Tucuruí frente ao desafio do elevado crescimento populacional, com realização das parcerias para a construção de inúmeras escolas em todos os municípios.

O PIRTUC contribuiu para o fortalecimento da economia local, firmando convênios com as Prefeituras Municipais para a implantação de infraestrutura produtiva e melhoria da qualidade de vida nos municípios. O efeito multiplicador da renda, que os projetos implementados exercem direta e indiretamente na economia, estimula o desenvolvimento regional.

Considerando o comportamento positivo dos indicadores regionais, bem como o empenho de recursos humanos, financeiros e econômicos nas parcerias realizadas, concluímos que a implementação do PIRTUC contribuiu significativamente para a consolidação da ocupação socioeconômica do território regional, com o avanço no alcance das metas de desenvolvimento sustentável e com a elevação da qualidade de vida da população dos municípios do entorno da UHE Tucuruí.

REFERÊNCIAS

- (1) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletrobras Eletronorte – **Relatório Socioambiental do Programa PIRTUC – 2002 – 2016** – Superintendência de Meio Ambiente – EEM – Brasília, 2017.
- (2) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletrobras Eletronorte – **Plano de Inserção Regional da UHE Tucuruí**. Brasília, 2001.
- (3) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletrobras Eletronorte, – **Plano de Desenvolvimento Sustentável da Microrregião da UHE Tucuruí**, Brasília, 2001.
- (4) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea / Fundação João Pinheiro – FJP) – **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, Atlas Brasil 2013**, Rio de Janeiro, 2013.
- (5) Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA – **Relatório de Assentamentos do INCRA SR 27 Pará / Marabá**, Brasília, 2016. – ([HTTP://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php](http://painel.incra.gov.br/sistemas/index.php))

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 15/07/2020

Anderson Siqueira Nogueira

CEMIG

Belo Horizonte – Minas Gerais

Rodrigo Damasceno Souza

CEMIG

Belo Horizonte – Minas Gerais

<http://lattes.cnpq.br/6502303181235625>

Marcelo de Calazans Barcelos

CEMIG

Belo Horizonte – Minas Gerais

<http://lattes.cnpq.br/9532165314323300>

Suellen Karine Braga Vieira

CEMIG

Belo Horizonte – Minas Gerais

<http://lattes.cnpq.br/9532165314323300>

Walmir de Oliveira Campos

CEMIG

Belo Horizonte – Minas Gerais

RESUMO: Em novembro de 2015 entrou em vigência a Instrução de Operação RO-GC.BR.01 revisão 06 - Gerenciamento da carga para controle de frequência do sistema - elaborada pelo Operador Nacional do Sistema - ONS. Esta instrução determina que as distribuidoras de energia elétrica deverão efetivar, em caso de necessidade, cortes de cargas no prazo máximo de 5 minutos a partir da solicitação do ONS, visando o controle da frequência no

Sistema Interligado Nacional - SIN. Nesse momento observou-se a necessidade de uma melhoria no processo de seleção das cargas a serem cortadas. Anteriormente as cargas eram mapeadas com base em valores históricos, nas situações de carga leve, média e pesadas, e repassadas ao Técnico de Operação do Sistema (TOS) através de planilhas, organizados por ordem de prioridade. Dentro desse contexto, utilizando-se das bibliotecas do Sistema de Aquisição de Grandezas Analógicas (SAGA) - que faz a interface entre o Sistema de Supervisão e Controle X-OMNI da empresa Audiolab - e os módulos de visualização, históricos e tendências das medidas analógicas da CEMIG Distribuição, foi desenvolvido um módulo que aperfeiçoa tanto o processo de atualização das curvas de cargas quanto da execução de corte propriamente dito, atendendo ao Plano de Corte Manual de Carga (PCMC).

PALAVRAS-CHAVE: CEMIG Distribuição. Centro de Operação da distribuição – COD. Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS. Plano de Corte Manual de Carga – PCMC. Sistema Interligado Nacional – SIN.

MANUAL LOAD CUTTING PLAN

ABSTRACT: In November 2015, the Operating Instruction RO-GC.BR.01 revision 06 - Load management for frequency control of the system - prepared by the National System Operator - ONS came into force. This instruction determines that the electric energy distributors must carry out, in case of need, load cuts within a maximum period of 5 minutes from the ONS request, aiming at controlling the frequency in the National

Interconnected System - SIN. At that moment, there was a need for an improvement in the selection process of the loads to be cut. Previously the loads were mapped based on historical values, in light, medium and heavy load situations, and passed on to the System Operation Technician (TOS) through spreadsheets, organized in order of priority. Within this context, using the libraries of the Analog Quantities Acquisition System (SAGA) - which is the interface between Audiolab's X-OMNI Supervision and Control System - and the visualization, history and trends modules of analog measures from CEMIG Distribuição, a module was developed that improves both the process of updating the load curves and the execution of the cut itself, in compliance with the Manual Load Cutting Plan (PCMC).

KEYWORDS: CEMIG Distribution. Distribution Operation Center – COD. National Electric System Operator – ONS. Manual Load Cutting Plan – PCMC. National Interconnected System – SIN.

1 | INTRODUÇÃO

O Centro de Operação da Distribuição – COD – possui como uma das ferramentas possíveis de serem utilizadas para consulta a valores históricos de carga um Sistema de Aquisição de Grandezas Analógicas – SAGA. O SAGA trabalha em conjunto com o atual Sistema de Supervisão e Controle – SSC - utilizado pelo COD da CEMIG, o X-OMNI da empresa Audiolab. Composto por vários módulos de programa, o SAGA tem como objetivo obter, armazenar históricos, criticar, tratar curvas de previsão e tendência de grandezas elétricas de forma “on-line”, sendo processado em máquinas independentes da rede do SSC.

Criado e incorporado ao COD no ano de 1998, O SAGA esteve presente como um dos trabalhos apresentados no Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, que ocorreu em Belo Horizonte em agosto de 2006.

A integração do SAGA com o SSC é feita através de um arquivo no formato texto, gerado pelo X-OMNI, contendo: nome do ponto, data, horário e o valor medido. Utilizando-se dessa base de dados, foram desenvolvidos diversos módulos.

Para desenvolvimento do módulo que atende ao Plano de Corte Manual de Carga – PCMC – foi incorporada ao módulo SAGA uma planilha, a qual era atualizada manualmente pela equipe de apoio do COD, e que possuía os valores de carga a serem cortados bem como a ordem de prioridade desses blocos. Inicialmente foi integrada ao SAGA uma rotina que atualizava automaticamente essa planilha tendo como entrada a data e o horário desejado. Após coletado esses valores era gerada uma nova planilha com os valores de cargas esperados e a prioridade de corte conforme o modelo abaixo:

PONTO DE CONEXÃO	PONTOS DE INFLUÊNCIA (SE CEMIG / CLIENTES)	PRIORID. CORTE	MW	DISJUNTORES MANOBRADOS / ABERTOS
BARREIRO - 138 kV	INSTALAÇÃO		112,00	
	BRUMADINHO	1	8,70	Abrir BMO-8F4 - Geral T1
	MATEUS LEME	1	11,24	Abrir MAL-14F4 - Geral T2
	IGARAPE 2	1	16,45	Abrir IGPD-210F4 - Geral T1
	MBR MORRO DO TAMANDUÁ	1	25,23	(Abrir NLAU-8K4) Desliga. SE NLAQ
	VALLOREC / MANN. BARREIRO	1	38,35	(Abrir BRRU-4K4)
	JATOBÁ	2	7,98	Abrir BHJT-5F4 - Geral T1
			7,34	Abrir BHJT-9F4 - Geral T2
			8,34	Abrir BHJT-18F4 - Geral T3
	BETIM 2	2	16,28	Abrir BETD-213F4 - Geral T1 - (212F4, 214F4, 215F4 - 2º ERAC)
			16,28	Abrir BETD-205F4 - Geral T2
	DEMETRÔ C	2	2,30	(Abrir BRRU-5K4)
	MAGOTTEAUX		11,00	
	CIDADE INDUSTRIAL (TRAFO T3)		8,51	
	NOVA LIMA 1	3	4,96	Abrir NLAU-14F4- Geral T2 - (NLAU-12 e NLAU-13F4 - 1º ERAC)
			4,85	Abrir NLAU-7F4 - Geral T1
	CIDADE INDUSTRIAL	3	8,51	Abrir CICM-22F4 - Geral T3
			10,38	Abrir CICM -33F4 - Geral T4
			13,03	Abrir CICM-13F4 - Geral T5
	BONSUCESSO	4	9,21	Abrir BHBN-5F4 - Geral T1
			9,77	Abrir BHBN-11F4 - Geral T2
			8,37	Abrir BHBN-17F4 - Geral T3
	SION	5	7,74	Abrir BHSN-3F4 - Geral T1
7,74			Abrir BHSN-8F4 - Geral T2	
9,24			Abrir BHSN-15F4 - Geral T3	
9,14			Abrir BHSN-19F4 - Geral T4	

Figura 1 - Parte da planilha com blocos de carga da Malha Centro de Minas Gerais em regime de carga leve.

Anteriormente ao módulo PCMC, as planilhas atualizadas manualmente eram anexadas às Instruções de Operação (IO), num total de vinte e uma tabelas, sendo divididas por região do Estado (Malha Centro, Malha Leste, Malha Norte, Malha Oeste, Malha Triângulo, Malha Mantiqueira e Malha Sul) e, para cada região, dividida por regime de carga (Leve, Média e Pesada).

Quando solicitado, através de uma requisição do ONS, o Técnico de Operação do Sistema – TOS – deveria recorrer a uma das vinte e uma tabelas referente nos anexos da IO e, a partir de então, dar início às manobras. Durante a execução da manobra cabia ao TOS somar o montante de carga já cortado e continuar prosseguindo com as manobras e com a soma até que o valor final de corte fosse atingido.

O módulo PCMC surgiu para agilizar e facilitar o processo de corte de carga, sem a necessidade de consulta a documentos impressos, sem a necessidade do

TOS realizar a soma de carga de forma manual, tornando o processo muito mais eficaz, uma vez que o montante de carga cortada ficará o mais próximo possível do valor solicitado.

2 | DESENVOLVIMENTO

Com o SAGA já implementado e consolidado o módulo PCMC utilizou-se da mesma base de dados para seu desenvolvimento, porém com algumas dificuldades iniciais e com algumas complementações a serem feitas.

2.1 Dificuldades iniciais

- Completar a base de dados com leituras dos pontos que ainda não eram monitorados pelo COD, o que foi conseguido utilizando-se do Transporte via ICCP (TASE 2) do Sistema de Supervisão e Controle Distribuído (SSCD) do Centro de Operação do Sistema (CEMIG – GT) para o SCADA X-OMNI, e deste para o Sistema de Aquisição de Grandezas Analógicas (SAGA).
- Com a base de dados completa também foi necessário calcular os fatores de influência nos casos onde uma mesma carga reflete em mais de um ponto de recebimento, o que foi realizado pela equipe de engenharia de operação através de programas de cálculo de fluxo de potência.
- Adequação da planilha de entrada de dados para que o sistema fosse configurável de modo a trabalhar tanto na estrutura de apenas um bloco (representando toda a CEMIG Distribuição) quanto por Região do Estado com sete malhas (Estrutura de Pessoal no COD). Ainda por ponto de Recebimento do MUST (Com 33 Ilhas, possibilitando um corte de carga muito mais elaborado e podendo ser utilizado também para atendimento a outros tipos de ocorrências).

Apesar do volume de trabalho inicial para que essa base de dados fosse construída, as atualizações de carga se tornaram automáticas pela inserção do campo TAG, isto é, a variável ou expressão de cálculo que relaciona a carga a ser cortada com ao banco de dados do módulo SAGA.

Atualmente só é necessária alguma atualização na estrutura do aplicativo em caso de alguma mudança de topologia que cause uma alteração significativa nos fatores de influência das cargas quando se tratar de corte por ponto de recebimento do Montante de Utilização do Sistema - MUST.

O módulo PCMC se integra ao SSC X-OMNI aquisitando em tempo real e também mantendo registros históricos de todas as cargas da CEMIG-D e também dos pontos da medição de fronteira (via TASE-2 - ICCP).

O módulo possui também uma tabela de cargas separadas em regiões

geográficas do estado de Minas Gerais, com uma lista de prioridade para o corte das cargas. Possui um módulo gerenciador de expressões que permite à busca do valor do consumo em tempo real, histórico ou, na falta desse valor a utilização de uma expressão equivalente (como no exemplo de consumidores da distribuição onde não temos a leitura direta, realizarmos a aquisição da leitura através dos pontos adjacentes).

MALHA	TAG	PONTO	MW A SER CORTADO NO PONTO	INFLUÊNCIA	PRIORIDADE DE CORTE	DISJUNTORES MANOBRADOS / ABERTOS	MW CORTADO	SUBESTAÇÃO / CARGA	RESPONSÁVEL
MALHA CENTRO									
CENTRO	[BMO_8_FA]	BARREIRO	133,70	28,0%	1	Abrir BMO-8F4 - Geral T1	8,70	BRUMADINHO	COD
CENTRO	[MAL_14_FA]	BARREIRO		20,0%	1	Abrir MAL-14F4 - Geral T2	11,24	MATEUS LEME	COD
CENTRO	[IGPD210FA]	BARREIRO		24,0%	1	Abrir IGPD-210F4 - Geral T1	16,45	IGARAPÉ 2	COD
CENTRO	[NLAU8_KJ]	BARREIRO		28,0%	1	(Abrir NLAU-8K4)	25,23	MBR MORRO DO TAMANDUÁ e NLAQ	COD
CENTRO	[BRRU4_KJ]	BARREIRO		88,0%	1	(Abrir BRRU-4K4)	35,35	VALLOREC / MANN. BARRERO	COS
CENTRO	BETC7K4_EQ	BARREIRO		37,0%	1	Abrir BETC-7K4 - Geral T1	8,28	BETM 5	COS
CENTRO	BETC8K4_EQ	BARREIRO			1	Abrir BETC- 8K4 - Geral T2	7,34		COD
CENTRO	BETC10K4_EQ	BARREIRO			1	Abrir BETC- 10K4 - Geral T3	9,35		COD
CENTRO	BETQ9K4_EQ	BARREIRO		28,0%	2	Abrir BETQ-9K4	9,58	BETM 4	COD
CENTRO	BETQ10K4_EQ	BARREIRO			2	Abrir BETQ-10K4	12,50		COD
CENTRO	BHJT5F4_EQ	BARREIRO		47,0%	2	Abrir BHJT-5F4 - Geral T1	7,98	JATOBÁ	COD
CENTRO	BHJT9F4_EQ					Abrir BHJT-9F4 - Geral T2	7,34		COD
CENTRO	BHJT18F4_EQ					Abrir BHJT-18F4 - Geral T3	8,34		COD
CENTRO	IGPU8F4_EQ	BARREIRO		28,0%	3	Abrir IGPU-8F4 - Geral T5	12,23	IGARAPÉ 1	COD
CENTRO	IGPU12F4_EQ	BARREIRO			3	Abrir IGPU-12F4 - Geral T6	3,85		COD
CENTRO	BETD213F4_EQ	BARREIRO		24,0%	2	Abrir BETD-213F4 - Geral T1 - (212F4, 214F4, 215F4 - 2º ERAC)	16,28	BETM 2	COD
CENTRO	BETD205F4_EQ	BARREIRO				Abrir BETD-205F4 - Geral T2	16,28		COD
CENTRO	BRRU5K4_VD	BARREIRO		88,0%	2	(Abrir BRRU-5K4)	2,30	DEMÉTRÓ C	COS
CENTRO	NLAU14F4_EQ	BARREIRO		28,0%	3	Abrir NLAU-14F4 - Geral T2 - (NLAU-12 e NLAU-13F4 - 1º ERAC)	4,96	NOVA LIMA 1	COD
CENTRO	NLAU7F4_EQ					Abrir NLAU-7F4 - Geral T1	4,85		COD
CENTRO	CICM22F4_EQ	BARREIRO		88,0%	3	Abrir CICM-22F4 - Geral T3	8,51	CIDADE INDUSTRIAL	COD
CENTRO	CICM33F4_EQ					Abrir CICM-33F4 - Geral T4	10,38		COD
CENTRO	CICM13F4_EQ					Abrir CICM-13F4 - Geral T5	13,03		COD
CENTRO	BHBN5F4_EQ	BARREIRO		88,0%	4	Abrir BHBN-5F4 - Geral T1	9,21	BONSUCESSO	COD
CENTRO	BHBN11F4_EQ					Abrir BHBN-11F4 - Geral T2	9,77		COD
CENTRO	BHBN17F4_EQ					Abrir BHBN-17F4 - Geral T3	8,37		COD
CENTRO	BHNS3F4_EQ		Abrir BHNS-3F4 - Geral T1			7,74	COD		
CENTRO	BHNS8F4_EQ	BARREIRO	88,0%	5	Abrir BHNS-8F4 - Geral T2	7,74	SIOM	COD	
CENTRO	BHNS15F4_EQ				Abrir BHNS-15F4 - Geral T3	9,24		COD	

Figura 2 - Exemplo da tabela dos Pontos a serem cortados com seus respectivos fatores de influência.

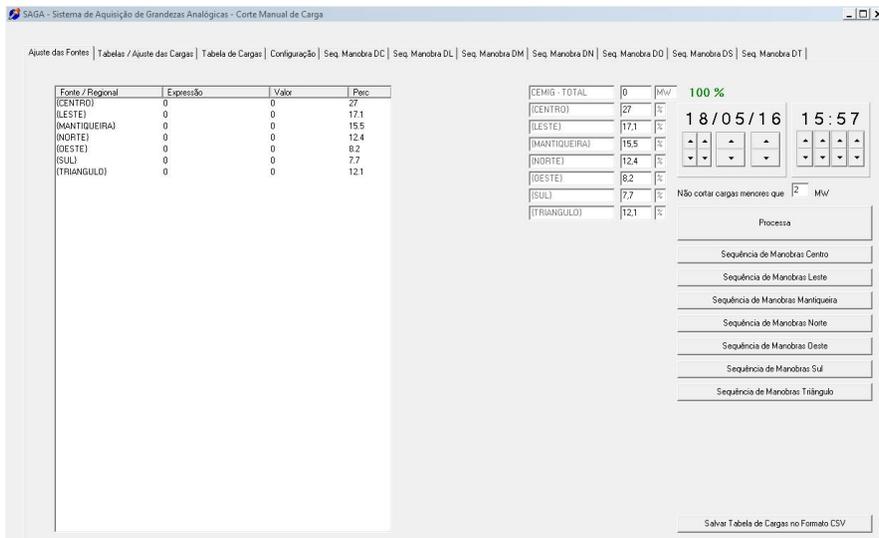


Figura 3 - Tela principal módulo PCMC

Na tela principal do módulo PCMC há um campo para que seja digitado o montante de carga a ser cortado, com a identificação 'CEMIG – TOTAL', de preenchimento do TOS. Logo abaixo, os percentuais de carga que serão cortados em cada uma das sete regiões geográficas do estado de Minas Gerais - com possibilidade de alteração desses percentuais. Esses campos já vem preenchido com o valor padrão conforme Instrução de Operação IO-OM/CO-01-058 Plano de Corte Manual de Carga no Sistema CEMIG Distribuição.

Divisão proporcional a ser adotada entre as Malhas regionais, segundo suas cargas totais.	
COD	Taxa de rateio (%)
Metropolitano	27,0
Mantiqueira	15,5
Triangulo	12,1
Norte	12,4
Leste	17,1
Oeste	8,2
Sul	7,7
Total	100%

Figura 4- Divisão proporcional das cargas a serem cortadas na CEMIG-D.

2.2 Algoritmo do módulo de Corte de Carga

O Aplicativo foi desenvolvido utilizando-se a linguagem Delphi (Borland) versão 4 e a biblioteca de tempo real do módulo SAGA.

Após executar o relacionamento entre a tabela de prioridades e o banco de dados do SAGA o sistema irá percorrer a lista de prioridades de um até N e fará uma pré-seleção da carga na seguinte condição:

$$\text{MW REAL CARGA\#N} \geq \text{CARGA A REJEITAR E MW REAL CARGA\#N} > \text{CARGA REAL MÍNIMA}$$

OU

$$\text{MW REAL CARGA\#N+1} < \text{CARGA RESTANTE A SER CORTADA E MW REAL CARGA\#N+1} > \text{CARGA REAL MÍNIMA.}$$

Se

$$\text{MW REAL CARGA\#N+1} < \text{CARGA REAL MÍNIMA}$$

o sistema deverá verificar CARGA#N+2.

A segunda condição passa a ser:

$$\text{MW REAL CARGA\#N+2} < \text{CARGA RESTANTE A SER CORTADA E MW REAL CARGA\#N+2} > \text{CARGA REAL MÍNIMA.}$$

Se

$$\text{MW REAL CARGA\#N+2} < \text{CARGA REAL MÍNIMA}$$

o sistema deverá verificar CARGA#N+3 e assim sucessivamente.

Para selecionar as cargas passíveis de rejeição no nível dois o sistema percorrerá as cargas pré-selecionadas anteriormente na ordem inversa da prioridade (de N até um), desfazendo a seleção anterior até que a diferença seja menor ou igual ao valor da diferença entre a potência ativa em MW da rejeição calculada e a somatória das potências ativas em MW das cargas pré-selecionadas para rejeição (selecionadas no nível um).

Tal algoritmo propicia que a carga efetivamente selecionada para rejeição fique o mais próximo possível da potência ativa calculada, porém sempre levando-se em conta a tabela de prioridades.

Como resultado é gerada uma sequência de manobra para desligar e uma sequência de manobra para religar cada uma das regiões do estado, ou seja, este algoritmo é executado para cada uma das regiões geográficas do Sistema Elétrico da CEMIG-D.

2.3 Modo de operação

Após abrir o módulo Corte Manual de Carga o TOS do COD deverá, na tela principal do programa, apenas:

- Atualizar o valor total da carga a ser cortada na CEMIG, conforme solicitação do ONS.
- Confirmar ou alterar a data e horário de referência. Por padrão o sistema atualiza para três minutos atrasados em relação ao horário real.

- Clicar em “Processa”. O sistema irá gerar uma Sequência de Manobras para Desligar que ao ser executada efetuará o corte programado e também uma Sequência de Manobras para Religar que ao ser executada religará as cargas na sequência inversa ao do Desligamento.
- Clicar em “Sequência de Manobra...” escolhendo umas das malhas o qual está responsável. Nesse caso, a manobra gerada será exportada no padrão HTML para que seja visualizada, impressa e executada.

Além disso, o TOS poderá:

- Alterar o percentual da carga a ser cortada na malha. Esse campo já vem preenchido conforme IO-OM/CO-01- 058 - Plano de Corte Manual de Carga no Sistema CEMIG Distribuição.
- Alterar o campo “Não cortar carga menores que”. Por “default” ao carregar o módulo PCMC esse campo vem preenchido com 2 MW, o que significa que para equipamentos com cargas abaixo desse valor estes não serão considerados na manobra.

MALHA	SE	VAO	PPI	EXPRESSÃO	F.INFL	MANOBRA	MW	MW INF	MWALX	M	B	A	MWAC	MWA	MWA...
DC	SÃO MARCOS	BHSOB	1	[BHS011_FW]	1	ABRIR BHS0 BF4 - Geral T1	11,63	11,63	11,63	X			11,63	11,63	
DC	BRUMADINH	BMDRF	1	[BMD11_FT0.023]	1	ABRIR BMD BF4 - Geral T1	0	0	11,63						
DC	BARROPI 1	BRPUAK	1	[BRPUA_FW]	1	ABRIR BRPU 4K4 - LD VALLORE	24,98	24,98	36,51	X			36,51	36,51	
DC	ESMERALDAS	ESR10F	1	[ESR_1T_FW]	1	ABRIR ESR 10F4 - Geral T1	4,77	4,77	41,28	X			41,28	41,28	
DC	ESMERALDAS	ESR19F	1	[ESR_2T_FW]	1	ABRIR ESR 19F4 - Geral T2	4,04	4,04	45,32	X			45,32	45,32	
DC	IGARAPE 2	IGP0210F	1	[IGP01T_FT0.023]	1	ABRIR IGP0 210F4 - Geral T1	16,581	16,581	61,901	X			61,901	61,901	
DC	JAGOTICATUBAS	JBT9K	1	[JBT_1T_FW]	1	ABRIR JBT 9K4 - Geral T1	3,79	3,79					74,101	74,101	
DC	MATEUS LEME	MAL14F	1	[abIMAL_2T_FW]	1	ABRIR MAL 14F4 - Geral T2	12,2	12,2	77,891	X			86,201	86,201	
DC	NEVES 2	RBSD211F	1	[RBSD2T_FW]	1	ABRIR RBSD 211F4 - Geral T2	12,1	12,1	89,991	X			107,532	107,532	
DC	SETE LAGOAS 3	SLAT9K	1	[abSLATL_K00.023]	1	ABRIR SLAT 9K4 - LD CNC	21,331	21,331							
DC	SETE LAGOAS 1	SLUJ7K	1	[SLUJ7_KW]	1	ABRIR SLUJ 7K4 - LD KRUPP	2,89	2,89							
DC	JATIBA	BHUT18F	2	[BHUT3T_FW]	1	ABRIR BHUT 18F4 - Geral T3	14,18	14,18	128,392	X			121,712	121,712	
DC	JATIBA	BHUT9F	2	[BHUT1T_FW]	1	ABRIR BHUT 9F4 - Geral T1	13,05	13,05	141,442	X			134,762	134,762	
DC	JATIBA	BHUT9F	2	[BHUT2T_FW]	1	ABRIR BHUT 9F4 - Geral T2	16,47	16,47	157,912	X			151,232	151,232	
DC	MARACANA	BHM21F	2	[BHM21_FA0.023]	1	ABRIR BHM 21F4 - RD STOLA	0,216	0,216	157,912						

Figura 5 - Exemplo de cargas a serem cortadas na CEMIG-D por solicitação do ONS.

Supondo uma situação em que um dos equipamentos da manobra gerada não possa ser operado, por falha de comunicação, por exemplo, o TOS consegue excluir esse equipamento da sequência gerada e o módulo PCMC recalcula, instantaneamente, as novas cargas a serem cortadas equivalentes, em termo de valores, à carga excluída anteriormente.

2.4 Exemplos de saída

De forma ilustrativa, segue algumas sequências de manobra simuladas (Malha Centro) no módulo PCMC para a condição de corte de 150MW de carga.

SAGA – Módulo PCMC - MALHA DC

REFERÊNCIA: 18/03/16 15:20

MANOBRAS PARA CORTAR CARGAS - 150MW

Hora	Item	SE	Manobra
...	1	SÃO MARCOS	ABRIR BHSO 6F4 - Geral T1
...	2	BARREIRO 1	ABRIR BRRU 4K4 - LD VALLOREC (A CARGO DO COS)
...	3	ESMERALDAS	ABRIR ESR 10F4 - Geral T1
...	4	ESMERALDAS	ABRIR ESR 19F4 - Geral T2
...	5	IGARAPE 2	ABRIR IGPD 210F4 - Geral T1
...	6	MATEUS LEME	ABRIR MAL 14F4 - Geral T2
...	7	NEVES 2	ABRIR RBSD 211F4 - Geral T2
...	8	SETE LAGOAS 3	ABRIR SLAT 5K4 - LD CNC
...	9	JATOBA	ABRIR BHJT 18F4 - Geral T3
...	10	JATOBA	ABRIR BHJT 5F4 - Geral T1
...	11	JATOBA	ABRIR BHJT 9F4 - Geral T2

SAGA - Módulo PCMC - MALHA DC

REFERÊNCIA: 18/03/16 15:20

MANOBRAS PARA RELIGAR CARGAS - 150MW

Hora	Item	SE	Manobra
...	1	JATOBA	FECHAR BHJT 9F4 - Geral T2
...	2	JATOBA	FECHAR BHJT 5F4 - Geral T1
...	3	JATOBA	FECHAR BHJT 18F4 - Geral T3
...	4	SETE LAGOAS 3	FECHAR SLAT 5K4 - LD CNC
...	5	NEVES 2	FECHAR RBSD 211F4 - Geral T2
...	6	MATEUS LEME	FECHAR MAL 14F4 - Geral T2
...	7	IGARAPE 2	FECHAR IGPD 210F4 - Geral T1
...	8	ESMERALDAS	FECHAR ESR 19F4 - Geral T2
...	9	ESMERALDAS	FECHAR ESR 10F4 - Geral T1
...	10	BARREIRO 1	FECHAR BRRU 4K4 - LD VALLOREC (A CARGO DO COS)
...	11	SÃO MARCOS	FECHAR BHSO 6F4 - Geral T1

Figura 6 - Exemplos de saída módulo PCMC

2.5 Utilização de fatores de influência

Opcionalmente o sistema pode ser subdividido por ponto de conexão entre a CEMIG-D e a Rede Básica utilizando-se uma nova tabela de carga, prioridade e percentual de contribuição do ponto de conexão para uma determinada carga. No caso do corte por pontos de recebimentos, uma mesma carga pode influenciar parcialmente vários pontos de recebimentos (exemplo Neves, Barreiro, Taquaril). O sistema permite a distribuição desse fator de influência fazendo com que o

corte de uma carga para um ponto de recebimento reflita de forma real no ponto de recebimento e, ao mesmo tempo, gere créditos de corte nos demais pontos de recebimento onde essa carga tenha influência conforme exemplo abaixo:

O corte da carga 1, com 10MW , refletiu 3MW para a área 1; 5MW para a área 2 e 2MW para a área 3.

CARGA 1	CARGA TOTAL	10MW
AREA 1	FAT INFL	
CARGA 1	0.3	3
AREA 2	FAT INFL	
CARGA 1	0.5	5
AREA 3	FAT INFL	
CARGA 1	0.2	2

Figura 7 - Exemplo pontos de influência.

2.6 Proposição futura

Utilizar-se da integração do SAGA com o banco de dados do Centro de Medição e fazer a integração com o Sistema ION, possibilitando a leitura em tempo Real dos Consumidores Livres em 138kV e 13,8kV reduzindo a necessidade de se calcular a carga pela diferença entre os terminais adjacentes.

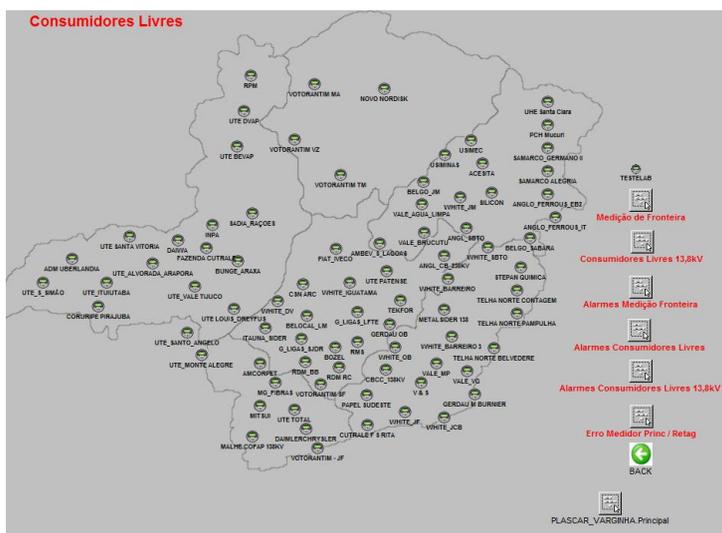


Figura 8 - Mapa de Consumidores Livres no estado de Minas Gerais.

Concluir a tabela para corte por ponto de conexão com a rede Básica possibilitando a utilização também para o caso de Corte Manual em contingências nas instalações da Malha Principal ou outra Empresa.

3 | CONCLUSÕES

Com a entrada em Operação comercial do Sistema em novembro de 2015 o Centro de Operação da Distribuição da CEMIG-D passou a fazer um acompanhamento e controle mais efetivo na rotina de Corte Manual de Carga com os seguintes resultados:

A área de Operação em tempo Real:

- Gerar de forma rápida e Segura a sequência de Corte Manual de Carga para qualquer montante desejado.
- Possibilidade de inclusão ou exclusão de qualquer montante de carga em virtude de indisponibilidade de manobra de equipamento ou outro motivo.
- Acompanhamento efetivo da manobra gerada.

A Área de Análise e Acompanhamento:

- Eliminação da necessidade de levantamentos para alterar as tabelas.
- Eliminação das diferenças entre o valor programado para o Corte de Carga e o valor efetivamente cortado tendo em vista que o Sistema pode trabalhar em tempo real ou por histórico de curto prazo (na ordem de minutos).
- Facilidade para a elaboração de relatórios sobre as ocorrências de corte de Carga e a proposição de novas sequências apenas acrescentando itens e/ou alterando as prioridades de corte em função de características econômicas ou sociais.

A Área de Planejamento da Operação:

- Possibilidade de simulação rápida de corte manual de carga otimizando uma análise de fluxo e elaborando contingências visando reduzir os reflexos econômicos e sociais inerentes ao corte de Carga (como exemplo alterar a tabela de corte conforme o horário e dia da semana)

REFERÊNCIAS

Borland International Inc, (1997) Delphi 3 avançado (Material de Treinamento).

Instrução de Operação IO-OM/CO-01-058 Plano de Corte Manual de Carga no Sistema CEMIG Distribuição.

Instrução de Operação RO-GC.BR.01 revisão 06 - Gerenciamento da Carga para Controle de Frequência do Sistema.

Makron Books, (Marco Cantú) (1997) Dominando o Delphi 3 A Bíblia - Título Original Mastering Delphi 3 for Windows 95/NT.

Nogueira, A. S. (2006). *Sistema de Aquisição de Grandezas Analógicas*. Belo Horizonte.

William Pereira Alves (1998) Banco de Dados em Delphi 3.

PROCEL RELUZ – ILUMINAÇÃO PÚBLICA E SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA EFICIENTES

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Ad Jefferson Custódio Gomes

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/7544659643429006>

Adi Neves Rocha

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4893308058398095>

Fabiano Rodrigues Soriano

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4708268086597248>

Luís Ricardo Cândido Cortes

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7007542686718562>

Taís Mirele Fernandes da Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4472904843564273>

Thiago Luís Campos Rodrigues

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/5626012961221964>

RESUMO: Este trabalho visa demonstrar a importância do programa PROCEL Reluz destinado à eficiência energética em sistemas

de iluminação pública e sinalização semafórica, por meio de resultados referentes à implantação deste em cidades brasileiras, com maior quantidade de candidatos nas regiões nordeste e sudeste. É cada vez maior o número de cidades candidatas à implantação, a qual chega a proporcionar até 40% de economia em suas faturas mensais durante a adesão. Desde sua implantação, em 2000, já foram substituídos mais de 2,7 milhões de pontos de iluminação pública no país. Portanto, o PROCEL Reluz é um projeto de eficiência energética competente, com dados satisfatórios, os quais proporcionam economia aos municípios brasileiros.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética, Iluminação Pública, PROCEL Reluz, Sinalização Semafórica.

PROCEL RELUZ - EFFICIENT PUBLIC LIGHTING AND SEMAPHORIC SIGNALING

ABSTRACT: This work aims to demonstrate the importance of the program PROCEL Reluz aimed at energy efficiency in public lighting systems and traffic light signaling, by means of results related to its implementation in Brazilian cities, with more applicants in the north-east and south-east regions. The number of candidate cities is increasing, which provides up to 40% savings on their monthly bills during accession. Since its establishment in 2000, more than 2.7 million public lighting points have been replaced in the country. Therefore, the PROCEL Reluz is a competent energy efficiency project, with satisfactory data, which provides savings to the

Brazilian municipalities.

KEYWORDS: Energy Efficiency, Public lighting, PROCEL Reluz, Traffic Light Signaling.

1 | INTRODUÇÃO

Os crescentes avanços tecnológicos, a necessidade de uma melhor iluminação, o aumento populacional, a utilização de aparelhos cada vez mais potentes de energia elétrica, dentre outros fatores, contribuem para um aumento na demanda de energia elétrica. Desse modo, frente a escassez de alguns recursos naturais utilizados na produção desta, é indispensável um estudo a respeito da eficiência energética dos diversos equipamentos utilizados na sociedade.

O consumo de energia, segundo a ANEEL, é um importante indicativo do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de uma população. Na Figura 1, percebe-se que o consumo de energia elétrica tem relação direta com o produto interno bruto (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

A iluminação pública é um segmento muito importante para a sociedade, bem como a sinalização semafórica. Ambas são fundamentais para a ordem em uma civilização. Estas duas representam parcelas importantes no que tange o consumo de energia elétrica (RELUZ, 2017).

Elas promovem a valorização noturna dos espaços públicos urbanos, reduzem o consumo de energia elétrica quando utilizados de forma eficiente, melhoram as condições de segurança nas vias públicas e, desta maneira, a qualidade de vida nas cidades brasileiras (RELUZ, 2017).

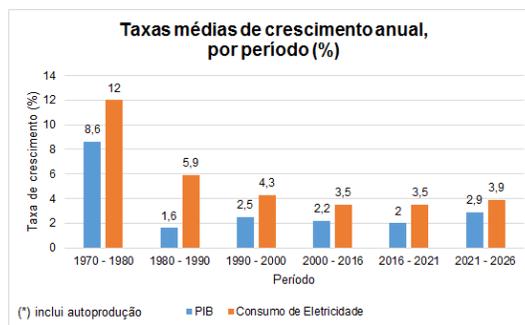


Figura 1 - Evolução do consumo de energia elétrica e do PIB. (*).

Fonte: (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

Desse modo, o consumo eficiente da iluminação pública e da sinalização semafórica surge num ambiente onde a demanda energética do setor está

ligeiramente ligado à qualidade de vida da sociedade. Além disso, o esgotamento dos recursos para produção de energia se torna também um importante motivo para a busca do consumo eficiente de energia elétrica (ANEEL, 2019).

O estudo “Iluminando Cidades Brasileiras – Modelos de negócio para Eficiência Energética em Iluminação Pública”, elaborado pelo Banco Mundial, afirma que as luminárias de tecnologia LED, por serem de 40 a 60% mais eficientes do que as utilizadas frequentemente no sistema de iluminação pública brasileira, se mostram como alternativa mais eficaz. Além disso, a tecnologia LED tem um consumo de até 90% menor de energia elétrica em relação às lâmpadas incandescentes (RELUZ, 2013).

Instituído pelo governo federal, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) foi criado desde 1985 pelo Ministério de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, sendo executado pela Eletrobrás. Este programa tem como objetivo promover o uso eficiente da energia elétrica, combater o seu desperdício e reduzir custos setoriais (RELUZ, 2017) e (INFO, 2000).

O PROCEL possui diversas diretrizes, como PROCEL Educação, PROCEL Info, PROCEL Edifica, PROCEL Indústria, PROCEL Reluz (abrange Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes), dentre outros segmentos, como apresentado na Figura 2 abaixo (PROCEL, 2016).



Figura 2 - Subprogramas Setoriais do PROCEL.

Fonte: (PROCEL, 2016).

Este trabalho tem como foco o PROCEL Reluz e os resultados obtidos a

partir da sua implantação, com apresentação de seus avanços no setor desde a sua implantação.

2 | PROCEL RELUZ

O crescente consumo de energia elétrica, apesar de significar uma melhoria na qualidade de vida da população e uma possível recuperação econômica, também apresenta aspectos negativos em relação à produção da energia elétrica, tais como possível esgotamento de recursos utilizados para produzi-las, bem como maiores danos ao meio ambiente (RELUZ, 2017).

A fim de diminuir o consumo desenfreado da energia elétrica, tem-se adotado pelo mundo maneiras mais eficientes para sua utilização. Desse modo, os produtos oferecerem os mesmos recursos com um menor consumo de energia elétrica (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

No Brasil, o incentivo ao melhor aproveitamento da energia elétrica começou em 1985, com a criação do Procel. Além disso, a legislação brasileira define que 0,25% da receita operacional líquida das distribuidoras devem ser aplicadas em projetos de eficiência energética, os quais devem ser aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019).

Até meados de 2008, a ANEEL aprovou cerca de 279 projetos, os quais visavam a redução do consumo de energia elétrica em 369 GWh (ANEEL, 2019).

Os estímulos para o uso eficiente de energia elétrica por parte do Procel se dividem em duas vertentes, as quais correspondem a ações educativas à população e o investimento em aparelhos e instalações.

Ao ser lançado, promoveu, inicialmente, publicação e distribuição de materiais visando a educação dos consumidores residenciais, comerciais, industriais e do setor público, segundo o estudo Análise Retrospectiva, Plano Nacional de Energia 2030, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Além disso, desenvolve projeto pedagógico a ser empregado em escolas de nível fundamental, bem como cursos técnicos (ANEEL, 2019).

Em 1993, os produtos passaram a receber o selo Procel, criado em parceria com o PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem, coordenado pelo Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, este era concedido anualmente como informativo da eficiência energética do equipamento. No entanto, foi no ano de 2001 que o selo ganhou maior expressividade, devido ao racionamento ocorrido no país, transformando a eficiência em um mecanismo de propaganda dos eletrodomésticos e eletrônicos (ANEEL, 2019).

Como investimento em ações eficientes por parte das distribuidoras, a população de baixa renda tem como campanhas recorrentes a substituição de

lâmpadas utilizadas por outras mais eficientes, além de regularização de ligações clandestinas, essa última apresenta maior eficácia ao menor consumo de energia.

Do ponto de vista ambiental esse programa também tem sido bastante satisfatório, sendo evitada a emissão de CO₂ correspondente a 584 mil veículos em um ano, dados estes relativos ao ano base de 2018 (PROCEL, 2019).

O Procel Reluz, parte integrante do Procel, visa trabalhar a eficiência no setor de iluminação pública e sinalização semafórica, de modo que os projetos desenvolvidos por ele contemplem (INFO, 2000):

- Melhoria dos Sistemas de Iluminação Pública Existentes;
- Expansão dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Remodelagem dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Melhoria dos Sistemas de Sinalização Semafórica;
- Iluminação Especial (Destaque de praças, monumentos, fachadas, etc);
- Iluminação de Espaços Públicos Esportivos;
- Inovação Tecnológica na Iluminação Pública.

Os candidatos a participarem do programa correspondem a entes federativos, tais como Municípios, Governos Estaduais e Distritos, por intermédio das concessionárias de energia elétrica (INFO, 2000).

De modo geral, as concessionárias de energia elétrica são responsáveis pela negociação e apresentação da solicitação de financiamento feita pelos entes federativos junto à Eletrobrás. Após aprovação de projeto, cerca de 75% do valor total do financiamento será arcado pela Eletrobrás, os 25% restante é pago pelo autor do projeto (ente federativo) ou concessionária de energia elétrica. Todo o processo é sintetizado na Tabela 1 (INFO, 2000).

Fonte de Recursos	Eletrobrás (RGR)
Agente Administrador	Concessionárias (Geração, Transmissão e Distribuição)
Coordenação das Obras	Concessionárias e Prefeituras
Execução das Obras	Empreiteira, Prefeitura ou Concessionária

Tabela 1 - Diagrama do processo para implementação do PROCEL Reluz.

Fonte: (INFO, 2000).

Um edital de Chamada Pública é disposto anualmente pela Eletrobrás, onde o solicitante deve submeter seus projetos à participação do Procel Reluz, tendo

como pré-requisito o cumprimento dos fatores impostos pelo Procel em edital. Para a seleção da proposta são realizadas visitas e inspeções nos municípios onde o projeto será aplicado, além da adoção de critérios técnicos e econômicos bem embasados (PROCEL, 2018).

A partir de 1986, os investimentos feitos pela Eletrobrás no Procel Reluz somam R\$3,11 bilhões (PROCEL, 2019). Desde 2000, equipamentos de mais de 2,78 milhões de pontos de iluminação pública foram substituídos por modelos mais eficientes, em mais de 1.300 municípios brasileiros, somando mais de R\$ 500 milhões em investimentos (ELETROBRAS, 2019).

Outro resultado bastante relevante se refere a quantidade de energia elétrica economizada desde a implantação desse programa. De 1986 a 2018 foram economizados 151,6 bilhões de kWh de energia, dados disponibilizados pela Eletrobrás (PROCEL, 2018).

Na Figura 3 a seguir, pode-se observar a economia de energia no período de 2013 a 2017, decorrentes dos últimos cinco anos de aplicação do Procel.

Além disso, houve uma redução de demanda na ponta de 7,25 milhões de kW, economia de 42 milhões de kWh em 4 indústrias energointensivas. Mais de 1,4 milhão de acessos e mais de 1.800 novos usuários cadastrados no Portal Procel Info (PROCEL, 2018).

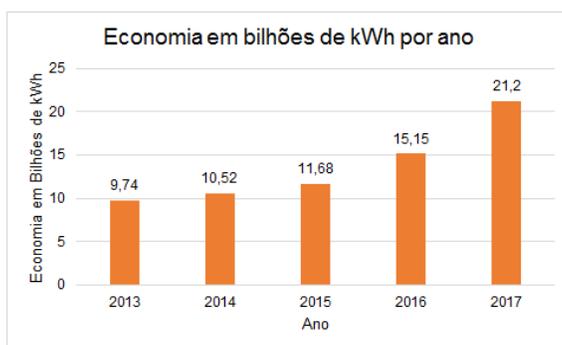


Figura 3 - Economia de energia decorrente das ações do Procel nos últimos cinco anos (em Bilhões de kWh).

Fonte: [9] Programas de Governo.

A economia de energia de 23 bilhões de kWh é equivalente ao consumo anual de 12,12 milhões de residências, sendo bastante expressiva essa redução. Essa mesma economia representou 4,87% do consumo total de eletricidade no Brasil (PROCEL, 2018).

O gráfico mostrado na Figura 4, mostra a distribuição regional dos pontos

de iluminação pública implementados pelo Procel Reluz em 2013. Ainda neste ano, houve economia de energia de 157,98 milhões de kWh e 62 mil pontos de iluminação pública implementados em 6 municípios. A cidade de Anápolis é um desses municípios, conforme Figura 5 (RELUZ, 2013).

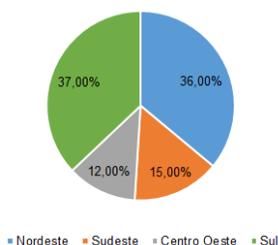


Figura 4 - Distribuição regional dos pontos de iluminação pública implementados pelo Procel Reluz em 2013.

Fonte: (RELUZ, 2013).



Figura 5 - Implementação do Procel Reluz no município de Anápolis/GO.

Fonte: (RELUZ, 2013).

A participação dos municípios nesse programa tem crescido cada vez mais, só na primeira chamada pública do Procel Reluz foram aprovados 22 municípios (PROCEL, 2019). A chamada pública do Procel Reluz 2019 esteve aberta até a data limite de 13 de agosto do presente ano, sendo esta a data limite para cada ente federativo, por intermédio da concessionária de energia correspondente, submeter seu projeto.

Segundo a Prefeitura da cidade de Anápolis, 60% do programa Reluz na cidade já havia sido concluído no ano de 2014, totalizando uma redução de 40% dos custos em relação ao modelo antigo de iluminação pública, onde foram trocados mais de 30 mil postes, luminárias e reatores da cidade desde a sua implantação (SECOM, 2014).

É cada vez maior a quantidade de municípios que manifestam interesse em aderir ao programa Procel Reluz, de modo que, na chamada pública de 2017, tiveram 1.101 municípios aptos a apresentar suas propostas. Na Figura 6, observa-se a participação de cada região em porcentagem (PROCEL, 2018).

A Figura 7 mostra que as regiões onde houveram maior quantidade de municípios inscritos na chamada pública Procel Reluz 2017 foram as regiões Nordeste, Sul e Sudeste (PROCEL, 2018).

Municípios Inscritos na chamada pública do PROCEL Reluz 2017

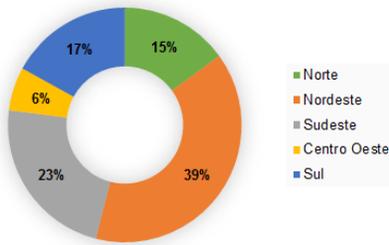


Figura 6 - Distribuição percentual dos municípios inscritos na chamada pública do Procel Reluz 2017 nas regiões geográficas brasileiras.

Fonte: (PROCEL, 2018).



Figura 7 - Municípios inscritos na chamada pública do Procel Reluz 2017.

Fonte: (PROCEL, 2018).

Segundo a Eletrobrás, as regiões onde mais ocorreram investimento e implantação do projeto Reluz são as regiões Norte e Nordeste. O total de pontos contratados e instalados foi de 500.400 pontos. O valor total investido foi de R\$ 269.770.401,15. A Figura 8 mostra a participação de cada região em porcentagem do valor total apresentado (SIQUEIRA, 2012).

Antes da implantação desse programa, e como ainda ocorre na grande maioria dos municípios no Brasil, o tipo de lâmpada mais utilizada na iluminação pública ainda é a de vapor de sódio, acompanhada do tipo vapor de mercúrio, conforme Figura 9 (SIQUEIRA, 2012).

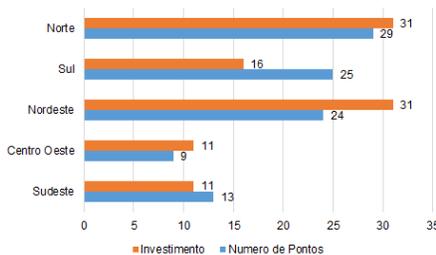


Figura 8 - Municípios inscritos na chamada pública do PROCEL Reluz 2017.

Fonte: (SIQUEIRA, 2012).

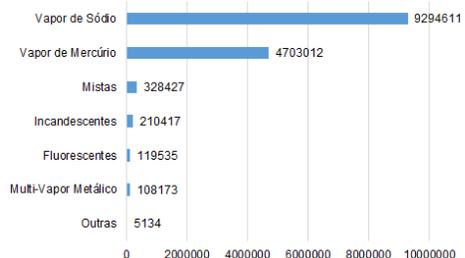


Figura 9 - Tipos de Lâmpadas utilizadas na iluminação pública.

Fonte: (SIQUEIRA, 2012).

Desse modo, ainda há uma grande quantidade de lâmpadas ineficientes

na iluminação pública brasileira, conforme a Figura 9. Logo, é viável realizar a substituição das luminárias ineficientes com lâmpadas de Vapor de Sódio por luminárias de alto rendimento, das quais se destacam as luminárias LED.

De acordo com a Eletrobrás, em um Projeto piloto desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, através do Procel Reluz simulou-se a substituição de 56 pontos de iluminação com tecnologia VSAP (lâmpada de vapor de sódio) de 250W, por tecnologia LED de 150W, a economia correspondeu a R\$7.185,83 por ano, conforme Tabela 2 (SIQUEIRA, 2012).

Preço Unitário do equipamento	R\$ 1960,00
Preço total	R\$ 109760,00
Custo unitário com M. O. para instalação	R\$ 80,00
Custo total de M. O. para instalação	R\$ 4480,00
Tempo médio de utilização (dia)	12 horas
Tempo médio de utilização (ano)	4380 horas
Potência unitária	150 W
Potência total	8,4 kW
Consumo total (anual)	36792 kWh
Redução do consumo (anual)	30660 kWh
Tarifa média de energia	0,234 R\$/kWh
Economia	7185,83 R\$/ano

Tabela 2 - Diagrama do processo para implementação do Procel Reluz.

Fonte: (SIQUEIRA, 2012).

Através destes estudos e Projetos Pilotos, percebe-se a necessidade de continuar investindo em pesquisas que demonstrem os reais resultados obtidos através dos programas de Eficiência Energética existentes no país, incentivando, dessa forma, que mais municípios participem, ampliando a abrangência desses programas no Brasil e servindo de exemplo até mesmo para outros países.

3 | DISCUSSÕES

Com a escassez cada vez maior dos recursos naturais utilizados na produção de energia elétrica, se torna indispensável a adoção de políticas públicas e de projetos que visam a utilização eficiente desta, com o objetivo de manter ao máximo a preservação do meio ambiente.

A quantidade de energia elétrica que pode ser economizada por meio destes projetos e o modo com que ela é utilizada reflete diretamente nas fontes de geração

de energia.

A busca por projetos de eficiência se tornou crescente com o passar dos anos, com adesão cada vez maior das cidades brasileiras, principalmente em relação à iluminação pública e sinalização semafórica. Números bastante expressivos de energia economizada, conforme visto, embasam este fato, principalmente nas regiões Sul e Nordeste.

De acordo com a Figura 7, 1.101 municípios se inscreveram na chamada pública do Procel Reluz em 2017, correspondente à aproximadamente 19,77% dos municípios brasileiros, mostrando que as cidades brasileiras vêm cada vez mais demonstrando interesse em eficiência energética. No entanto, ainda há uma grande quantidade de lâmpadas ineficientes sendo utilizadas no sistema de iluminação pública nas cidades brasileiras, conforme a Figura 9.

As políticas de incentivo, campanhas de educação realizadas por programas como o Procel e o investimento das empresas consumidoras e fabricantes em produtos com maior eficiência constituem um importante caminho para um futuro onde o consumo de energia elétrica se torne mais eficiente.

Com investimento inicialmente alto, porém em maior parte financiado pela Eletrobrás (70%), o retorno, se tratando de iluminação pública e sinalização semafórica, é de certa forma satisfatório, como visto na cidade de Anápolis, onde com apenas 60% dos pontos de iluminação trocados já representava uma diferença de menos 40% no valor da conta de energia elétrica ao fim do mês.

Desde a sua criação em 2000, o Procel Reluz já proporcionou a substituição de mais de 2,7 milhões de pontos de iluminação pública em todo o país, beneficiando e melhorando a qualidade de vida da população.

Mesmo com tanto desenvolvimento em projetos de eficiência energética na área da iluminação pública e sinalização semafórica, o Brasil ainda tem um longo caminho a ser percorrido, visto que existem regiões com alto grau populacional que ainda não aderiram ao programa de eficiência energética, como observado na Figura 10, que traz a quantidade de municípios inscritos por faixa populacional.

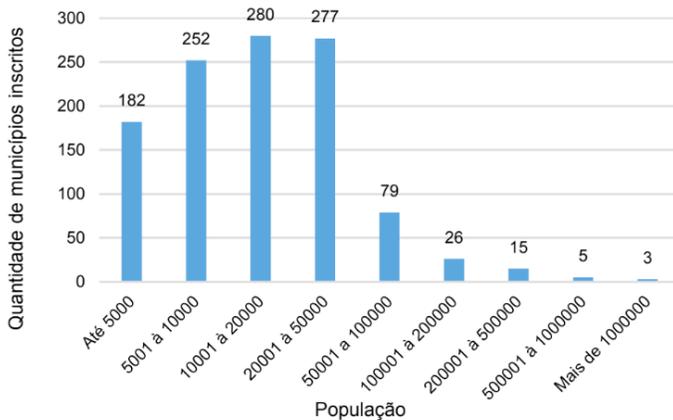


Figura 10 - Municípios inscritos na chamada pública do Procel Reluz 2017.

Fonte: (PROCEL, 2018).

O emprego das luminárias LED em sistemas de iluminação pública e sinalização semafórica garante uma maior eficiência nos seus respectivos funcionamentos, proporcionando maior qualidade de vida e segurança à população, além de permitir melhor visibilidade aos motoristas e pedestres ao trafegarem pela cidade.

Desta forma, reafirma-se a importância do uso da tecnologia LED na sinalização semafórica, tendo em vista que os semáforos dependem essencialmente de uma fonte de energia elétrica e de uma fonte luminosa para seu funcionamento, e se tratando de semáforos tradicionais, que utilizam lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio, além da baixa eficiência, a queima é muito frequente, podendo ocasionar um aumento nos incidentes de trânsito e constantes manutenções (PINTO, 2012).

Com isso, nos módulos semafóricos baseados na tecnologia LED utilizam-se placas de circuito impresso nas quais são fixados vários LEDs, dessa maneira, o sistema torna-se mais seguro e confiável, pois no caso da queima de um LED, apenas este é comprometido, todos os outros continuam funcionando (BENEDITO, 2016).

Além do emprego de LEDs na sinalização semafórica, outra tecnologia que contribui para a diminuição do consumo de energia é a utilização de um sistema fotovoltaico conectado à rede, para geração de energia própria e alimentação dos semáforos, como foi feito num estudo para a cidade de Pato Branco – Paraná, no qual analisou-se a viabilidade técnico-econômica para esta aplicação (BENEDITO, 2016).

4 | CONCLUSÕES

O programa Procel Reluz tem se mostrado bastante eficiente, em face aos significativos resultados que apresenta ao longo dos anos. Isso demonstra que essas políticas de incentivos tem um papel fundamental no desenvolvimento mais sustentável de um país.

Saber gerir e utilizar seus recursos naturais e próprios com eficiência torna um país mais autossuficiente, além de prolongar seus recursos a fim de utilizá-los a longo prazo, pensando no futuro das novas gerações.

As constantes pesquisas voltadas para o uso eficiente de energia elétrica são primordiais para o Brasil continuar trilhando o caminho certo.

Em face a isso, observa-se ao comparar o ano de 2012 com 2017, que em 2012 apenas as regiões Norte e Nordeste se destacavam com investimentos e inscrições no Procel Reluz, em 2017 o cenário já se modificou, havendo destaque também para a região Sudeste.

Descobertas de novas tecnologias voltadas para a iluminação, o crescente uso das lâmpadas LED, o amplo acesso da população a energia elétrica e a uma iluminação pública de qualidade, faz com que desigualdades existentes no país sejam minimizadas, melhorando a qualidade de vida dos cidadãos de um modo geral.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil - Relatório Técnico**. Relatório Técnico, 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

BENEDITO, L. F. **Análise da eficiência energética na sinalização semafórica de Pato Branco utilizando sistemas LED e geração fotovoltaica**. 2016. -, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, E. **Projeção de Demanda de Energia Elétrica para os Próximos 10 anos (2017-2026)**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. 2017.

ELETRORBRAS, P. **Programas de Governo**. Relatório Técnico, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Procel.aspx>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

INFO, P. **Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes**. Relatório Técnico, 2000. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID6C524BD8642240ECAD7DEF8CD7A8C0D9PTBRIE.htm>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

PINTO, A. M. **Modelo de financiamento para a eficiência energética dos semáforos no município de Lisboa**. 2012. -.

PROCEL. **Plano Anual de Aplicação de Recursos do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.** Relatório Técnico. 2016.

PROCEL. **Resultados Procel 2018, ano base 2019.** Relatório Técnico. 2018.

PROCEL. **Resultados Procel 2019, ano base 2018.** Relatório Técnico. 2019.

RELUZ, P. **Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes.** Relatório Técnico, 2013. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/procel-reluz.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

RELUZ, P. **Edital de Chamada Pública - 01/2017. Projetos de Iluminação Pública - LED.** Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia. ELETROBRAS. 2017.

SECOM. **Prefeitura conclui mais de 60% do programa Reluz em Anápolis.** Relatório Técnico. 2014.

SIQUEIRA, M., 2012, **Procel Reluz - Programa Nacional de Iluminação Pública e Iluminação Semafórica Eficientes.**

PRODUÇÃO EFICIENTE DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM CUSTO OPERACIONAL REDUZIDO

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 06/07/2020

Igor Ferreira do Prado

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/6971326406673954>

Taís Mirele Fernandes da Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4472904843564273>

Marcelo Bento Pisani

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/1003717727759886>

Rodrigo Dórea da Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/9263375088976937>

RESUMO: Atualmente é comum a prática de instalação de placas fotovoltaicas com inclinação fixa seguindo o perfil dos telhados das residências ou através de estruturas que proporcionam inclinação igual ao grau da latitude. Com a motivação de melhorar a eficiência do sistema de geração fotovoltaica, foi proposta uma metodologia de alocação variável da angulação ao longo do ano, com o objetivo de maximizar a geração de energia com um custo operacional reduzido. O presente trabalho propõe um dimensionamento eficiente do

sistema de geração fotovoltaica com o intuito de determinar os equipamentos necessários para atendimento de uma unidade residencial padrão. Foi considerado também o projeto de um sistema armazenador de energia capaz de alimentar a mesma carga por um período de um dia sem geração.

PALAVRAS-CHAVE: Geração distribuída, Energia solar fotovoltaica, Eficiência energética.

EFFICIENT PRODUCTION OF ELECTRIC ENERGY USING PHOTOVOLTAIC PANELS WITH REDUCED OPERATIONAL COST

ABSTRACT: Currently, the practice of installing photovoltaic panels with fixed inclination, following the profile of the roofs of homes or through structures that provide inclination equal to the degree of latitude, is commonly used. In order to improve the efficiency of the photovoltaic generation system, a variable allocation methodology for the angulation was proposed throughout the year, with the objective of maximizing energy generation with a reduced operational cost. The present work proposes an efficient dimensioning of the photovoltaic generation system in order to determine the necessary equipment to serve a standard residential unit. It was also considered the design of an energy storage system capable of supplying the same load for a period of one day without generation.

KEYWORDS: Distributed generation, Photovoltaic solar energy, Energy efficiency.

1 | INTRODUÇÃO

A procura por fontes de energias alternativas tem crescido em muitos países, buscando-se uma forma eficiente para suprir suas demandas internas. No que tange à captação da energia solar, o Brasil recebe uma irradiação média de 5 kWh/m²/dia (PEREIRA *et. al* 2006). Essa fonte alternativa de energia renovável converte diretamente a luz solar em energia elétrica, e, após a conversão, a mesma é coletada, armazenada e processada por dispositivos eletrônicos. Sabe-se que quanto maior a radiação solar maior será a quantidade de eletricidade produzida. Tal irradiância mostra o espetacular potencial de utilização dessa fonte de energia dentro da matriz energética brasileira.

Um desafio existente além da produção da energia é a sua distribuição para os locais de consumo. Nesse aspecto, a Geração Distribuída tem fundamental importância, pois é uma fonte de energia ligada diretamente à rede de distribuição ou ao local de medição do cliente, podendo ser instalada próximo aos centros de carga, minimizando as perdas e atendendo, também, as regiões onde o potencial de expansão dos sistemas de transmissão ou distribuição é limitado, além de ter um aumento da eficiência energética global.

Com o desenvolvimento do conceito de *Smart Grid*, cujo objetivo é tornar o sistema elétrico de potência mais interligado e eficiente, surgiu a proposta de utilização de diversas fontes de energia, sendo que esses sistemas incluem geradores baseados em biomassa, turbinas de combustão, microturbinas, sistemas de concentração de energia solar térmica e fotovoltaica, pequenas centrais hidrelétricas, turbinas eólicas, entre outros, os quais apresentam características de serem compostos por redes renováveis.

Este trabalho apresenta um estudo voltado para a caracterização de sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica, evidenciando também a importância e a relação otimizada de uso entre fontes renováveis de energia. Além disso, dimensionou-se a quantidade de carga necessária para alimentar uma residência padrão, constatando a necessidade de um sistema de armazenamento de energia, composto por 4 baterias, para armazenar a carga a ser consumida pela família.

2 | METODOLOGIA

Com o objetivo de analisar os aspectos que influenciam no rendimento global da instalação, foi proposto um dimensionamento eficiente do sistema de geração fotovoltaica, bem como novas formas de alocação variável da angulação do painel solar ao longo do ano através de cálculos precisos que levam em conta a inclinação do sol no decorrer dos meses. Em seguida, propôs-se a divisão do ano em duas partes, com diferentes angulações, a fim de aumentar a potência máxima gerada.

Outro fator avaliado que influencia na capacidade de geração de energia elétrica é o aumento de temperatura.

O trabalho foi desenvolvido em etapas: 1ª etapa: Dimensionamento do sistema de geração e armazenamento de energia; 2ª etapa: Cálculos de posicionamento; 3ª etapa: Teste de eficiência.

2.1 Dimensionamento do sistema

Este projeto teve início com o estudo de assuntos relacionados com o aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica, bem como nos aspectos gerais do funcionamento de sistemas fotovoltaicos isolados e as características que influenciam no seu rendimento (como o posicionamento do painel fotovoltaico e efeito da temperatura), além do dimensionamento do sistema. A Figura 1 mostra um sistema solar fotovoltaico OFF-GRID ou autônomo (ANEEL,2005).

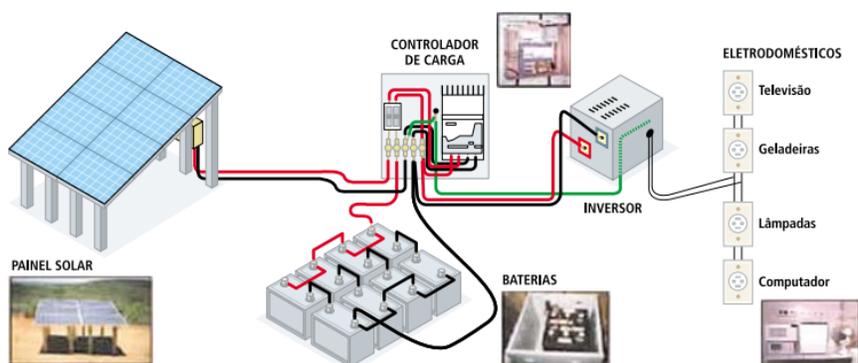


Figura 1. Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica OFF-GRID de energia elétrica

Fonte: Atlas de energia elétrica (ANEEL,2005).

Analisou-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico, calculando a energia consumida por uma casa com três pessoas, como é apresentado na Tabela 1, podendo, assim, dimensionar a capacidade do banco de baterias para o sistema que será montado, ou seja, a quantidade de baterias necessárias para alimentar uma casa (com consumo médio de aproximadamente 2500 Wh diariamente). Há uma dada importância nesses cálculos, pois na queda ou falta de energia (em decorrência do tempo nublado, chuvoso ou sombreamento), o banco de baterias entra em ação, alimentando assim a residência. Para calcular a energia consumida diariamente (E_c) multiplicou-se a quantidade de eletrodomésticos (X) pela potência média de cada um (P) e pelo tempo de uso diário (T), obtendo assim o consumo diário, conforme (1) Para obter o consumo mensal (E_{cm}), basta multiplicar o consumo

diário (E_c) pelos dias de uso mensal (Y), conforme (2). (ver Tabela 1)

$$E_c = X * P * T \quad (1)$$

$$E_{cm} = E_c * Y \quad (2)$$

A partir disso, pode-se calcular a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, a potência através do método da insolação, o dimensionamento do banco de baterias, bem como a quantidade de painéis fotovoltaicos a serem usados no sistema.

Eletrodomésticos	Quant.: X	Potência média: P [W]	Dias de uso mensal: Y	Tempo de uso diário: T [hrs]	Consumo diário: E_c [Wh]	Consumo mensal: E_{cm} [kWh]
Geladeira	1	100	30	8,00*	800	24
Fogão	1	60	30	0,17	10,2	0,306
Ferro	1	1000	8	0,28	280	2,24
Televisão 32"	1	55	30	4,9	269,5	8,085
Ventilador	1	120	28	1,6	192	5,376
Liquidificador	1	300	28	0,03	9	0,252
Lâmpadas	6	5	30	4,9	147	4,41
Carregador de celular	3	1,5	30	2	9	0,27
Carregador de notebook	1	300	30	2,5	750	22,5
Aparelho de som pequeno	1	20	25	1	20	0,5
Total:	17	1961,5	269	25,38	2486,7	67,939

* Considerando que o compressor funciona apenas oito horas diárias.

Tabela 1. Dimensionamento da energia consumida por uma residência padrão

Na Tabela 2, calculou-se a energia produzida (E_p) pelos módulos fotovoltaicos, adotando o método da insolação, através da potência já estabelecida pelo módulo, com um valor prévio de 205 W, e área de 1,455 m², obtendo assim uma eficiência

(η_m) de 14,09%, conforme (3). Utilizando a insolação diária da região do Sul da Bahia, valor obtido com o auxílio do Atlas de energia elétrica do Brasil fornecido pela ANEEL (2005), encontrou-se a energia produzida pelo painel (E_p), conforme (4). (ver Tabela 2).

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{A_m * 1000} * 100 \quad (3)$$

$$E_p = E_s * A_m * \eta_m \quad (4)$$

Potência máxima- $P_{máx}$ [W]	Área do módulo - A_m [m ²]	Eficiência - η_m	Insolação diária - E_s [Wh/m ² .dia]	Energia produzida - E_p [Wh]
205	1,455	0,14089	5100	1046290

Tabela 2. Cálculo da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos.

Na Tabela 3, foi dimensionado o banco de baterias, encontrando o número de baterias em série (valores necessários caso essas sejam utilizadas em série no sistema). Conforme (5), a capacidade do banco de baterias (C_{banco}) é calculada através da energia armazenada (E_a) multiplicando-se pela tensão do banco (V_{banco}), conforme (6). A energia armazenada foi obtida utilizando o valor encontrado na Tabela 3 (2486,7 Wh) multiplicado pela profundidade de descarga da bateria, correspondente a 50%, conforme a (7). Assim como se calculou o número de baterias em série, foi calculado o número de baterias para um conjunto em paralelo, dividindo a capacidade de carga do banco de baterias (C_{banco}) pela capacidade do banco de cada bateria (C_{bat}), conforme (8).

$$N_{bs} = \frac{V_{banco}}{V_{bat}} \quad (5)$$

$$C_{banco} = \frac{E_a}{V_{banco}} \quad (6)$$

$$E_a = \frac{E_c}{P_d} \quad (7)$$

$$N_{bp} = \frac{C_{banco}}{C_{bat}} \quad (8)$$

$V_{\text{banco}} [V]$ 12	$V_{\text{bat}} [V]$ 12	Número de baterias em série – N_{bs} 1
Energia armazenada [Wh] – E_a 4973,4	$V_{\text{banco}} [V]$ 12	Capacidade do banco de baterias [Ah] – C_{banco} 414,45
Energia consumida – E_c [Wh] 2486,7	Profundidade de descarga permitida (20%, 50%, 80%) – P_d 0,5	Energia armazenada – E_a [Wh] 4973,4
Capacidade de carga do banco de baterias – C_{banco} [Ah] 414,45	Capacidade de carga de cada bateria – C_{bat} [Ah] 200	Número de conjuntos paralelos – N_{bp} 2,072

Tabela 3. Dimensionamento do banco de baterias

Na Tabela 4, obteve-se a quantidade de módulos fotovoltaicos que serão necessários para o sistema. Para encontrar o número de painéis empregados dividiu-se a energia diária consumida no sistema (E_c), valor encontrado na Tabela 3, pela energia diária produzida por cada módulo (E_p), valor encontrado na Tabela 4, conforme (9).

$$N = \frac{E_c}{E_p} \quad (9)$$

Energia diária consumida no sistema – E_c [Wh]	Energia diária produzida por cada módulo E_p [Wh]	Números de módulos empregados no sistema - N	
		Calculado	Utilizado
2486,7	1046,29	2,38	3

Tabela 4. Quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para o sistema

Partindo do pressuposto de que existe um consumo de 2486,7 Wh diariamente, dois módulos não seriam suficientes para gerar energia para a residência, logo, serão utilizados três módulos, havendo uma sobra de energia referente a 652,17 Wh. Tendo em vista os constantes avanços tecnológicos, essa sobra de energia pode ser utilizada, e se faz necessária, quando houver a compra de novos eletrodomésticos.

Ao longo do desenvolvimento do projeto foram analisados aspectos necessários para ter um maior aproveitamento do sistema de geração de energia.

Dentre esses aspectos, podem ser citados o posicionamento e o ângulo de inclinação da placa.

2.2 Cálculos de Posicionamento

Na análise do ângulo de inclinação da placa houve, primeiramente, uma análise local/regional do posicionamento do sol e das taxas de radiação solar incidente para localização adequada das placas, com o intuito de maximizar a produção de energia elétrica e melhorar a eficiência da placa solar.

Atualmente o posicionamento de placas fotovoltaicas é realizado de modo prático, através de tabelas que relacionam a posição geográfica (latitude/longitude), para se obter uma angulação média de inclinação da placa fotovoltaica. Para tal situação, a placa é instalada de forma fixa ao longo do ano. Para região sul da Bahia utiliza-se uma inclinação fixa igual a 14° , referente à latitude local. Com isso, a melhor maneira de instalar um módulo solar fixo é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico, que corresponde ao ângulo azimutal.

Com a motivação de se melhorar a eficiência global do sistema, o projeto prossegue com a análise dos ângulos de inclinação da placa solar. Como o ângulo de altura do Sol possui grande variação ao longo das estações do ano, sendo a altura do Sol maior nos dias de verão, determinaram-se dois ângulos para a inclinação do painel, observando sua variação no período de verão-primavera e outono-inverno, e obtendo os ângulos para o horário de maior incidência de luz solar. Esses fatores são importantes e imprescindíveis para uma melhor eficiência das placas solares. O ângulo alfa calculado (ângulo de inclinação) é responsável por fazer os raios solares incidirem perpendicularmente à superfície do módulo, maximizando a captação da radiação solar direta.

Através do *site* Solar Topo (SOLAR TOPO, 2015), obteve-se o ângulo zenital correspondente à altura solar para todos os meses do ano em um dia fixo e em horários em que os picos de incidência de luz são maiores, por volta de meio dia, e a latitude local. Devido à grande variação do ângulo de inclinação nos meses, calculou-se uma média para o ano, como é apresentado na Tabela 5: Latitude e inclinação para épocas específicas do ano para a Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Além da média anual, calculou-se a inclinação dividindo o ano em duas partes: verão-primavera e outono-inverno, obtendo, assim, a inclinação para os meses de abril a setembro, correspondente ao período do outono-inverno, e de outubro a março, ao período do verão-primavera, ver Tabela 5.

Média anual			
Anual (jan – dez)	Outono - Inverno (abr – set)	Primavera - Verão (out – mar)	Latitude
18,715833°	30,303333°	7,128333°	14°

Tabela 5. Latitude e inclinação para duas épocas específicas do ano para a UESC

Em seguida, utilizaram-se quatro ângulos, que foram parametrizados para simulação em bancada de laboratório, sendo o ângulo zero referente à média anual calculada de 18,72°, o ângulo de cinco graus foi referente à diferença entre a média anual e o ângulo de inclinação da latitude local (UESC: 14°), o ângulo aproximado de sete graus foi referente à diferença entre o ângulo de inclinação calculado para o ano e a média verão-primavera e o ângulo aproximado de dezesseis graus foi referente à média outono-inverno.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos teóricos e a execução do projeto geraram alguns resultados para análise e comprovação do que foi estudado. Abaixo, seguem os gráficos plotados a partir dos resultados obtidos no experimento.

Após a execução das medidas de tensão, corrente e temperatura, foram plotados os gráficos a fim de analisar as curvas de corrente X tensão ($I \times V$) e potência X tensão ($P \times V$), e observar qual das angulações trouxe uma melhor eficiência para a placa solar e quais os parâmetros físicos que impossibilitaram determinadas angulações de obterem uma melhor eficiência.

Segundo VILLALVA (2012), o melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios incidem perpendicularmente ao módulo, ou seja, com um ângulo de inclinação igual a zero grau. Tendo em vista essa característica do módulo, foram utilizadas as medidas com inclinação de zero grau para analisar os efeitos de temperatura e irradiância sobre a placa solar.

No gráfico a seguir, têm-se todas as curvas de posicionamento (ângulos: 0°, 5°, 7° e 16°) para $I \times V$, a uma temperatura monitorada entre 25° e 30°C, ver Figura 2.

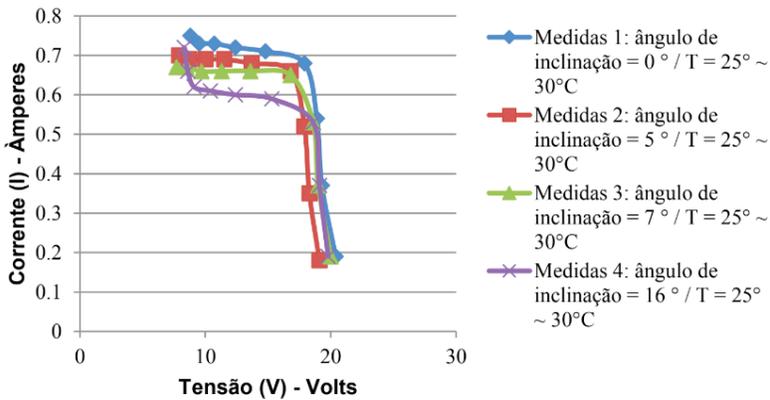


Figura 2. Gráfico com as curvas de $I \times V$ para os diferentes ângulos calculados

Esse gráfico apresenta as curvas de corrente X tensão para os diferentes ângulos de inclinação. Pode-se notar que a curva que apresenta um melhor rendimento se refere à inclinação de zero grau, ou seja, quando o Sol se posiciona perpendicularmente à placa solar. No experimento foi utilizada a placa composta por quinze lâmpadas incandescentes para simular o efeito de radiação solar.

O próximo gráfico apresenta a curva $P \times V$ para os diferentes ângulos calculados, ver Figura 3.

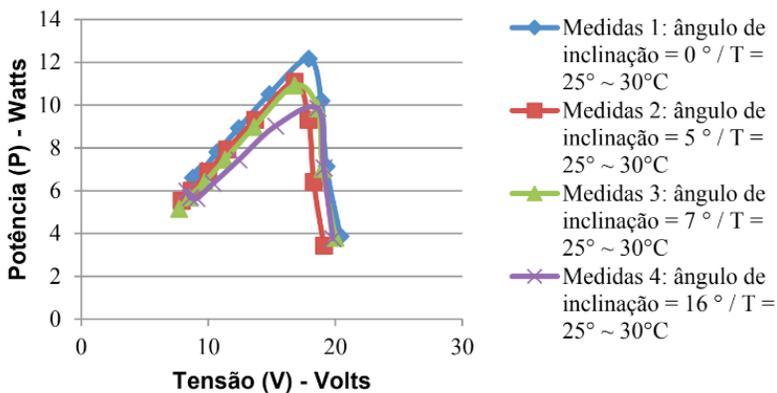


Figura 3. Gráfico com as curvas de $P \times V$ para os diferentes ângulos calculados

O gráfico da Figura 3 apresenta as curvas potência X tensão para esses mesmos ângulos, e nota-se que a curva que apresenta um melhor desempenho é a referente à inclinação de zero grau.

Nos gráficos a seguir são apresentadas as curvas de $I \times V$ (Figura 4) e de P

x V (Figura 5) para o ângulo de zero grau com temperaturas de monitoramento diferentes, sendo uma curva a 25° ~ 30°C e outra a 65°C. A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece em seus terminais e consequentemente na potência fornecida.

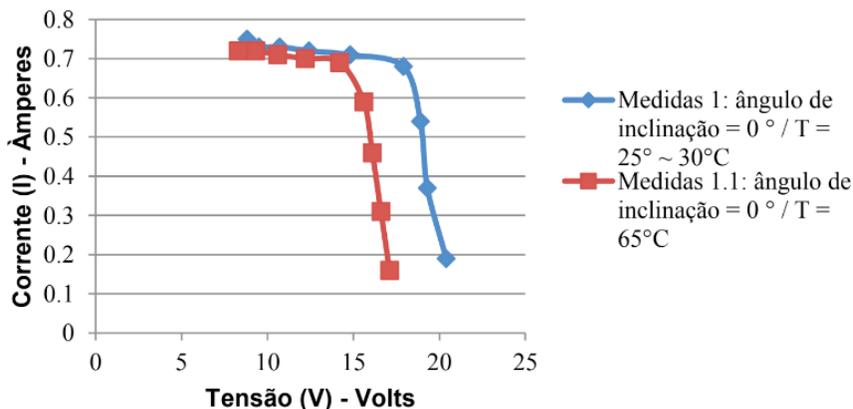


Figura 4. Gráfico com as curvas de I x V para as diferentes temperaturas

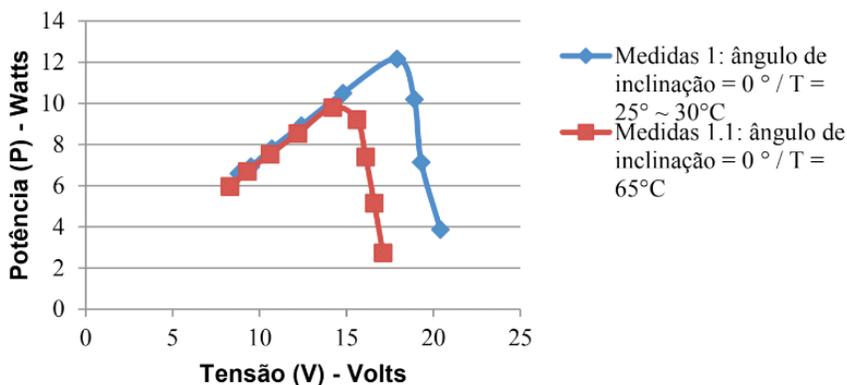


Figura 5. Gráfico com as curvas de P x V para diferentes temperaturas

As tensões são maiores para temperaturas mais baixas e em temperaturas mais altas as tensões são menores e a corrente fornecida pelo módulo não se altera com a temperatura. É o que pode ser observado no gráfico anterior, da Figura 5, haja vista que a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo, pois quando a temperatura aumenta, a potência fornecida pelo módulo diminui (VILLALVA, 2012).

Os resultados deste trabalho indicam que o posicionamento do módulo solar apresenta forte influência nos resultados de rendimento e de eficiência que ele pode apresentar. As análises feitas anteriormente possibilitaram chegar a essa conclusão,

pois os fatores ambientais que influenciaram significativamente na eficiência do módulo foram a temperatura e as variações angulares.

4 | CONCLUSÃO

A relevância deste trabalho evidenciou-se através dos estudos feitos a fim de obter um melhor rendimento para o painel solar e, conseqüentemente, aperfeiçoar os estudos voltados para a implantação do sistema solar fotovoltaico *OFF-GRID* mais eficiente. Tal constatação se dá em razão da análise das curvas de eficiência para diferentes ângulos, avaliando assim o posicionamento do módulo solar.

Verificou-se que para o projeto de uma instalação *OFF-GRID* aspectos como o posicionamento e a temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos influenciam na quantidade de energia produzida podendo ter um acréscimo de cerca de 20% na energia produzida durante o ano ao se adotar a metodologia proposta neste trabalho.

Portanto, foi validado em laboratório que o método de alocação de placas fotovoltaicas proposto se mostrou eficiente, visto que apresentou uma maior quantidade de energia gerada quando comparado com a técnica convencional de posicionamento utilizando apenas a latitude do local, proporcionando uma maior geração de energia aliada a um baixo custo operacional de posicionamento do sistema de geração.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2. Ed. – Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.: il.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). “**Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.**” Rio de Janeiro, maio/2012 (Nota Técnica).

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU S. L.; RUTHER R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. – São José dos Campos: INPE, 2006.

SOLAR TOPO. **Dom calculadora posição – Azimute e Zenith**. Disponível em: <http://www.solartopo.com/posicao-do-sol.htm>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. “**Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**”. Editora: Érica. 2012. São Paulo.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM: BREVE PANORAMA

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Ad Jefferson Custódio Gomes

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/7544659643429006>

Fabiano Rodrigues Soriano

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4708268086597248>

Fábio Alexandre Martins Monteiro

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/7007542686718562>

Luís Ricardo Cândido Cortes

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7007542686718562>

Victor Santos Matos

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4813015095509110>

Vinícius de Souza Andrade Wanderley

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/2757326537201365>

RESUMO: Este trabalho apresenta um breve panorama sobre o Programa Brasileiro de Etiquetagem, seus objetivos, funcionamento, impactos e vertentes. O programa é a ferramenta

regulatória do contexto de eficiência energética no país. Demonstra-se capaz de influenciar desde a criação, à formação do mercado dos produtos tecnológicos associados a consumo energético.

PALAVRAS-CHAVE: Edifica, Eficiência Energética, Fotovoltaico, Programa Brasileiro de Etiquetagem, Veicular.

BRAZILIAN LABELING PROGRAM: A BRIEF OVERVIEW

ABSTRACT: This work presents a brief overview of the Brazilian Labeling Program, its objectives, operation, impacts and strands. The program is the regulatory tool of the energy efficiency context in the country. It proves capable of influencing from the creation, to market formation of technology products associated with energy consumption.

KEYWORDS: Brazilian Labeling Program, Edification, Energy Efficiency, Photovoltaic, Vehicular.

1 | INTRODUÇÃO

Eficiência energética pode ser definida como um conjunto de ações de diversas naturezas que resultam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade (HADDAD, 2007).

De posse deste conceito, verifica-se que há um potencial latente de conservação de energia mediante investimentos em equipamentos mais eficientes.

Ao longo do século XX, as crises do petróleo trouxeram à tona a escassez do recurso e evidenciaram a necessidade de haver um consumo racional de energia, além de estimular os investimentos em desenvolvimento de fontes alternativas de energia (JANNUZZI; DANELLA; SILVA, 2004).

Com este plano de fundo, é criado em 1984 o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), o qual é coordenado e regulamentado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), e executado em parceria com o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) (CONPET, 2011).

O CONPET busca estimular o uso consciente de energia informando a população acerca de características do funcionamento dos equipamentos disponíveis no mercado.

Este trabalho descreve o funcionamento do programa, bem como as motivações por trás de sua criação. Da mesma forma, são apresentados programas derivados deste e que objetivam ampliar o rol de aplicação da proposta a fim de incentivar as medidas de eficiência energética em outras áreas.

2 | PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), desempenha a função de fornecer aos consumidores informações pertinentes acerca do desempenho de produtos, avaliando um conjunto de critérios, tal como a eficiência energética dos mesmos (INMETRO, 1993).

O objetivo é conscientizar a população em relação às características de consumo dos produtos disponíveis, acarretando na escolha dos mais eficientes e desestimulando a produção de itens com baixo desempenho neste quesito (INMETRO, 1993). Isso estimula a indústria a buscar por soluções mais eficientes como vantagem competitiva.

A disseminação dos equipamentos eficientes, contém parte do avanço da demanda energética, uma vez que, para uma mesma quantidade de novos equipamentos conectados à rede, uma menor demanda total é solicitada, postergando investimentos em ampliação da geração.

A. Como funciona

O PBE trabalha a partir da realização de ensaios dos produtos em laboratórios e na consequente atribuição de uma etiqueta, a denominada Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que os classificam conforme os resultados em eficiência observados.

Estas consistem em uma classificação de (A), para os produtos mais eficientes, à (E), para aqueles considerados menos eficientes. A depender do

programa, a etiqueta pode ser composta por mais ou menos faixas classificatórias (INMETRO, 1993).

Atualmente, o PBE possui em torno de 40 programas de etiquetagem, atuando principalmente na área de produtos consumidores de energia elétrica (ELETROBRAS, 2013).

B. Como ler a etiqueta

Para que o programa atinja satisfatoriamente o objetivo de informar os consumidores, é essencial que o mesmo desenvolva um modelo de apresentação de informações de fácil compreensão e leitura.

A Figura 1, apresenta um exemplo de etiqueta de eficiência energética. Cada uma das setas e letras corresponde a um determinado setor da mesma e transmite ao consumidor um tipo de informação.

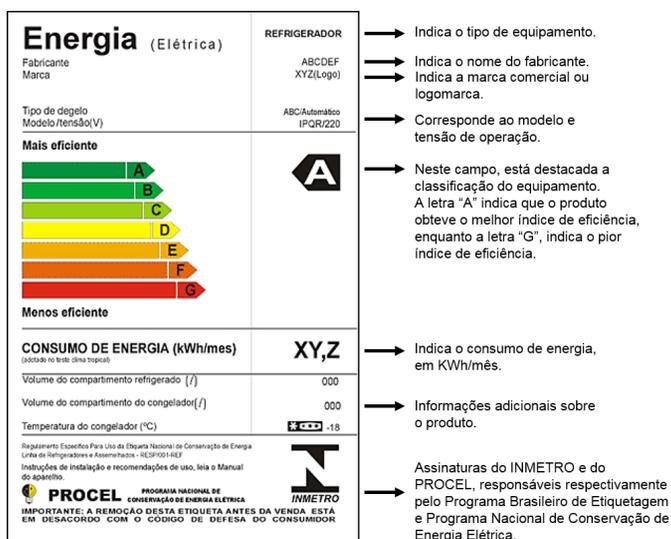


Figura 1 - Exemplo de etiqueta.

Fonte: adaptado de (INMETRO, 1993).

A Figura 2, descreve uma possível distribuição das vendas de determinado produto como função de sua respectiva eficiência, considerando para tal o cenário base, ou seja, aquele sem a influência das etiquetas (CARDOSO, 2012).

A introdução das etiquetas passou a munir os consumidores de informações e o desempenho do equipamento passou a ser uma grandeza visível e influente sobre a decisão de compra (CARDOSO, 2012). Tal fenômeno provoca o deslocamento da curva gaussiana para a direita indicando que o montante de vendas de produtos

mais eficientes cresce, em detrimento dos demais, conforme Figura 3.

Como as etiquetas apresentam informações pertinentes ao consumo energético dos produtos de forma simples ao público, a proposta acabou sendo um sucesso e estimulou a ampliação do programa a outras áreas por meio de seus derivados, como o PBE Edifica, PBE Veicular e o PBE Fotovoltaico, os quais serão descritos a seguir.

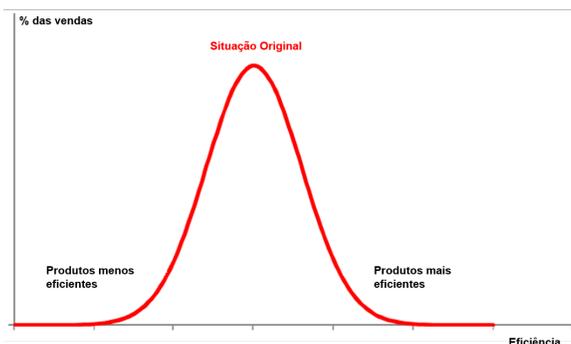


Figura 2 - Influência da eficiência sobre a compra.

Fonte: (CARDOSO, 2012).

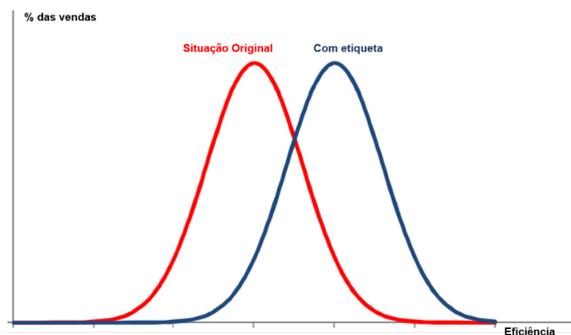


Figura 3 - Influência das etiquetas sobre as decisões de compra.

Fonte: (CARDOSO, 2012).

3 | PBE EDIFICA

A etiqueta PBE Edifica foi desenvolvida em uma parceria entre o INMETRO e a Eletrobrás/PROCEL Edifica e oficializada em 2001.

A etiquetagem de edificações atua na disseminação de conhecimento acerca da eficiência energética das edificações, incentivando o crescimento do país com

controle sobre o aumento da demanda de energia (SUSTENTARQUI, 2018).

Para a obtenção da etiqueta é necessário que se entre em contato com um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA), o qual se caracteriza como uma pessoa jurídica e cuja competência é reconhecida pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO (CGCRE) (EDIFICA).

Foram então desenvolvidos, no âmbito do PBE, os: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), e os Requisitos de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência energética de Edificações (RAC) (CB3E, 2014).

Os RTQ-C e RTQ-R contém os requisitos necessários para a determinação do nível de eficiência energética de uma determinada edificação. Já o RAC descreve os procedimentos para submissão para avaliação, direitos e deveres dos envolvidos, modelos das ENCEs, dentre outros (CB3E, 2014).

Utilizando-se por base os critérios estabelecidos pelos RTQ-C e RTQ-R, além dos procedimentos descritos pelo RAC, desenvolve-se o processo de etiquetagem, o qual envolve a inspeção do projeto e, posteriormente, da edificação construída, resultando na emissão das respectivas ENCEs. No caso das edificações já construídas, apenas a última é emitida (CB3E, 2014).

A inspeção de projeto pode ser feita mediante dois métodos (CB3E, 2014):

- Método prescritivo: avaliação feita a partir de parâmetros pré-estabelecidos ou mesmo obtidos a partir de cálculos;
- Método de simulação: baseado na simulação de duas edificações: a real e aquela representativa do modelo obtido pelo método prescritivo.

Já a inspeção de edificação construída é realizada por meio de inspeção amostral in loco.

A Figura 4 traz um exemplo de ENCE correspondente a eficiência energética da categoria de edificações comerciais, de serviços e públicas. Destaca-se que, no âmbito do PBE Edifica, verificam-se as eficiências correspondentes à envoltória da edificação, de sua iluminação e do condicionamento de ar.

Outro ponto de destaque é com relação às bonificações: estas abrangem iniciativas que comprovadamente contribuam com a eficiência energética da edificação, como elevadores classe “A”, sistema de uso racional de água, sistemas ou fontes de energia renovável, sistema de cogeração, entre outros (CB3E, 2014).



Figura 4 - Etiqueta do programa PBE Edifica.

Fonte: (CREATO).

4 I PBE VEICULAR

O setor de transportes é um dos maiores consumidores de energia do Brasil, com a predominância do viés rodoviário que é alimentado, principalmente, por derivados do petróleo e gás. Essa realidade promoveu a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE-V) em 2008, a partir da parceria entre INMETRO e CONPET (ENERGIA, 2008).

Criou-se o PBE-V com o intuito de contribuir com o desenvolvimento tecnológico, o aumento da eficiência energética dos veículos e a redução de emissões de poluentes. Através de uma etiqueta padrão, Figura 5.a, que deixa visível informações úteis aos consumidores na hora da compra do veículo. Sendo que os destaques em eficiência nas categorias recebem também o selo CONPET, Figura 5.b.

A adesão dessa etiquetagem é de forma voluntária pelas fabricantes dos automóveis (MACHADO, 2016) e abrange fabricantes e importadores de veículos leves, sendo, no entanto, incentivada no âmbito fiscal (COSTA, 2017). A classificação é feita com base na eficiência, resultando em informações como autonomia em km/l de combustível, emissão de CO₂, consumo energético, por tecnologia de combustível, categoria e ambiente (DE MORAES; MACHADO, 2015), que são divulgadas anualmente em tabela com os modelos avaliados (INMETRO, 2013).

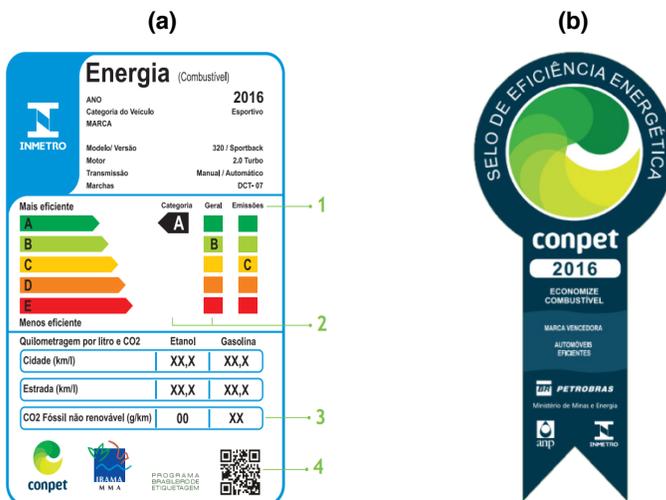


Figura 5 - a. ENCE veicular, b. Selo de eficiência energética.

Fonte: adaptado de (COSTA, 2017) e (INMETRO, 2013).

Vê-se, na Figura 6, que de forma geral, houve crescimento adesões ao programa, principalmente para os destaques em eficiência, o que pode indicar um crescimento nessa vertente de veículos. Os de pior categoria (E), também, apresentaram considerável aumento, o que induz a ideia de polarização do mercado.

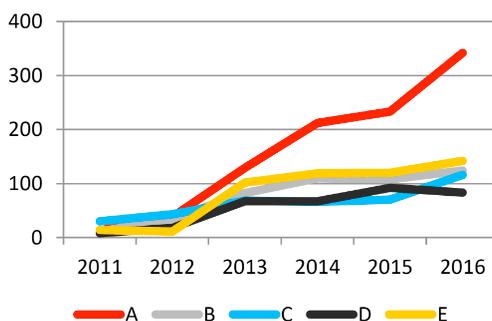


Figura 6 - Número de versões de veículos etiquetados, por categorias ao ano (2011-2016).

Fonte: (COSTA, 2017).

A criação do PBE-V permitiu que o Brasil se tornasse um dos países reconhecidos por desenvolver programas de eficiência energética e pela utilização racional dos combustíveis em veículos. Ademais, as informações diretas e

comparativas entre modelos das categorias tende a promover a redução dos custos com os veículos, uma vez que gera expectativas por mais eficiência e economia, modificando o setor industrial e reduzindo as assimetrias do mercado ao gerar uma competitividade adicional no setor (COSTA, 2017).

Salienta-se que, diferentemente dos programas de etiquetagem veicular dos Estados Unidos e Europa, nos quais o foco era a drástica necessidade de reduzir as emissões de CO₂, no Brasil, devido sua matriz energética considerada limpa - se comparada com essas outras realidades, a criação se deu muito mais por apelo comercial em intensificar a competição de mercado (COSTA, 2017).

É notório, porém, que diferentemente de outros programas, a utilização da etiqueta pelo consumidor ainda seja limitada, uma vez que as mesmas não são utilizadas como conteúdo de propaganda para as vendas e que muitos consumidores desconhecem a presença dessas informações.

Essa realidade não levou ao incremento dos setores de pesquisa, desenvolvimento e inovação como proposto para o programa, ao passo que não modificou o rumo tecnológico no país por conta de dificuldades na relação entre as filiais locais e suas empresas matrizes por investimentos no setor.

Outrossim, há grandes dificuldades de cooperação entre universidades brasileiras e empresas para desenvolvimento dessas pesquisas, demonstrando a presença de um sistema defasado se comparado com a realidade dos países das matrizes (COSTA, 2017).

5 | PBE FOTOVOLTAICO

A evolução da capacidade solar instalada no mundo e, de forma mais discreta, no Brasil, levou a necessidade de adoção de práticas regulatórias para os equipamentos usados no setor, surgindo o PBE Fotovoltaico. A portaria INMETRO n°4 (2011) implementou o programa com caráter compulsório, com o objetivo de formalizar regras sobre os equipamentos de geração de energia fotovoltaica e para o processo de adaptação determinou fases até 2016: fabricação e importação de produtos (2011); comercialização em território nacional (2012); fabricação e importação (2016) (INMETRO, 2020).

O PBE Fotovoltaico abrange os painéis fotovoltaicos, os controladores de carga, os inversores off-grid (potência de 5W a 10kW), os inversores on-grid (potência até 10kW) e as baterias (INMETRO, 2020), a ENCE para cada um dos produtos pode ser vista na Figura 7.

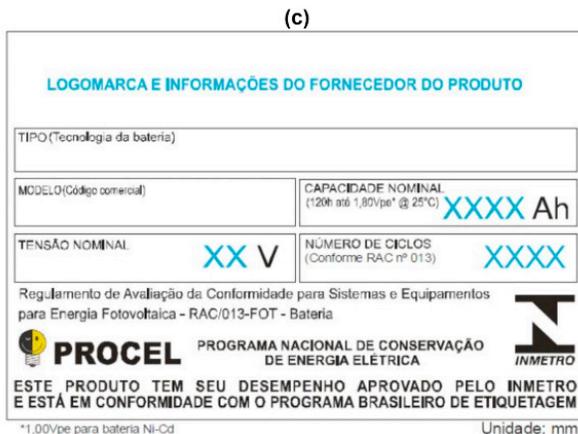
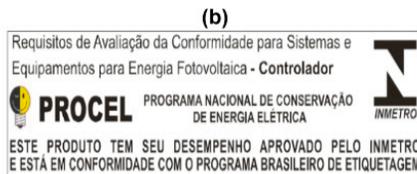
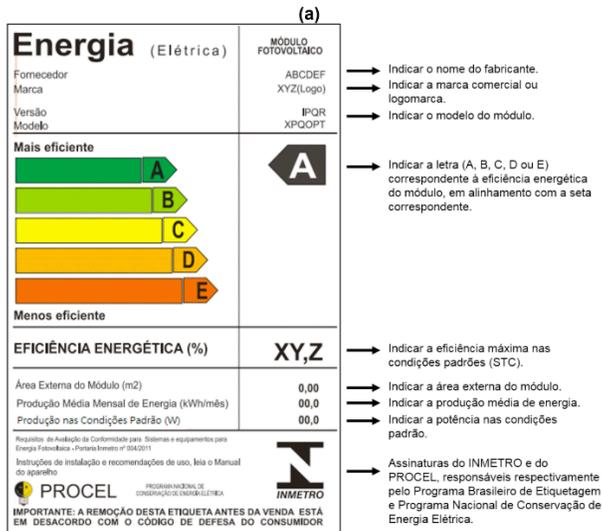


Figura 7 - ENCE para: (a) painéis, (b) controladores/inversores, (c) baterias.

Fonte: (INMETRO, 2020) e (INMETRO, 2011).

O objetivo dessa vertente do programa é “qualidade, segurança e eficiência energética para produtos nacionais e importados”, que, por meio da ENCE, traz aos consumidores, informações que lhes permitam avaliar desempenho e eficiência energética dos produtos.

Juntamente com outros programas e convênios, o PBE se configura como

um instrumento de apoio ao setor solar fotovoltaico no Brasil, regulando todo o setor.

6 | CONCLUSÕES

O PBE age como ferramenta regulatória dos planos de eficiência energética desenvolvidos no Brasil. Sua aplicação com base na ENCE atua como um dispositivo de informação capaz de influenciar na dinâmica de mercado, desde a fabricação à compra, ao menos, para dispositivos eletroeletrônicos.

De forma indireta o programa contribui para com o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e econômicas, atingindo desde o setor dos combustíveis ao sistema elétrico.

Sobre o impacto das vertentes específicas, percebe-se que na forma PBE Edifica, intensificasse uma “onda verde” no setor de construções; na forma PBE-V desenvolve-se uma acentuação no mercado de carros econômicos; no PBE Fotovoltaico, graças ao caráter compulsório, garante-se mais segurança aos equipamentos.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, R. B. **Estudo dos impactos energéticos dos Programas Brasileiros de Etiquetagem Energética: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos**. 2012. (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá.

CB3E, I., Procel Edifica, Eletrobras. **Manual para etiquetagem de edificações públicas**. 2014. 121 p.

CONPET. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 2011. Disponível em: http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/programa-brasileiro-de-etiquetagem-1.shtml. Acesso em: 18 de julho de 2019.

COSTA, J. P. d. **A Eficiência energética e o PBE-V: breve relato**. 2017.

CREATO. **PBE PROCEL EDIFICA**. Disponível em: <https://www.creato.com.br/procel-edifica>. Acesso em: 23 de julho de 2019.

DE MORAES, N. G.; MACHADO, B. V. Impacto do Inovar-Auto nas emissões veiculares. **Blucher Engineering Proceedings**, 2, n. 1, p. 181-198, 2015.

EDIFICA, P. **Como obter a etiqueta**. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/como-obter>. Acesso em: 19 de julho de 2019.

ELETROBRAS, P. E., Inmetro, CB3E, UFSC. **Introdução ao Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações**. Rio de Janeiro: 2013. 12 p.

ENERGIA, M. d. M. e. **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas**. MME. 2008.

HADDAD, J., Santos, A.H. **Eficiência Energética Teoria e Prática**. 2007. 87 p. (Eletrobrás-procel / Escola Federal de Engenharia de Itajubá).

INMETRO. **O Programa Brasileiro de Etiquetagem**. 1993. Disponível em: https://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php. Acesso em: 19 de julho de 2019.

INMETRO. **Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011**. INMETRO, M. D. E.-. : 50 p. 2011.

INMETRO. **Como você decide a compra do seu carro?** : 6 p. 2013.

INMETRO. **Orientações Gerais para fabricantes e importadores sobre a Regulamentação de Equipamentos para geração de energia fotovoltaica**. INMETRO, M. D. E.-. : 15 p. 2020.

JANNUZZI, G. D. M.; DANELLA, M. A.; SILVA, S. A. S. **Metodologia para avaliação da aplicação dos recursos dos programas de eficiência energética**. *In: Energy Discussion Paper*, 2004, 2.60-01. p. 04.

MACHADO, B. V. Z. **Perspectivas para uma política brasileira de eficiência energética veicular**. 2016. -, Dissertação de M. Sc.-Programa de Planejamento Energético, Universidade

SUSTENTARQUI. **Etiqueta PBE Edifica: O que é e como obter**. 2018. Disponível em: <https://sustentarqui.com.br/etiqueta-pbe-edifica/>. Acesso em: 19 de julho de 2019.

REPRESENTAÇÃO DE MODELOS RACIONAIS NO PROGRAMA ATP

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 08/07/2020

Sergio Luis Varricchio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –
CEPEL

Rio de Janeiro – RJ

<http://lattes.cnpq.br/5825024551486331>

Trabalho originalmente publicado no XXIV SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, promovido pelo Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRE-Brasil).

RESUMO: A utilização de modelos racionais (MRs), isto é, modelos baseados nos polos dominantes e resíduos associados de funções de transferência (FTs), calculados de forma exata ou aproximada, têm sido amplamente utilizados em diversas áreas da engenharia, como modelagem de linhas de transmissão, de transformadores de potência, construção de equivalentes eletromagnéticos, etc. Atualmente, existem diversos métodos para a obtenção destes MRs, sendo o método denominado Vector Fitting o mais utilizado. No entanto, existem poucos trabalhos descrevendo como construir equivalentes eletromagnéticos, a partir destes MRs, em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, em especial, o ATP (Alternative Transient Program). Neste trabalho é dada uma contribuição a este tema, pela proposição de um

método para a implementação de MRs de FTs SISO (single-input single-output) no ATP.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos racionais, modelo de acompanhamento, Alternative Transient Program (ATP), funções de transferência, polos e resíduos.

REPRESENTATION OF RATIONAL MODELS IN THE ATP PROGRAM

ABSTRACT: The use of rational models (RMs), that is, models based on the dominant poles and associated residues of transfer functions (TFs), calculated in an exact or approximate way, has been widely used in several areas of engineering, such as modeling of transmission lines, power transformers, construction of electromagnetic equivalents, etc. Currently, there are several methods for obtaining these RMs, being the so-called Vector Fitting method the most used. However, there are few studies describing how to build electromagnetic equivalents, from these RMs, in electromagnetic transient simulation programs, particularly, the ATP (Alternative Transient Program). In this work, a contribution on this theme is given, by proposing a method for the implementation of RMs of TFs SISO (single-input single-output) in ATP.

KEYWORDS: Rational models, companion network, Alternative Transient Program (ATP), transfer functions, poles and residues.

1 | INTRODUÇÃO

Estudos de transitórios eletromagnéticos em redes elétricas são, em geral, concentrados

em uma área específica (área de estudos ou de interesse), onde se deseja analisar algum tipo de fenômeno elétrico. Desta forma, torna-se conveniente dividir a rede elétrica em dois subsistemas. O primeiro subsistema é formado pela área de interesse, que deve ser modelada em detalhes, o segundo é composto pelo resto do sistema (área externa) que pode ser representado por um equivalente. O principal motivo de se utilizar equivalentes é a redução do esforço computacional, do esforço despendido pelo analista em preparar os dados de toda a rede com detalhes e, conseqüentemente, do tempo necessário para a obtenção dos resultados. De fato, dependendo do porte do sistema a ser analisado, a utilização de equivalentes é a única forma viável de se realizar o estudo.

O equivalente comumente utilizado para a área externa é uma matriz de impedâncias nodais, cujas componentes são as impedâncias próprias e de transferência de curto-circuito obtidas a partir de suas barras de fronteira para a frequência fundamental do sistema. Por este método, as características da área externa para outras frequências são perdidas, o que poderá implicar em sérios erros em análises posteriores.

Portanto, a utilização de equivalentes de alta fidelidade (qualidade) de redes elétricas é de fundamental importância para que estes estudos possam ser feitos de forma precisa e confiável. Modelos racionais (MRs), isto é, modelos baseados nos polos dominantes e resíduos associados de funções de transferência (FTs), calculados de forma exata [1] ou aproximada [2], [3], têm sido amplamente utilizados para esta e outras importantes finalidades [4]. Atualmente, existem diversos métodos para a obtenção destes MRs, sendo o método denominado Ajuste Vetorial ou, em inglês, Vector Fitting (VF), o mais utilizado. Neste método, as respostas em frequência das admitâncias ou impedâncias próprias das barras de fronteira e de transferência entre elas são eficientemente aproximadas por funções racionais de baixa ordem da frequência complexa s . O problema passa a ser, então, como representar estas funções racionais de s (modelos racionais) em programas de simulação no tempo de transitórios eletromagnéticos como EMTP, PSCAD e ATP.

Neste trabalho é proposto um método simples e eficiente para a representação destes MRs no programa ATP (Alternative Transient Program), utilizando a linguagem MODELS, disponibilizada neste programa para que os usuários possam definir seus próprios modelos de componentes de redes elétricas.

Na presente fase da pesquisa, este método é aplicável apenas a equivalentes mono-barras, ou seja, quando as áreas de interesse e externa são conectadas apenas por uma barra (FTs SISO). Julga-se, no entanto, que este método pode ser futuramente generalizado para ser aplicado, também, a equivalentes de redes multi-barras (FTs multi-input multi-output - MIMO). Após esta generalização, pretende-se implementar este método no programa HarmZs do CEPEL (para estudo

do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas). Desta forma, as aplicações do programa HarmZs serão expandidas, tornando-o, também, uma ferramenta complementar importante para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência de grande porte.

Além do desenvolvimento matemático detalhado do método proposto, neste trabalho será apresentado também um caso exemplo mostrando a eficiência do método por meio de comparações entre respostas no tempo dos modelos completo da rede elétrica e da área de interesse conectada ao MR da área externa.

2 | MODELOS RACIONAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

A relação entre uma saída $y(s)$ e \mathbb{C} e uma entrada $u(s)$ é definida pela FT apropriada $H(s)$ e \mathbb{C} , ou seja

$$y(s) = H(s)u(s) \equiv \left[\sum_l \frac{R_l}{s - \lambda_l} + \sum_k \left(\frac{R_k}{s - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} \right) + es + d \right] u(s) \quad (2.1)$$

onde l pertence ao conjunto de índices dos polos dominantes reais λ_l e de seus resíduos associados R_l . Por outro lado, k pertence ao conjunto dos índices dos pares de polos dominantes complexos conjugados λ_k, λ_k^* e de seus resíduos associados R_k, R_k^* . Note, portanto, que $l \neq k$. Os símbolos e e d denotam números reais.

Os estados podem ser definidos por:

$$x_l(s) = \frac{R_l}{s - \lambda_l} u(s) \quad (2.2)$$

$$x_k(s) = \left(\frac{R_k}{s - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} \right) u(s) \quad (2.3)$$

sendo x_l um estado correspondente a um polo e resíduo associados reais e x_k um estado correspondente a um par de polos e resíduos associados complexos conjugados.

Seja y_{ed} a contribuição para a saída dos termos e e d , ou seja:

$$y_{ed}(s) = (es + d)u(s) \quad (2.4)$$

Substituindo (2.2), (2.3) e (2.4) em (2.1), obtém-se:

$$y(s) = \sum_l x_l(s) + \sum_k x_k(s) + y_{ed}(s) \quad (2.5)$$

De (2.2), tem-se:

$$\dot{x}_l(t) - x_l(t)\lambda_l = R_l u(t) \quad (2.6)$$

Integrando (2.6) de t a $t + \Delta t$ pelo método trapezoidal, chega-se a:

$$x_l(t + \Delta t) - x_l(t) - \frac{\lambda_l \Delta t}{2} [x_l(t + \Delta t) + x_l(t)] = \frac{R_l \Delta t}{2} [u(t + \Delta t) + u(t)] \quad (2.7)$$

Atribuindo os sobrescritos 0 e 1 aos instantes de tempo t e $t + \Delta t$, respectivamente, (2.7) pode ser escrita mais simplificadamente como:

$$x_l^1 - x_l^0 - \frac{\lambda_l \Delta t}{2} (x_l^1 + x_l^0) = \frac{R_l \Delta t}{2} (u^1 + u^0) \quad (2.8)$$

Resolvendo (2.8) para x_l^1 , obtém-se:

$$x_l^1 = \left(\frac{\xi + \lambda_l}{\xi - \lambda_l} \right) x_l^0 + \left(\frac{R_l}{\xi - \lambda_l} \right) (u^1 + u^0) \quad (2.9)$$

sendo:

$$\xi = \frac{2}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Seja

$$A_l = \frac{\xi + \lambda_l}{\xi - \lambda_l} \quad (2.11)$$

e

$$B_l = \frac{R_l}{\xi - \lambda_l} \quad (2.12)$$

Substituindo (2.11) e (2.12) em (2.9), obtém-se:

$$x_l^1 = B_l u^1 + A_l x_l^0 + B_l u^0 \quad (2.13)$$

O estado x_k pode ser escrito como

$$x_k = \bar{x}_k + \bar{\bar{x}}_k \quad (2.14)$$

sendo:

$$\bar{x}_k(s) = \frac{R_k}{s - \lambda_k} u(s) \quad (2.15)$$

$$\bar{\bar{x}}_k(s) = \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} u(s) \quad (2.16)$$

Seja

$$h_k(s) = \frac{R_k}{s - \lambda_k} \quad (2.17)$$

A resposta no tempo de h_k (igual a resposta de \bar{x}_k ao impulso) é dada por:

$$h_k(t) = R_k e^{\lambda_k t} \quad (2.18)$$

Logo, pelo Teorema da Convolução, a resposta no tempo de \bar{x}_k a uma entrada qualquer u é dada por:

$$\bar{x}_k(t) = \int_0^t h_k(\tau) u(t-\tau) d\tau = \int_0^t R_k e^{\lambda_k \tau} u(t-\tau) d\tau \quad \therefore$$

$$\bar{x}_k(t) = \int_0^t e^{\sigma_k \tau} \left[(R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) + j (R_{\text{Im}_k} \cos \omega_k \tau + R_{\text{Re}_k} \sin \omega_k \tau) \right] u(t-\tau) d\tau \quad (2.19)$$

sendo:

$$\lambda_k = \sigma_k + j \omega_k \quad (2.20)$$

$$R_k = R_{\text{Re}_k} + j R_{\text{Im}_k} \quad (2.21)$$

Realizando procedimento análogo, obtém-se:

$$\bar{\bar{x}}_k(t) = \int_0^t e^{\sigma_k \tau} \left[(R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) - j (R_{\text{Im}_k} \cos \omega_k \tau + R_{\text{Re}_k} \sin \omega_k \tau) \right] u(t-\tau) d\tau \quad (2.22)$$

Portanto, de acordo com (2.14), (2.19) e (2.22), a contribuição de x_k será:

$$x_k(t) = 2 \int_0^t e^{\sigma_k \tau} (R_{\text{Re}_k} \cos \omega_k \tau - R_{\text{Im}_k} \sin \omega_k \tau) u(t-\tau) d\tau = 2\Re[\bar{x}_k(t)] \quad (2.23)$$

A Equação (2.23) mostra que não é necessário aplicar o método de integração trapezoidal a ambas as parcelas de (2.14), dadas por (2.15) e (2.16). Basta aplicar a (2.15) e multiplicar a parte real do resultado por 2.

De (2.15), tem-se:

$$\dot{\bar{x}}_k(t) - \bar{x}_k(t) \lambda_k = R_k u(t) \quad (2.24)$$

De forma análoga à (2.6), a integração trapezoidal de (2.24) produz:

$$\bar{x}_k^1 = \begin{pmatrix} \xi + \lambda_k \\ \xi - \lambda_k \end{pmatrix} \bar{x}_k^0 + \begin{pmatrix} R_k \\ \xi - \lambda_k \end{pmatrix} (u^1 + u^0) \quad (2.25)$$

Tem-se que:

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{\text{Re}_k} + j \bar{x}_{\text{Im}_k} \quad (2.26)$$

Substituindo (2.26) em (2.25), obtém-se:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = \begin{pmatrix} \xi + \lambda_k \\ \xi - \lambda_k \end{pmatrix} (\bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^0) + \begin{pmatrix} R_k \\ \xi - \lambda_k \end{pmatrix} (u^1 + u^0) \quad (2.27)$$

Seja:

$$C_k + j D_k = \frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \quad (2.28)$$

$$E_k + j F_k = \frac{R_k}{\xi - \lambda_k} \quad (2.29)$$

Substituindo (2.28) e (2.29) em (2.27), obtém-se:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 + j \bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = (E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0) + j (F_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + D_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + F_k u^0) \quad (2.30)$$

Tem-se de (2.30) que:

$$\bar{x}_{\text{Re}_k}^1 = E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0 \quad (2.31)$$

$$\bar{x}_{\text{Im}_k}^1 = F_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + D_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 + F_k u^0 \quad (2.32)$$

De acordo com (2.23) e (2.31), obtém-se:

$$x_k^1 = 2 \bar{x}_{\text{Re}_k}^1 = 2 \left(E_k u^1 + C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 + E_k u^0 \right) \quad (2.33)$$

De (2.4), tem-se:

$$y_{ed}(t) = eu(t) + du(t) \quad (2.34)$$

Integrando (2.34) de t a $t + \Delta t$ pelo método trapezoidal, chega-se a:

$$y_{ed}(t + \Delta t) = (d + \xi e)u(t + \Delta t) + (d - \xi e)u(t) - y_{ed}(t) \quad (2.35)$$

Novamente, atribuindo os sobrescritos 0 e 1 aos instantes de tempo t e $t + \Delta t$, respectivamente, (2.35) pode ser escrita mais simplificada como:

$$y_{ed}^1 = (d + \xi e)u^1 + (d - \xi e)u^0 - y_{ed}^0 \quad (2.36)$$

De (2.5), tem-se:

$$y^1 = \sum_l x_l^1 + \sum_k x_k^1 + y_{ed}^1 \quad (2.37)$$

Substituindo (2.13), (2.33) e (2.36) em (2.37), obtém-se:

$$y^1 = \left(\sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d + \xi e \right) u^1 + \left(\sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d - \xi e \right) u^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.38)$$

Definindo

$$\Psi = \sum_l B_l + 2 \sum_k E_k + d \quad (2.39)$$

a Equação (2.38) pode ser reescrita mais compactamente como:

$$y^1 = (\Psi + \xi e)u^1 + (\Psi - \xi e)u^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.40)$$

2.1 Entrada de Tensão e Saída de Corrente - MR de Admitância

No caso da entrada u ser igual a uma tensão v e a saída y igual a uma corrente \hat{I} , (2.40) pode ser reescrita como:

$$\hat{I}^1 = (\Psi + \xi e)v^1 + (\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k \left(C_k \bar{x}_{\text{Re}_k}^0 - D_k \bar{x}_{\text{Im}_k}^0 \right) - y_{ed}^0 \quad (2.41)$$

A Equação (2.41) pode ser interpretada como o equivalente de Norton mostrado na Figura 2.1 (também conhecido como modelo de acompanhamento ou modelo companheiro [5]), onde a condutância g e a fonte de corrente I^0

(constituída apenas por termos históricos) são dadas por:

$$g = \Psi + \xi e \quad (2.42)$$

$$I^0 = - \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.43)$$

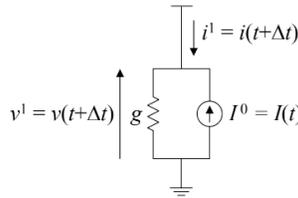


Figura 2.1 - Circuito equivalente de Norton

De acordo com a Figura 2.1, pode-se escrever:

$$i^1 = g v^1 - I^0 \Rightarrow i(t + \Delta t) = g v(t + \Delta t) - I(t) \quad (2.44)$$

2.2 Entrada de Corrente e Saída de Tensão - MR de Impedância

No caso da entrada u ser igual a uma corrente \hat{I} e a saída y igual a uma tensão v , (2.40) pode ser reescrita como:

$$i^1 = \frac{v^1}{\Psi + \xi e} - \frac{1}{\Psi + \xi e} \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.45)$$

A Equação (2.45) também pode ser interpretada como o equivalente de Norton mostrado na Figura 2.1, mas, neste caso, a condutância g e a fonte de corrente I^0 (constituída apenas por termos históricos) são dadas por:

$$g = \frac{1}{\Psi + \xi e} \quad (2.46)$$

$$I^0 = g \left[(\Psi - \xi e)v^0 + \sum_l A_l x_l^0 + 2 \sum_k (C_k \bar{x}_{Re_k}^0 - D_k \bar{x}_{Im_k}^0) - v_{ed}^0 \right] \quad (2.47)$$

2.3 Equações complementares

Substituindo (2.20) em (2.28), obtém-se:

$$C_k = \Re \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) = \frac{\xi^2 - (\sigma_k^2 + \omega_k^2)}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.48)$$

$$D_k = \Im \left(\frac{\xi + \lambda_k}{\xi - \lambda_k} \right) = \frac{2\omega_k \xi}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.49)$$

Substituindo (2.20) e (2.21) em (2.29), obtém-se:

$$E_k = \Re\left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k}\right) = \frac{R_{\text{Re}_k}(\xi - \sigma_k) - R_{\text{Im}_k} \omega_k}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.50)$$

$$F_k = \Im\left(\frac{R_k}{\xi - \lambda_k}\right) = \frac{R_{\text{Re}_k} \omega_k + R_{\text{Im}_k}(\xi - \sigma_k)}{(\xi - \sigma_k)^2 + \omega_k^2} \quad (2.51)$$

3 I RESULTADOS

Para testar a implementação do equivalente de Norton, mostrado na Figura 2.1, no ATP por meio da ferramenta MODELS, utilizou-se o sistema teste simples de cinco barras mostrado na Figura 3.1 (a). Este sistema é uma ampliação do sistema de três barras apresentado em [6], feita pela conexão dos sistemas mostrados na Figura 3.1 (b) e Figura 3.1 (c). Os valores dos componentes do sistema mostrado na Figura 3.1 (b) são iguais aos de seus correspondentes mostrados na Figura 3.1 (c) que, por sua vez, são iguais aos valores originais do sistema de três barras.

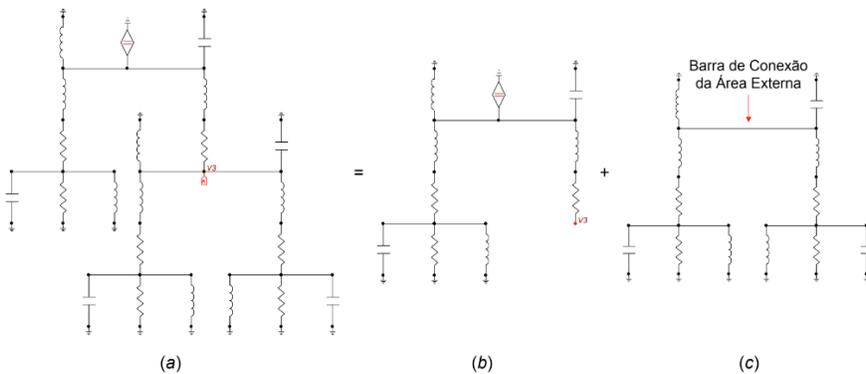


Figura 3.1 - Sistema teste de cinco barras

Nesta implementação, o sistema mostrado na Figura 3.1 (b) será mantido íntegro (área de estudos) e o mostrado na Figura 3.1 (c) será substituído pelo equivalente de Norton (área externa).

Os polos e resíduos associados da admitância própria da barra de conexão da área externa isolada (MR de admitância da área externa) estão mostrados na Tabela 3.1, sendo os valores dos termos e e d iguais a 2.39×10^{-5} e 0 , respectivamente. Por outro lado, os polos e resíduos associados da impedância própria da barra de conexão da área externa isolada (MR de impedância da área externa) estão apresentados na Tabela 3.2, sendo os valores dos termos e e d nulos.

Uma vez que a área externa possui apenas componentes de parâmetros concentrados, a mesma foi facilmente modelada por sistemas descritores [6]. Esta

formulação permite a utilização do método QZ [7] para o cálculo exato (dentro da precisão da aritmética finita) dos polos e resíduos. Deve-se observar que se a área externa possuir componentes de parâmetros distribuídos (i.e., linhas de transmissão - LTs), que é a situação de maior interesse prático, o método QZ não é aplicável. Neste caso, os métodos descritos em [1], [2] ou [3] poderiam ser utilizados. Deve-se observar que a aplicação do VF [2] às respostas em frequência da admitância e impedância próprias da barra de conexão de área externa produziu valores muito próximos aos apresentados na Tabela 3.1 e Tabela 3.2, respectivamente.

Na Figura 3.2 está mostrado o circuito da área de estudos conectada à área externa representada pela MODELS (type-94 Norton component). Ambos os equivalentes de Norton dos MRs de admitância e de impedância foram implementados nesta linguagem. As respostas de tensão na barra de conexão (indicada como V3) do sistema modelado convencionalmente, mostrado na Figura 3.1 (a), e do sistema com a área externa modelada pelos equivalentes de Norton dos MRs de admitância e de impedância, mostrado na Figura 3.2, estão apresentadas na Figura 3.3, sendo as três curvas visualmente coincidentes. Estas respostas são devidas a um degrau de 1 A aplicado pela fonte de corrente mostrada nestas figuras.

Polos	Resíduos
$-804.434251993978 \pm j355061885351934$	$50.4068078617104 \mp j10.7321081794713$
$-338.520512682448 \pm j267092047917551$	$41.1030087390907 \mp j4.48279363010448$
0	124.9987129904 82
-1.0090834430 7371	1.8274893718 8682
-1.0548747621 3233	2.2806859071 9615

Tabela 3.1 - Polos e resíduos associados do MR de admitância da área externa

Polos	Resíduos
$-345.88480703949 \pm j4535.65834674007$	$116586394390407 \mp j3717.38798953217$
$-507.003088494858 \pm j3069.12931700367$	$1362.78139937112 \pm j2115.05556146725$
$-290.083330514519 \pm j1583.59473046325$	$7899.08138142322 \pm j 211831367036637$
-0.9891444291 01846	-0.0001903909 71331472
-1.0418910312 2054	$-6.5180336640 7657 \times 10^{-5}$

Tabela 3.2 - Polos e resíduos associados do MR de impedância da área externa

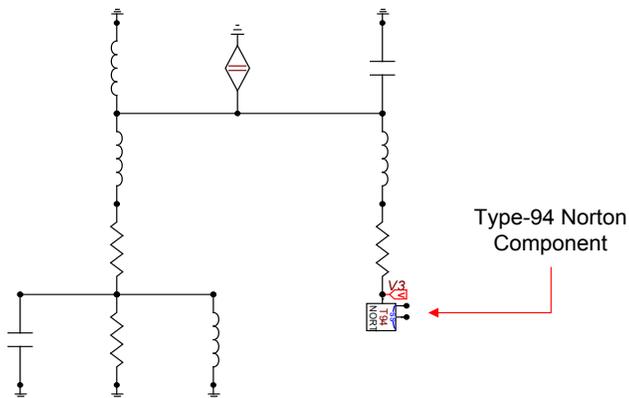


Figura 3.2 - Circuito da área de estudos conectada à área externa modelada pela MODELS (type-94 Norton component)

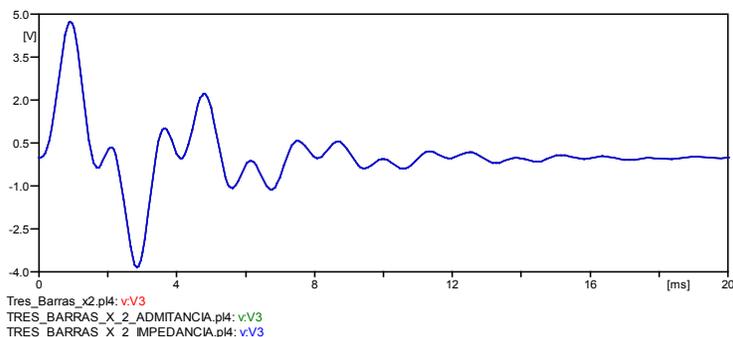


Figura 3.3 - Respostas do sistema de cinco barras modelado convencionalmente (curva vermelha) e com a área externa representada pelos equivalentes de Norton dos MRs de admitância (curva verde) e de impedância (curva azul)

Como o objetivo das simulações realizadas foi o de comprovar a precisão do método proposto, utilizaram-se todos os polos e resíduos associados dos MRs de admitância e impedância. No entanto, na prática, apenas os polos dominantes (polos associados a resíduos de elevado módulo) são utilizados (modelo reduzido). Para o caso exemplo utilizado, os polos reais -1.00908344307371 e -1.05487476213233 do MR de admitância e os polos -0.989144429101846 e -1.04189103122054 do MR de impedância poderiam ser desprezados sem prejuízos à precisão das simulações. Deve-se observar que sistemas contendo LTs modeladas por parâmetros distribuídos possuem um número infinito de polos (sistemas infinitos), mas apenas os polos mais dominantes necessitam ser utilizados [1] na construção dos MRs (MRs de ordem reduzida).

4 | CONCLUSÃO

Neste trabalho é proposto um método para a representação de MRs de admitância e de impedância no programa ATP. MRs são de fundamental importância para a construção de equivalentes de redes elétricas de alta fidelidade. Apesar desta importância, existem poucos trabalhos descrevendo como construir equivalentes eletromagnéticos, a partir dos MRs, em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos. Na referência [8] está o mais importante e completo destes trabalhos. Ao contrário do método proposto, o descrito em [8] utiliza uma formulação matricial, baseada na realização de estados do MR. Uma vez que a linguagem MODELS, disponibilizada no ATP, não lida diretamente com matrizes [9], o método proposto, além de mais simples, é mais adequado à sua utilização.

Atualmente, o método proposto é aplicável apenas a equivalentes mono-barras, ou seja, quando as áreas de interesse e externa são conectadas apenas por uma barra (FTs SISO). Julga-se, no entanto, que este método possa ser generalização para ser aplicado, também, a equivalentes de redes multi-barras (FTs MIMO). Após esta generalização, pretende-se implementar este método no programa HarmZs do CEPEL (para estudo do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas), tornando-o, também, uma ferramenta complementar importante para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência de grande porte.

REFERÊNCIAS

- [1] Sergio Luis Varricchio, Francisco Damasceno Freitas, Nelson Martins, and Franklin Clement Véliz “Computation of Dominant Poles and Residue Matrices for Multivariable Transfer Functions of Infinite Power System Models”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 3, May 2015.
- [2] Bjørn Gustavsen and Adam Semlyen, “Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, July 1999.
- [3] Taku Noda, “Identification of a Multiphase Network Equivalent for Electromagnetic Transient Calculations Using Partitioned Frequency Response”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, April 2005.
- [4] Stefano Grivet-Talocia and Bjørn Gustavsen, “Black-box Macromodeling and its EMC Applications”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine – Volume 5 – Quarter 3, 2016.
- [5] Alcécio B. Fernandes e Antonio C. S. Lima, “Elaboração de Modelos Definidos pelo Usuário no ATP”, XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, de 23 a 26 de Outubro de 2011.

[6] S. L. Varricchio, N. Martins, and L. T. G. Lima, "A Newton-Raphson Method Based on Eigenvalue Sensitivities to Improve Harmonic Voltage Performance", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, January 2003, pp. 334-342.

[7] G. H. Golub and C. F. Van Loan, Matrix Computations, 3rd ed. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 1996.

[8] Bjørn Gustavsen and H. M. Jeewantha De Silva, "Inclusion of Rational Models in an Electromagnetic Transients Program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-Parameters, Transfer Functions", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, April 2013.

[9] H. K. Høidalen, A. H. Soloot: "Cable modelling in ATP – from NODA to TYPE94", Proc. EMTP Users Group meeting, Helsinki, Finland, Aug. 16-17, 2010.

UMA PROPOSTA PARA A IDENTIFICAÇÃO DA ORIGEM DOS FENÔMENOS VTCDs EM INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS SUPRIDAS POR TRANSFORMADORES DELTA-ESTRELA ATERRADA

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 04/08/2020

Adrian Ribeiro Ferreira

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/2473367188801567>

José Carlos de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/5220457650011257>

Paulo Henrique Oliveira Rezende

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/2338311941319569>

RESUMO: As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são fenômenos responsáveis por alterações do valor eficaz das tensões de suprimento por tempos inferiores a 3 minutos. Muito embora sua pequena duração, as mesmas exercem grande influência no funcionamento das cargas e podem, em casos extremos, provocar a interrupção de processos produtivos. Diante desse fato, este indicador de desempenho, assim como os demais fenômenos próprios à qualidade da energia, encontram regulamentados através de padrões estabelecidos a nível nacional e internacional. Tais diretrizes fornecem definições, limites e outras informações para a manutenção dos fornecimentos de energia de forma a garantir o funcionamento adequado do sistema e cargas supridas. Não obstante o reconhecimento da

abrangência desses documentos normativos, no que tange ao fenômeno aqui considerado, à nível de distribuição, este somente foi considerado na última revisão do PRODIST-ANEEL. Muito embora se reconheça que a matéria ainda esteja sendo tratada de forma incipiente, o estabelecimento de quantificadores máximos permitidos para estas ocorrências se mostra de grande interesse. Inserido nesse contexto fica ainda o desafio imposto pela responsabilidade das VTCDs. De fato, visando consubstanciar as análises dos processos envolvendo reclamações por consumidores e eventuais medidas corretivas, surge a questão da necessidade de mecanismos para uma clara atribuição se o fenômeno teria sido provocado pela supridor ou o consumidor. É neste cenário que se encontra o ponto focal do presente trabalho, o qual estabelece os fundamentos para uma proposta de identificação da origem do fenômeno, e ainda, realiza um conjunto de avaliações computacionais sobre a eficácia do processo.

PALAVRAS - CHAVE: Legislação, Qualidade da energia, Responsabilidade de Eventos, Origem das VTCDs, VTCD.

A PROPOSAL TO IDENTIFY VOLTAGE SAGS PHENOMENA RESPONSIBILITY IN CONSUMER PLANTS SUPPLIED BY GROUNDED DELTA-STAR TRANSFORMERS

ABSTRACT: Voltage Sags are phenomena responsible for changes in the effective value of supply voltages for less than 3 minutes. Although their short duration, they exert great influence on the operation of loads and can even interrupt

production processes. In this regard, the regulations applicable to the establishment of quality standards, at national and international level, present guidelines and limits for several other indicators, however, regarding the phenomenon considered here, at distribution level, these were recently contemplated by PRODIST-ANEEL. Although still in its incipient stage the phenomenon herein focused shows a promising application to improve power quality standards. However, in addition to the quantitative guidelines, the issue of identifying the responsibility of the Voltage Sags, aiming, above all, to substantiate the analysis of processes involving consumer complaints are essentials. In fact, in order to establish means to improve the supply standards throughout corrective measures, raises the need for mechanisms for a clear attribution whether the phenomenon is produced by the utility or the consumer itself. This point is presented as the core of the present work which is aimed at presenting fundamentals and the computational results of the proposed strategy to highlight the approach efficacy at identifying the Voltage Sags origin.

KEYWORDS: Standards, Power Quality, Phenomena Responsibility, Voltage Sags Origin, Voltage Sags.

1 | INTRODUÇÃO

Os estudos envolvendo a área da Qualidade de Energia Elétrica se apresentam com o objetivo de analisar os fenômenos próprios à degradação dos suprimentos elétricos, visando, sobretudo, compatibilizá-los aos padrões mínimos estabelecidos pelas recomendações em vigor. Dentre os vários fatores impactantes e atinentes à matéria, um dos mais comuns refere-se às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs). As manifestações destes fenômenos se fazem presentes na forma de elevações, afundamentos e interrupções das tensões de suprimento, em que pese, para a maioria das ocorrências, a questão dos afundamentos.

De um modo geral, estas anomalias ocorrem na forma de desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos, e, muito embora suas ocorrências se façam presentes em pequenos intervalos de tempo, as consequências podem ser drásticas.

A Tabela I sintetiza a classificação dos distúrbios em pauta, em consonância com a ANEEL-PRODIST (ANEEL, 2018). As três primeiras linhas correspondem a Variação Momentânea de Tensão, enquanto as demais, correspondem a Variação Temporária de Tensão.

Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Interrupção Momentânea de Tensão - IMT	Inferior ou igual a 3 (três) segundos	Inferior a 0,1 pu
Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação Momentânea de Tensão - EMT	Igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	Superior a 1,1 pu
Interrupção Temporária de Tensão - ITT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Inferior a 0,1 pu
Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação Temporária de Tensão - ETT	Superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	Superior a 1,1 pu

Tabela I : Caracterização das VTCDs

Como mencionado, quando da ocorrência destes desvios das tensões dos suprimentos, o efeito se apresenta com expressivos impactos sobre as unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais. Isto é de grande relevância para todos os consumidores, pois, os prejuízos operacionais e financeiros atrelados com instalações industriais e outras se apresentam em proporções bastante elevadas. A título de ilustração, as tabelas II e III ilustram custos típicos relacionados com a manifestação de VTCDs em diferentes tipos de indústrias, quando da parada de processos devido as VTCDs (F. SALIM, K. M. NOR, D. M. SAID, 2014).

Indústria	Perdas Típicas por Evento (€)
Mercado Financeiro	6.000.000 (por hora)
Telecomunicações	30.000 (por minuto)
Produção de Semicondutores	3.800.000
Centro de Informática	750.000
Aço	350.000
Vidro	250.000

Tabela II : Perdas por VTCDs (União Europeia)

Indústria	Perdas Típicas por Evento (US\$)
Produção de Semicondutores	2.500.000
Processamento de cartão de crédito	250.000
Fabricação de Equipamentos	100.000
Automobilística	75.000
Fabricação de Papel	30.000
Indústria Química (plástico, vidro, etc)	5.000

Tabela III : Perdas por VTCDs (Estados Unidos)

Uma vez reconhecida a relevância do fenômeno ora considerado, a ANEEL, através do conhecido Procedimento da Distribuição – PRODIST, apontou, em sua última revisão, para a questão da quantificação das VTCDs. O objetivo desta medida visou, sobretudo, o estabelecimento de limites para tais fenômenos. Muito embora os desafios deste propósito, a estratégia indicada pela referida agência aponta para a quantificação do fenômeno na forma de um indicador denominado por Fator de Impacto (FI). Esta grandeza se destina, como referido, a traduzir as ocorrências em termos de um número que venha a representar os quantitativos em termos de níveis, durações e relevâncias das variações de tensão registradas. Caso as monitorações conduzam a um valor superior ao limite estabelecido, é natural constatar que medidas deverão ser, num futuro, tomadas para ressarcimentos financeiros decorrentes de eventuais prejuízos causados pelo distúrbio ora tratado. Adicionalmente, há ainda a se considerar que eventuais medidas corretivas devam ser conduzidas visando a compatibilização aos padrões estabelecidos e, para tanto, investimentos financeiros se farão necessários.

Dentro da temática ora posta, a exemplo de qualquer outro indicador de qualidade da energia, surge uma questão de grande importância, a qual se encontra diretamente afeita à identificação da responsabilidade dos efeitos manifestados na forma das VTCDs. Isto se apresenta revestido de grande importância pois, naturalmente, a ocorrência de um distúrbio associado com as variações de tensão pode ser advinda da rede de suprimento ou da própria unidade consumidora.

Nos últimos anos pode-se identificar alguns estudos voltados para o estabelecimento de mecanismos para atender aos requisitos acima postos. Um deles baseia-se na tensão residual presente no barramento e também na duração do evento (NOCE e colab., 2018). Outro procedimento, vale-se do comportamento da potência do sistema, baseado no uso da “Short-Time Fourier Transform” e

variações da mesma (HUSSAIN SHAREEF, AZAH MOHAMED, 2013). No contexto da análise do fluxo de potência complexa, baseando-se num direcionamento do lugar geométrico para a definição da origem de afundamentos de tensão, o trabalho (PASSOS, 2015) explora uma estratégia e mostra resultados promissores aos propósitos estabelecidos. Entretanto, essa linha de trabalhos não evidencia aplicabilidade em campo e o sucesso da proposta em ambientes reais. Outra estratégia se apresenta fundamentada em critérios de análise envolvendo a potência, a corrente e as distorções harmônicas no sistema analisado (AHN e colab., 2008). Por fim, em (W.KANOKBANNAKORN, T.SAENGSUWAN, 2011) é feito um trabalho investigativo baseado na impedância de sequência negativa para se determinar a origem da VTCD. Não obstante tais publicações, o fato é que, na atualidade, não há um processo que se apresente com características próprias à aplicação em campo, que ofereça: segurança, confiabilidade e praticidade aos propósitos almejados.

À luz dos fatos acima ponderados, o presente trabalho encontra-se direcionado a apresentar os fundamentos para o estabelecimento de uma metodologia visando atender aos requisitos postos. Tendo em vista que os trabalhos investigativos ainda se encontram numa etapa inicial, e também, reconhecendo que um número expressivo de consumidores é suprido através de transformadores com conexão delta-estrela aterrada, as bases e estudos conduzidos neste trabalho encontram-se, para o momento, centradas nesta configuração de suprimento.

Em atenção aos propósitos ora apresentados, o trabalho se apresenta constituído por seções constituídas por: uma síntese dos fundamentos aplicáveis à circuitos trifásicos, a proposta da metodologia, a caracterização de um arranjo para os estudos de casos e, por fim, a apresentação e discussão do desempenho da estratégia metodológica feita.

2 | COMPONENTES SIMÉTRICAS

Classicamente, é sabido que um complexo trifásico não equilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados. O tratamento matemático para a citada transformação é largamente conhecido e maiores detalhes podem ser encontrados, por exemplo, em (RESENDE, [S.d.]) (STEVENSON, 1986) (SILVA, 2017). Em consonância com os procedimentos estabelecidos, um determinado arranjo desequilibrado pode, então, ser considerado como uma composição de três sistemas trifásicos, como a seguir.

A. Componentes de Sequência Positiva

Essa componente se apresenta na forma de 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120° , e tendo a mesma sequência que os fasores da

rede trifásica original.

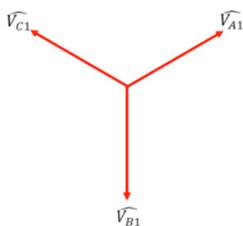


Figura 1: Fasores da sequência positiva

B. Componentes de Sequência Negativa

Essa componente se apresenta constituída por 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120°, porém, com sequência das fases opostas a dos fasores originais.

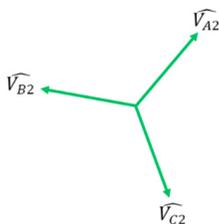


Figura 2: Fasores da sequência negativa

C. Componentes de Sequência Zero

Por fim, o último conjunto de componentes equivale a 3 fasores iguais em módulo, com defasagem de 0° entre si.

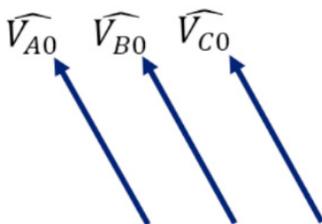


Figura 3: Fasores da sequência zero

Em resumo, a Figura 4 ilustra a forma tradicional através da qual as componentes de fase são adicionadas visando, como indicado, a reconstrução do sistema trifásico original, que se apresenta com um certo grau de desequilíbrio. A figura se apresenta, para maior clareza, constituída por um sistema com elevado nível de desequilíbrio.

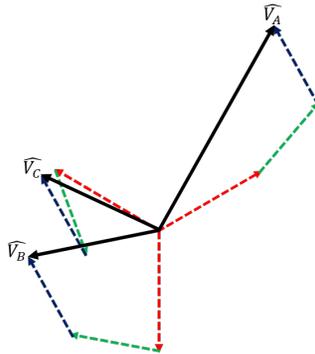


Figura 4: Sistema Trifásico Desequilibrado original e suas componentes de sequência: positiva, negativa e nula

Sob o ponto de vista da modelagem matemática, a correlação entre o sistema trifásico desequilibrado e as componentes de sequência pode ser tratada nos termos indicados a seguir:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Caso seja de interesse, é também possível o procedimento inverso, isto é, a partir dos fasores das fases A, B e C, determinar as grandezas de sequência positiva, negativa e zero.

Uma vez conhecidas as componentes de sequência, é possível determinar uma grandeza que caracteriza o nível de desequilíbrio da rede, grandeza essa denominada por Fator de Desequilíbrio de Tensão (ANEEL, 2018) -*FD%*. Essa é obtida através da equação a seguir:

$$FD\% = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

- V_1 é a magnitude da componente de sequência positiva;
- V_2 é a magnitude das componentes de sequência negativa.

Uma vez reconhecido que a grande maioria dos fenômenos associados com as VTCDs se apresentam de forma desequilibrada, essa propriedade se apresenta como o fundamento para a metodologia destinada a atribuição da origem dos fenômenos tratados. De fato, tendo em vista que tais manifestações anômalas às redes se apresentam constituídas pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero, tais grandezas se apresentam como alvo para o estabelecimento das premissas destinadas a atribuição da origem dos eventos. As bases para tal encontram-se alicerçadas nos cálculos das grandezas representativas das componentes de sequência aqui tratadas e, a partir dos valores obtidos e inspeção do comportamento de transferência do primário para o secundário do transformador, ou via inversa, estabelecer os critérios para identificação em pauta.

Para tanto maior clareza da proposta, ao invés de um tratamento teórico e genérico através de formulações matemáticas, a opção aqui feita foi pela definição de um arranjo típico alimentador suprindo uma carga com características de uma indústria. A partir desse arranjo procede-se a imposição de uma sequência de eventos, atrelados com a ocorrência de curtos-circuitos, fenômenos estes responsáveis por um grande número de VTCDs. Naturalmente, outras situações poderiam ser adotadas para os estudos de desempenho, todavia, para o momento, esta foi a estratégia estabelecida.

3 I CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA TESTE E ESTUDOS DE CASOS

Com o intuito de se observar o comportamento do conteúdo das componentes simétricas durante a ocorrência de uma falta, como mencionado acima, os trabalhos investigativos foram conduzidos através de um arranjo de um sistema elétrico simples, composto por um suprimento advindo da concessionária, de um transformador com a conexão anteriormente estabelecida, cargas estáticas e dinâmicas e, por fim, um transformador interno à instalação do consumidor. O arranjo foi implementado na plataforma MATLAB/Simulink, empregando-se os parâmetros representativos dos componentes, como indicado nas Tabelas IV e V.

A carga motriz equivalente foi adotada como um conjunto de máquinas de indução totalizando 9 MVA.

Fonte:	Tensão: 138 kV; Nível de Curto: 500 MVA; X/R: 8;
Transformador 1:	Relação de Transformação: 138kV/13,8kV; - Potência: 20 MVA; - X%: 7%; - R%: 1%;
Transformador 2:	Relação de Transformação: 13,8kV/0,4kV; Potência: 10 MVA; X%: 6%; R%: 1%;

Tabela IV: Características do Sistema Estudado (Parte 1)

Cargas 1:	Potência: 4 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Delta;
Cargas 2:	Potência: 4 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Estrela aterrado;
Cargas 3:	Potência: 3 MVA; Fator de Potência: 0,9 ind; Tipo de Ligação: Delta;

Tabela V: Características do Sistema Estudado (Parte 2)

O sistema implementado é ilustrado na Figura 5, a qual é indicativa do modelo implementado no simulador empregado.

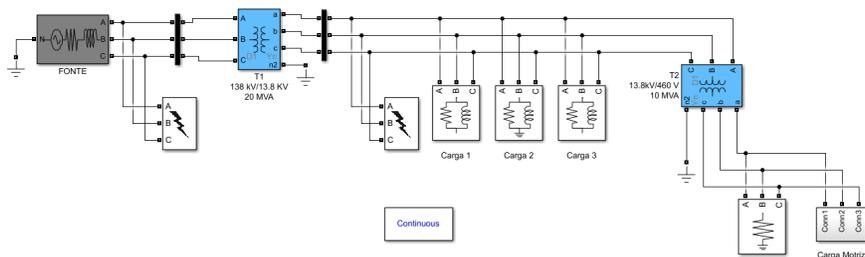


Figura 5 : Sistema Elétrico Estudado

Quanto aos estudos de casos, foram impostas faltas com duração de 50 ms, tanto no lado primário como também do lado secundário do transformador de conexão entre a concessionária e o consumidor em foco, como esclarecido a seguir:

- Faltas no primário do transformador T1 - conexão delta;

- Faltas no secundário do transformador T1 - conexão estrela aterrada.

Visando obter informações sobre o grau de influência dos níveis de desequilíbrios manifestados nas tensões, as faltas acima referidas foram ainda subdivididas em 4 tipos: fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase e trifásica. Para cada uma delas foram ainda definidos distintos valores para as impedâncias de falta.

A seguir é feita uma síntese das situações consideradas no trabalho:

- **Caso 1 – Curto Fase-Terra (F-T)** - Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω ;
- **Caso 2 – Curto Fase-Fase-Terra (FF-T)** - Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω ;
- **Caso 3 - Curto Fase-Fase (F-F)** – Resistências nula;
- **Caso 4 – Curto Trifásico-Terra (FFF-T)** – Resistências de 10 Ω , 5 Ω e 0 Ω .

4 | RESULTADOS

As Tabelas VI e VII elucidam os resultados encontrados para as simulações realizadas, as respostas exibidas estão relacionadas à tão apenas a fase A. As demais fases indicaram resultados similares. Os valores representados estão em p.u, e, os valores para as tensões de referência, para a condição pré-falta, do primário e secundário do transformador são, respectivamente, 70939 V e 6134 V.

Tipo de Falta	Resistência	Grandezas Observadas	Falta no Primário		Falta no Secundário	
			Primário	Secundário	Primário	Secundário
Fase A-T	10 Ω	V1	0,716	0,715	0,998	0,993
		V2	0,299	0,301	0,008	0,03
		V0	0,335	0	0	0,026
		V2/V1	0,418	0,421	0,008	0,03
	5 Ω	V1	0,692	0,692	0,994	0,982
		V2	0,312	0,313	0,017	0,059
		V0	0,35	0	0	0,051
		V2/V1	0,451	0,453	0,017	0,06
	0 Ω	V1	0,68	0,68	0,902	0,655
		V2	0,321	0,321	0,099	0,345
		V0	0,36	0	0	0,31
		V2/V1	0,471	0,472	0,109	0,527

Fases AB-T	10 Ω	V1	0,444	0,444	0,995	0,985
		V2	0,319	0,32	0,008	0,028
		V0	0,324	0	0	0,026
		V2/V1	0,719	0,722	0,008	0,028
	5 Ω	V1	0,381	0,38	0,989	0,966
		V2	0,335	0,337	0,016	0,057
		V0	0,338	0	0	0,052
		V2/V1	0,881	0,887	0,016	0,059
	0 Ω	V1	0,346	0,347	0,807	0,323
		V2	0,346	0,347	0,092	0,323
		V0	0,346	0	0	0,323
		V2/V1	1	0,999	0,114	1
Fases A-B	0,001 Ω	V1	0,501	0,502	0,859	0,503
		V2	0,501	0,502	0,143	0,502
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	1	1,001	0,167	1

Tabela VI : Resultados para as componentes simétricas – Falta fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase – com distintas impedâncias de faltas

Tipo de Falta	Resistência	Grandezas Observadas	Falta no Primário		Falta no Secundário	
			Primário	Secundário	Primário	Secundário
Fases ABC-T	10 Ω	V1	0,271	0,271	0,993	0,979
		V2	0,001	0,002	0,001	0,002
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	0,004	0,006	0,001	0,002
	5 Ω	V1	0,143	0,143	0,983	0,953
		V2	0,002	0,004	0	0,001
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	0,011	0,026	0	0,002
	0 Ω	V1	0	0	0,715	0
		V2	0	0,001	0	0
		V0	0	0	0	0
		V2/V1	2,711	6,016	0	5,301

Tabela VII : Resultados para as componentes simétricas – Falta trifásicas – com distintas impedâncias de faltas

De um modo geral as grandezas obtidas através da aplicação dos princípios da decomposição em componentes simétricas e respectivos valores para os fatores de desequilíbrio apontam para as seguintes constatações:

- As situações envolvendo os curtos circuitos desequilibrados do lado primário do transformador T1 evidenciam que os níveis das grandezas indicativas dos desequilíbrios das tensões durante a ocorrência da falta (e do VTCD) se apresentaram muito próximos àqueles obtidos para os desequilíbrios do lado secundário do mesmo transformador;
- Caso as faltas desequilibradas ocorram do lado secundário, durante a manifestação do VTCD, os níveis de desequilíbrios entre os dois lados do transformador T1 se mostram bastante distintos;
- As distinções entre as propagações dos níveis de desequilíbrios de tensão de um para outro lado do transformador evidenciam, pois, um caminho para o estabelecimento da estratégia para o processo da identificação da responsabilidade do fenômeno para transformadores com a conexão aqui estabelecida e fenômenos desequilibrados;
- As observações acima apresentadas se mostram verdadeiras, como já dito, para faltas fase-terra e também fase-fase;
- Para as faltas equilibradas, como seria esperado, não foi possível observar as propriedades acima, indicando, pois, que, caso o fenômeno VTCD seja de natureza trifásica e equilibrada, o processo de identificação e comparação das componentes de sequência negativa não são aplicáveis para a identificação da responsabilidade aqui contemplada.

5 | CONCLUSÕES

Como explicitado ao longo do artigo, seu objetivo central, que se revestiu da busca de uma metodologia para a identificação da origem dos fenômenos VTCDs, apresentou indicativos bastante promissores para uma resposta à questão da atribuição da responsabilidade dos eventos ora considerados.

De fato, muito embora os estudos tenham se restringido a instalações que utilizam um suprimento elétrico através de transformadores abaixadores com conexão delta-estrela aterrada, a metodologia baseada na correlação entre os níveis de desequilíbrios presentes no lado primário e secundário destes, indicaram comportamentos que podem nortear estratégias de análise consistentes. Quando a monitoração feita para as tensões dos lados primários e secundários indicarem, para condições de afundamentos ou elevações de tensão desequilibradas, o mesmo nível para o fator de desequilíbrio entre o primário e o secundário, fica aqui o reconhecimento que o fenômeno é advindo da rede de suprimento. Por outro lado, caso há valores distintos para o respectivo indicador de desequilíbrio entre o primário e o secundário, para as mesmas condições assimétricas para as variações das tensões, os estudos mostraram, com clareza, que a responsabilidade dos

eventos está atrelada com a unidade consumidora.

Fica, todavia, a ressalva que os resultados encorajadores se apresentam, como já referidos, limitados aos transformadores com a conexão esclarecida (os quais representam a grande maioria das instalações reais), e ainda, a fenômenos relacionados com variações de tensão de modo desequilibrado.

O reconhecimento acima feito não implica, todavia, que avanços atrelados com os mesmos princípios postos não possam ser aplicados para diferentes situações. De fato, outros fatores de influência, a exemplo dos indicativos associados com os níveis dos Fatores de Sequência Zero, dentre outras características, podem, efetivamente, abrir horizontes para a solução dos desafios aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

AHN, Seon-Ju e colab. **A New Approach to Determine the Direction and Cause of Voltage Sag**. Journal of Electrical Engineering and Technology, p. 8, 2008.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. . [S.l: s.n.], 2018.

F. SALIM, K. M. NOR, D. M. SAID, A. A. A. Rahman. **Voltage Sags Cost Estimation for Malaysian Industries**. IEEE International Conference Power & Energy (PECON), p. 6, 2014.

HUSSAIN SHAREEF, AZAH MOHAMED, Ahmad Asrul Ibrahim. **Identification of voltage sag source location using S and TT transformed disturbance power**. Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 15, 2013.

NOCE, C. e SANTIS, M. De e P. VARILONE, P. Verde. **Comparison of Methods Using only Voltage Measurements for Detecting the Origin of Voltage Sags in the Modern Distribution Networks**. IEEE, p. 6, 2018.

ONS. **Submódulo 25.6 Indicadores de qualidade de energia elétrica – frequência e tensão**. . [S.l: s.n.], 2010.

PASSOS, Frederico Oliveira. **Localizador da Fonte de AMTs Baseado nas Medições de Tensões de Fronteira**. 2015. 103 f. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2015.

RESENDE, José Wilson. **Apostila: Análise de Sistemas de Energia Elétrica**. Uberlândia - Brasil: [s.n.], [S.d.].

SILVA, Rafaela Oliveira Da. **Análise de faltas simétricas e assimétricas na rede primária de distribuição da Universidade Federal da Paraíba**. 2017. 46 f. Universidade Federal da Paraíba, 2017.

STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

W.KANOKBANNAKORN, T.SAENGSUWAN, S.Sirisukprasert. **Unbalanced Voltage Sag Source Location Identification Based on Superimposed Quantities and Negative Sequence**. The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand, p. 4, 2011.

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO ESTADO DA BAHIA

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Ad Jefferson Custódio Gomes

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/7544659643429006>

Fabiano Rodrigues Soriano

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4708268086597248>

Giovanna Buscatti Gonçalves

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4912385804360920>

Luís Ricardo Cândido Cortes

Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7007542686718562>

Victor Santos Matos

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/4813015095509110>

Vinícius de Souza Andrade Wanderley

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – Bahia
<http://lattes.cnpq.br/2757326537201365>

RESUMO: A análise do potencial de geração fotovoltaica de uma região de interesse é de fundamental importância para o estudo da

viabilidade de implantação deste tipo de sistema. Este trabalho focou na análise dos dados referentes ao perfil solar da Bahia, iniciando por uma abordagem geral das variáveis envolvidas, com posterior estudo de caso em um sistema simulado a fim de avaliar contrastes entre localidades. Como resultado de ambas análises, houve a constatação de que o estado apresenta grande potencial de geração via aproveitamento do recurso solar nas duas modalidades apresentadas, geração distribuída e centralizada. **PALAVRAS-CHAVE:** Bahia, Geração Centralizada, Geração Distribuída, Fotovoltaica, Potencial Fotovoltaico.

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF PHOTOVOLTAIC GENERATION IN THE STATE OF BAHIA

ABSTRACT: An analysis of the photovoltaic generation potential of a region is of fundamental interest for the study of the feasibility of implementing this type of system. This work focuses on the analysis of the data to the solar profile of Bahia, starting, through a general approach of the variables involved, with a subsequent study case in a simulated system in order to evaluate contrasts between localities. As a result of both analyzes, there has been a realization that they are of great potential for generation through both a distributed and centralized system.

KEYWORDS: Bahia, centralized generation, distributed generation, photovoltaic, photovoltaic potential.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização da irradiação solar para geração de eletricidade vem recebendo grande atenção como uma alternativa limpa e renovável, características extremamente atrativas em vista da crescente preocupação com questões ambientais e de esgotamento de fontes não renováveis.

No Brasil, a geração fotovoltaica já se configura, junto com a energia eólica, como uma das mais promissoras formas de diversificação da matriz energética (AWS TRUEPOWER, 2018).

O estado da Bahia, foco deste trabalho, é pioneiro na geração fotovoltaica brasileira, apresentando um ambiente extremamente favorável à implementação de sistemas de aproveitamento do recurso solar, devido à sua localização na região tropical, o que acarreta na grande incidência de radiação da esfera solar.

Destarte, acaba sendo um dos estados com maior atratividade para investimentos neste setor, finalizando o ano de 2017 com 36 projetos vencedores em leilões realizados pela ANEEL, totalizando 1006 MW a ser instalado até 2021 (AWS TRUEPOWER, 2018).

Este trabalho busca analisar o potencial de geração fotovoltaica baiano, com base em dados climatológicos da região. Para tal, fora realizada uma discussão acerca das variáveis envolvidas no processo e como as mesmas influenciam no aproveitamento das placas utilizadas.

Por fim, fora realizado um estudo de caso objetivando a comparação dos potenciais de geração distribuída entre o estado da Bahia e de São Paulo, realizando um levantamento de dados das capitais de cada um: a cidade de Salvador (BA) e de São Paulo (SP).

2 | GERAÇÃO SOLAR

A. Caracterização do recurso solar

Para a determinação da viabilidade técnica da implantação de um sistema de aproveitamento fotovoltaico, é imprescindível o entendimento das variáveis envolvidas no processo de geração.

A atmosfera terrestre afeta a distribuição dos raios solares incidentes sobre uma determinada região do globo. Ao adentrá-la, acabam por interagir com a mesma, o que acarreta na alteração de sua direção de propagação. Assim sendo, os raios incidentes, constituem-se, em geral, de dois componentes principais (IST; EUROPEIA, 2004): a irradiância difusa horizontal e a irradiância normal direta, as quais podem ser vistas na Figura 1.

- Irradiância Global Horizontal: Corresponde ao total de energia solar que

atinge a superfície terrestre em uma determinada região.

- Irradiância Difusa Horizontal: é a parcela da radiação que é desviada de sua trajetória original pela atmosfera atingindo a superfície no plano horizontal.
- Irradiância Normal Direta: é o parâmetro que representa a radiação recebida diretamente da esfera solar.

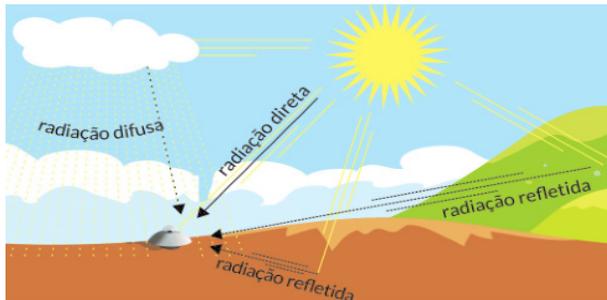


Figura 1 - Decomposição da irradiação solar.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

Além disso, existem ainda outros parâmetros de extrema importância na descrição do potencial solar de uma região (IST; EUROPEIA, 2004):

- Irradiância Global Horizontal: Corresponde ao total de energia solar que atinge a superfície terrestre em uma determinada região.
- Irradiância Global no Plano Inclinado: A inclinação das placas é projetada de forma a maximizar o aproveitamento dos raios solares incidentes.
- Insolação total: indica a quantidade de horas diárias cuja irradiância direta apresenta valores superiores ao valor de referência, especificado pela Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO) como 120 W/m^2 .
- Temperatura: exerce forte influência no desempenho das placas solares. Maiores temperaturas acarretam em menores rendimentos das placas.
- Velocidade e direção do vento: aparecem tanto no projeto estrutural do sistema como entre as variáveis da produção, pois, a movimentação de massas de ar contribui para o resfriamento das placas.

B. As placas fotovoltaicas

Os painéis solares são os principais componentes dos sistemas de geração

fotovoltaica. São os responsáveis pela conversão da radiação solar incidente em energia elétrica. A depender de suas características construtivas, as células constituintes dos painéis, podem ser classificadas de acordo com o material utilizado em três gerações, as quais são (LANA; ALMEIDA; DIAS; ROSA *et al.*, 2015):

1ª Geração: enquadram-se nesta categoria aquelas construídas com silício cristalino. Estas ainda são divididas em silício monocristalino e policristalino.

As placas de silício monocristalino são mais eficientes, entretanto, custam mais caro devido aos processos a que são submetidas para garantir o nível de pureza desejado, o qual reflete em sua característica cor uniforme. Já as placas de silício policristalino apresentam menor eficiência, mas são mais atrativas por seu menor custo, sendo assim mais utilizadas.

2ª Geração: engloba os painéis construídos a partir da tecnologia de filmes-finos. Estes trazem consigo a grande vantagem de requererem menor gasto energético e de matéria-prima em sua fabricação, contribuindo para a redução de custos. São menos eficientes que os tipos anteriores.

3ª Geração: englobam as células orgânicas ou poliméricas, as quais constituem um grupo de células ainda em fase de desenvolvimento e produção em pequena escala. Podem ainda ser classificadas de acordo com o material do qual são constituídos (IST; EUROPEIA, 2004):

- Irradiância Global Horizontal: Corresponde ao total de energia solar que atinge a superfície terrestre em uma determinada região.
- Silício amorfo (a-Si);
- Telureto de cádmio (CdTe);
- Cobre, índio e gálio seleneto (CIS / CIGS);
- Células solares fotovoltaicas orgânicas (OPV);

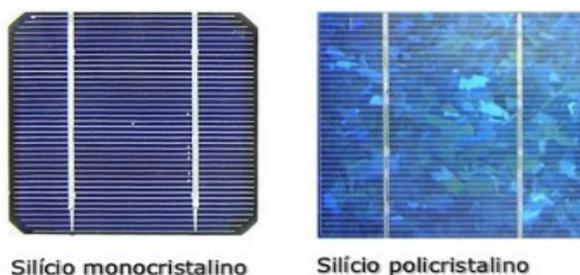


Figura 2 - Aspecto visual de placas de silício monocristalino x policristalino.

Fonte: (LANA; ALMEIDA; DIAS; ROSA *et al.*, 2015).



Figura 3 - Placas solares de filme-fino.

Fonte: (IST; EUROPEIA, 2004).

C. Eficiência das placas fotovoltaicas

A eficiência energética de módulos fotovoltaicos depende das condições ambientais de funcionamento, tais como a temperatura, a intensidade da irradiação solar, o ângulo de inclinação e tipo de módulos solares (DE SOUZA; ARISTONE, 2017).

Em condições laboratoriais, é possível a confecção de painéis com eficiências superiores a 24%, porém comercialmente os valores típicos de eficiência das placas variam entre 13% e 19% (LANA; ALMEIDA; DIAS; ROSA *et al.*, 2015).

Nos laboratórios, os testes de eficiência são feitos sob condições normais de ensaio (Standard Testing Conditions - STC). Entretanto, tratam-se de condições restritas que, em geral, não traduzem a realidade brasileira, onde as temperaturas de operação das placas atingem facilmente valores superiores a 25°C, o que diminui a eficiência de geração.

Assim, na aquisição dos painéis, devem ser escolhidos aqueles com o menor coeficiente de temperatura, o qual identifica o grau de sensibilidade da eficiência da placa em função da temperatura (SOLAR, 2019).

Os painéis de silício monocristalino (m-Si) são os mais eficientes (apesar de mais caros), seguidos pelos de silício policristalino (p-Si). Já aqueles de filme-fino acabam por ser menos eficientes que os anteriores, apesar de mais baratos.

A Tabela 1 elenca os principais tipos de tecnologias empregados e mostra uma comparação dos rendimentos obtidos a partir da utilização de cada material.

Material	Célula	Módulo
Silício monocristalino	14 a 25%	14 a 21%
Silício policristalino	20%	13 a 16,5%
Orgânicas	12%	7 a 12%
Filmes finos	9 a 16%	7 a 13%
Silício amorfo	9%	6 a 9%
Telureto de Cádmio	14,4%	9 a 11%

Tabela 1 - Eficiência de células e módulos fotovoltaicos.

Fonte: (LANA; ALMEIDA; DIAS; ROSA *et al.*, 2015).

D. Geração centralizada

Em termos gerais, a geração centralizada é traduzida como grandes centrais geradoras com grandes capacidades instaladas, buscando o máximo aproveitamento da irradiação solar local (AWS TRUEPOWER, 2018).

A potência gerada será função tanto da irradiância local, quanto da eficiência das placas utilizadas, a qual, vai depender do módulo e do perfil do meio onde serão instaladas.

Além disso, por se tratar de um complexo, a área ocupada é considerável. Ou seja, a implementação de um parque solar passa a gerar preocupações ambientais, sendo inviáveis em áreas protegidas e podendo gerar conflitos com comunidades locais.

Apesar disso, a geração centralizada possibilita o maior aproveitamento dos recursos de uma região, uma vez que torna possível uma potência gerada de centenas de megawatts.

Na Bahia, o Complexo Lapa começou a gerar energia em maio de 2017 e está a operar em capacidade total. O complexo é composto por dois parques, Bom Jesus da Lapa (80 MW) e Lapa (78 MW) totalizando 158 MW, sendo atualmente o maior do Brasil.

E. Geração distribuída

Em contrapartida, na geração distribuída a área requerida é restrita aos locais disponíveis, que podem ser residências ou mesmo edificações industriais (AWS TRUEPOWER, 2018). A Figura 5 exibe placas fotovoltaicas instaladas em residências populares no município de Juazeiro - BA. Essas instalações são, em geral constituídas por painéis fixos e inclinados de forma a obter o máximo aproveitamento do potencial solar do local de instalação.

Quando se tratando de instalações isoladas, ou seja, não conectadas à rede, há ainda a possibilidade de utilização de baterias para possibilitar o armazenamento da energia gerada para utilização nos momentos de demanda. O conjunto de

baterias necessárias encarece o projeto, seja pelo seu preço de aquisição, quanto devido à sua vida útil não muito longa, além de requerer espaço dentro da edificação com condições mínimas de segurança (AWS TRUEPOWER, 2018).

Apesar de alguns problemas relacionados com o aumento da complexidade do sistema, a geração distribuída traz vantagens tanto para os consumidores quanto para concessionária e para o sistema interligado nacional. Algumas das quais como a redução dos custos de transporte, uma vez que se localizam próximas aos pontos consumidores e o atendimento a áreas remotas (GOMES, 2018).



Figura 4 - Geração centralizada.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).



Figura 5 - Geração distribuída - Juazeiro - BA.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

3 I CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA BAHIA

O estado da Bahia é o quinto maior estado brasileiro. Apresenta relevo caracterizado por planícies, planaltos e depressões e vegetação variada entre caatinga, cerrado, mata atlântica e até manguezais. Em paralelo, o estado apresenta considerável variabilidade climática por microrregião. Mas, de forma simplificada, sua localização é marcada por forte incidência solar, assim como todo o Nordeste (AWS TRUEPOWER, 2018).

Com base nos dados das principais estações meteorológicas da Bahia, foram estimadas as principais variáveis caracterizadoras de potencial em geração solar que podem ser vistas nas Figuras 6 a 10.

Como principal característica indicadora, a irradiação global horizontal anual, Figura 6, demonstra que o estado apresenta valores acima de 1400 kWh/m², com grande predominância de valores acima de 2000 kWh/m² em seu território.

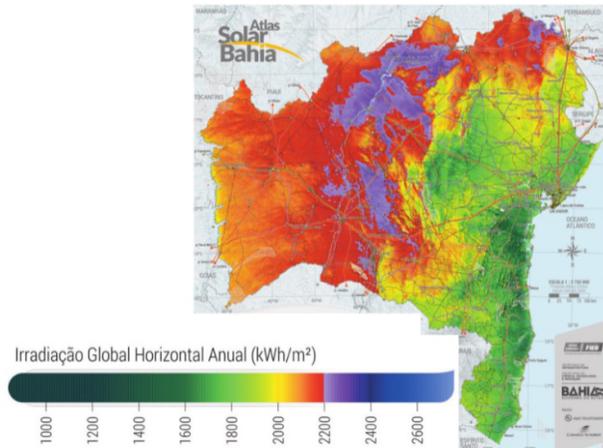


Figura 6 - Irradiação global horizontal anual no estado da Bahia.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

Da mesma forma, a análise da Figura 7 e sua comparação com a Figura 8 mostra a relação existente entre as componentes de irradiação direta e difusa: nas regiões onde se observa os maiores índices de irradiação direta menores são os valores de irradiação difusa. Disso entende-se que, a interação entre os raios solares e a atmosfera é menos intensa nessas regiões, acarretando em menores desvios dos raios luminosos e constatando-se a maior incidência direta dessa radiação.

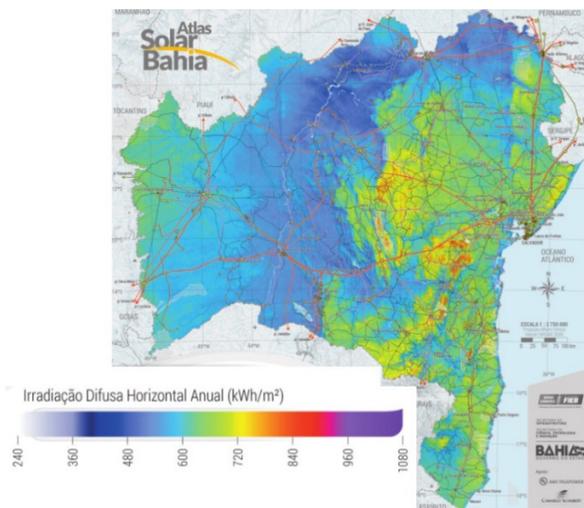


Figura 7 - Irradiação difusa horizontal anual no estado da Bahia.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

A região de Barra a Juazeiro, bem como entre Macaúbas e Livramento de Nossa Senhora chegam a apresentar índices de irradiação solar direta superiores a 2200 kWh/m². Como dito anteriormente, em Juazeiro fora inaugurado o maior parque solar brasileiro, região está onde se constata menores índices de irradiação difusa e maiores da direta.

Na Bahia observam-se, ainda, altos índices de irradiação normal ao longo de boa parte de seu território. Tal fato se deve a sua posição geográfica, a qual consiste em uma região de baixa latitude, próxima ao Equador.

Da Figura 8, destaca-se o superior nível de irradiação normal média anual nas sub-regiões Oeste, Serra Geral, Irecê, Baixo Médio e Médio São Francisco e Chapada Diamantina.

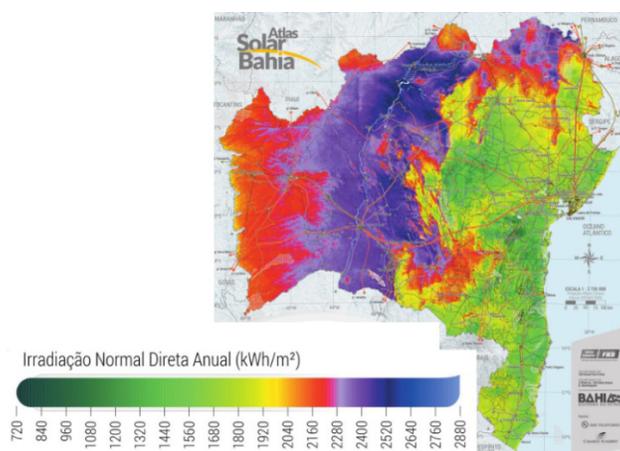


Figura 8 - Irradiação normal direta anual no estado da Bahia.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

Já no que tange aos dados da Figura 9, nota-se que, em relação à temperatura média anual, o estado apresenta forte predominância de temperaturas acima de 24°C, chegando a 28°C nas regiões do vale do São Francisco.

No que diz respeito a velocidade média dos ventos, Figura 10, o estado apresenta, em sua maior parte, ventos de 2,5 a 4,0 m/s, sendo que apenas nas regiões de maior altitude, como na Chapada Diamantina e nas Serras de Jacobina e do Espinhaço, os ventos tem velocidade de 4,5 a 8,0 m/s.

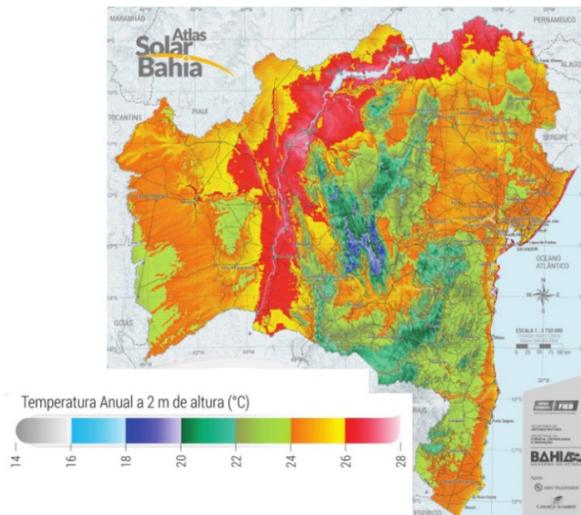


Figura 9 - Temperatura média anual no estado da Bahia.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

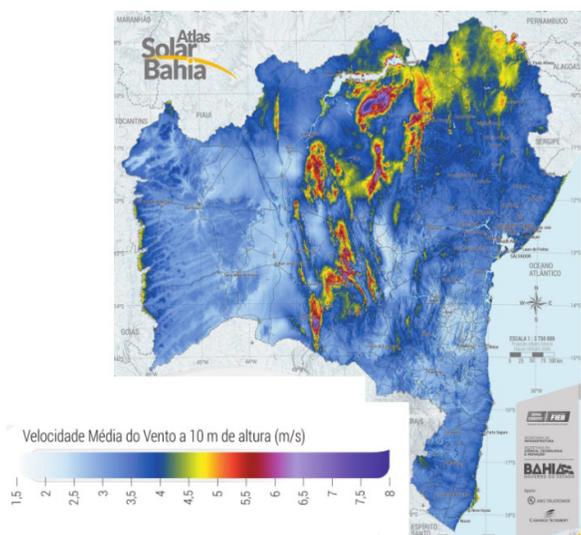


Figura 10 - Velocidade média dos ventos no estado da Bahia.

Fonte: (AWS TRUEPOWER, 2018).

4 | ESTUDO DE CASO: GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Conforme definido, o sistema de geração distribuída se baseia na implantação das placas nas construções residenciais/industriais/comerciais podendo estar ligado à rede de distribuição e/ou a sistemas de armazenamento.

Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) para a avaliação do potencial de geração fotovoltaica em residências, com base nos níveis de irradiância, área disponível de telhados e consumo de energia elétrica no ano de 2013, indicou, Tabela 2, que o estado com maior potencial fotovoltaico residencial era São Paulo, estando a Bahia em quarto lugar, atrás dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

UF	São Paulo	Bahia
Potencial Fotovoltaico Residencial (MWmédios)	7.100	2.360
Potencial Fotovoltaico Residencial(GWh/ano)	62.196	20.674
Consumo Residencial Anual 2013 (GWh)	38.783	6.144
Potencial Fotovoltaico/Consumo Residencial	160%	337%

Tabela 2 - Potencial técnico fotovoltaico residencial.

Fonte: (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

A fim de verificar a origem desta potencialidade, considerando que a Bahia se destaca em recurso solar, foi proposto um estudo de caso comparativo por meio de simulações no ambiente Matlab - Simulink®. Com base nos dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2019), estimou-se a energia média produzida para um sistema composto de 8 placas do modelo SunPower SPR-E20-327, de potência nominal 327 W (SUNPOWER, 2016), correspondendo ao intervalo de teste de Janeiro/2018 a Junho/2018, em relação às cidades de Salvador (BA) e São Paulo (SP).

A partir do diagrama montado, Figura 11, com base na simulação de exemplo Solar Cell Power Curve (MATLAB, 2019), foram obtidas as potências diárias médias associadas aos valores médios uteis de irradiância e temperatura ambiente, Tabela 3, a partir das estações meteorológicas A401 - Salvador e A701 - São Paulo. Com o produto dessas potências pelas insolações mensais (estações: 83229 - Salvador, 83781 - São Paulo), obteve-se a energia média produzida em cada um dos meses simulados, Figura 12.

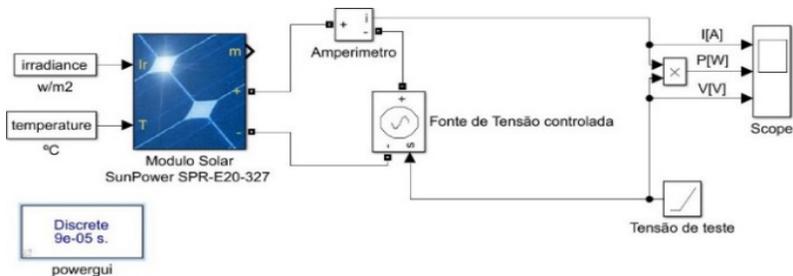


Figura 11 - Diagrama de simulação.

Fonte: acervo dos autores.

Uma observação que precisa ser feita é que a faixa temporal analisada foi limitada pela disponibilidade de dados das estações meteorológicas, ainda que fosse desejado a análise anual.

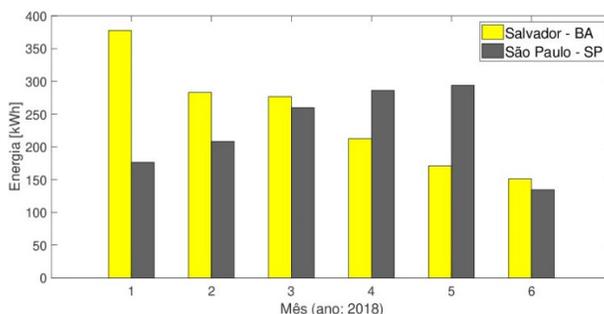


Figura 12 - Gráfico de energia gerada mensalmente.

Fonte: acervo dos autores.

A Figura 12 indica que a cidade de Salvador nos meses de janeiro, fevereiro e março (durante o verão) apresenta alta produção energética no sistema. Cruzando com os dados da Tabela 3, vê-se que nesses meses a taxa de irradiância é na faixa de 600 Wh/m^2 e as horas de sol na faixa de 200 h/mês . Enquanto isso São Paulo, na mesma época, apresenta situação inversa: baixa produção energética, irradiância e insolação inferiores.

Essa situação diz respeito às características climáticas das regiões: Salvador apresenta verão de sol forte, dias longos e poucas chuvas, enquanto em São Paulo, o verão é marcado por fortes chuvas, dias menores e mais escuros. Tal dinâmica se inverte em direção ao outono. Esses sintomas refletem a influência da sazonalidade na produção.

Mês	Temperatura [°C]		Irradiância [Wh/m ²]		Insolação total [h/mês]	
	São Paulo	Salvador	São Paulo	Salvador	São Paulo	Salvador
1	22.644	27.242	523.494	650.971	129	225.1
2	22.135	27.175	539.986	611.025	147.3	180
3	23.494	27.539	580.693	570.564	171.4	189.1
4	21.146	26.106	569.719	511.457	190.7	161.2
5	19.088	26.106	551.939	462.839	200.9	143.4
6	18.434	24.466	445.199	453.850	114.2	129

Tabela 3 - Parâmetros médios calculados.

Fonte: acervo dos autores.

Assim, infere-se que nesses meses, Salvador apresentou uma média superior de produção energética, indicando que mesmo não estando nas regiões do estado com as mais altas incidências solares, conseguiu ultrapassar a capital do estado de São Paulo, a qual possui maior potencialidade de geração distribuída. O motivo por trás disso é exposto pela Tabela 2, onde o potencial fotovoltaico residencial é calculado considerando as áreas disponíveis dos telhados – sendo diretamente proporcional à densidade populacional. A Bahia, com aproximadamente 15 milhões de habitantes contra SP com mais de 40 milhões segundo IBGE. Assim, SP só se destaca por conta da grande densidade de telhados disponíveis para captar o recurso solar em relação a BA.

Ainda sobre a Tabela 2, a razão entre Potencial Fotovoltaico e consumo residencial chama atenção, ao informar que o estado é capaz, mesmo que com densidade demográfica inferior, produzir 300% a mais do que consome em energia elétrica se o sistema fosse implementado, contra os 160% de SP.

5 | ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO

Observando-se o mapa de global horizontal irradiance (GHI) do Brasil, Figura 13, pode-se observar que tal índice se apresenta em menor valor no litoral do estado de Santa Catarina, na ordem de 1500 kWh/m² de GHI anual, enquanto a maior incidência se verifica no norte do estado da Bahia, na ordem de 2330 kWh/m². Com base nessas informações, pode-se inferir que todo o território tem incidência média de 4,0 a 6,4 kWh/m² diária.

Uma comparação interessante é realizada com países pioneiros e líderes em geração fotovoltaica, como a Alemanha, que possui uma incidência anual entre 1000 a 1.200 kWh/m² e a Espanha que varia de 1.200 a 1.900 kWh/m² anuais, Figura 14 (DA ROSA; GASPARIN, 2016).

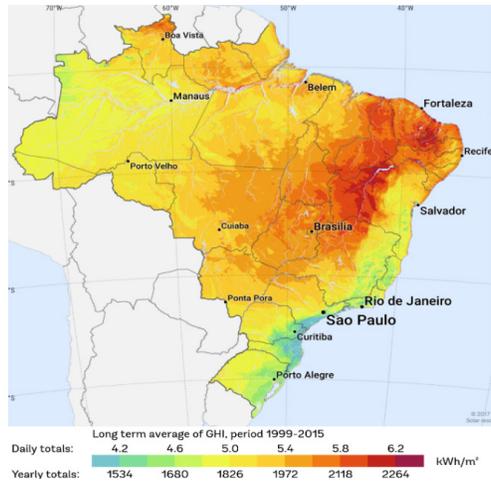


Figura 13 - GHI médio diário/anual do Brasil.

Fonte: (SOLARGIS, 2019).

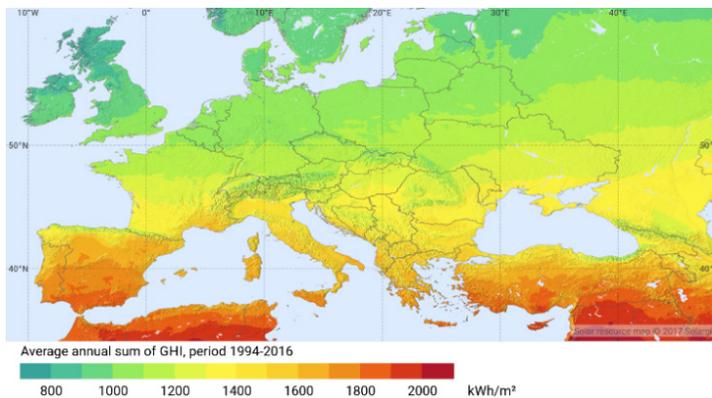


Figura 14 - GHI médio anual da Europa.

Fonte: (SOLARGIS, 2019).

Assim sendo, a Bahia se destaca tanto nacional quanto internacionalmente no setor, uma vez que, como fora visto, apresenta condições de irradiação extremamente favoráveis para o aproveitamento energético, com foco nas regiões centro-norte e oeste do estado.

Ainda em comparação aos países europeus, levanta-se uma questão interessante: “Por que então a Bahia não demonstra grande aproveitamento nesse recurso?”. A Bahia, ainda que detentora desse enorme potencial de geração solar, enfrenta dificuldades em implementá-lo, uma vez que a infraestrutura dos sistemas elétricos presentes nas áreas de maior capacidade não é suficiente para escoar

essa energia (AWS TRUEPOWER, 2018).

Além do mais, quando se trata de geração solar centralizada, o estado ainda encontra outras dificuldades, ainda que este tenha território vasto, a presença de diversas regiões ambientalmente protegidas, como reservas naturais, terras indígenas e quilombos diminuem a área efetiva (AWS TRUEPOWER, 2018).

Em relação a geração distribuída, ainda que o estado tenha um vasto território, há uma maior concentração das regiões urbanas na faixa litorânea (AWS TRUEPOWER, 2018). Isso representa valores menores de GHI e uma área útil reduzida para implementação desse tipo de sistema, como percebido no estudo de caso.

6 | CONCLUSÕES

Constata-se que o estado da Bahia apresenta um potencial para geração fotovoltaica extremamente alto, se destacando nas principais condições: irradiações e insolação. Ainda que apresente temperaturas altas por todo território, essa grandeza pode ser amenizada pela presença de taxas consideráveis de ventos nas regiões de maior temperatura.

A geração centralizada já ratifica a superioridade do potencial com a presença dos principais e maiores sistemas em funcionamento desse tipo no país e dos novos sistemas leiloados para futura instalação, com leve dificuldades de interligar esses sistemas na infraestrutura energética existente.

A geração distribuída, definitivamente, não pode ser renegada, uma vez que tem capacidade de gerar três vezes o consumido no estado, com relação aos valores absolutos de irradiação solar. Qualquer região do território tem tecnicamente viabilidade para o desenvolvimento dessa forma de geração, mesmo que fora das melhores condições, bastando um estudo e dimensionamento adequado.

REFERÊNCIAS

AWS TRUEPOWER, C. S. E. A., FIEB/SENAI CIMATEC. **Atlas solar : Bahia**. CIMATEC/SENAI, S. S. Salvador: 76 p. 2018.

DA ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, E.-E. **Nota Técnica DEA 19/14–Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil–Condicionantes e Impactos**. Rio de Janeiro, 2014.

DE SOUZA, A.; ARISTONE, F. **ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO**. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 2, n. 7, p. 115-128, 2017.

GOMES, A. C. **Microrredes CC: distribuição de potência e modelo estático com base no controle por droop e MPPT**. 2018.

INMET. **Bdmep - dados históricos e dados meteorológicos**. 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/porta1>. Acesso em: 15 de junho de 2019.

IST, D. A. E.; EUROPEIA, U. **Energia Fotovoltaica-Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Janeiro de, p. 368, 2004.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C. *et al.* **Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica**. *Engenharias On-line*, 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

MATLAB, M.-. **Solar Cell Power Curve**. 2019. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/solar-cell-power-curve.html?s_tid=srchtitle. Acesso em: 19 de junho de 2019.

SOLAR, P. **Tudo sobre a Eficiência do Painel Solar**. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html>. Acesso em: 15 de junho de 2019.

SOLARGIS. **Solar resource and pv power potential maps**. 2019. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-%20data/download#search>. Acesso em: 19 de junho de 2019.

SUNPOWER. **Datasheet SunPower® E-Series Residential Solar Panels - E20-327**. 2016. Disponível em: <https://us.sunpower.com/sites/default/files/media-library/data-sheets/ds-e20-series-327-residential-solar-panels.pdf>. Acesso em: 17 de junho de 2019.

ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO HIDRO-SOLAR AUXILIADO POR UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA FORMA DE HIDROGÊNIO JUNTO À USINA HIDROELÉTRICA DE MANSO

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 03 /07/2020

Juarez Corrêa Furtado Júnior

Universidade Estadual de Campinas

Ennio Peres da Silva

Universidade Estadual de Campinas

Vitor Feitosa Riedel

Universidade Estadual de Campinas
BASE Energia Sustentável

Demóstenes Barbosa da Silva

BASE Energia Sustentável

Diogo Oliveira Barbosa da Silva

BASE Energia Sustentável

Ana Beatriz Barros Souza

Universidade Estadual de Campinas

Hélio Nunes de Souza Filho

Universidade Estadual de Campinas

RESUMO: O histórico de geração de energia na Usina Hidrelétrica de Manso mostra que, nos últimos 10 anos, a produção de eletricidade correspondeu a apenas 37,6% da capacidade da subestação da hidrelétrica. Dessa forma, esse trabalho propõe a instalação de uma planta solar fotovoltaica junto à UHE, de modo a complementar sua geração, além de capturar as sinergias inerentes a essa integração. Para auxiliar esse propósito, é proposto a instalação de um sistema de armazenamento de energia

elétrica sob a forma de hidrogênio (SAEEH2), com o objetivo de minimizar a ociosidade da subestação. Para avaliar a operação desse sistema é apresentada uma simulação do sistema hidro-solar, considerando o dimensionamento da planta solar e SAEH2, que compense o déficit hídrico dos últimos anos.

PALAVRAS-CHAVE: Geração solar; Integração hidráulico/solar, Painéis solares flutuantes, Armazenamento de energia elétrica, Hidrogênio.

ABSTRACT: The history of power generation at the Manso Hydroelectric Plant shows that, in the last 10 years, electricity production corresponds to only 37.6% of the hydroelectric substation capacity. Thus, this work offers the installation of a photovoltaic solar power plant next to the HPP, in order to complement its generation, in addition to capturing synergies inherent to this integration. To assist in this purpose, it is proposed to install an electrical energy storage system in the form of hydrogen (HESS), with the objective of minimizing the substation's idleness. To evaluate the operation of this system, make a simulation of the hydro-solar system, considering or dimensioning the solar plant and the HESS, what is the difference or the water deviation in recent years.

KEYWORDS: Solar generation; Hydraulic / solar integration, Floating solar panels, Electric energy storage, Hydrogen.

1 | INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira, que tem um histórico de predominância da fonte hidráulica,

está passando por um processo de transformação, no qual se observa um aumento na diversificação das fontes de geração, principalmente com o incentivo cada vez maior do desenvolvimento de projetos que envolvam fontes renováveis [1]. As fontes solar fotovoltaica (FV) e eólica se destacam nesse cenário, tendo sido responsáveis por 276 GWh e 4.123 GWh respectivamente da geração de energia elétrica no Brasil em 2019, valores que correspondem a 0,6% e 8,4% respectivamente do montante total [2]. A Figura 1 apresenta o histórico da participação das principais fontes de geração na matriz elétrica brasileira.

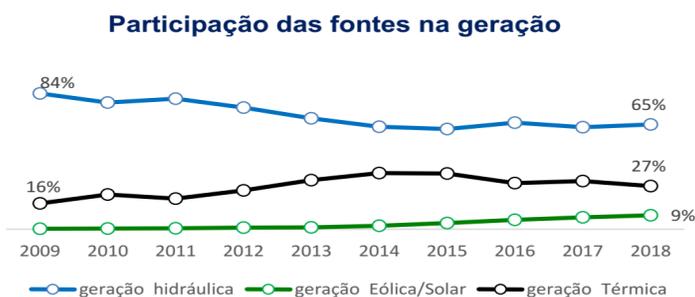


Figura 1: Evolução da participação das fontes de geração elétrica no Brasil [3]. Obs.: a soma em 2018 é maior que 100 % por conta dos arredondamentos.

Há projeções de crescimento dessas fontes, de modo que em 2025 espere-se que a fonte solar fotovoltaica produza 16 TWh e a eólica 92 TWh, tendo um importante papel para o cumprimento das metas brasileiras assumidas no Acordo de Paris [4].

Por outro lado, a natureza das fontes renováveis é ser sazonal e, considerando somente as eólicas e solares, elas ainda são intermitentes. O inconveniente nesse caso é a ocorrência de problemas na qualidade da eletricidade produzida, além de incertezas na confiabilidade do suprimento de energia, o que se reflete na segurança energética [1, 5]. Por essa razão, faz-se necessária a adoção de medidas e tecnologias que permitam reduzir os efeitos da intermitência e sazonalidade.

Nesse caso, tendo em vista a magnitude do parque de geração hidrelétrico brasileiro, a associação da geração hidráulica com fontes renováveis, especialmente solar e eólica, representa uma oportunidade para diversificar a matriz elétrica. Embora ainda em pequena escala, existem iniciativas para a integração de usinas hidrelétricas com a geração solar fotovoltaica, com o desenvolvimento de painéis solares flutuantes para serem instalados sobre os lagos dos reservatórios das hidrelétricas, tais como os exemplos de projetos de pesquisa e desenvolvimento executados pela CESP junto a UHE de Porto Primavera, por FURNAS junto à UHE

de Itumbiara e pela CHESF junto a UHE de Sobradinho [6].

São várias as vantagens da associação entre a geração hidráulica e a geração solar fotovoltaica, uma vez que a planta flutuante pode utilizar a infraestrutura já disponível para a drenagem da energia produzida (subestação, transformadores, linhas de transmissão etc.), aproveitando a área alagada, que de outra forma não poderia ser utilizada. Isso contribui para o aumento da produtividade energética por área (MWh/m^2) do empreendimento hidrelétrico, e possivelmente pode ter os trâmites relativos ao licenciamento ambiental facilitados. Outras vantagens a serem mencionadas são que painéis fotovoltaicos posicionados próximos à lamina d'água podem operar a menores temperaturas, aumentando a eficiência da geração fotovoltaica e que a cobertura, mesmo que parcial, da superfície reduz as perdas de água do reservatório por evaporação. Como desvantagens, podem haver impactos ambientais na flora e na fauna do reservatório, que precisarão ser estudados cuidadosamente em cada caso [7].

Para facilitar a integração entre diferentes fontes renováveis, a adoção de tecnologias de armazenamento de energia pode ser vista como uma alternativa que permite atenuar os efeitos da intermitência e sazonalidade das fontes renováveis [10]. Tais tecnologias permitem maximizar o aproveitamento dessas fontes, de modo que, nos períodos de grande oferta de energia renovável e/ou baixa demanda, a parcela excedente à demanda é armazenada. O montante armazenado pode ser utilizado nos períodos de elevada demanda e/ou baixa oferta, contribuindo para uma maior estabilidade da rede elétrica, além de maior penetração das fontes renováveis [9, 10].

A utilização de sistemas de armazenamento de energia elétrica na forma de hidrogênio (SAEEH2) está associada a grandes blocos de energia que necessitem ser estocados por intervalos de tempo elevados, sem que se tenha perdas relevantes no processo. Os SAEEH2 podem aproveitar o excesso de energia renovável, produzindo H_2 através da eletrólise da água, reconvertendo esse gás posteriormente em eletricidade nos momentos oportunos. Além disso, o hidrogênio produzido pode ter outras aplicações, como na indústria química, na mobilidade etc. [1, 11].

Ainda com custos relativamente elevados, as tecnologias de armazenamento de energia constituem um campo de pesquisa bastante promissor, e possuem elevado potencial de transformação na maneira do consumo, produção e despacho de energia elétrica. Além disso, essas tecnologias podem impactar significativamente na competitividade industrial, e deve receber grandes volumes de investimento, devido à sua importância estratégica [12]. Tendo em vista essa importância, a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL propôs em 2016 uma chamada pública de projetos que atendam à temática do armazenamento de energia, Chamada ANEEL No. 021/2016 - Arranjos técnicos e comerciais para a inserção de sistemas de

armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, na qual tem-se investimentos previstos de R\$ 406 milhões através dos 23 projetos aprovados, sendo que 3 deles tratam do uso da tecnologia do hidrogênio. Dentre esses, tem-se os projetos sob o código PD-00061-0054/2016, desenvolvido pela Companhia Energética de São Paulo, CESP, e PD 00394-1606/2016, que está sendo construído pelas Centrais Elétrica FURNAS [13].

O primeiro, intitulado “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia Junto a Usinas Hidrelétricas, Utilizando Tecnologias de Armazenamento Eletroquímico e em Hidrogênio”, trata do armazenamento de eletricidade na forma de hidrogênio e o uso de baterias avançadas. É composto por um eletrolisador PEM com potência de 100 kW e capacidade de produção de 20 Nm³/h de hidrogênio gasoso. Esse gás é armazenado em um tanque pressurizado com capacidade de 600 m³ (CNTP) a uma pressão de 25 bar. A reconversão do hidrogênio em eletricidade é realizada em uma célula a combustível (CaC) PEM de 100 kW. O armazenamento eletroquímico é feito por um sistema de bateria de íon lítio de 500 kWh, com inversor de 250 kW. Esse projeto está sendo desenvolvido junto à UHE de Porto Primavera, no rio Paraná, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, local onde a CESP desenvolve diversos projetos envolvendo geração de eletricidade através de fontes renováveis de energia (1.050 kWp de geração solar fotovoltaica, com uma produção média correspondente a 5.070 kWh de eletricidade, a um fator de capacidade de 20%, e geração eólica com potência instalada de 200 kW, com um fator de capacidade de 30%, e uma média diária de produção de 1.440 kWh). Dessa forma, o sistema de armazenamento de energia tem o papel de integrar todas as fontes renováveis, visando o melhor aproveitamento das mesmas [14].

Já o segundo projeto, com o título “Desenvolvimento de Sinergia entre as Fontes Hidrelétrica e Solar com Armazenamento de Energias Sazonais e Intermitentes em Sistemas a Hidrogênio e Eletroquímico (SHSBH2)”, possui arranjo similar ao da CESP, com um eletrolisador alcalino de 270 kW com produção de até 50 Nm³/h de H₂, consumindo 5,72 kWh/Nm³, um tanque com volume total de armazenamento equivalente a 900 Nm³ (81 kg H₂) a pressões de 30 bar, além de uma CaC de até 300 kW, com consumo de 215 Nm³/h de H₂, com a produção de 1,42 kWh/Nm³. Nesse caso, projeto de demonstração, de escala reduzida, tem por objetivo avaliar a aplicabilidade de novas tecnologias de armazenamento de energia, em suporte à sinergia entre as fontes solar fotovoltaica e hidrelétrica. Esse projeto está sendo realizado junto à Usina Hidrelétrica de Itumbiara, localizada no rio Paranaíba, entre os municípios de Itumbiara, em Goiás, e Araporã, em Minas Gerais. Está prevista a instalação de uma planta fotovoltaica com 1 MW_p de potência instalada, correspondendo a 800 kWp instalados no solo e os 200 kW_p restantes instalados em estruturas flutuantes no lago do reservatório da usina [15].

Com o objetivo de avaliar a integração hidro-solar associada a um SAEEH2 nas usinas hidrelétricas brasileiras, bem como a sua aplicabilidade em quaisquer locais, este trabalho analisa tanto aspectos energéticos como da operação conjunta desses sistemas na UHE de Manso, com o intuito de verificar o potencial de aumento da capacidade de geração, além de uma melhor gestão do reservatório.

2 I HISTÓRICO DE GERAÇÃO NA UHE DE MANSO

A UHE de Manso localiza-se no Rio da Morte, no município de Chapada dos Guimarães - MT, com coordenadas geográficas $14^{\circ}52'16''\text{S}$ e $55^{\circ}47'7''\text{W}$, distante 86 km da capital do estado, Cuiabá. Essa usina é do tipo reservatório, com uma potência outorgada pela ANEEL de 210 MW e energia firme de 92 MW/ano. A casa de máquinas possui 4 turbinas tipo Francis de eixo vertical com 52,5 MW cada. Em relação à barragem, a queda líquida nominal é de 57,5 m (nível de máximo de operação 287 m e mínimo de 278 m), com área inundada do reservatório de 427 km² [16]. A Figura 2a apresenta esquematicamente a localização geográfica do município de Chapada dos Guimarães e a Figura 2b apresenta a vista da UHE de Manso, com o local considerado para a instalação da planta solar fotovoltaica.



Figura 2: a) Localização geográfica do município de Chapada dos Guimarães; b) Local considerado para a instalação da planta solar fotovoltaica

Uma análise do histórico das características do reservatório dessa usina, disponíveis na base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) [17], mostra que a vazão, a cota e o volume útil do reservatório da UHE tem se mantido aproximadamente constantes nos últimos 10 anos. Como consequência, a geração elétrica no mesmo período permaneceu aproximadamente constante, não apresentando tendência de aumento ou redução na geração, conforme dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico [2]. A Figura 3 apresenta graficamente o histórico das médias mensais do nível do reservatório, percentual do volume útil, e o percentual de potência fiscalizada gerada, no período compreendido entre 2009 a 2018.

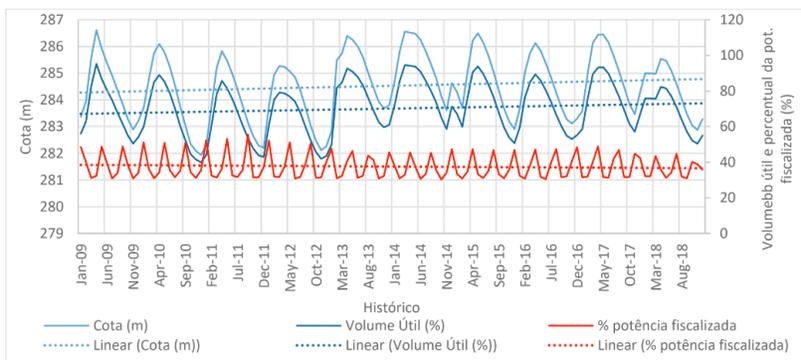


Figura 2 – Histórico das médias mensais do nível do reservatório, percentual do volume útil, e o percentual de potência fiscalizada gerada, no período compreendido entre 2009 a 2018 [2], [17].

Nota-se na Figura 2 os efeitos da sazonalidade da geração hidrelétrica durante os últimos 10 anos, porém uma análise da linha de tendência revela que houve pouca variação durante esse período, com as variáveis da cota, volume útil e geração elétrica se mantendo aproximadamente constantes. A Tabela 1 apresenta as médias mensais dos últimos 10 anos para os dados hidrológicos e da produção de eletricidade durante o ano.

Mês	Cota (m)	Afluência (m ³ /s)	Defluência (m ³ /s)	Vazão Vertida (m ³ /s)	Vazão Turbinada (m ³ /s)	Potência média (MW _{med})
JAN	283,62	307,53	186	0,2	186	94
FEV	284,74	346,18	197	0,4	196	102
MAR	285,60	315,65	209	1,1	208	110
ABR	286,10	196,32	190	7,7	183	97
MAI	285,92	95,67	137	0,3	136	72
JUN	285,55	68,77	128	0,6	127	67
JUL	285,04	49,71	128	0,0	128	66
AGO	284,44	45,31	127	1,1	126	65
SET	283,84	48,36	130	1,9	128	65
OUT	283,26	69,78	136	1,7	134	68
NOV	282,93	124,79	137	1,4	135	68
DEZ	283,18	199,19	154	1,4	153	77
Média	284,52	155,60	155	1,5	153	79

Tabela 1- Médias mensais entre 2009 e 2018 para os dados hidrológicos e de geração elétrica da UHE de Manso [2], [17].

Conforme apresentado na Tabela 1, a média de geração elétrica nos últimos 10 anos foi de 79 MW_{med}, valor inferior à energia firme da UHE, de 92 MW_{med} [16]. Por outro lado, esse valor corresponde a apenas 37,6% da potência outorgada pela ANEEL, o que permite inferir que a infraestrutura da usina está sendo subaproveitada. Portanto, é proposta a instalação de uma planta solar fotovoltaica sobre a lamina d'água do reservatório, de modo a otimizar o aproveitamento da infraestrutura da UHE de Manso.

3 | DIMENSIONAMENTO DA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 Dados Solarimétricos da UHE de Manso

Os dados solarimétricos do local de instalação da planta solar fotovoltaica, utilizando-se as coordenadas geográficas da UHE de Manso, foram obtidos através do programa SunData, disponibilizado no site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) [18]. Essa plataforma fornece a irradiação solar diária média mensal para todas as localidades do território brasileiro. Para as coordenadas de Manso são fornecidos dados de três estações solarimétricas, sendo adotado os valores da estação mais próxima à UHE, localizada no próprio município de Chapada dos Guimarães, a 5,3 km do local de instalação da planta solar fotovoltaica. Os valores das irradiações médias mensais estão apresentados na Tabela 2.

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0°N	5,36	5,34	5,14	5,09	4,64	4,54	4,73	5,42	5,21	5,34	5,52	5,54	5,16
Ângulo igual a latitude	15°N	4,97	5,13	5,18	5,45	5,26	5,32	5,48	5,99	5,37	5,21	5,16	5,09	5,30
Maior média anual	16°N	4,94	5,11	5,17	5,47	5,30	5,36	5,52	6,01	5,37	5,19	5,13	5,05	5,30
Maior mínimo mensal	11°N	5,10	5,21	5,19	5,38	5,12	5,13	5,31	5,87	5,35	5,27	5,28	5,23	5,29

Tabela 2- Dados de irradiação solar no reservatório da UHE de Manso [18].

Dessa forma, adotou-se nesse estudo a irradiação média de 5,30 kWh.m⁻². dia⁻¹, considerando que os painéis serão instalados com um ângulo de inclinação igual ao da latitude (15°N). É importante mencionar que esse valor é numericamente igual ao número de horas diárias equivalentes a uma irradiação de 1.000 W.m⁻².

Por outro lado, a geração solar fotovoltaica varia ao longo de dia, tendo seu pico de produção às 12 horas, horário local. Para o dimensionamento, tanto da

planta FV como do SAEEH2, bem como para a sua operação integrada à geração hidráulica, é necessário conhecer a quantidade de energia solar fotovoltaica que pode ser produzida em cada hora do dia. Essa estimativa pode ser feita através do conhecimento da distribuição horária da irradiação. Assumindo um dia com céu claro, a irradiação solar horária pode ser calculada de acordo com a equação E1 [5].

$$Irradiação\ horária = k I_0(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(15^\circ(H - 12))) \quad (E1)$$

Onde I_0 representa a intensidade média de energia que atinge o topo do planeta, e k é o fator de atenuação de I_0 , devido à absorção e à reflexão da radiação na atmosfera. A variável δ é a declinação solar, ou seja, o ângulo referente à estação do ano (sendo 0° para os equinócios de março e setembro e $23,27^\circ$ para os solstícios de junho e dezembro) e φ é a latitude da UHE de Manso ($14^\circ52'$). O termo $15^\circ(H-12)$ é uma aproximação para a determinação do ângulo horário, com H sendo a hora do dia em décimos. A fração da radiação solar é calculada conforme a Equação E2 [5].

$$F_{solar} = \frac{Irradiação\ horária}{Irradiação\ total} = \frac{k I_0(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(15^\circ(H - 12)))}{k I_0} \quad (E2)$$

É importante observar que no cálculo da fração da irradiação para uma determinada hora do dia, os valores de I_0 e k se cancelam. Considerando um dia de céu claro, a distribuição teórica da irradiação solar ao longo do dia para a UHE de Manso é apresentada na Figura 3.

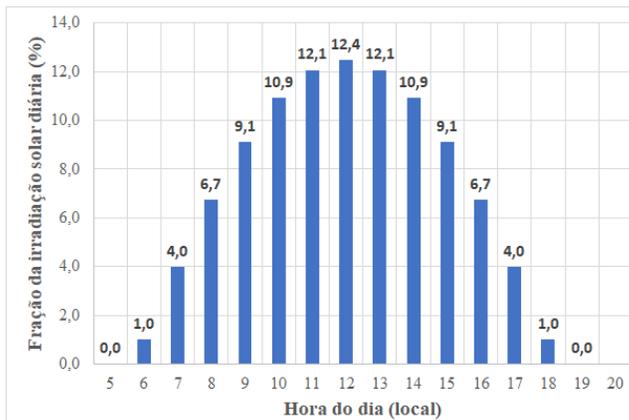


Figura 3- Frações da irradiação solar média horária para o reservatório da UHE de Manso.

3.2 Estimativa da capacidade da planta FV

Após a obtenção dos dados solarimétricos da UHE de Manso, é necessária a seleção dos painéis fotovoltaicos a serem utilizados. É desejável a seleção de

um modelo com elevada eficiência e baixo custo, além de que o fabricante tenha expertise na instalação e manutenção de plantas solares fotovoltaicas de grande porte. Para a seleção dos painéis foi utilizada a tabela de eficiência energética para sistemas de energia fotovoltaica elaborada pelo INMETRO, a qual apresenta diversas características como área, eficiência, tensão de operação e potência. Essa tabela está disponível em [19]. A partir de uma seleção inicial dos modelos, foram levantados os fabricantes que já participaram de projetos relevantes em plantas fotovoltaicas.

Observou-se que o complexo de Pirapora, localizado no norte de Minas Gerais e inaugurado em outubro de 2017, é composto por 11 plantas fotovoltaicas que totalizam 321 MW_p de capacidade instalada, teve como principal fornecedor o fabricante canadense *Canadian Solar*. Esse fabricante possui instalações em Sorocaba/SP, o que contribuiu para facilitar eventuais serviços de assistência técnica, além de já ter fornecido cerca de 594 mil módulos fotovoltaicos para o complexo de Pirapora. Além disso, esse fabricante faz parte do consórcio vencedor do leilão A4 de energia da ANEEL, tendo ofertado preço de R\$123,33/MWh para a fonte solar [20, 21].

Por essa razão, o modelo selecionado nesse caso foi o *Canadian Solar* CS6X-320P, com uma potência de 320 W_p por módulo e área de $1,92 \text{ m}^2$ [19]. Assim, a produção diária média de cada painel fotovoltaico junto à UHE de Manso corresponde a $1,696 \text{ kWh}$ ($320 \text{ W}_p \times 5,30 \text{ kWh.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$). Após a seleção dos painéis fotovoltaicos, é necessário definir o tamanho da planta FV. Isso é feito com base na disponibilidade da subestação. Tendo em vista que a UHE foi projetada para uma potência de 210 MW , e a média de geração dos últimos 10 anos foi de $79 \text{ MW}_{\text{med}}$, tem-se uma margem para o aumento da produção de uma fonte complementar de $131 \text{ MW}_{\text{med}}$, o que representa um aumento de 1,6 vezes na produção média atual, sem alterar os componentes de transmissão da usina, especialmente subestações e linhas de transmissão.

Assim, a complementação com $131 \text{ MW}_{\text{med}}$ equivale a 3.144 MWh de energia por dia ($131 \text{ MW} \times 24 \text{ h}$) e, dessa forma, para toda a planta são necessários $1.853.778$ painéis ($3.144.000 \text{ kWh}/1,696 \text{ kWh/painel}$), demandando uma área de $3.559.254 \text{ m}^2$ ($1.853.778 \text{ painéis} \times 1,92 \text{ m}^2/\text{painel}$). Assumindo um acréscimo de área de 50 % para os flutuadores [7], a área total ocupada pela planta corresponde a aproximadamente $5,34 \text{ km}^2$, que equivale a 1,25 % da área total do reservatório.

3.3 Justificativa para a instalação de um SAEEH2

Conforme observado no item anterior, para a complementação da geração hidráulica da UHE de Manso é necessária a instalação de uma planta solar com capacidade de produção diária de $3,144 \text{ MWh}$ ($131 \text{ MW}_{\text{med}}$). No pico de geração,

compreendido entre às 12:00h e 13:00h (meio-dia local), tem-se a máxima geração solar fotovoltaica durante o dia, com a planta solar fotovoltaica recebendo 12,4% do total da irradiação diária. Assim a energia a ser despachada nesse período corresponde a 389,9 MWh, valor 1,86 superior à capacidade máxima da subestação (210 MW). Ainda que toda a energia hidráulica deixasse de ser produzida nesse período, não seria possível drenar toda a energia gerada para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Isso evidencia a necessidade de um sistema de armazenamento de energia.

3.4 Sistema de Armazenamento de Energia a Hidrogênio

Dentre as tecnologias de armazenamento de energia elétrica, para a aplicação aqui analisada, necessita-se daquelas que permitem a estocagem de grandes quantidades por elevados períodos de tempo, sem que haja perdas relevantes. Essa característica qualifica o uso da tecnologia do hidrogênio para essa aplicação, que demanda uma capacidade de armazenamento em larga escala por períodos que podem chegar a meses, devido à sazonalidade anual das hidroelétricas.

Um SAAE2 é composto essencialmente por um eletrolisador, um tanque de estocagem de hidrogênio e uma célula a combustível (CaC). Nesses sistemas, os excedentes das fontes renováveis são utilizados para a produção de hidrogênio através do processo de eletrólise da água, realizado através do eletrolisador, que produz hidrogênio gasoso através da decomposição da água em seus constituintes (H_2 e O_2), por meio do fornecimento de energia elétrica em corrente contínua. O gás produzido fica armazenado nos tanques de estocagem até o momento oportuno para a sua utilização. Por fim, a CaC converte o hidrogênio gasoso em eletricidade, por um processo reverso ao da eletrólise, a qual pode ser despachada para a rede [5, 8]. A Figura 4 apresenta esquematicamente um sistema de armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio.

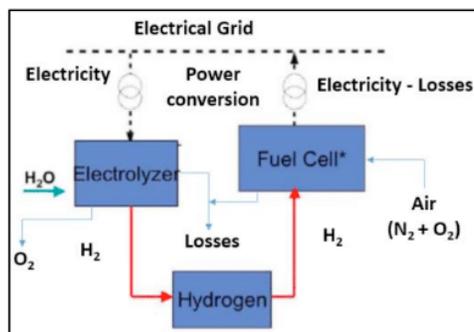


Figura 4 – Esquema de um sistema de armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio.

Geralmente, a eficiência do eletrolisador varia de 50 a 70%, e a da CaC é próxima a 50%. As perdas no tanque de estocagem de hidrogênio podem ser desprezadas. Assim, a eficiência de um SAEEH2 é da ordem de 30 % [8].

Admite-se que o sistema a ser construído assemelha-se aos SAEEH2 contemplados nos projetos de pesquisa e desenvolvimento PD-00061-0054/2016 e PD 00394-1606/2016, aprovados na Chamada nº21 da ANEEL, proposta em 2016 [14, 15]. Assim, considera-se que o eletrolisador tem um consumo de 5,72 kWh/Nm³ de H₂, e a CaC uma produção de 1,42 kWh por Nm³ de H₂ consumido. A eficiência teórica desse sistema corresponde 24,8%. Para o estudo de caso da associação hidro-solar na usina de Manso, o SAEEH2 requerido é similar ao do projeto da UHE Itumbiara, ou seja, possui os mesmos parâmetros de eficiência estimados naquele caso.

4 I INTEGRAÇÃO HIDRO/SOLAR NA UHE DE MANSO

Como mencionado, a subestação da UHE de Manso possui capacidade de 210 MW, com capacidade máxima de injeção 5.040 MWh/dia no SIN. Por outro lado, a média de geração nos últimos 10 anos correspondeu a 37,6 % desse valor, evidenciando que a infraestrutura está sendo subproveitada. Tanto a planta FV como o SAEEH2 foram dimensionados de modo que, combinados à operação da hidrelétrica, produzam energia suficiente para utilizar a capacidade máxima da subestação ao longo do dia. O dimensionamento da planta solar considera a irradiação de um dia de céu claro.

Admitiu-se que, durante toda a operação, pelo menos uma turbina hidráulica seja mantida em funcionamento, uma vez que é necessário manter a vazão mínima da UHE, com as demais máquinas sendo desligadas nos horários de elevada geração fotovoltaica. Além disso, a máquina que é mantida em funcionamento pode operar dentro da faixa de maior eficiência, de modo a produzir 52,5 MW.

O uso de um sistema de armazenamento de energia a hidrogênio se adequa a essa situação, em virtude das grandes quantidades de energia que devem ser armazenadas. O excesso de energia solar fotovoltaica produzido é enviado para o eletrolisador e a reconversão do hidrogênio produzido é realizada quando não há excesso na geração solar fotovoltaica. A Tabela 2 apresenta os valores da geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica, junto com o excesso de energia, e a produção de eletricidade através da célula a combustível, considerando a planta solar dimensionada.

Hora	Fração (%)	Prod. FV (MWh)	FV Rede (MWh)	Energia Hidráulica (MWh)	Excesso (MWh)	Consumo Eletrolise (MWh)	Prod. H ₂ (10 ³ Nm ³)	Prod. CaC (MWh)	Total Energia injetada na rede (MWh)
0	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
1	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
2	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
3	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
4	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
5	1	31,4	31,4	91,6	0,0	0,0	0,0	21,6	144,7
6	4	125,8	73,3	62,4	0,0	0,0	0,0	5,4	193,5
7	6,7	210,6	158,1	52,5	53,1	-53,1	9,3	0,0	210,0
8	9,1	286,1	157,5	52,5	128,6	-128,6	22,5	0,0	210,0
9	10,9	342,7	157,5	52,5	185,2	-185,2	32,4	0,0	210,0
10	12,1	380,4	157,5	52,5	222,9	-222,9	39,0	0,0	210,0
11	12,4	389,9	157,5	52,5	232,4	-232,4	40,6	0,0	210,0
12	12,1	380,4	157,5	52,5	222,9	-222,9	39,0	0,0	210,0
13	10,9	342,7	157,5	52,5	185,2	-185,2	32,4	0,0	210,0
14	9,1	286,1	157,5	52,5	128,6	-128,6	22,5	0,0	210,0
15	6,7	210,6	158,1	52,5	53,1	-53,1	9,3	0,0	210,0
16	4	125,8	73,3	62,4	0,0	0,0	0,0	5,4	193,5
17	1	31,4	31,4	91,6	0,0	0,0	0,0	21,6	144,7
18	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
19	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
20	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
21	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
22	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
23	0	0,0	0,0	101,4	0,0	0,0	0,0	27,0	128,4
Total	100	3144,0	1628,2	1896,0	1412,1	-1412,1	246,9	350,6	3978,5

Tabela 2 – Geração de energia ao longo do dia para a fontes solar e hidráulica e SAEEH2

A introdução da planta FV permite a geração de 165 MW_{med}, equivalente a cerca de 2,1 vezes a média de produção hidráulica dos últimos 10 anos. Deve-se observar que a produção total do sistema hidro-solar é de 3.978 MWh/dia, ao passo que a capacidade da subestação corresponde a 5.040 MWh/dia, ou seja, que a produção do sistema representa 78,9% da utilização dessa subestação. Antes da introdução da planta FV, esse valor correspondia a 37,6%. A produção diária da planta FV corresponde a 3.144 MWh, valor 1,65 vezes superior ao da geração hidráulica. É importante mencionar que o porte dessa planta estaria entre

as maiores plantas FV presentes no Brasil. Além disso, a CaC é responsável por 8,8% da energia injetada na rede, com o processo de produção de H₂, por eletrólise, consumindo 45,2 % da produção solar FV.

O excesso de energia solar fotovoltaica é superior à capacidade máxima de escoamento de energia através da subestação, o que pode ser melhor observado na Figura 5, que apresenta a geração de energia através das diferentes fontes ao longo do dia.

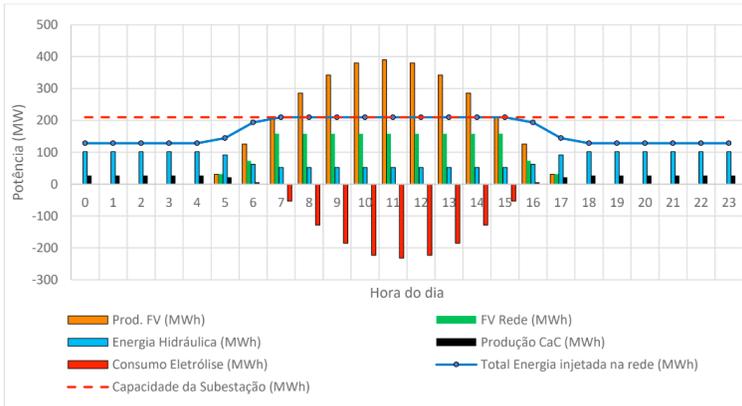


Figura 5 – Geração hidráulica e solar, produção de eletricidade via CaC e energia injetada na rede ao longo do dia.

A Figura 5 mostra a envergadura da geração solar em relação à geração hidráulica e a energia máxima que pode ser injetada na rede. Nesse caso, 44,9 % da energia solar fotovoltaica é destinada para a produção de hidrogênio, ao passo que apenas 11,1 % dessa energia é reinjetada na rede. A Figura 6 apresenta o balanço de energia, considerando um dia de geração com sol claro. Para atender a esse sistema é necessária uma planta FV de grande porte.

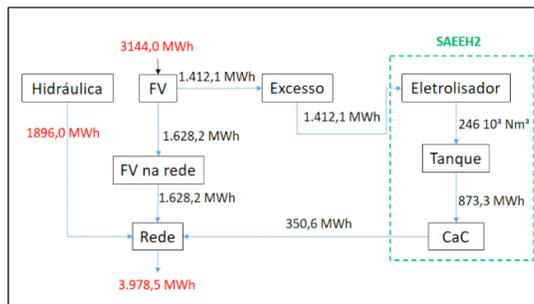


Figura 6: Balanço de energia, considerando um dia de geração com sol claro

No caso do SAEH2, considerando os valores máximos demandados na produção de H₂ no eletrolisador, seu armazenamento no tanque, e a sua posterior reconversão em eletricidade, são necessários aproximadamente 12 eletrolisadores de 20 MW cada um, similares aos da Thyssenkrupp [22], e cerca de 10 células a combustível de 2,8 MW cada, como as SureSource 3000 da FuelCell Energy [23]. A Figura 7 apresenta o sistema de armazenamento a hidrogênio, com as suas respectivas capacidades máximas de operação.

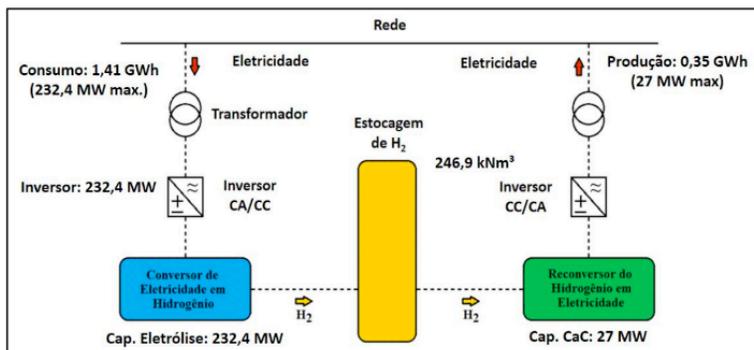


Figura 7: Capacidades máximas de operação do SAE a H₂.

Nessa configuração, a potência média injetada na rede pelo sistema híbrido é de $2.968 / 24 = 124 \text{ MW}_{\text{med}}$, um aumento de 55 % em relação à média histórica ($80 \text{ MW}_{\text{med}}$). Entretanto, como se pode verificar, há margem para aumentar a quantidade de painéis fotovoltaicos, desde que haja um manejo do reservatório, de forma a se reduzir a geração hidráulica nos momentos de maior produção fotovoltaica. Entretanto, essa alternativa depende das condicionantes operacionais da usina, havendo necessidade de se conhecer qual a potência mínima possível, o que implica em mínimo turbinamento e outros fatores.

Pode-se verificar também que ainda há a possibilidade de se aumentar a planta fotovoltaica sem alterar a vazão hidráulica mínima, pois ocorrem horários em que a injeção na rede é inferior à máxima capacidade de 210 MW. Nesse caso, um maior excedente de eletricidade fotovoltaica seria destinado à produção de hidrogênio, aumentando-se a geração pelas CaC nos horários de 16h até 6h do dia seguinte, de forma a se complementar 210 MW durante as 24 horas do dia.

5 I CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho é apresentar os aspectos energéticos e de operação da associação de uma planta solar FV junto à UHE de Manso. A maximização da

planta fotovoltaica exige a introdução de um sistema de armazenamento de energia elétrica para os momentos de elevada geração fotovoltaica, sendo aqui considerada a tecnologia de armazenamento da eletricidade na forma de hidrogênio (SAEEH2). Como foi mostrado, a subestação dessa UHE, que inicialmente tinha em média 37,6 % da sua capacidade sendo utilizada, após a instalação da planta FV e do SAEEH2 aumentou a sua utilização em 2,1 vezes, diminuindo consideravelmente o seu grau de ociosidade.

Esse aumento da geração foi possível devido à utilização de um SAEEH2, uma vez que, nos horários de maior insolação, a produção total do sistema híbrido hidro-solar supera a capacidade de despacho de energia da subestação (210 MW). Por outro lado, o sistema utilizado nesse trabalho possui eficiência da ordem de 25 % e, dessa forma, quando possível, é desejável que o armazenamento no próprio reservatório da hidrelétrica seja priorizado.

REFERÊNCIAS

- [1] - ANEEL (2016). Chamada nº 021/2016. Projeto Estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais Para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2016.
- [2] - ONS (2020). Resultado Histórico da operação. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Brasília DF, 2020. Disponível em http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx
- [3] – EPE (2019). Balanço Energético Nacional 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia, Brasília –DF. 2020.
- [4] – EPE (2016) O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Empresa de pesquisa energética. Ministério de Minas e Energia, 2016.
- [5] - Silva, E.P. Fontes Renováveis de Energia, 1ª Edição. Livraria da Física, São Paulo, 2014
- [6] –EPE (2020). Expansão da Geração. Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao Planejamento. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-466/NT%20Solar%20Fotovoltaica%20Flutuante.pdf>
- [7] – Strangueto, K. M. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidroelétricas. Universidade Estadual de Campinas. [S.I.]. 2016.
- [8] – IEA 2014. Technology Roadmap: Energy Storage. International Energy Agency, 19 March 2014.

- [9] - McPherson, M., Johnson, N., & Strubegger, M. (2018). The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions. *Applied Energy*, 216, 649–661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.110>
- [10] - Blanco, H., & Faaij, A. (2018). A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1049–1086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.062>
- [11] - IEA (2017) *Tracking Clean Energy Progress*. International Energy Agency, 2017, June, 2017.
- [12] - UK GOV (2018). *Eight great Technologies*. Department for Business, Innovation & Skills e The Rt Hon David Willetts. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/speeches/eight-great-technologies>
- [13] – ANEEL (2017). *Seminário Revolução Tecnológica no Sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil. Recursos de P&D para projetos de energia por fontes renováveis*. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2017. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/seminarios/2017-1/apresentacoes/Painel%20%20-2-%20ANEEL_%20Ailson.pdf
- [14] - Furtado Jr, J., C., Riedel, V., F., Silva, E. P.; Silva, D. B.; Silva, D. O., B., Medice, J. A.. (2018). Analysis and definition of software for modeling and simulation of a complete electrical energy storage system composed by electrolyzer, pressurized tanks and fuel cells. 22nd World Hydrogen Energy Conference – WHEC 2018. 18 June 2018, Rio de Janeiro – Brazil.
- [15] - Furtado Jr J. C.; Silva E. P.; Riedel V. F.; Silva D. O. B.; Silva D. B. Pimentel J. M.; Souza A. B. B. Análise e simulação do sistema de armazenamento de energia elétrica do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D 00394-1606/2016. 1º Congresso da Associação Brasileira do Hidrogênio. 8 de Novembro de 2019 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.
- [16] - FURNAS, 2019, <https://www.furnas.com.br/subsecao/124/usina-de-manso---212-mw> , consultado em 08/02/2020.
- [17] - ANA(2019). *Dados de operação dos reservatórios SIN*. Agência Nacional de Águas. Brasília DF, 2019. Disponível em <http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin?dropDownListEstados=14&dropDownListReservatorios=19025&dataInicial=01%2F01%2F2008&dataFinal=28%2F05%2F2008&button=Buscar>
- [18] – CRESSES (2020) *Potencial Solar – Sun Data v 3.0*. Centro de referência para as energias Solar e Eólica Sergio Brito. CEPEL. Rio de Janeiro –RJ. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>.
- [19] - INMETRO (2019) – *Tabela de Eficiência Energética – Sistema de Energia Fotovoltaica - Módulos - Edição 01/2018*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf
- [20] – ANEEL (2018). ANEEL homologa parcialmente resultado do Leilão de Geração “A-4”. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-homologa-parcialmente-resultado-do-leilao-de-geracao-a-4-656877?inheritRedirect=false

[21] – OMEGA ENERGIA (2020) Maior usina de energia solar em operação no Brasil, o Complexo Pirapora está localizado em Minas Gerais e é composto por 11 usinas em operação. A Omega Geração é detentora de 50% do Complexo, atuando em sociedade com a EDF Renewables. Disponível em: <http://www.omegaenergia.com.br/projetos/pirapora/>

[22] – GreenCarCongress (2018). Thyssenkrupp offering large-scale water electrolysis. Disponível em <https://www.greencarcongress.com/2018/07/20180728-tk.html>. Acessado em 17/03/2020.

[23] – Fuelcellenergy (2020). SureSource 3000. Disponível em <https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/Product-Spec-SureSource-3000.pdf>.

ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 07/07/2020

Mateus Camargo Franco

Universidade Federal do Pampa - Unipampa
Alegrete- RS
<http://lattes.cnpq.br/6959728384001220>

Eduardo Machado dos Santos

Universidade Federal do Pampa - Unipampa
Alegrete- RS
<http://lattes.cnpq.br/2387118009577291>

Alex Itczak

Universidade Federal do Pampa - Unipampa
Alegrete- RS
<http://lattes.cnpq.br/3230243109713390>

Arian Rodrigues Fagundes

Universidade Federal do Pampa - Unipampa
Alegrete- RS
<http://lattes.cnpq.br/5204442190325133>

Artur Henrique Rodrigues

Universidade Federal do Pampa - Unipampa
Alegrete- RS
<http://lattes.cnpq.br/4956455158563958>

RESUMO: O gerador síncrono é uma fonte de tensão com frequência constante que fornece energia para uma carga. Os níveis de tensão e corrente nos terminais do gerador estão relacionados ao sistema de excitação que fornece corrente contínua, induzindo um campo magnético nos enrolamentos do gerador. A subexcitação desta máquina pode conduzir

a sérios problemas, como afundamento de tensão nos terminais, perda de capacidade de gerar energia ativa, aquecimento da máquina e consumo de energia reativa. Dessa forma, é necessário estudar e desenvolver metodologias que protejam a máquina contra esses problemas indesejáveis. Assim, o presente estudo demonstra uma técnica de detecção da perda total e parcial de excitação em geradores síncronos. A técnica é baseada na extração de envoltórias dos sinais de corrente e tensão nos terminais do gerador através de um filtro morfológico.

PALAVRAS-CHAVE: Potência ativa, perda de excitação, filtro morfológico, gerador síncrono e envoltórias.

ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR DETECTION OF EXCITATION LOSS IN SYNCHRONOUS GENERATORS

ABSTRACT: The synchronous generator is a voltage source with constant frequency that provide power for a load. The voltage and current levels at the generator terminals are related to the excitation system that provides direct current, inducing a magnetic field, in the windings of the generator. Under-excitation of the generator can lead to serious problems, such as the voltage drop at terminals, loss of capacity to generate active power, heating of the machine and consumption of reactive power. In this way, it is necessary to study and develop methodologies that protect the machine against these undesirable problems. Thus, the present study intends to demonstrate a technique of detection of total and partial loss of excitation in synchronous generators. The

technique is based on the extraction of the current and voltage waveform envelope at the generator terminals through a morphological filter.

KEYWORDS: Active Power, Loss of Excitation, Morphological Filter, Synchronous Generator and Waveform Envelope.

1 | INTRODUÇÃO

Os geradores síncronos são caracterizados por serem máquinas capazes de fornecer potência elétrica em frequência constante. O termo síncrono faz referência ao sincronismo entre a velocidade mecânica de rotação do gerador e a frequência elétrica produzida. Devido a essa característica de sincronismo, os geradores síncronos são comumente empregados em centrais geradoras de eletricidade (CHAPMAN, 2013).

Nos geradores síncronos, o campo magnético é produzido no rotor. O rotor pode ser projetado com ímãs permanentes ou podem ser magnetizados por um circuito de corrente contínua, dito circuito de campo ou de magnetização. Quando o rotor é eletromagnetizado, ele se torna sujeito à problemas de perda de excitação (PE), devido, principalmente, à problemas no circuito de campo.

O circuito de campo do rotor dos geradores síncronos pode reportar problemas como curto-circuito, atuação indevida dos disjuntores de campo e falta de alimentação. As perdas parciais ou totais de excitação podem implicar em danos permanentes na máquina síncrona quando estes perduram por um longo período de tempo, devido ao sobreaquecimento dos enrolamentos e elevação de velocidade nominal da máquina.

Devido a sua importância para o sistema elétrico de potência (SEP), os geradores síncronos devem possuir uma proteção robusta e eficaz (FILHO e MAMEDE, 2011). Assim, eles não devem ser desconectados da rede por motivos indevidos, devendo possuir proteções que impeçam o seu funcionamento de maneira adequada, já que tal efeito pode resultar em problemas no sistema elétrico de potência. Quando os geradores encontram-se em paralelismo e uma ou mais das máquinas passam por condições de perda de excitação, as máquinas em plena operação devem suprir a demanda das que se encontram em falha, bem como injetar os reativos que estas ocasionalmente passam a demandar. Tal efeito implica em sérios problemas ao SEP, pois pode resultar em afundamentos de tensão e distorção do fluxo de potência.

Com base nos problemas causados pela perda de excitação, desenvolveu-se uma metodologia onde o estudo é direcionado para a proteção do gerador sob condições de falhas no seu sistema de magnetização, os quais resultam na perda parcial ou total de excitação. O estudo é baseado na análise morfológica de sinais de

corrente e tensão, com a utilização de filtros morfológicos de extração de envoltórias (FMEE) (GABE, 2014). Outra vertente de atuação da metodologia, é a percepção e diferenciação de quando há presença de perda parcial ou total de excitação, fazendo com que a proteção da máquina tenha um melhor diagnóstico para atuar.

A técnica desenvolvida para a detecção da perda de excitação também foi comparada com outra técnica recentemente proposta na literatura especializada, que tem como base a variação da potência reativa e tensão terminal da máquina síncrona quando esta se encontra sobre efeitos de perda de excitação. Os dados utilizados foram obtidos no software de simulação DigSilent® e foram processados no Matlab®.

2 | EFEITOS DA PERDA DE EXCITAÇÃO

O sistema de excitação das máquinas síncronas é o responsável por fornecer corrente contínua aos enrolamentos de campo. Através desse sistema, consegue-se regular a tensão terminal da máquina. De acordo com (KUNDUR, 1994), o sistema de excitação também assegura os limites da máquina síncrona e contribui para a estabilidade do sistema.

Falhas no sistema de excitação podem comprometer a integridade da máquina síncrona. Os efeitos da perda de excitação nos geradores síncronos são: consumo de potência reativa, aquecimento dos enrolamentos, afundamento de tensão, elevação das correntes e redução de potência ativa gerada. Estes efeitos são provenientes do enfraquecimento do acoplamento magnético entre rotor e estator, fato que influencia na elevação de velocidade da máquina.

O enfraquecimento do acoplamento magnético entre rotor e estator faz com que a máquina opere em velocidade diferente da nominal, devido a existência do ajuste de velocidade. O ajuste de velocidade representa um controle que é regulado de forma a garantir que uma mesma quantidade de potência mecânica seja entregue pela máquina.

Desta forma, o sistema de excitação é de extrema importância para o funcionamento das máquinas síncronas, fazendo-se necessário a presença de sistemas de proteção que permitam a sua integridade.

3 | PROTEÇÃO DOS GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos são de extrema importância para o sistema elétrico de potência em que estão inseridos. Desta maneira, necessitam de proteções que permitam o seu pleno funcionamento, conforme citado anteriormente. As proteções empregadas nos geradores síncronos devem garantir que a máquina esteja

operando de maneira adequada e que elas não sejam retiradas de operação de maneira indevida. Desta forma, o sistema de proteção dos geradores síncronos deve atender os seguintes requisitos e características (FILHO e MAMEDE, 2011):

- Evitar a ocorrência de defeitos;
- Na ocorrência de defeitos, minimizar os danos recorrentes;
- Não atuar para faltas além da zona de atuação;
- Limitar a corrente de defeito fase-terra para valores que os equipamentos suportem;
- Operar com extrema rapidez para defeitos internos ao gerador.

Portanto, o FMEE visa atender os requisitos citados e aplicá-los na análise das perdas parciais ou totais de excitação de geradores síncronos, permitindo uma proteção robusta e eficaz.

4 | METODOLOGIA

As metodologias aqui analisadas, foram testadas para o sistema teste da Figura 1, onde obtiveram-se os resultados para a realização das comparações. O sistema foi implementado no software DigSilent Power Factory[®], onde foram simuladas as perdas parcial e total de excitação de um gerador síncrono de 500 MVA. Os casos simulados para a perda parcial de excitação foram para 0%, 50% e 90% do valor nominal em p.u. da tensão do circuito de campo.

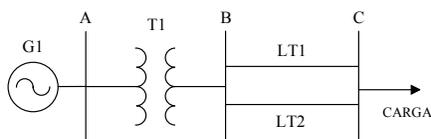


Figura 1. Sistema teste.

Nas simulações, foram observados o comportamento da Barra A da Figura 1, bem como, as potências ativas e reativas da máquina síncrona, devido ao fato que essas grandezas apresentam alterações, à medida que a máquina passa por eventos de subexcitação. Nas simulações os efeitos de perda parcial ou total de excitação iniciam a partir dos 0,2s.

Conforme a Figura 1, o sistema teste é composto pelo gerador síncrono, transformador e duas linhas de transmissão (LT1 e LT2). Os parâmetros e especificações que configuram estes equipamentos podem ser encontrados nas Tabelas 1 a 5. Nas Tabelas 1, 2 e 3, estão representadas as especificações,

parâmetros e carregamentos do Gerador Síncrono. Já a Tabela 4 demonstra as características do Transformador e a Tabela 5 os parâmetros das linhas de transmissão.

Especificações do Gerador Síncrono	
Tipo do Rotor	Polo Liso
Potência Nominal (MVA)	500
Fator de Potência	0.96
Frequência de Operação (Hz)	60
Tensão Nominal (kV)	13.8
Ligação	YN

Tabela 1. Especificações do Gerador Síncrono

Parâmetros	Gerador Síncrono 500 MVA	Parâmetros	Gerador Síncrono 500 MVA
X_d (p.u.)	1.60	$T'd_0$ (s)	6.10
X'_d (p.u.)	0.48	$T''d_0$ (s)	0.1050
X''_d (p.u.)	0.30	$T'q_0$ (s)	0.1800
X_d (p.u.)	0.95	H (s)	4.00
X_2 (p.u.)	0.2860	PS-1,0 (p.u.)	0.1833
X_0 (p.u.)	0.11	OS-1,2 (p.u.)	0.3333

Tabela 2. Parâmetros do Gerador Síncrono (GAZEN, MORAIS, et al., 2010).

Carregamento	Gerador 500 MVA
25%	120 + j35 MVA
50%	240 + j70 MVA
75%	360 + j105 MVA
100%	480 + j140 MVA

Tabela 3. Carregamento do Gerador Síncrono (GABE, 2014).

Parâmetros	Linha de Transmissão
V(kV)	500
Z_1, Z_2 (Ω)	0.0212 + j0.01162
Z_0 (Ω)	0.0848 + j0.4650
B_1, B_2 (μS)	72.2566
B_0 (μS)	72.4451

Tabela 4. Parâmetros das Linhas de Transmissão (GAZEN, MORAIS, et al., 2010).

Parâmetro	Transformador
S (MVA)	550
V (kV)	13.8/500
X (p.u.)	0.19

Tabela 5. Parâmetros do Transformador (GAZEN, MORAIS, *et al.*, 2010).

Com as simulações, conseguiu-se um banco de dados, cujos sinais foram processados através do FMEE, para os respectivos sinais de tensão e corrente do terminal da máquina, com os quais a metodologia proposta pôde classificar os casos de perdas de excitação como parcial ou total.

4.1 Utilizando o filtro morfológico de extração de envoltórias (fmee) para a detecção de perdas parcial e total de excitação.

A metodologia proposta utiliza operadores morfológicos de dilatação e erosão para a detecção de perdas parcial e total de excitação. A detecção é baseada na diferenciação das envoltórias superiores e inferiores dos sinais de corrente e tensão processados, as quais foram extraídas pelo filtro morfológico (WU, LU e JI, 2009) e (ITCZAK, 2016).

Os valores de corrente e tensão são processados pelo filtro em uma janela móvel que contém $N/6$ amostras, sendo N o número de amostras por ciclo, conforme equação (1). A variável ' n ' representa a amostra atual, enquanto ' x_0 ' representa o primeiro termo da janela, o qual é descartado à medida que novas amostras são inseridas. Quando uma nova amostra é inserida, os termos são deslocados para a esquerda do vetor referente a janela móvel, onde o termo ' x_n ' representará a amostra atual.

$$W_1(n) = [x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (1)$$

Em cada janela obtida são aplicados os operadores de dilatação e erosão, que foram modificados para a extração de envoltórias dos sinais de corrente e tensão. Como forma de não se alterar os valores de máximo e mínimo dos sinais processados, adotou-se que o elemento estruturante (SE) é nulo. Assim, determinam-se as equações (2) e (3), onde (2) foi obtida através do operador de dilatação, enquanto (3) através do operador de erosão:

$$W_1 \oplus (n)SE = \max W_1(n) \quad (2)$$

$$W_1 \ominus (n)SE = \min W_1(n) \quad (3)$$

Nas equações acima, a janela móvel (W) pode ser referente tanto ao sinal de corrente quanto ao de tensão, dependendo apenas do direcionamento da análise. Através de (2) e (3), consegue-se determinar um sinal $Y(n)$, que é extraído através

da média aritmética entre a soma dos valores de erosão e dilatação, conforme a equação (4).

$$Y(n) = \frac{1}{2} [W_1 \oplus (n)SE - W_1 \ominus (n)SE] \quad (4)$$

Os valores de $Y(n)$ são divididos em valores maiores que zero e menores que zero, onde os valores maiores que zero representam a pré-envoltória superior do sinal analisado, enquanto que os valores menores que zero representam a pré-envoltória inferior. Como maneira de se evitar oscilações numéricas decorrentes da amostragem, os valores numéricos são realocados em uma nova janela móvel $W_2(n)$, que possui comprimento de 5 ciclos ($5 \cdot N$) e é atualizada da mesma maneira que $W_1(n)$ (ITCZAK, 2016). Desta forma, as equações (5) e (6) definem as envoltórias superior e inferior, respectivamente. Sendo válido ressaltar que os sinais podem ser referentes a tensão ou corrente.

$$EnvSuperior(n) = \max W_2 superior(n) \quad (5)$$

$$EnvInferior(n) = \max W_2 inferior(n) \quad (6)$$

A partir das envoltórias extraídas pelo filtro morfológico, a metodologia é capaz de classificar o evento no qual o gerador se encontra. Desta maneira, através das envoltórias obtidas pelo filtro consegue-se determinar as perdas parciais ou totais de excitação. Para tal classificação, faz-se necessário a utilização das equações (7) e (8).

$$DifEnv(n) = EnvSuperior(n) - EnvInferior(n) \quad (7)$$

$$\Delta DifEnv(n) = \Delta DifEnv(n) - \Delta DifEnv(n - 1) \quad (8)$$

As classificações são padronizadas através de constantes diferentes. Quando à ocorrência de eventos de PE parcial ou total, tem-se que, se o sinal analisado for a corrente, quando $\Delta DifEnv(n) > 1 \times 10^{-7}$, haverá a classificação de perda de excitação da máquina. Entretanto, quando se analisa o sinal de tensão, a classificação de perda de excitação será realizada quando $\Delta DifEnv(n) < -1 \times 10^{-7}$. Ambos os casos devem ser confirmados por pelo menos 10 ciclos (ITCZAK, 2016).

A metodologia foi implementada no software Matlab®, onde foi considerado uma taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo. Foram testados casos de perda parcial e total de excitação para um carregamento de 100% para máquina síncrona.

4.2 Características da Metodologia comparada

A metodologia comparada utiliza as variações de potência reativa e tensão terminal para a detecção de perda de excitação (AMINI, 2015). Trata-se de um estudo recente que demonstrou êxito na identificação de eventos de perda de excitação nos geradores síncronos. A metodologia é baseada na influência do

sistema de excitação de um gerador síncrono em sua tensão terminal e potência reativa, onde, nos casos de perda de excitação, esses parâmetros demonstraram um comportamento específico.

O processo para a detecção de perda de excitação ocorre basicamente sobre a análise da equação (9). Nessa equação calcula-se a LOEI (Loss of excitation index) onde são determinadas amostras de perda de excitação com base na variação da potência reativa Q e tensão terminal V_t , a constante 10^5 é utilizada para tornar a amostra mais visível. O termo ' k ' representa a k -ésima amostra (AMINI, 2015).

$$LOEI = 10^5 x [Q^{(k)} - Q^{(k-1)}] x [V_t^{(k)} - V_t^{(k-1)}] \quad (9)$$

A perda de excitação é detectada quando a LOEI é repetida por 8 vezes e é maior que o valor limite de ajuste, denominado Th . Esse ajuste é um parâmetro mínimo para que a LOEI seja caracterizada como crítica e possa ser contabilizada como uma amostra. É válido ressaltar que em sua tese original, tal proposta era analisada em um sistema que operava em 50 Hz, onde considerava-se então que a LOEI fosse repetida por 10 amostras, entretanto, neste trabalho a análise é feita sobre um sistema em 60 Hz. Desta forma, foi considerado um número mínimo de amostras igual a 8. Outro critério para a detecção da perda de excitação é a tensão terminal V_t . Os autores afirmam em seu trabalho que, para a existência da LOEI, a tensão terminal deve ser inferior a 0.95 p.u. (AMINI, 2015).

5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são analisados os resultados obtidos com a metodologia baseada no FMEE. Depois os resultados são comparados com aqueles obtidos pela metodologia abordada em (AMINI, 2015).

5.1 Perda total de excitação em um gerador síncrono de 500 MVA operando com 100% de carregamento.

Na Figura 2, observa-se o sinal de corrente nos terminais do gerador. Esse sinal é analisado sob influência de uma perda total de excitação da máquina. Verifica-se um crescimento da envoltória até o regime permanente. No sinal de tensão, exposto na Figura 3, pode-se observar um decremento nas envoltórias até o seu regime permanente.

Então, os sinais apresentados nas Figuras 2 e 3 são processados pelo FMEE. A partir do processamento, conseguem-se os sinais apresentados nas Figuras 4 e 5. Nessas Figuras, observa-se as envoltórias superior e inferior dos sinais de corrente e tensão, respectivamente.

Quando se realiza a diferença entre as envoltórias superior e inferior dos sinais de corrente e tensão, obtêm-se os gráficos apresentados nas Figuras 6 e 7,

respectivamente. Esses sinais são obtidos pela subtração algébrica da envoltória superior pela inferior do sinal, que são calculadas de acordo com a metodologia proposta.

As Figuras 8 e 9 apresentam as diferenças entre as amostras para os primeiros 10 ciclos dos sinais de tensão e corrente. Nas referidas Figuras, pode-se observar que ambas as envoltórias satisfazem as condições de classificação do evento como perda de excitação, assim, confirmando que o filtro morfológico classifica o transitório corretamente.

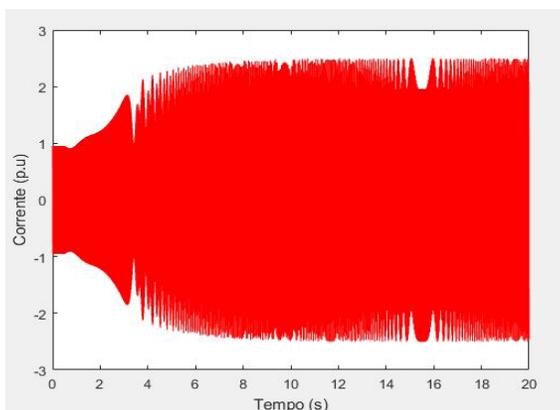


Figura 2. Sinal de corrente senoidal para uma perda total de excitação em um gerador de 500 MVA.

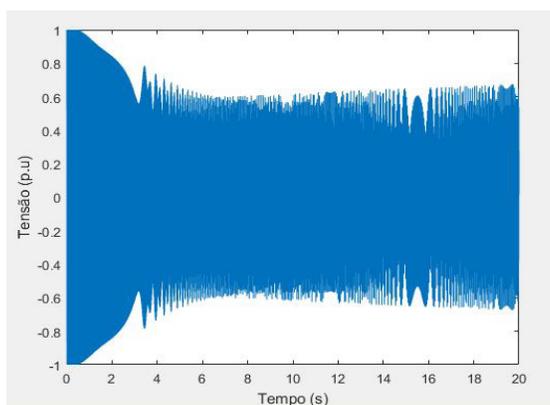


Figura 3. Sinal de tensão senoidal para perda total de excitação em um gerador de 500MVA

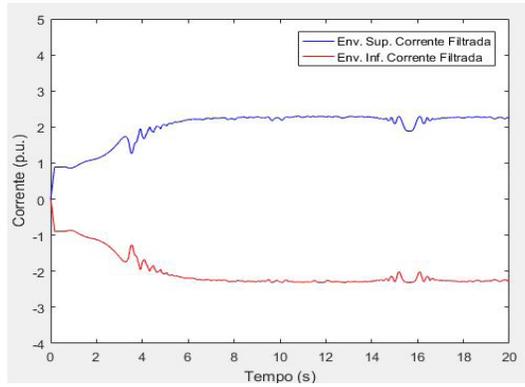


Figura 4. Envoltórias Superior e Inferior do sinal de corrente.

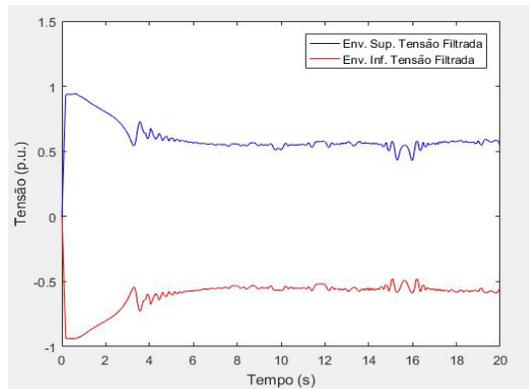


Figura 5. Envoltórias Superior e Inferior do sinal de tensão.

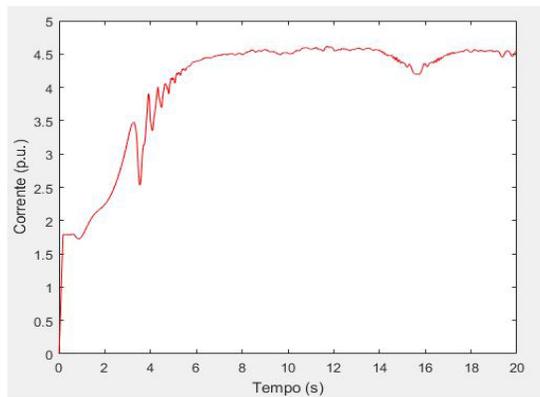


Figura 6. Diferença das envoltórias da corrente para perda total de excitação.

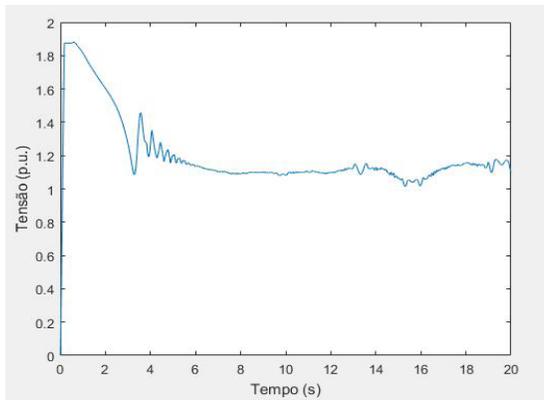


Figura 7. Diferença das envoltórias da tensão para perda total de excitação.

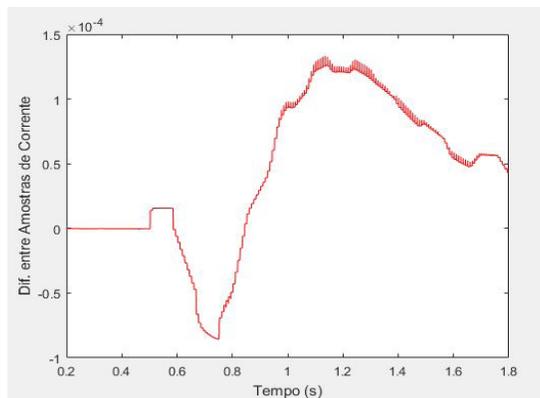


Figura 8. Diferenças entre amostras de Corrente.

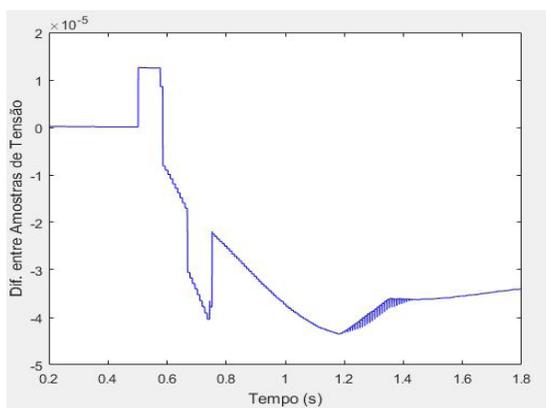


Figura 9. Diferenças entre as amostras de Tensão

Na Tabela 6, tem-se o tempo de detecção e atuação da metodologia do Filtro Morfológico de Extração de Envoltórias para um gerador de 500 MVA, operando sob condições de perda total de excitação e 100% de carregamento.

Carga	Excitação (p.u.)	Deteção de Possível PE (s)	Confirmação após Possível Deteção (s)	Tempo Acumulado (s)
100%	0	0.5858	0.3415	0.9273

Tabela 6. Tempo de atuação para perda total de excitação.

Nas Figuras 10 e 11, pode-se observar o comportamento da técnica baseada na variação da potência reativa, bem como os momentos de detecção da LOEI. Pode ser observado, na Figura 10, a variação abrupta da potência reativa que representa uma das consequências da perda de excitação nos geradores síncronos. Na Figura 11, são demonstradas as amostras dos eventos de perda de excitação. Foi utilizado um ajuste de Th igual a 35 para os dados obtidos.

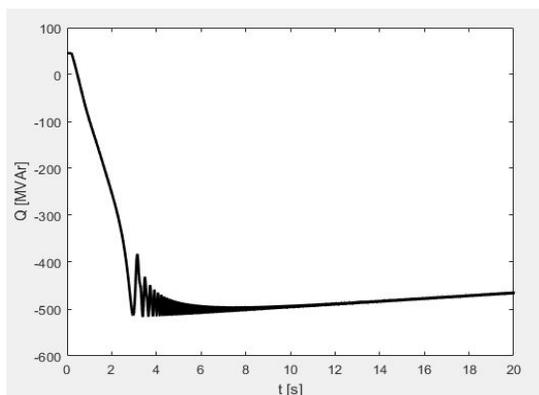


Figura 10. Comportamento da potência reativa na máquina.

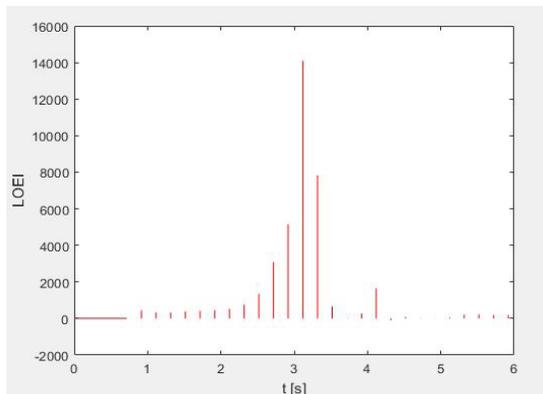


Figura 11. Detecção de LOEI.

5.2 Análise das metodologias para perdas parcial e total de excitação em um gerador de 500MVA com 100% de carregamento

Sabe-se que além da perda total de excitação outro problema indesejável para os geradores síncronos é a perda parcial de excitação, este problema ocorre quando a tensão de excitação da máquina é menor que 1 p.u. e maior que 0 p.u. Desta maneira, as proteções também devem atuar para esses casos, pois a perda parcial de excitação também é um evento que pode causar danos à máquina. Sendo assim, na Tabela 7, tem-se os tempos de classificação e atuação das metodologias analisadas para casos de 0, 0,5 e 0,9 p.u. da tensão de excitação.

De acordo com a Tabela 7, pode-se observar que o tempo de atuação para a proteção baseada no FMEE é menor que o apresentado pela metodologia comparada. Desta forma, o FMEE demonstra-se ser uma técnica eficaz para a detecção de perdas parciais e totais de excitação da máquina, o que poderia evitar sobreaquecimento e demais problemas relacionados a sua subexcitação, permitindo uma vida útil maior para a máquina. O maior tempo de atuação da técnica baseada na variação da potência reativa pode estar relacionado com o tempo de espera para a detecção do evento da perda de excitação, o qual está relacionado a taxa de amostragem dos valores de tensão terminal e potência reativa.

Atuação	FMEE		Metodologia Comparada
	Classificação	$t_{\text{classificação}}$ (s)	$t_{\text{atuação}}$ (s)
PE 0 p.u.	PE	0.9273	2.3172
PE 0.5 p.u.	PE	9.9271	2.4796
PE 0.9 p.u.	PE	0.9271	2.7729

Tabela 7. Comparação entre os tempos de atuação das metodologias

6 | CONCLUSÃO

Tendo-se em vista os resultados alcançados, conclui-se que o FMEE demonstrou ser uma metodologia eficaz já que detecta as perdas parciais e totais de excitação de maneira eficiente, atuando de forma mais rápida do que a técnica proposta em (AMINI, 2015). A metodologia baseada no FMEE permite que a máquina seja desconectada de forma rápida quando ocorre a detecção de perda de excitação. Com isso, eleva-se a vida útil do gerador síncrono e a confiança do sistema elétrico de potência. Desta maneira, trata-se de uma técnica promissora, tendo em vista que, em outras oportunidades, como nos trabalhos de (GABE, 2014) e (ITCZAK, 2016), ela também foi capaz de distinguir oscilações estáveis de potência das perdas parcial e total de excitação, o que evitaria uma atuação indevida do sistema de proteção.

REFERÊNCIAS

- AMINI, M. . D. M. . S.-P. M. **A novel approach to detect the synchronous generator loss of excitation.** [S.I.]: IEEE, 2015.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** New York: MC Graw Hill, 2013.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- GABE, J. **Filtro Morfológico de Extração de Envoltória para a Proteção Contra a Perda de Excitação do Gerador Síncrono.** Alegrete: Unipampa, 2014.
- GAZEN, Y. N. et al.. **Proteção Contra Perda de Excitação em Geradores Síncronos Através do Cálculo Contínuo da Impedância Aparente.** Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito MS, 2010.
- ITCZAK, A. **“Análise de metodologia para detecção de perda total de excitação em geradores síncronos sob condição de perda parcial de campo”.** Unipampa, 2016. Alegrete: Unipampa, 2016.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control.** New York: McGraw-Hill, 1994.
- WU, Q. H.; LU, Z.; JI, T. Y. **Protective relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology.** London, UK: Springer, 2009.

DESENVOLVIMENTO DE FUNCIONALIDADES COMPUTACIONAIS PARA ATENDIMENTO DOS NOVOS PROCEDIMENTOS DE REDE PARA ESTUDOS DE DESEMPENHO HARMÔNICO

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 08/07/2020

Cristiano de Oliveira Costa

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –
CEPEL
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/5094272372321272>

Sergio Luis Varricchio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –
CEPEL
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/5825024551486331>

Franklin Clement Véliz

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –
CEPEL
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/4574335818761705>

Fabiano Andrade Oliveira

Operador Nacional do Sistema – ONS
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/6090559738172527>

Trabalho originalmente publicado no XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, promovido pelo Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRE-Brasil).

RESUMO: Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento no programa HarmZs do CEPEL de uma interface gráfica extremamente

amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos de acesso de novas instalações à Rede Básica, considerando simultaneamente lugares geométricos (LGs) de admitâncias na forma de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos Procedimentos de Rede (PR). A flexibilidade da ferramenta, sua facilidade de utilização e velocidade de processamento tornam possíveis análises de sensibilidades mais rigorosas e detalhadas em relação a parâmetros como intervalo harmônico e passo de frequência, utilizados na construção dos LGs. Assim, os usuários e o próprio ONS podem utilizar o programa como ferramenta de aprimoramento dos PR atuais, uma vez que estes tendem a ser dinâmicos de acordo com a evolução do sistema. Além da interface gráfica desenvolvida, serão apresentadas também, de forma didática, suas facilidades através de exemplos de traçados de setores e polígonos utilizando um caso real.

PALAVRAS-CHAVE: Harmônicos, Procedimentos de Redes, HarmZs, Lugares Geométricos, Interface Gráfica.

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL FEATURES TO MEET THE NEW BRAZILIAN GRID CODE PROCEDURES FOR HARMONIC PERFORMANCE STUDIES

ABSTRACT: This work presents the development in the CEPEL's HarmZs program, a production grade software, of an extremely friendly and flexible graphical interface, where it is possible to carry out harmonic impact studies of new

customer connections to the Brazilian Transmission Grid (BTG), simultaneously considering geometric loci (GL) of admittances in the form of angular sectors and polygons of n sides, determined and plotted according to the peculiarities of each one described in the Brazilian Grid Code Procedures (BGCPs). The tool flexibility, its ease of use and computational speed make possible more rigorous and detailed sensitivity analyzes with respect to parameters such as harmonic interval and frequency step, used in the construction of GL. Thus, users and the Independent System Operator (ISO) itself can use the HarmZs program as a tool to improve the current BGCPs, since they need to be dynamic to follow the electrical system evolution. The graphical interface features will be presented in a didactic way through examples of sector and polygons plots using a real case study.

KEYWORDS: Harmonics, Brazilian Grid Code Procedures, HarmZs program, geometric loci, graphical interface.

1 | INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, com o intuito de atender às necessidades de melhoria do processo de gerenciamento da emissão de harmônicos, criou uma nota técnica [1] em complemento aos PR – submódulo 2.8 relativo à qualidade de energia elétrica. Esse novo documento procura flexibilizar os PR de forma a atender às constantes reivindicações dos agentes no sentido de tornar a forma de avaliação dos estudos de desempenho harmônico menos conservadora e mais alinhada às normas internacionais de grande relevância técnica.

Dentre as implementações inseridas no novo documento, destaca-se a possibilidade de se utilizar, além dos setores angulares, polígonos de n lados [2] para a representação dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Deve-se observar que os intervalos harmônicos e os passos de frequência sugeridos neste novo documento, que serão utilizados para a determinação e traçado de cada tipo de LG (setor angular ou polígono de n lados), necessários para o cálculo das máximas distorções harmônicas de tensão, são diferentes entre si.

Desta forma, para que o programa HarmZs do CEPEL [3], que é indicado pelo ONS como ferramenta de execução dos estudos de comportamento harmônico, pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos de acesso, a metodologia descrita em [2], para determinação e traçado destes polígonos, foi implementada na versão 3.0 do programa.

Além da implementação do método do polígono de n lados, foi desenvolvida uma interface gráfica extremamente amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um

descritas nos PR. Desta forma, o usuário poderá optar pelo LG que lhe for mais conveniente em relação à necessidade de se adotar medidas mitigadoras como a utilização de filtros passivos, sem praticamente nenhum esforço adicional. Por meio desta interface, é possível realizar traçados de LGs de todas as frequências desejadas de uma só vez e de forma bastante automatizada. As grandezas que definem os LGs (módulos e ângulos de admitâncias mínimos e máximos para os setores angulares, e vértices de admitâncias para os polígonos de n lados), bem como as contingências que as geraram, são também apresentadas na interface.

Outra facilidade importante desta interface é a apresentação de todos os resultados de forma tabular, destacando-se na cor vermelha todas as distorções harmônicas individuais (DHI) e totais (DHT) que ultrapassaram os limites adotados nos PR. É também possível exportar todos os resultados obtidos para o Excel para que os usuários possam fazer comparações mais detalhadas e preparar relatórios de forma fácil e rápida.

Neste trabalho, além da interface gráfica desenvolvida, serão apresentadas também, de forma didática, suas facilidades através de exemplos de traçados de setores e polígonos utilizando um caso real.

2 | CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE REDE

O método dos lugares geométricos de admitâncias (MLG), adotado nos PR, objetiva determinar majorantes para as distorções harmônicas individuais e total. Portanto, o MLG não pretende obter o valor de uma determinada distorção harmônica para uma determinada topologia de rede, que posteriormente poderia ser verificado por meio de medições, que são fotografias do comportamento harmônico do sistema válidas apenas para os períodos em que foram realizadas estas medições. Neste sentido, são consideradas, para cada harmônico de interesse (do 2° ao 50°), diversas contingências e diversos cenários de carga. Além disto, são consideradas as configurações do Sistema Interligado Nacional (SIN) para o ano de entrada em operação da nova instalação e mais 2 anos à frente. Além das admitâncias geradas por estas diversas topologias, são consideradas também aquelas provenientes de eventuais erros de dados ou de modelos de componentes de rede. Para exemplificar, considere a impedância Z (ou admitância Y) de um circuito RLC paralelo. Obviamente, Z é função de R , L , C e f_h , sendo f_h a frequência harmônica considerada. Note que, neste caso, a maior distorção harmônica de tensão se dá quando $f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (frequência de ressonância do circuito). Note, também, que considerar uma variação ΔL em L ou uma variação ΔC em C , é equivalente a considerar uma variação Δf_h em f_h . Portanto, para a obtenção destes majorantes, são consideradas diversas variações em f_h . Obviamente, quanto menor o passo Δf_h maiores as chances de

se encontrar a ressonância do circuito RLC em questão. Outro parâmetro que afeta as chances de se encontrar ressonâncias da rede são os valores mínimo e máximo considerados em torno de f_h . Veremos a seguir que para o polígono de n lados, é considerado $f_h - 0,5 f_0$ e $f_h + 0,5 f_0$ com passo $\Delta f_h = 6$ Hz, sendo f_0 a frequência fundamental (60 Hz). No caso do setor anular (ainda aceito nos procedimentos de rede) se considera $f_h - f_0$ e $f_h + f_0$ com passo $\Delta f_h = 60$ Hz (apenas 3 valores de admitância).

Um dos fatores que levam ao conservadorismo do MLG, alegado pelos empreendedores, é que os LGs devem retratar a variação das admitâncias harmônicas do parque (ou qualquer outro tipo de empreendimento) por toda a sua vida útil, estimada em 20 anos. No entanto, por falta de informações sobre as configurações futuras do SIN, apenas 2 anos à frente são considerados. Portanto, tenta-se compensar esta falta de informações utilizando critérios conservadores como, por exemplo, não levando em conta a probabilidade de falta de determinado equipamento e considerando um elevado número de elementos contingenciados. Outro fator é o aumento significativo de harmônicos circulando no SIN, comprovado recentemente pela saída de operação do elo de Ibiúna devido à sobrecarga dos filtros de 3° e 5° harmônicos, onde a corrente gerada pelo elo representava apenas 10% da corrente total dos filtros.

Devido aos fatos acima descritos e que, em menor ou maior grau, a segurança sistêmica do setor elétrico é responsabilidade de todos os agentes, as propostas de mudanças nos PR devem ser feitas baseadas em fortes indícios técnicos. Apesar desta responsabilidade, o aperfeiçoamento contínuo dos PR, tornando-os mais justos e realistas, deve ser objetivo de todos os agentes do setor.

Como explicado anteriormente, os resultados da aplicação dos PR fornecem apenas majorantes para as distorções harmônicas individuais e totais, cujos valores não podem ser verificados por medições. No entanto, a precisão do programa HarmZs pode ser verificada experimentalmente. Esta verificação é importante, pois mostra que os PR utilizam uma ferramenta computacional capaz de representar com aceitável precisão determinadas características das redes elétricas. Em [4] e [5] foram realizadas comparações entre medições e simulações utilizando o programa HarmZs onde pôde-se verificar boa consistência entre os valores comparados. Como exemplo destas comparações, a Figura 1, retirada de [4], cortesia da Eletrobras Eletrosul, apresenta a curva V_{x1} para o 5° harmônico obtido em campanhas de medição na subestação de Livramento 2 230kV, que é o PAC (Ponto de Acoplamento Comum) relativo ao Complexo Eólico de Cerro Chato (propriedade da Eletrobras Eletrosul). Distante aproximadamente 50 km do parque, há a conversora de frequência de Rivera que é despachada ocasionalmente e conseqüentemente é energizada junto com seus filtros, os quais reduzem as distorções no PAC do parque.

De acordo com a BT 468 [6], se os pontos medidos se situarem próximos da reta $|Z_i|$, que representa o módulo da impedância da rede interna do consumidor vista do PAC, então as fontes dominantes de harmônicos, de ordem h , são as existentes no resto do sistema que fluem pelas instalações do consumidor devido à presença de capacitores ou filtros. Por outro lado, se as medições se concentrarem predominantemente próximas da reta $|Z_e|$, que representa a impedância do sistema, então as fontes dominantes, de ordem h , são as fontes existentes no consumidor que fluem pela impedância da rede.

Nesta Figura 1 pode-se reparar a existência de 3 regiões bem distintas na nuvem de pontos V_{xI} . Os pontos da região 1, situados em torno da reta $|Z_i|$, apresentam a condição normal de operação do parque. A região 2 também considera a operação normal do parque eólico, mas com a conversora de Rivera em operação. Os pontos na região 3 ocorrem quando a rede de média tensão do parque e os aerogeradores estão desligados, ficando energizados apenas a LT 230 kV e os transformadores 230/34,5 kV de uso exclusivo dos parques. Note que para cada situação de operação, foi realizada a simulação rede apropriada e calculada a impedância vista da barra do PAC. Os valores simulados são as 3 retas traçadas no gráfico. É fácil observar que os valores de medição tem a tendência de seguir os valores simulados.

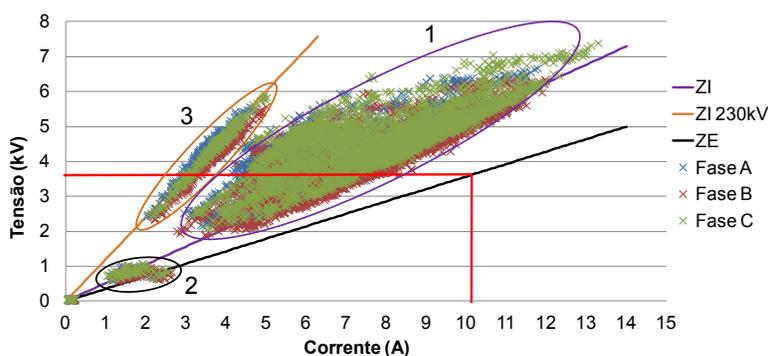


Figura 1 – Curva V_{xI} para o 5º harmônico obtidas para o PAC do Complexo Eólico de Cerro Chato

3 I PRINCIPAIS ALTERAÇÕES NOS PROCEDIMENTOS DE REDE QUE LEVARAM A MUDANÇAS NO PROGRAMA HarmZs

Uma das alterações mais significativas nos PR, descrita em [1] e com implicações no programa HarmZs, foi a possibilidade de representação da rede externa (Rede Básica) por polígonos de “ n ” lados. Esta representação, de acordo com

referências mais recentes [2], [7], se mostrou uma alternativa menos conservadora e aceitável para estudos envolvendo parques eólicos, solares e consumidores livres.

Devido a algumas particularidades do polígono de n lados como, por exemplo, menor conservadorismo na representação da rede externa em relação ao setor angular (circular), o intervalo harmônico e o passo de frequência para o seu traçado foram definidos nos PR de forma distinta aos adotados para o setor angular, objetivando aumentar a margem de segurança desta representação. Desta forma, os limites inferior e superior deste intervalo foram definidos como $(f_{\hat{h}}-0,5 f_0)$ e $(f_{\hat{h}}+0,5 f_0)$, respectivamente. O passo de frequência adotado para o cálculo das impedâncias harmônicas foi $\pm 0,1$ de (ou $\pm 6\text{Hz}$). Esta representação é apresentada na Figura 2.

Cabe lembrar que os limites inferior e superior do intervalo harmônico e o passo de frequência adotados para o traçado dos setores circulares não sofreram alteração nos novos PR, sendo iguais a $(f_{\hat{h}}-f_0)$, $(f_{\hat{h}}+f_0)$ e $\pm f_0$ (ou $\pm 60\text{Hz}$), respectivamente.

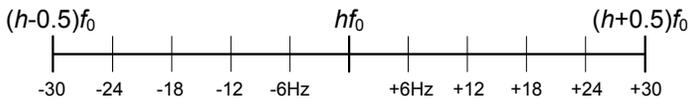


Figura 2 – Intervalo harmônico para traçados de polígonos de admitâncias de “ n ” lados

4 I TRAÇADOS DE LUGARES GEOMÉTRICOS NO PROGRAMA HarmZs

Para a representação dos LGs, sejam eles de impedâncias ou de admitâncias, várias formas geométricas podem ser utilizadas [7]. Tradicionalmente, são escolhidos setores angulares, diagramas de círculo, polígonos, áreas limitadas por retas e arcos de circunferência, etc.

No programa HarmZs, até a versão 2.0.2, era possível traçar diagramas circulares de impedâncias, setores angulares (circulares) de impedâncias e de admitâncias. Podia-se, também, visualizar a nuvem de pontos de impedâncias ou de admitâncias, sendo possível identificar os valores que definiam os limites dos diagramas.

No entanto, todas essas formas geométricas somente podiam ser traçadas utilizando uma interface gráfica onde os LGs eram criados de forma individual, um para cada frequência. Deste modo, o traçado dos LGs para todas as frequências era uma tarefa um tanto quanto trabalhosa considerando-se que, no geral, em estudos de comportamento harmônico, são traçados os LGs para 49 harmônicos (do 2° ao 50°). Essa interface gráfica desenvolvida na versão 2.0.2 do programa HarmZs,

onde ainda não existia a possibilidade de traçado de polígonos, está apresentada na Figura 3.

Cabe lembrar que, embora possa se fazer a representação dos LGs no programa HarmZs por impedâncias ou admitâncias, neste trabalho o foco são os LGs de admitâncias.

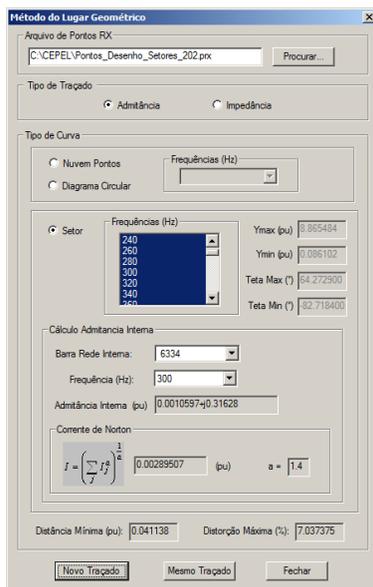


Figura 3 – Interface para traçados de LGs na versão 2.0.2 do programa HarmZs

5 | NOVAS IMPLEMENTAÇÕES NOS TRAÇADOS DE LUGARES GEOMÉTRICOS NO PROGRAMA HarmZs

Para que o programa HarmZs do CEPEL [3], que é indicado pelo ONS como ferramenta de execução dos estudos do comportamento harmônico de novas instalações conectadas à Rede Básica, pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos, a metodologia para determinação e traçado dos polígonos de n lados, adotada nos novos PR [1], foi implementada na versão 3.0 do programa.

A primeira etapa da implementação foi realizada atualizando o diálogo da Figura 3 existente na versão 2.0.2. Neste diálogo foi adicionada a opção de traçado de polígonos de admitâncias, dentre outras opções que serão descritas a seguir. Na Figura 4 é apresentada a interface gráfica atualizada para traçados de LGs. Note que neste diálogo os LGs ainda são traçados de forma individual.

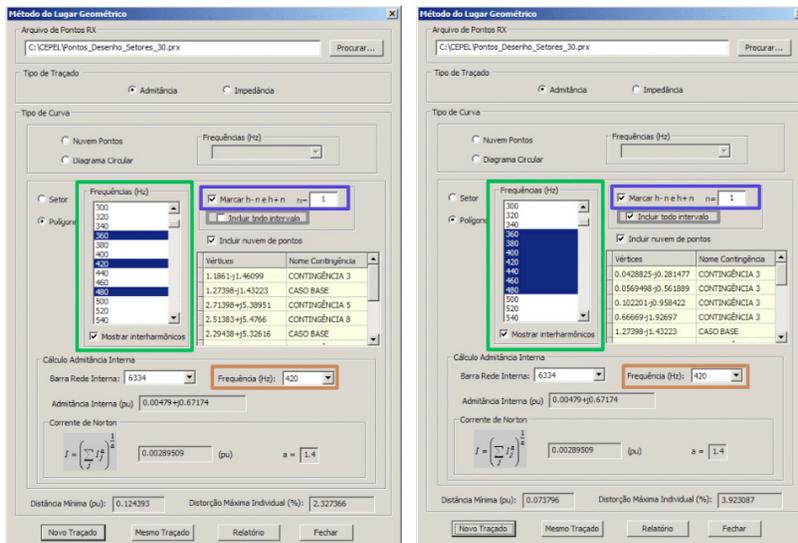


Figura 4 – Nova interface gráfica para traçados de LGs individuais no HarmZs

A seguir será apresentado o procedimento para os traçados dos LGs utilizando-se a nova interface gráfica do programa HarmZs com as implementações criadas para atender os novos PR do ONS. Nas explicações feitas a seguir, os casos utilizados são redes reais referentes a um estudo de comportamento harmônico de um novo acesso a rede básica de uma instalação que possui equipamentos não lineares que injetam harmônicos na rede. A rede interna, representando a instalação que possui conteúdo harmônico, é utilizada no cálculo da corrente de Norton e de sua impedância vista do PAC. A rede externa, que representa as diversas configurações do SIN, é utilizada para calcular as impedâncias harmônicas vistas do PAC que darão origem aos LGs de admitância na forma de setores ou polígonos. A partir destes cálculos envolvendo ambas as redes (interna e externa) são determinadas as máximas distorções harmônicas individuais e total.

A escolha da frequência do LG é feita através da *combobox* “Frequência (Hz)” destacada na cor marrom na Figura 4. Após esta escolha, a frequência selecionada é marcada automaticamente no *frame* “Frequências (Hz)”, destacado na cor verde. As frequências marcadas neste *frame* são as que realmente darão forma ao LG.

Como solicitado pelo ONS nos seus novos PR, é necessária a escolha de um intervalo harmônico para o traçado de setores angulares e de polígonos. Para que os limites deste intervalo sejam escolhidos automaticamente, foi implementada a opção “Marcar h-n e h+n”, evidenciada em tom azul. Note que *h* representa a ordem da frequência harmônica $f_h = hf_0$ e *n* o fator multiplicador da ordem da frequência fundamental f_0 (que é igual a 1). Logo (*h-n*) e (*h+n*) são equivalentes a ($f_h - nf_0$) e

$(f_h + n f_0)$ ou a $(h - n) f_0$ e $(h + n) f_0$, respectivamente. Conforme mostrado na Figura 4, é necessário informar o valor do “n”. Dois exemplos de escolha deste valor são informados na Tabela 1. Observa-se que ao ser selecionada esta opção, somente as frequências dos limites inferior $(h - n) f_0$ e superior $(h + n) f_0$, além da frequência $h f_0$, são escolhidas no *frame* “Frequências (Hz)”.

Outra funcionalidade implementada é a opção “Incluir todo intervalo” (destacada na cor cinza) para que todas as frequências existentes entre esses limites sejam selecionadas. Note que, na Figura 4 (a) a opção “Incluir todo intervalo” está desmarcada e somente as frequências 360, 420 e 480 Hz estão selecionadas. Já na Figura 4 (b), a mesma opção está marcada e todo o intervalo, de 360 a 480 Hz, é selecionado.

Cabe lembrar que as frequências apresentadas no *frame* “Frequências (Hz)”, destacado na cor verde, estão de acordo com o passo escolhido no cálculo das impedâncias harmônicas que é feito com a utilização da ferramenta batch [8]. Após a execução dessa ferramenta batch, um arquivo de extensão PRX com os valores das frequências e respectivas impedâncias é criado. Este arquivo PRX é carregado nesta interface gráfica e, a partir da leitura deste arquivo, as frequências harmônicas possíveis são apresentadas na interface gráfica.

De acordo com os novos PR, para o caso do LG escolhido ser o polígono de n lados, o passo de cálculo das impedâncias no batch deve ser de $\pm 0,1$ de f_0 (ou ± 6 Hz). No entanto, como este passo geraria muitas frequências, para que fosse possível visualizar com maior facilidade as seleções nas interfaces gráficas apresentadas neste trabalho, foi escolhido o passo de 20 Hz.

n	$n f_0$ (Hz)	$f_h - n f_0$ (Hz)	$h f_0$ (Hz)	$f_h + n f_0$ (Hz)
0.5 (padrão)	30	390	420	450
1.0 (exemplo)	60	360	420	480

Tabela 1: Valores de h-n e h+n para diferentes valores de n

Note que, para o caso do traçado de polígonos, a opção “Marcar h-n e h+n” deve estar selecionada e o valor do n deve ser igual a 0.5. Como deve ser considerado todo o intervalo entre h-n e h+n, a opção “Incluir todo intervalo” também deverá ser selecionada.

Para o caso de traçado de setores angulares, a opção “Marcar h-n e h+n” deve estar selecionada com o valor do n igual a 1. Como só devem ser consideradas as frequências limites e não todo intervalo, a opção “Incluir todo intervalo” não deve ser selecionada.

É importante observar que no momento de se calcular as impedâncias utilizando a ferramenta batch, deve ser utilizado o passo de frequências igual a 6 Hz, que é o passo necessário para representar os LGs por polígonos de admitâncias. No entanto, os valores de impedâncias calculados com esse mesmo passo podem ser utilizados para a representação por setores angulares, pois somente as frequências limites $h-1$ e $h+1$ serão selecionadas com a não ativação da opção “Incluir todo intervalo”.

Como uma segunda etapa, foi desenvolvida uma nova interface gráfica extremamente amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos novos PR. Esta interface está apresentada na Figura 5. Observa-se que é possível escolher opções diferentes para setores e polígonos (valor do n na forma $h \pm n$, e inclusão ou não de todo intervalo). Desta forma, o usuário poderá optar pelo LG que lhe for mais conveniente em relação à necessidade de se adotar medidas mitigadoras como a utilização de filtros passivos, sem praticamente nenhum esforço adicional. Por meio desta interface, é possível realizar traçados de LGs de todas as frequências desejadas de uma só vez e de forma bastante automatizada. As grandezas que definem os LGs (módulos e ângulos de admitâncias mínimos e máximos para os setores angulares, e vértices de admitâncias para os polígonos de n lados), bem como as contingências que as geraram, são também apresentadas na interface.

Frequência	H (Norton) (pu)	a	Y (pu)	Ymin Setor (pu)	Ymin Polígono (pu)	DHI Máx Setor (%)	DHI Máx Pol. (%)
120	0.00459522	1.0	0.00010+ <i>j</i> 0.09745	0.0146866403752626	0.220019480785273	31.2884198995627	2.0835303
180	0.00919044	1.0	0.00025+ <i>j</i> 0.15463	0.0198501571255712	0.0877173300013722	46.29960264075	10.477332
240	0.00459522	1.0	0.00053+ <i>j</i> 0.22435	0.0289640868340874	0.0976769394385293	15.8652288549374	4.7045072
300	0.00289507	1.4	0.00105+ <i>j</i> 0.31638	0.0411384588157956	0.0790379919010671	7.03737475376115	3.6628806
360	0.00144754	1.4	0.00215+ <i>j</i> 0.44880	0.0474910247691524	0.217013575961775	3.04802297748455	0.6670261
420	0.00289509	1.4	0.00479+ <i>j</i> 0.67174	0.0725016835651324	0.0737861315106263	3.99313026139116	3.9230878
480	0.00144755	1.4	0.01367+ <i>j</i> 1.13422	0.127975950218718	1.08838576089772	1.13111286885816	0.1329999
540	0.00289513	1.4	0.08229+ <i>j</i> 2.77955	1.10816551412237	1.13827466814525	0.261254412450488	0.2543438
600	0.00144758	1.4	0.99149+ <i>j</i> 9.59354	1.93540959647476	4.71881023053214	0.074794715109968	0.0306768
660	0.00121747	2.0	0.03910+ <i>j</i> 1.91318	0.3519540008392	0.730438214874824	0.34591597798536	0.1666759
720	0.00060877	2.0	0.01294+ <i>j</i> 1.09951	0.162980792337399	0.216298079234643	0.318649317508044	0.2814480
780	0.00121762	2.0	0.00663+ <i>j</i> 0.78652	0.236051077658097	0.489148430326504	0.515829877090926	0.2489268
840	0.00060887	2.0	0.00413+ <i>j</i> 0.61967	0.347862599291049	1.33897298802571	0.175030961411205	0.0454727
900	0.00121788	2.0	0.00286+ <i>j</i> 0.51534	0.301155183939652	0.919740406715085	0.404401266425387	0.1324151

Figura 5 – Traçados de múltiplos LGs no HarmZs

Outra facilidade importante desta interface é a apresentação de todos os

resultados de forma tabular, destacando-se na cor vermelha todas as distorções harmônicas individuais (DHI) e totais (DHT) que ultrapassaram os limites adotados nos PR. O programa permite que estes limites sejam editados conforme modificações nos PR ou caso o usuário queira utilizar outra norma técnica. Estes limites estão apresentados na Figura 6.

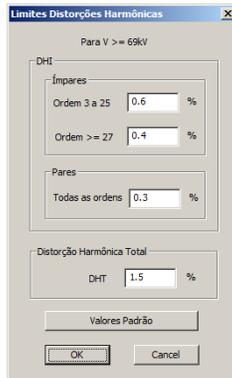


Figura 6 – Diálogo com os valores dos limites adotados para as distorções harmônicas para tensões superiores a 69kV

É também possível exportar todos os resultados obtidos para o Excel para que os usuários possam fazer comparações mais detalhadas e preparar relatórios de forma fácil e rápida. Um exemplo de exportação para o Excel é apresentado na Figura 7.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Freq[Hz]	I Norton[pu]	φ	Y[pu]	Ymin Sator[pu]	Ymin Polig[pu]	DHI Máx Sator[%]	DHI Máx Polig[%]	Frequências Sator	Frequências Poligono	Ymax Sator[pu]	Cont_Ymax	Ymin Sator[pu]	Cont_Ymin
2	120	0.0046	1	0.0001+0.0975j	0.0147	0.088	31.2884	5.2534	120 180	120 180	2.466	CASO BASE	0.0907	CONTINGÊNCIA 6
3	180	0.0052	1	0.0001+0.1346j	0.0199	0.0818	46.7931	11.395	180 240 300	180 240 300	8.8605	CONTINGÊNCIA 2	0.0907	CONTINGÊNCIA 6
4	240	0.0048	1	0.0000+0.2244j	0.029	0.0821	15.8652	5.9962	180 240 300	180 240 300	8.8605	CONTINGÊNCIA 2	0.0907	CONTINGÊNCIA 6
5	300	0.0029	1.4	0.0011+0.1683j	0.0411	0.0995	7.0734	2.9108	240 300 360	240 300 360	8.8605	CONTINGÊNCIA 6	0.1701	CONTINGÊNCIA 7
6	360	0.0014	1.4	0.0021+0.4498j	0.0475	0.0955	3.948	2.4443	300 360 420	300 360 420	4.9461	CONTINGÊNCIA 6	0.1237	CONTINGÊNCIA 2
7	420	0.0029	1.4	0.0048+0.6717j	0.0725	0.1244	3.9931	2.3274	360 420 480	360 420 480	6.0343	CONTINGÊNCIA 5	0.1237	CONTINGÊNCIA 2
8	480	0.0014	1.4	0.0137+1.1342j	0.128	0.1318	1.1311	0.4363	420 480 540	420 480 540	6.0343	CONTINGÊNCIA 5	0.1237	CONTINGÊNCIA 2
9	540	0.0029	1.4	0.0219+1.7795j	1.1882	1.1763	0.2813	0.2842	480 540 600	480 540 600	6.0343	CONTINGÊNCIA 5	0.2137	CONTINGÊNCIA 3
10	600	0.0014	1.4	0.0913+3.9355j	1.9354	3.4881	0.0748	0.0204	540 600 660	540 600 660	14.2818	CONTINGÊNCIA 5	0.2789	CONTINGÊNCIA 6
11	660	0.0012	2	0.0391-1.9132j	0.352	0.3885	0.3459	0.3304	600 660 720	600 660 720	14.2818	CONTINGÊNCIA 5	0.2789	CONTINGÊNCIA 6
12	720	0.0006	2	0.0129-1.0995j	0.1929	0.2255	0.1156	0.17	660 720 780	660 720 780	14.2818	CONTINGÊNCIA 5	0.2789	CONTINGÊNCIA 6
13	780	0.0012	2	0.0646-0.7865j	0.2361	0.3398	0.1518	0.5077	720 780 840	720 780 840	8.2484	CONTINGÊNCIA 2	0.9682	CONTINGÊNCIA 4
14	840	0.0006	2	0.0041-0.8189j	0.3479	0.5255	0.175	0.1159	780 840 900	780 840 900	8.2484	CONTINGÊNCIA 2	0.8541	CONTINGÊNCIA 9
15	900	0.0012	2	0.0020-0.1219j	0.3012	0.3381	0.2044	0.3802	840 900 960	840 900 960	7.9484	CASO BASE	0.4616	CONTINGÊNCIA 7
16	900	0.0006	2	0.0021-0.4436j	0.2565	0.2766	0.2175	0.2202	900 960 1020	900 960 1020	4.9575	CASO BASE	0.096	CONTINGÊNCIA 1
17	1020	0.0006	2	0.0017-0.1909j	0.0894	0.0989	0.6815	0.616	960 1020 1080	960 1020 1080	4.9575	CASO BASE	0.096	CONTINGÊNCIA 1
18	1080	0.0003	2	0.0011-0.1505j	0.0523	0.0982	0.382	0.3881	1020 1080 1140	1020 1080 1140	4.9575	CASO BASE	0.096	CONTINGÊNCIA 1
19	1140	0.0006	2	0.0011-0.1184j	0.0464	0.1124	1.3119	0.5424	1080 1140 1200	1080 1140 1200	2.5441	CONTINGÊNCIA 2	0.2868	CONTINGÊNCIA 3
20	1200	0.0003	2	0.0009-0.1292j	0.0425	0.1769	0.7173	0.1723	1140 1200 1260	1140 1200 1260	7.4123	CONTINGÊNCIA 2	0.2868	CONTINGÊNCIA 3
21	1260	0.0006	2	0.0006-0.1705j	0.1442	0.1682	0.2228	0.1556	1200 1260 1320	1200 1260 1320	15.444	CASO BASE	0.4064	CONTINGÊNCIA 4
22	1320	0.0003	2	0.0007-0.2520j	0.1772	0.2879	0.0528	0.106	1260 1320 1380	1260 1320 1380	16.1356	CONTINGÊNCIA 8	0.8213	CONTINGÊNCIA 3
23	1380	0.0006	2	0.0009-0.1281j	0.0628	0.2383	0.9715	0.2562	1320 1380 1440	1320 1380 1440	16.1356	CONTINGÊNCIA 8	0.1936	CONTINGÊNCIA 3
24	1440	0.0003	2	0.0005-0.2222j	0.0803	0.2182	0.3802	0.14	1380 1440 1500	1380 1440 1500	16.1356	CONTINGÊNCIA 8	0.1936	CONTINGÊNCIA 3
25	1500	0.0006	2	0.0005-0.1100j	0.0759	0.2166	0.8052	0.3821	1440 1500 1560	1440 1500 1560	8.7546	CASO BASE	0.1936	CONTINGÊNCIA 3
26	1560	0.0003	2	0.0004-0.1992j	0.3594	0.2376	0.0651	0.1287	1500 1560 1620	1500 1560 1620	4.8215	CASO BASE	0.5379	CONTINGÊNCIA 1
27	1620	0.0006	2	0.0004-0.1876j	0.0885	0.215	0.6814	0.2848	1560 1620 1680	1560 1620 1680	4.8215	CASO BASE	0.1883	CONTINGÊNCIA 4
28	1680	0.0003	2	0.0006-0.1809j	0.0758	0.1283	0.4042	0.2392	1620 1680 1740	1620 1680 1740	4.8215	CASO BASE	0.1883	CONTINGÊNCIA 4
29	1740	0.0006	2	0.0003-0.1730j	0.0412	0.128	1.489	0.4791	1680 1740 1800	1680 1740 1800	6.2966	CASO BASE	0.1883	CONTINGÊNCIA 4
30	1800	0.0003	2	0.0003-0.1858j	0.1525	0.1564	0.2619	0.1593	1740 1800 1860	1740 1800 1860	6.2966	CASO BASE	0.3117	CONTINGÊNCIA 7
31	1860	0.0006	2	0.0009-0.1591j	0.1048	0.2366	0.1537	0.2668	1800 1860 1920	1800 1860 1920	6.2966	CASO BASE	0.3485	CONTINGÊNCIA 3
32	1920	0.0003	2	0.0003-0.1532j	0.2005	0.2315	0.1537	0.1131	1860 1920 1980	1860 1920 1980	6.9238	CONTINGÊNCIA 7	0.3485	CONTINGÊNCIA 3
33	1980	0.0006	2	0.0005-0.1477j	0.2684	0.268	0.2991	0.2844	1920 1980 2040	1920 1980 2040	11.3818	CASO BASE	0.3485	CONTINGÊNCIA 3
34	2040	0.0003	2	0.0002-0.1425j	0.4877	0.1829	0.6054	0.0777	1980 2040 2100	1980 2040 2100	11.3818	CASO BASE	0.4526	CONTINGÊNCIA 6

Figura 7 – Tabela Excel contendo os dados de traçados de múltiplos LGs no HarmZs

Além de realizar os cálculos das DHIs e DHTs máximas, considerando setores e/ou polígonos, a ferramenta também traça os LGs para todas as frequências automaticamente.

Se o usuário escolher os traçados de setores e polígonos e selecionar a opção “Sobrepor Traçados”, as duas formas geométricas serão apresentadas em um mesmo gráfico. Esses traçados sobrepostos podem ser visualizados na Figura 8. Se a opção de sobrepor traçados não for marcada, o programa irá traçar os setores e os polígonos em gráficos diferentes, considerando todas as frequências do estudo.

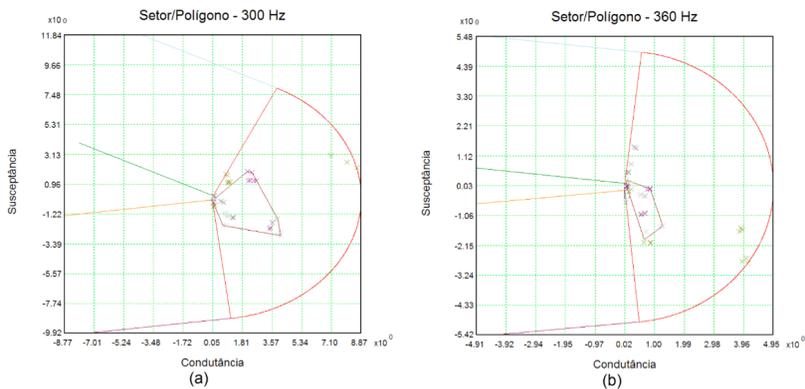


Figura 8 – Traçado sobreposto do polígono e do setor angular para as frequências de 300 e 360 Hz

6 | CONCLUSÃO

O ONS atualizou os PR através da emissão de uma nota técnica [1] com o intuito de atender às necessidades de melhoria do processo de gerenciamento da emissão de harmônicos. Esse novo documento procura flexibilizar os PR de forma a atender às constantes reivindicações dos agentes no sentido de tornar a forma de avaliação dos estudos de desempenho harmônico menos conservadora e mais alinhada às normas internacionais de grande relevância técnica.

Destaca-se, dentre as modificações, a possibilidade de se utilizar nos estudos de acesso de novas instalações à Rede Básica, além dos setores angulares, polígonos de n lados para a representação dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os intervalos harmônicos e os passos de frequência adotados neste novo documento para a determinação e traçado de cada tipo de LG (setor angular ou polígono de n lados), necessários para o cálculo das máximas distorções harmônicas de tensão, são diferentes entre si.

Deste modo, para que o programa HarmZs pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos, a metodologia para determinação e traçado destes polígonos foi implementada na versão 3.0 do programa. Uma interface gráfica extremamente amigável e flexível foi desenvolvida, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos novos PR. Além da visualização dos traçados gráficos dos setores e polígonos, os resultados do estudo são também apresentados no formato de tabelas que podem ser exportadas para o Excel, permitindo que o usuário possa manipular os dados e preparar facilmente relatórios bastante completos.

A flexibilidade da ferramenta, sua facilidade de utilização e velocidade de processamento tornam possíveis análises de sensibilidades mais rigorosas e detalhadas em relação a parâmetros como intervalo harmônico e passo de frequência, utilizados na construção dos LGs. Assim, os usuários e o próprio ONS podem utilizar o programa como ferramenta de aprimoramento dos PR atuais, uma vez que estes tendem a ser dinâmicos de acordo com a evolução do sistema.

REFERÊNCIAS

[1] Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres - REV.01 - ONS – Operador Nacional do Sistema – www.ons.org.br, abril de 2016.

[2] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio e Cristiano de Oliveira Costa, “Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico”, XXII SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília (DF), 12 a 16 de outubro de 2013.

[3] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, “Manual do Usuário da Versão 1.7 do Programa HarmZs”, Relatório Técnico CEPEL, No. DSE 51747 / 2007.

[4] Miguel Pires de Carli, Breno Torres Meyer, Ricardo Penido D. Ross, Alex Jean de Castro Mello, “Harmônicos Resultantes da Conexão de Parques Eólicos com a Rede Elétrica: Análise Conjunta de Medições e Simulações Associadas a um Estudo de Caso”, XXIII SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu (PR), 18 a 21 de outubro de 2015.

[5] Sergio Luis Varricchio, Franklin Clement Véliz, Cristiano de Oliveira Costa e José Roberto Medeiros, “Distribuição de Correntes de 5° Harmônico nas Vizinhanças da SE Ibiúna 345 kV: Comparação entre Simulação e Medição”, XXI SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis (SC), 23 a 26 de outubro de 2011.

[6] Technical Brochure 468, "Review of Disturbances Emission Assessment Techniques", Cigré-Cired Working Group C4-109, June 2011.

[7] Guide to the Specification and Design Evaluation of A. C. Filters for HVDC Systems, 1st ed., IEC PAS 62001, 2009.

[8] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, "Automatização Computacional de Estudos de Comportamento Harmônico", XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém (PA), Brasil, 17 a 20 de março de 2009.

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 02/08/2020

Guilherme Gomes dos Santos

Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás

<http://lattes.cnpq.br/4258035966944269>

Paulo Sérgio Zanin Júnior

Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Goiás

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

RESUMO: Quando ocorre um curto-circuito em máquinas síncronas, correntes são induzidas no enrolamento de forma a compensar os fluxos concatenados, surgindo assim parâmetros visíveis no oscilograma. Este trabalho permite verificar os parâmetros da máquina síncrona e analisar seu comportamento no distúrbio por meio de modelagem computacional, a qual utiliza o conceito das equações de Park, reatâncias operacionais e constantes de tempo. Apresenta-se um estudo de caso e comparação dos resultados obtidos com parâmetros de uma máquina real.

PALAVRAS-CHAVE: Curto-circuito; máquina síncrona; reatância; extração de parâmetros.

SYNCHRONOUS MACHINES PARAMETERS EXTRACTION BY SHORT- CIRCUIT COMPUTATIONAL SIMULATION

ABSTRACT: When a short circuit occurs in

synchronous machines, currents are induced in the winding in order to compensate the concatenated flux, thus resulting in visible parameters in oscillogram. This work allows synchronous machine parameters verification and its behavior analysis during a disturb by computational modeling, using the following concepts: Park equations, operational reactances and time constants. It is presented a study case and the comparison between obtained results and real machine parameters.

KEYWORDS: Short circuit; synchronous machine; reactance; parameter extraction.

NOMENCLATURA

P Número de par de pólos.

V_{qd} Componentes da tensão de estator.

I_{qd} Componentes da corrente de estator.

v_{qs}^r Tensão do eixo de quadratura no referencial do rotor.

v_{ds}^r Tensão do eixo de direto no referencial do rotor.

ψ_{qs}^r Fluxo concatenado em eixo quadratura no referencial do rotor.

ψ_{ds}^r Fluxo concatenado em eixo direto no referencial do rotor.

i_{ds}^r Corrente do estator no eixo direto no referencial do rotor.

i_{qs}^r Corrente do estator no eixo de quadratura no referencial do rotor.

v_{fd}^{tr} Derivada da Tensão do eixo magnético direto.

v_{kqz}^{tr} Derivada da Tensão do eixo magnético quadratura.

ω_r Velocidade angular do rotor.

ω_b Velocidade angular de base elétrica.

ρ Derivada no tempo.

$X_q(s)$ Impedância operacional do eixo q.

$X_d(s)$ Impedância operacional do eixo d.

X_{md} Impedância de magnetização de eixo direto.

X_{mq} Reatância de magnetização de eixo de quadratura.

X_{ls} Reatância de dispersão.

1 | INTRODUÇÃO

A máquina síncrona trifásica é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e um fluxo de corrente contínua (CC) de rotor é produzido por uma excitação CC no enrolamento do campo ou por ímãs [1]. Ela é constituída basicamente de 3 enrolamentos, cujos eixos magnéticos estão defasados de 120° elétricos ao longo do perímetro do entreferro, definindo o estator. Internamente, há um enrolamento em torno de um núcleo de ferro alimentado por corrente contínua que produz um fluxo magnético estático, definindo o rotor, também chamado de enrolamento de campo ou de excitação [6]. É uma máquina em corrente alternada, no qual seu campo girante está em sincronismo com o rotor. Esse tipo de máquina é usado principalmente para converter energia mecânica em elétrica.

O comportamento elétrico e eletromecânico da maioria das máquinas síncronas pode ser conhecido a partir das equações que descrevem o síncrono trifásico de pólos salientes. Em particular, essas equações são utilizadas para avaliar o desempenho de motores síncronos, híbridos, vapor, combustão ou síncronos acionados por turbinas eólicas geradores [4].

Quando ocorre um curto-circuito na máquina síncrona, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [6]. Com o curto-circuito, é possível analisar as correntes de estator por meio das equações de Park e, conseqüentemente, determinar os parâmetros da máquina e seu comportamento diante do distúrbio.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De modo a facilitar a análise de curto-circuito trifásico na máquina síncrona, utilizam-se os conceitos de Park, seu conjunto de equações, conceitos de constantes de tempo e reatâncias operacionais. Estes, portanto, serão os temas apresentados

na fundamentação teórica.

A. Equações de Park

Em 1929, Park desenvolveu a transformação de coordenadas dq0, onde as fases a, b e c, defasadas de 120°, giram em sincronismo numa velocidade em relação ao referencial d e q, que é composto de 2 enrolamentos teoricamente estacionários e em quadratura [6].

Em seu trabalho, Park adota impedâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo. Dessa forma, o rotor é tratado como um modelo de parâmetros distribuídos visto pelo estator [6]. Park utiliza como eixo de referência o rotor, eliminando assim as indutâncias variáveis no tempo das equações de tensão. As equações de Park são apresentadas em (1) a (14).

$$v_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}^r + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^r \quad (2)$$

$$v_{0s} = -r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3)$$

$$v_{kq1}^{r'} = r_{kq1}' i_{kq1}^{r'} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq1}^{r'} \quad (4)$$

$$v_{kq2}^{r'} = r_{kq2}' i_{kq2}^{r'} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kq2}^{r'} \quad (5)$$

$$v_{fd}^{r'} = r_{fd}' i_{fd}^{r'} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{fd}^{r'} \quad (6)$$

$$v_{kd}^{r'} = r_{kd}' i_{kd}^{r'} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{kd}^{r'} \quad (7)$$

$$\psi_{qs}^r = -X_{ls} i_{qs}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (8)$$

$$\psi_{ds}^r = -X_{ls} i_{ds}^r + X_{mq} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{r'} + i_{kd}^{r'}) \quad (9)$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} i_{0s} \quad (10)$$

$$\psi_{kq1}^{r'} = X_{lkq1}' i_{kq1}^{r'} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (11)$$

$$\psi_{kq2}^{r'} = X_{lkq2}' i_{kq2}^{r'} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (12)$$

$$\psi_{fd}^{r'} = X_{lfd}' i_{fd}^{r'} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{r'} + i_{kd}^{r'}) \quad (13)$$

$$\psi_{kd}^{r'} = X_{lkd}' i_{kd}^{r'} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{r'} + i_{kd}^{r'}) \quad (14)$$

Nas equações (15) a (20), utilizam-se reatâncias operacionais e uma função de transferência entre fluxo de estator e tensão de campo [4], sendo que o operador p é a derivada no domínio da frequência e s , o operador de Laplace.

$$v_{qs}^r(s) = -r_s i_{qs}^r(s) + \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) \quad (15)$$

$$v_{ds}^r(s) = -r_s i_{ds}^r(s) - \frac{\omega_r(s)}{\omega_b} \psi_{qs}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{ds}^r(s) \quad (16)$$

$$v_{0s}^r(s) = -r_s i_{0s}^r(s) + \frac{s}{\omega_b} \psi_{0s}^r(s) \quad (17)$$

$$\psi_{qs}^r(s) = X_q(s) i_{qs}^r(s) \quad (18)$$

$$\psi_{ds}^r(s) = X_d(s) i_{ds}^r(s) + G(s) v_{fd}^r \quad (19)$$

$$\psi_{0s}^r(s) = X_{ls} i_{0s} \quad (20)$$

As equações de Park desprezam as características magnéticas do material resultando em um circuito magnético linear, não considerando a saturação. Portanto, se houver saturação, não é possível fazer este tipo de análise com as equações de Park. Além disso, as equações eliminam a quantidade de enrolamentos amortecedores de rotor.

B. Reatâncias de Máquina Síncrona

Utilizando os circuitos de eixo direto e de quadratura, é possível encontrar as reatâncias da máquina síncrona. Através da metodologia empregada [4], considerando uma máquina com um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor no eixo d e dois enrolamentos amortecedores no eixo q , têm-se os circuitos representados nas Figuras de 1 e 3.

Na Figura 1, ilustra-se em forma de circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(S)$. Na Figura 2, é exibido em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(S)$, com $f_d^{rr} = 0$. Na Figura 3, tem-se a representação em forma de circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$, com $i_{ds}^{rr} = 0$.

Na Figura 4, ilustra-se a máquina síncrona com eixos e enrolamentos, sendo, as três fases do estator as , bs e cs , os enrolamentos do rotor de campo f_d e amortecedor k_d no eixo direto e amortecedores k_{q1} e k_{q2} no eixo de quadratura.

Através das equações (15) e (16), é possível encontrar as expressões analíticas para $X_q(s)$, $X_d(s)$ e $G(s)$, apresentadas nas equações (21), (22) e (23). Nestas equações os valores das constantes de tempo τ_1 , τ_2 , etc. relacionam os componentes do seu respectivo circuito [4].

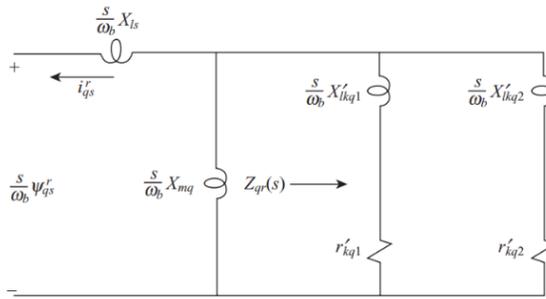


Figura 1: Circuito do eixo q de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_q(s)$.

Fonte: [4]

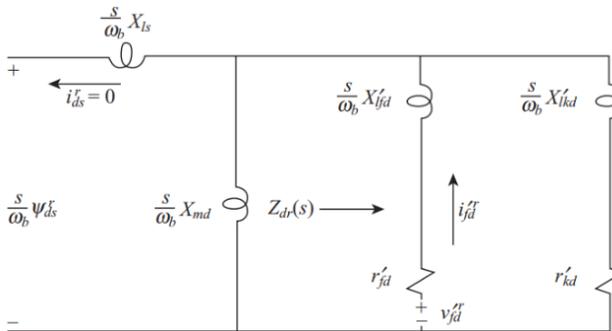


Figura 2: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a reatância operacional $X_d(s)$.

Fonte [4]

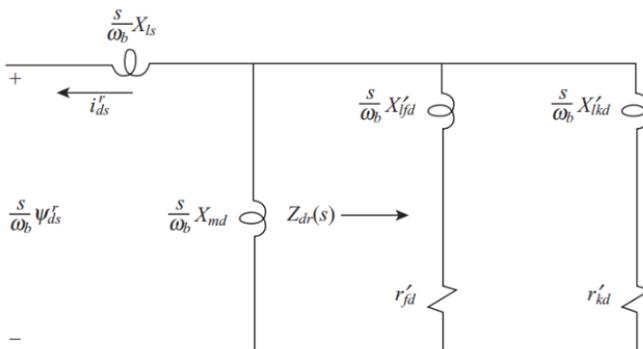


Figura 3: Circuito do eixo d de uma máquina síncrona para se obter a função de transferência $G(s)$.

Fonte [4]

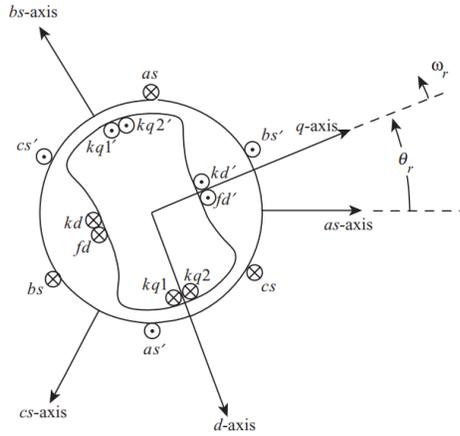


Figura 4: Esquema da máquina síncrona com os eixos e enrolamentos.

Fonte [4]

$$X_q(s) = X_q \frac{1 + (\tau_{q4} + \tau_{q5})s + \tau_{q4}\tau_{q6}s^2}{1 + (\tau_{q1} + \tau_{q2})s + \tau_{q1}\tau_{q3}s^2} \quad (21)$$

$$X_d(s) = X_d \frac{1 + (\tau_{d4} + \tau_{d5})s + \tau_{d4}\tau_{d6}s^2}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (22)$$

$$(s) = \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \frac{1 + \tau_{db}s}{1 + (\tau_{d1} + \tau_{d2})s + \tau_{d1}\tau_{d3}s^2} \quad (23)$$

As reatâncias são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, X_d'' e X_q'' , em altas frequências;
- Transitórias, X_d' e X_q' , em médias frequências; e
- Regime permanente, X_d e X_q , em baixas frequências.

Definem-se as reatâncias operacionais por um valor padrão para cada tipo de máquina, as quais se tratam de uma simplificação das formas derivadas do circuito da máquina e estimativa do valor real, sendo este preciso ou não.

C. Constantes de Tempo

As constantes de tempo da máquina síncrona possuem forma derivada das equações de Park e forma padrão. A forma padrão é uma simplificação da forma derivada, sendo uma estimativa do valor real.

Assim como as reatâncias, as constantes de tempo também têm sua classificação. As constantes de tempo são definidas de acordo com a frequência s em:

- Subtransitórias, com τ_{d0}'' , τ_{q0}'' , τ_d'' e τ_q'' , e
- Transitórias, com τ_{d0}' , τ_{q0}' , τ_d' e τ_q' .

Obtêm-se as constantes de tempo a partir das equações de cálculo das impedâncias operacionais, (II.21), (II.22) e (II.23). O denominador destas equações representa a resposta natural do circuito, ou seja, a máquina operando em circuito aberto. Portanto, as constantes de tempo de circuito aberto, τ''_{d0} , τ''_{q0} , τ'_{d0} e τ'_{q0} , são as raízes da equação de segundo grau do denominador da respectiva reatância operacional.

As constantes de tempo de curto-circuito, τ''_d , τ''_{q0} , τ'_d e τ'_q também são calculadas a partir de (II.21), (II.22) e (II.23), sendo as raízes do numerador destas equações e representam a resposta forçada do sistema, que neste caso é um curto-circuito trifásico das fases do estator.

Encontra-se em [4], as equações das constantes de tempo aqui citadas. Em (24) a (31), tem-se as equações.

$$\tau'_{q0} = \frac{1}{w_b r'_{kq1}} (X'_{lkq1} + X_{mq}) \quad (24)$$

$$\tau'_{d0} = \frac{1}{w_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (25)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{w_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X'_{lkq1}}{X_{mq} + X'_{lkq1}} \right) \quad (26)$$

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X'_{lfd}}{X_{md} + X'_{lfd}} \right) \quad (27)$$

$$\tau'_q = \frac{1}{w_b r'_{kq1}} \left(X'_{lkq1} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (28)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{w_b r'_{fd}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (29)$$

$$\tau''_q = \frac{1}{w_b r'_{kq2}} \left(X'_{lkq2} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lkq1}}{X_{mq} X_{ls} + X_{mq} X'_{lkq1} + X_{ls} X'_{lkq1}} \right) \quad (30)$$

$$\tau''_d = \frac{1}{w_b r'_{kd}} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{mq} X_{ls} X'_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{md} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (31)$$

Quando $r'_{kq2} \gg r'_{kq1}$ e $r'_{kd} \gg r'_{fd}$, as estimativas para os valores padrão das constantes de tempo são mais próximas dos valores calculados a partir das reatâncias operacionais. Geralmente r'_{kd} é bem maior que r'_{fd} , gerando boas estimativas com os valores padrão para o eixo d . Mas r'_{kq2} é quase sempre menor que r'_{kq1} , o que torna as estimativas dos valores padrão não tão adequadas para o eixo q . Nas formas padrão, os termos com r'_{kq1} e com r'_{fd} são eliminados, conforme [4].

3 I CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO

Curto-circuito trifásico é o tipo de falta mais severa, ocasionando em uma corrente de falta elevada. É raro acontecer curto-circuito trifásico numa situação real com a máquina sem carga. Entretanto, para fins de estudos, considera-se um ensaio de curto-circuito trifásico sem carga. Através do ensaio é possível obter parâmetros de eixo d da máquina síncrona. Este ensaio é feito com a máquina já na velocidade síncrona, sem carga e com tensão de campo fixa. Em um determinado instante aplica-se um curto-circuito trifásico nas fases do estator da máquina [3].

A. Definição e Expressão Analítica

Para a análise do ensaio de curto-circuito trifásico da máquina síncrona sem carga, utiliza-se as equações de Park. Considerando $G(s = \infty)$ zero, pois o rotor é insensível à altas frequências (intervalo transitório), a variação da tensão de campo é nula e que os termos que aparecerão com r_s^2 serão muito pequenos, estes são desprezados. As equações das correntes de eixo q e d são apresentadas em (32), (33), e (34).

$$i_{qs}^r(s) = -\frac{1/X_q(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r_s v_{qs}^r(s)}{X_d(s)} + \omega_b s v_{qs}^r(s) - \omega_b^2 v_{ds}^r(s) \right] \quad (32)$$

$$i_{ds}^r(s) = -\frac{1/X_d(s)}{s^2 + 2\alpha s + \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 r_s v_{ds}^r(s)}{X_q(s)} + \omega_b s v_{ds}^r(s) - \omega_b^2 v_{qs}^r(s) \right] \quad (33)$$

$$\alpha = \frac{\omega_b r_s}{2} \left(\frac{1}{X_q(s)} + \frac{1}{X_d(s)} \right) \quad (34)$$

Para encontrar a corrente de curto-circuito é necessário manipular e resolver as equações (32), (33), e (34) no domínio do tempo. A corrente de curto-circuito é apresentada em (35), após seguir os passos de resolução de [4]. Os passos para esta resolução são:

- Tensão de eixo direto na falta como um degrau de $V_s \sqrt{2}$ para zero, sendo V_s o módulo da tensão nominal;
- $X_d(s)$ e $X_q(s)$ como função das constantes de tempo de circuito aberto e de curto-circuito;
- Fator alfa calculado com $X_s(s = \infty)$; e
- $X_q(s = \infty)$ e os termos com r_s (com exceção de alfa) são eliminados.

Na equação da corrente do estator (35), tem-se uma componente AC com a mesma frequência do sistema, uma componente DC que decresce de forma exponencial e outra componente AC que decresce de forma exponencial com o

dobro da frequência do sistema.

$$i_{as} = \sqrt{2}V_s \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau'_d} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau''_d} \right] \sin[\omega_b t + \theta_r(0)]$$

$$- \frac{\sqrt{2}V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X'_q} \right) e^{-\alpha t} \sin\theta_r(0) - \frac{\sqrt{2}V_s}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_q} \right) e^{-\alpha t} \sin[2\omega_b t + \theta_r(0)]$$
(35)

B. Intervalos Subtransitório, Transitório e Regime Permanente no Curto-Circuito

Na ocorrência de curto-circuito na máquina síncrona, os fluxos concatenados nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Dessa forma, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes [6].

Após o curto-circuito é possível notar variações na corrente da máquina síncrona. Na Figura 5, tem-se um exemplo do comportamento desta corrente, sendo dividida em três intervalos: subtransitório, transitório e regime permanente.

O intervalo subtransitório refere-se aos primeiros ciclos do curto-circuito contém correntes de armadura muito elevadas que se amortecem rapidamente, com relação às altas variações de corrente nos enrolamentos amortecedores.

No intervalo transitório a corrente amortecida vai a zero e a corrente de campo ainda é alta, porém menor que no intervalo subtransitório.

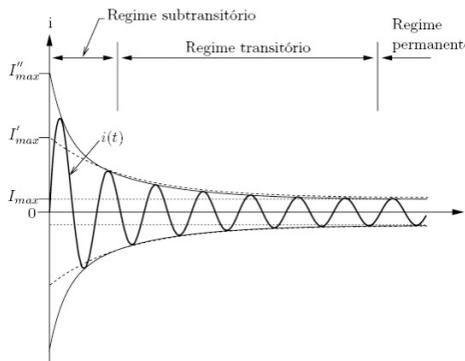


Figura 5: Exemplo de corrente em curto-circuito trifásico em uma máquina síncrona.

Fonte [1]

O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo. Neste intervalo não há corrente induzida, pois a máquina alcança o equilíbrio. Em regime permanente, o campo magnético resultante do estator gira na mesma velocidade que o campo induzido

pele rotor. Assim, não há variação temporal dos enlaces de fluxo nos circuitos do rotor e nenhuma tensão é induzida ali.

A reatância subtransitória é a menor de todas, seguida da reatância transitória e reatância em regime permanente, a maior delas. Dessa maneira, a relação entre as reatâncias de eixo direto é expressa da seguinte forma: $X_d'' < X_d' < X_d$.

4 | EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Em [2], [3] e [4], utiliza-se o método do oscilograma da corrente de curto-circuito para obtenção dos parâmetros de eixo d da máquina síncrona, através do ensaio de curto-circuito. Para facilitar, utiliza-se a escala logarítmica, a qual transforma as envoltórias em retas, e portanto, a forma logarítmica é mais prática para extração dos parâmetros, como mostra a Figura 6. O gráfico ilustra os componentes transitórios e subtransitório da corrente de curto-circuito do estator. Nesse oscilograma logarítmico não é plotada a corrente de regime permanente, logo não decai com o tempo.

Com a equação (36) é possível encontrar X_d a partir da corrente final, sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ o valor da corrente após alguns segundos, já estabilizando. A corrente final é dividida em três partes, conforme a expressão (37). Logo, em regime permanente tem-se i_{ss} (*steady-state*, regime permanente), como parte que decai com τ_d' tem-se i_t (corrente transitória) e como parte que decai com τ_d'' tem-se i_{st} (corrente subtransitória).

A Figura 6 é a plotagem logarítmica de $i_t + i_{st}$ (Intervalo transitório e subtransitório), por meio do qual é possível extrair o valor da corrente nos instantes iniciais da falta, $i_i(t = 0^+)$. Assim, calcula-se a razão entre as constantes de tempo de curto-circuito e circuito aberto, apresentada pela equação (38).

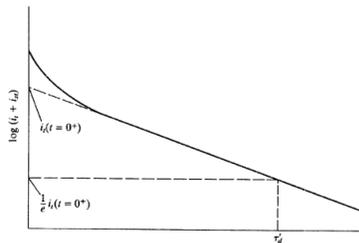


Figura 6: Curva logarítmica da forma de onda da corrente.

Fonte [4]

$$i_{sc}(t \rightarrow \infty) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X_d} \quad (36)$$

$$i_{sc} = i_{ss} + i_t + i_{st} \quad (37)$$

$$i_t(t = 0^+) = \sqrt{2}V_s \left(\frac{\tau'_{do}}{\tau'_d} \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (38)$$

Pode-se substituir $(\tau'_{do} / \tau'_d) * (1 / X'_d)$ por $1 / X'_d$. Mesmo sem as constantes de tempo padrão, τ'_{do} pode ser calculado com parâmetros conhecidos da máquina [4]. As referências [2] e [3] assumem as constantes padrão para este cálculo.

Além disso, encontra-se a constante de tempo, sendo o tempo em que a corrente se torna $i_t(t = 0^+) / e$. Subtraindo o valor máximo de $i_t + i_{st}$ por $i_t(t = 0^+)$, obtém-se $i_{st}(t = 0^+)$. Com este resultado é possível traçar a curva da diferença e encontrar τ''_d da mesma forma que foi encontrado τ'_d . Pela equação (39), encontra-se X''_d .

$$i_{sc}(t = 0^+) = \frac{\sqrt{2}V_s}{X''_d} \quad (39)$$

Com os equacionamentos, determina-se os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: τ'_d e τ''_d . Com esses parâmetros encontrados através do ensaio de curto-circuito, é possível obter os parâmetros da máquina síncrona. A aproximação para constantes de tempo padrão, para encontrar X''_d por exemplo, é realizada para simplificar os cálculos.

5 | ESTUDO DE CASO

Para aplicar os conceitos apresentados, elaborou-se um exemplo da extração de parâmetros de eixos d . Com os parâmetros reais da máquina, plotou-se gráficos da corrente de curto-circuito do estator. A partir dos gráficos, extraiu-se os parâmetros da máquina e estes foram comparados com os valores reais. Esse método permite verificar a aplicabilidade as equações de Park no ensaio de curto-circuito. Utilizou-se máquinas de 100 MVA e com tensão de 23 kV [6].

As Figuras 7, 8 e 9, ilustram o transitório dessas máquinas, plotados pelas equações de Park solucionadas no programa.

Na figura 7, tem-se o gráfico da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona, gerando uma corrente muito maior que a corrente nominal. Isso mostra a importância de uma proteção eficaz na máquina.

No gráfico da Figura 8, tem-se o oscilograma da corrente de curto-circuito em uma máquina síncrona sem a componente contínua e sem a componente com dobro da frequência. Nota-se que a corrente tende a se estabilizar mais rápido neste caso.

Com a equação (36) é possível calcular X_d , sendo $i_{sc}(t \rightarrow \infty)$ igual a 1,458 p.u., de acordo com a figura 8. Através da equação (39), é possível encontrar

X_d'' , sendo $i_{sc}(t = 0^+)$ igual a 7,071 p.u. Utilizando-as, encontra-se $X_d = 1$ p.u. e $X_d'' = 0.2$ p.u., seguindo a referência [5]. Ambas as reatâncias encontradas são iguais às reatâncias reais da máquina. Para encontrar os demais parâmetros é preciso traçar a curva logarítmica e remover a parte de regime permanente.

A constante de tempo então pode ser calculada utilizando o ponto $i_t(t = 0^+)$ /e, conforme Figura 6. Através deste valor, utilizando o gráfico da Figura 10, é possível encontrar τ_d' . Encontra-se que τ_d' é igual a 1 s. Com os valores da corrente transitória e subtransitória, é possível encontrar o valor de corrente subtransitória no instante zero, sendo que $i_t(t = 0^+)$ já é um valor conhecido. Com a mesma lógica para encontrar a constante de tempo transitória, encontra-se τ_d'' , sendo igual a 0.03 s. Ambos os valores são iguais aos valores reais da máquina.

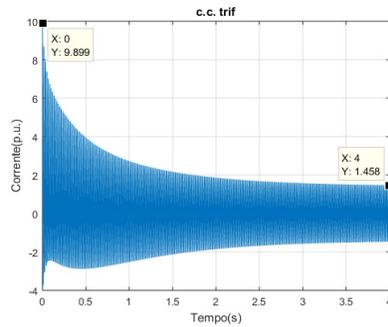


Figura 7: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, a vazio.

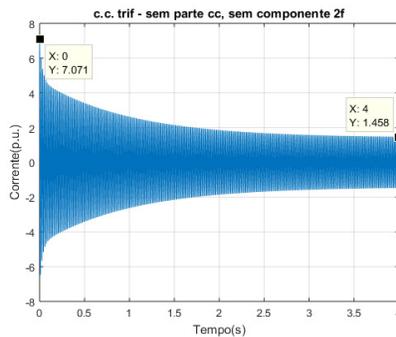


Figura 8: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua e sem componente com dobro da frequência.

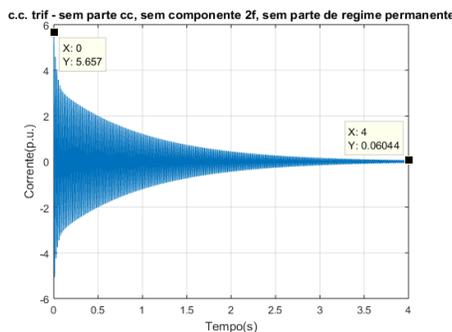


Figura 9: Corrente de curto-circuito em máquina síncrona, sem componente contínua, sem componente com dobro da frequência e sem componente de regime permanente.

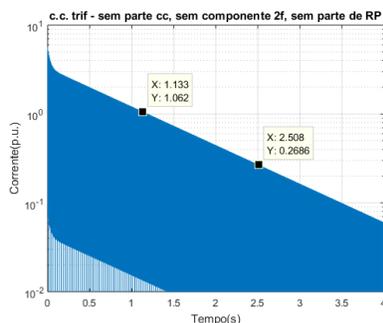


Figura 10: Gráfico em escala logarítmica

6 | CONCLUSÕES

Este trabalho exibiu a importância do ensaio de curto-circuito – que mostra o comportamento da máquina com mudanças bruscas de carga – para determinar os parâmetros de eixo d da máquina síncrona: reatâncias operacionais e constantes de tempo.

Nota-se que o modelo computacional desenvolvido a partir das equações de Park, permite encontrar os parâmetros da máquina síncrona (constantes de tempo e reatâncias) de maneira precisa para o esforço computacional gasto, que é bastante pequeno, com exceção da reatância de eixo direto transitória.

Nota-se nos resultados a importância de proteção no equipamento, para que este possa funcionar de maneira contínua e oferecendo o melhor desempenho, a fim de evitar danos a máquina síncrona na ocorrência de curto-circuito nos terminais do estator.

Sugere-se como futuros trabalhos, a melhoria na extração de parâmetros, com uso de inteligência artificial para extrair os parâmetros de maneira mais eficiente e a simulação do comportamento das equações de Park com saturação

para verificar sua inadequabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, **Máquinas Elétricas**, 6ª edição, Bookman.
- [2] L. T. Jordão. **Máquinas síncronas**. LTC/EDUSP. São Paulo, 1980.
- [3] L. W. Matsch, J. D. Morgan. **Electromagnetic and electromagnetical machines**. 3rd Edition, Wiley. New York, 1987.
- [4] P. C. Krause. **Analysis of electric machinery and drive systems**. Wiley, IEEE.
- [5] R. H. Park., **Two reaction theory of synchronous machines – Generalized method of analysis - part I**. AIEE – Transactions, Vol. 48, Julho de 1929, pp. 716-727.
- [6] T. Granato, “**Análise de curto circuito em um gerador síncrono de pólos salientes pelo método dos elementos finitos**” UFRJ, Agosto 2013.

Data de aceite: 01/10/2020

Lucas Eid Ramire Gonçalves

FATEC Botucatu
Botucatu, São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/3683698907647916>

Luiz Eduardo Vieira Montanha

Faculdade de Ciências Agrônômicas de
Botucatu
Botucatu, São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/6771096065525858>

Marco Antonio Nagao

FATEC Botucatu
Botucatu, São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4061738601498016>

RESUMO: Com o mundo globalizado tornou-se mais que essencial ter domínio da língua inglesa, se tornando uma grande vantagem num currículo. Mas são poucos que possuem disposição e tempo de esforçar em aprender um novo idioma. Felizmente, a internet abriu portas para que as pessoas pudessem aprender qualquer coisa sem sair de casa ou até mesmo pagando quase nada. Entretanto, aprender algo sozinho pode ser mais difícil do que estar sendo ensinado por alguém, pois não sabe onde exatamente deve começar. Neste artigo é discutido o porquê de as pessoas preferirem ensino presencial e dos bons resultados que serão obtidos se investirem seu tempo no ensino autodidata.

PALAVRAS-CHAVE: Aprendizagem; inglês; esforço.

ENGLISH SELF-TEACHING LEARNING

ABSTRACT: As we are living in a globalized world it became more than essential to have a domain of the English language, becoming a great advantage in a curriculum. But fewer that have disposition and time to strive to learn a new language. Fortunately, the internet opened doors for people to learn anything without leaving home or even else paying almost nothing. However, learn something on your own can be harder than being taught by someone, because it doesn't know where exactly should begin. In this article it is addressed why people rather classroom and the beneficial results that will be obtained if they invested their time on self-teaching learning.

KEYWORDS: Learning; English; effort.

1 | INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, pode-se perceber facilmente que o acesso à informação, ao conhecimento e ao compartilhamento desses recursos ficou mais dinamizado. O acesso à internet permitiu uma facilidade ao obter informação de modo mais rápido e prático em qualquer lugar (MERLIM, 2007 apud SILVA et al., 2017). Com essa acessibilidade, o indivíduo determina o seu ritmo de estudo, pois terá acesso ao conteúdo quando e quantas vezes desejar para a sua compreensão. Assim é o aprendizado autodidata, onde a pessoa busca conhecimento em seu determinado tempo sem ter orientador ou professor ao seu lado te direcionando. A língua inglesa está se

tornando cada vez mais uma língua obrigatória em todo o mundo e assim deixando profissionais que possuem o seu conhecimento muito requisitados e contratados rapidamente.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Muitos possuem uma grande dificuldade no aprendizado do inglês, para isso, necessitam de um acompanhamento durante o seu estudo, alguma orientação e outras resolvem iniciar o aprendizado sozinhas. Portanto, é preciso confiar no seu progresso. Isso é o mesmo que um quebra-cabeça. Existem prós e contras em relação ao aprendizado autodidata. Para se tornar um ponto positivo, precisa ter disciplina, planejamento de estudo, organização, persistência, motivação e entre outros pontos que precisam ser avaliados no decorrer do tempo. Sem isso, se tornaria um ponto negativo, já que não teria uma supervisão durante o ensino e o tempo se tornaria a pior desvantagem, pois dependeria somente da pessoa de estudar.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

O aprendizado autodidata é uma forma moderna de educação e de conseguir informação. Isso não necessariamente significa que possui mais vantagens do que métodos mais antigos de aprendizado. Muito pelo contrário, isso ajudou a dar suporte a novas ferramentas (SCOTT, 2019). Para esse auxílio, existem diversas ferramentas e aplicativos de apoio para autodidatas como por exemplo o Duolingo e Hello English de aplicativos; e diversos cursos online, sendo gratuitos ou pagos que disponibilizam diversos materiais para suporte. Muitas pessoas têm a preferência por esse método de aprendizagem pelo simples fato de que seus objetivos em cursos de inglês não se enquadram com procedimento passado, pois o aluno, muitas das vezes, possui um nível de vocabulário baixo e limitado. Com exceção de uma ou outra palavra realmente nova, cabe ao aluno se auto alimentar com leitura. Contudo, é ótimo compreender, ainda mais com um dicionário, o conteúdo de um texto. Estudar com um livro adequado para o seu nível, irá te levar a muitas palavras novas a um custo bem inferior de um curso (JACOBS, 2002).

De acordo com a pesquisa (Figura 1) feita pelos autores Paulo Henrique Simon e André Rollwagen no ano de 2017, podemos notar um maior número de pessoas que não tem a preferência pelo aprendizado autodidata de uma língua adicional. Optam pelo ensino presencial.

Ao retomar sua experiência profissional, qual método de ensino/aprendizagem você considera como o mais eficiente para aprendizagem de uma segunda língua?

10 respostas

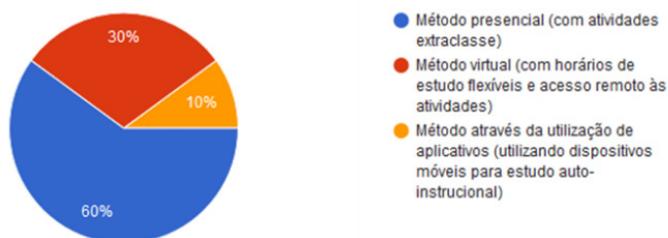


Figura 1 - Pesquisa sobre qual o melhor método de aprendizagem

Fonte: SIMON, P. H.; ROLLWAGEN, A. F. (2017)

Com base na pesquisa, percebe-se uma grande preferência pela atuação presencial na possibilidade de contemplar o ensino da língua estrangeira. É válido ressaltar que o grupo participante, embora tenha maior preferência pela modalidade presencial, é favorável também outras abordagens, pois o principal objetivo é que o ensino e aprendizagem da língua se efetive de forma significativa favorecendo a comunicação do aprendiz.

De acordo com a Figura 2, pode-se perceber uma porcentagem alta de aprendizado quando envolve mais pessoas num tipo de atividade, tanto passando seus ensinamentos quanto recebendo-os, em relação aos demais modos.

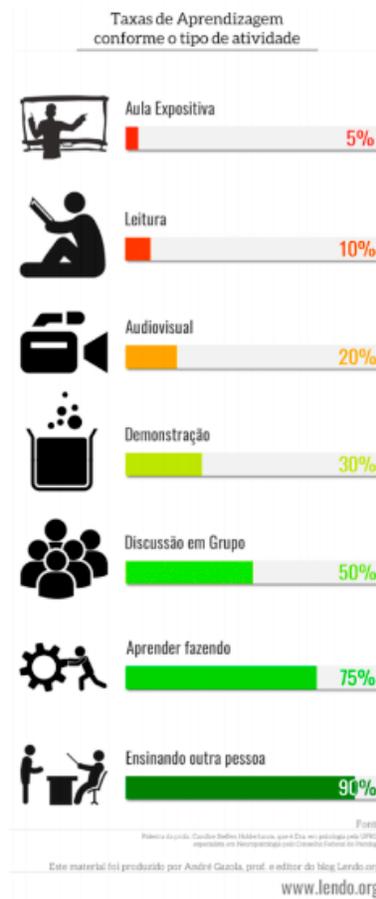


Figura 2 - Taxas de Aprendizagem
Fonte: GAZOLA, André (2015)

4 | CONCLUSÕES

Portanto, primeiramente é necessário verificar a facilidade de cada pessoa com relação ao seu aprendizado, o seu nível de Inglês e a sua disponibilidade em aprender Assim, poderá seguir um cronograma de estudo de acordo com o método mais apropriado e, conseqüentemente, ter um melhor rendimento e uma melhor aprendizagem, seja por ensinamentos de livros, aplicativos ou professores Todos com o mesmo objetivo, de te guiar, direcionar e ensinar.

REFERÊNCIAS

GAZOLA, André. **Estudar para o ENEM**, 2015. Disponível em: <https://www.lendo.org/como-estudar-enem>. Acesso em: 23 out. 2019.

JACOBS, Michael A. **Como Não Aprender Inglês: Erros comuns e soluções práticas**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2002. 272 p.

SCOTT, Evan. **The Science of Self-Learning: How to Learn Anything Faster, Remember More, and be More Productive**. Nova Iorque: Important Publishin, 2019. 135 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=icuDwAAQBAJ&lpg=PT2&dq=The%20Science%20of%20Self-Learning&hl=pt-BR&pg=PT2#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 23 set. 2019.

SILVA, L. O., et al., **Didatismo e Autodidatismo: Um auxílio no ensino e na aprendizagem da Matemática**; V Colóquio de Educação Matemática, UFJF, 2017. Disponível em: http://www.ufjf.br/coloquioedumat/files/2017/10/DIDATISMO-E-AUTODIDATISMO_-UM-AUXILIO-NO-ENSINO-E-NA-APRENDIZAGEM-DA-MATEMATICA.pdf. Acesso em: 22 mar. 2019.

SIMON, P. H.; ROLLWAGEN, A. F. **PERCEPÇÕES DE INTERATIVIDADE NO ENSINO DE LÍNGUA ESTRANGEIRA**. 2017. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Especialização em Linguagens e Tecnologias na Educação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Passo Fundo, 2017. Disponível em: <https://painel.passofundo.ifsul.edu.br/uploads/arq/201807021812461537622795.pdf>. Acesso em: 22 out. 2019.

CAPÍTULO 16

MODELAGEM DE PROCESSOS: UMA PROPOSTA DE MELHORIA PARA A ATUAÇÃO DAS EQUIPES DE SAÚDE DA ATENÇÃO BÁSICA

Data de aceite: 01/10/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Cristiane Oliveira de Santana

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/5850109313490132>

Ana Carla do Nascimento Santos

Universidade Federal de Sergipe

Simão Dias – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/9249364940901293>

Jislane Silva Santos de Menezes

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/4484686084492373>

Almerindo Nascimento Rehem Neto

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/0670543268890257>

Adriana de Melo Fontes

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/0298479335828468>

Gilson Pereira dos Santos Júnior

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/1921529260813959>

Jean Louis Silva Santos

Instituto Federal de Sergipe (IFS)

Campus Lagarto

Aracaju – Sergipe

<http://lattes.cnpq.br/2939386820411644>

RESUMO: O mapeamento dos dados em um processo é uma das ferramentas chave para realizar a modelagem desse processo. A fim de analisar o funcionamento do sistema de Atenção Básica de Saúde, foi realizado um estudo de contexto com o objetivo de coletar informações, e o mapeamento do processo para auxiliar na identificação das informações, e posteriormente análise do fluxo de todas as atividades. Assim, foi possível identificar que apesar da existência de Sistemas de Informação no Departamento de Saúde da Atenção Básica, os dados coletados não são recuperados de uma forma que otimize a tomada de decisão das equipes de saúde, quando se pensa em ações como programas de saúde em comunidades locais. Desta forma, este trabalho busca realizar a modelagem do cenário atual das atividades de uma Unidade Básica de Saúde (UBS), estudando os principais problemas neste ambiente, propondo assim, a melhor solução para auxiliar as equipes na tomada de decisão, nas ações de vigilância e nas intervenções governamentais, incluindo técnicas de georreferenciamento e geoprocessamento dos dados.

PALAVRAS-CHAVE: UBS. Modelagem de Processos. BPMN. Atenção Básica de Saúde. ABS.

PROCESS MODELING: AN IMPROVEMENT PROPOSAL FOR THE PERFORMANCE OF PRIMARY CARE HEALTH TEAMS

ABSTRACT: Data mapping in a process is one of the main tools to perform the modeling of that process. In order to analyze the behavior of the Primary Health Care system, a context study was carried out with the purpose of collecting information, mapping the process to assist in the identification of information, and later analysis of the flow of all activities. Thus, it was possible to identify that despite the existence of Information Systems in the Department of Health of Primary Care, the data collected are not recovered in a way that optimizes the decision making of health teams, when thinking about actions such as health programs in local communities. In this way, this work aims to perform the modeling of the current scenario of the activities of a Basic Health Unit (BHU), studying the main problems in this environment, thus proposing the best solution to assist teams in decision making, surveillance actions and government interventions, including georeferencing techniques and data geoprocessing.

KEYWORDS: BHU. Process Modeling. BPMN. Primary Health Care. PHC.

1 | INTRODUÇÃO

A saúde pública tem como objetivo principal organizar sistemas e serviços de saúde, para agir em fatores condicionantes e determinantes do processo saúde-doença, controlando a incidência de doenças nas populações através de ações de vigilância e intervenções governamentais [Cardoso et al. 2016].

O uso de ações de promoção da saúde consolida-se na Estratégia da Saúde da Família, reforçando os princípios do SUS, especialmente o da integralidade na atenção à saúde e o da participação social [Durant, 2013].

Com essa nova proposta na saúde pública, intensifica-se o atendimento e ações de controle de doenças. Apoiados com a construção da Unidade Básica de Saúde (UBS) em pontos estratégicos para atender diretamente a população de comunidades. Nestas comunidades, os pacientes são encaminhados para a UBS por intermédio do Agente Comunitário de Saúde (ACS).

O ACS é o membro da equipe que faz parte da comunidade, o que permite a criação de vínculos de forma natural, propiciando o contato direto do paciente com a equipe. Trabalham com a comunidade da área, do bairro, da cidade ou da região rural para facilitar o acesso da população à saúde e prevenir doenças. Ele visita regularmente residências e faz registros da população em fichas de atendimento, coletando informações para o acesso aos serviços de saúde, e sobre possíveis problemas de saúde que possam ser identificados na residência. Assim, o ACS deve orientar pessoas em relação à sua saúde, encaminhando ao posto de saúde ou outros locais de atendimento sempre que necessário [Brasil 2012].

Diante deste cenário, o objetivo principal do trabalho é a realização da análise e modelagem do cenário atual de uma UBS, estudando os principais problemas neste

ambiente, propondo, assim, uma solução automatizada para auxiliar as equipes na tomada de decisão, nas ações de vigilância e nas intervenções governamentais.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na fundamentação teórica deste trabalho, serão apresentadas as principais teorias e tecnologias. Na área da saúde, a importância do georreferenciamento dos dados e na tecnologia a construção de Modelos de Processo de Negócio – BPM utilizando a notação de Modelos de Processo de Negócio – BPMN.

2.1 Saúde pública, análise e georreferenciamento dos dados

A Atenção Básica (AB) se caracteriza por um conjunto de ações no âmbito individual e coletivo, realizadas por equipes multiprofissionais, que visam à promoção e proteção da saúde, à prevenção de agravos, ao diagnóstico, ao tratamento, à reabilitação e à manutenção da saúde. É considerada porta preferencial de acesso da população usuária do sistema. Segundo a Política Nacional de Atenção Básica (PNAB), as UBSs, com ou sem Programa de Saúde da Família (PSF), são indispensáveis à realização das ações de AB nos municípios [Brasil, 2012].

Assim, as UBSs que fazem parte da composição das Redes de Atenção à Saúde (RAS), devem dispor, minimamente, de equipes multiprofissionais compostas por médico, enfermeiro, cirurgião dentista, auxiliar de consultório dentário ou técnico em higiene dental, auxiliar de enfermagem ou técnico de enfermagem e agente comunitário de saúde, entre outros. Também podem contar com psicólogo, fisioterapeuta, farmacêutico, profissional de educação física, entre outros.

As RAS são arranjos organizativos de ações e serviços de saúde, de diferentes densidades tecnológicas que, integradas por meio de sistemas de apoio técnico, logístico e de gestão, buscam garantir a integralidade do cuidado [Brasil 2010]. Nesta circunstância, encontra-se o e-SUS Atenção Básica (e-SUS AB), uma estratégia do Departamento de Atenção Básica para reestruturar as informações da AB em nível nacional. O e-SUS AB faz referência ao processo de informatização qualificada em busca de um Sistema Único de Saúde (SUS) eletrônico [Brasil 2018a].

Com essa atualização dos processos do SUS, em busca da unificação dos dados da população por meio da informatização, nota-se uma problemática na visualização dos dados de uma maneira plana, ou quando pensado em visualização em mapa geográfico para localização de áreas que estão sendo acompanhadas. Por isso, o governo realiza este tipo de acompanhamento usando pesquisas, como a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS), que tem como objetivo realizar a coleta de dados domiciliar.

A PNS é uma pesquisa de base domiciliar, de âmbito nacional, fruto de

uma parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e com o Ministério da Saúde. A pesquisa tem uma periodicidade quinquenal [Brasil 2018b]. É composta por três questionários: o domiciliar, referente às características do domicílio; o relativo a todos os moradores do domicílio; e o individual, a ser respondido por um morador maior de 18 anos no domicílio. Seu objetivo principal é dar enfoque às principais doenças crônicas não transmissíveis, aos estilos de vida, e ao acesso ao atendimento médico. Os microdados, tabelas, notas técnicas e glossário estão disponíveis no site do IBGE [Brasil 2018b].

Porém, os dados coletados pela PNS não são suficientes para auxiliar na tomada de decisão, pois são números não mapeados por territórios. Uma vez que, pensar em uma gestão territorial implica, necessariamente, na subdivisão do território nacional.

A divisão do território deve considerar as características geográficas, populacionais, sociais, econômicas, culturais e epidemiológicas, de maneira que possua as particularidades mais similares possíveis.

Desta forma, o território passa a ter um papel fundamental e, em conjunto com o cadastramento das famílias vinculadas à UBS, produz-se uma grande quantidade de dados a respeito da população que reside no espaço, sendo necessária uma ferramenta mais adequada para armazenar e visualizar estas informações no sentido de subsidiar a tomada de decisões no processo de planejamento em saúde [Pinheiro et al. 2015].

As temáticas sobre território e tecnologia de informação têm sido consideradas cada vez mais importantes no âmbito da saúde. Dentre os diversos modelos de sistemas de informação, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem auxiliado especialistas comprometidos com o processo de territorialização nos municípios. As técnicas de geoprocessamento vêm sendo utilizadas no planejamento, monitoramento e avaliação das ações de saúde, além de serem consideradas como ferramentas importantes de análise das relações entre o ambiente e eventos relacionados à saúde [Müller et al. 2010]. O geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de técnicas computacionais necessárias para manipular informações espacialmente referidas. Esta tecnologia, aplicada à saúde coletiva, permite o mapeamento de doenças, a avaliação de riscos, o planejamento de ações de saúde e a avaliação de redes de atenção [Brasil, 2006].

2.2 Modelagem de processo de negócio

O termo *Business Process Management* (BPM) é a área de conhecimento que serve para definir, criar esboços, realizar a execução, criar registros, fazer a medição, monitoramento, controle e atualização dos processos de negócio, informatizados ou não, para alcançar resultados de acordo com os objetivos da

organização. Com a finalidade de elevar a organização das operações rotineiras e a transparência na direção estratégica, o gerenciamento de processos de negócio envolve todos os setores e níveis de uma empresa, do começo ao fim, buscando alcançar a definição, a melhoria e a gestão dos processos de negócio [Back 2016].

O ciclo do BPM proposto por Baldam et al. (2009) está estruturado em 4 fases: Planejamento, Modelagem e otimização de processos, Execução de processos e Controle e análise de dados. No Planejamento são definidos os processos estratégicos da organização e são analisados os pontos fracos que podem causar danos à organização. Também são definidos planos de ação para implantação [Baldam et al. 2009]. A modelagem de processos é a fase mais visível do BPM. Esta fase engloba atividades que permitem obter informações sobre o processo atual (As-Is) e sobre o modelo de processo futuro (To-Be). Para isso, é necessário compreender e documentar os processos e coletar informações como custo, recursos e tempo necessários para a sua realização [Baldam et al. 2009]. Na etapa de Execução, os processos são implementados e executados. Na fase de Controle e análise de dados são usados indicadores que geram informações que posteriormente realimentarão as atividades de otimização e planejamento [Baldam et al. 2009].

Segundo Smith e Fingar (2007), a aplicação do BPM nas organizações reformula toda a estrutura da organização, desde tarefas mais simples até as mais complexas. O BPM permite modelar o processo existente, testar variações, gerenciar melhorias e/ou inovações que a organização pretenda seguir e entregar os resultados com rapidez.

Para realizar a modelagem, usa-se *Business Process Model and Notation* (BPMN), uma notação gráfica que descreve a lógica das etapas de um processo comercial. Esta notação foi especialmente projetada para coordenar a sequência de processos e as mensagens que fluem entre os participantes de diferentes atividades. A simbologia usada pela BPMN é muito ampla, mas basicamente representa: eventos, atividades e decisões. Os benefícios trazidos com a modelagem de processos com BPMN, torna-o amplamente adotado nas organizações [Mariano 2012] [Ribeiro et al. 2015].

3 | JUSTIFICATIVA

Apesar da existência de Sistemas de Informação no Departamento de Saúde da Atenção Básica, percebe-se que essas informações ficam concentradas nos níveis mais estratégicos quando se pensa em ações como programas de saúde em comunidades locais. Muitas vezes o ACS não tem informações agrupadas da situação da sua microárea em relação a outras. Ou seja, não existe um *feedback*

das informações registradas nas visitas domiciliares por meio de relatórios informatizados.

Outro fato é a necessidade da Secretaria de Saúde Municipal analisar o comportamento espacial da sua comunidade, e georreferenciar os pacientes na região Centro Sul do estado de Sergipe. Para isto, é necessário desenvolver estratégias e ferramentas que auxiliem este tipo de análise. O georreferenciamento permite a visualização dos dados em mapa para localização de áreas que estão sendo acompanhadas. Por meio desta técnica, seria possível viabilizar ações de saúde em todo território da atenção básica. Benefícios como: controle epidemiológico e encaminhamentos de casos para regulação de forma adequada à necessidades e demandas regionais refletirão na melhoria de qualidade no atendimento na rede pública de saúde [Brasil 2014].

Assim, é necessário conhecer o comportamento atual do processo de registro de informações da atenção básica por meio do mapeamento dos dados e modelagem do cenário atual, para depois, propor uma solução otimizada que atenda as necessidades aqui apresentadas e auxilie as equipes na tomada de decisão, nas ações de vigilância e nas intervenções governamentais.

4 | METODOLOGIA

Este trabalho é caracterizado por um estudo de caso. A pesquisa é de natureza aplicada, pois envolve a utilização prática da metodologia sugerida para solucionar uma situação específica [Moresi 2003].

A coleta dos dados foi realizada por meio de observação direta intensiva, os dados são obtidos por meio de análise e acompanhamento da realização do processo, além de trechos de documentos e registros utilizados durante o processo e descrição de atividades. Esta técnica permitiu compreender as ações realizadas no contexto, durante atendimento ao paciente. Também foram realizadas entrevistas com as partes envolvidas no processo, análise de documentos e pesquisa bibliográfica.

Posteriormente, confeccionou-se a modelagem de processo de negócio As-Is utilizando a BPMN. O processo foi mapeado e validado pelas partes envolvidas.

Após este passo, foi realizada uma nova análise para modelar o processo To-Be, a fim de inserir sugestões de melhorias, apontando os ganhos aos envolvidos. E por fim, uma validação final para verificar viabilidade de implantação.

5 | ESTUDO DE CASO

Atualmente, segundo a PNS [Brasil, 2018b] juntamente com a análise dos

sistemas e- SUS-AB [Brasil 2018a], a necessidade de resultados rápidos e o aumento no controle de fluxo dos dados por meio da informatização dos sistemas de saúde está crescendo cada vez mais. Assim, ao analisar o cenário das Secretarias de Saúde do Brasil, é notória a atual reestruturação e unificação no controle dos processos.

Com base nisso, foi realizada a análise do processo de Atendimento Básico à Família, com dados observados na Secretaria de Saúde do Município de Lagarto-SE, a fim de identificar os principais problemas na sua estruturação.

Inicialmente foram identificadas as partes envolvidas no processo e com base em levantamento bibliográfico, como era realizado o mapeamento dos dados. Posteriormente, foi realizada uma reunião em uma UBS, onde foram entrevistados 5 responsáveis pela inserção dos dados no sistema. Também foram entrevistadas duas enfermeiras responsáveis pela equipe de ACS, e foi feito o acompanhamento de três ACS no âmbito de trabalho, no qual possibilitou observar as principais dificuldades enfrentadas pelos mesmos. Durante a reunião foram informados quais dados são inseridos no sistema e-SUS e como são recuperados, a fim de auxiliar nas campanhas de intensificação. Segundo os entrevistados, os dados cadastrados são retornados no sistema por meio de relatórios quantificados por índices. Por exemplo, quantidades de pacientes com doenças crônicas, ou quantidade de nascidos por mês, por microárea, dentre outros.

Atualmente, a Secretaria de Saúde municipal adota o cenário 2 do e-SUS AB, conforme Figura 1. Neste cenário a UBS é informatizada e os dados coletados pelos ACSs são enviados à UBS, que realiza o cadastro no sistema local. Posteriormente os dados são enviados à Secretaria por meio de arquivo de importação para serem encaminhados ao Sistema de Informação da Atenção Básica.

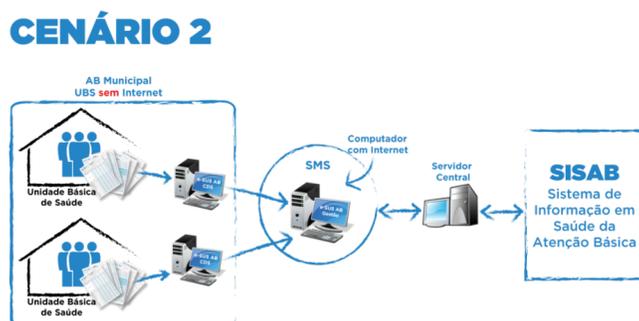


Figura 1. Representação do cenário de informatização da UBS.

O segundo passo foi acompanhar o ACS durante uma visita, onde é realizado

o preenchimento da ficha de visita domiciliar e territorial. Caso o paciente não tenha cadastro, ou finalizar um cadastro em caso de morte de um paciente, neste caso, o ACS notifica diretamente a Secretaria de Saúde.

Durante o preenchimento da ficha domiciliar é realizado o levantamento das doenças crônicas de cada integrante da família, como por exemplo diabetes e hipertensão. O ACS recebe solicitações dos pacientes para marcação de consulta ou realização de exames, as quais são analisadas e, posteriormente, é tomada a ação de agendar diretamente para o médico clínico geral ou encaminhar à enfermeira responsável pela UBS para anamnese.

Além disso, ao final de cada mês, o ACS participa de um encontro com as equipes (todos os ACS da microárea e enfermeiro responsável) responsáveis por aquela microárea, onde são pontuados os problemas da região para que sejam realizadas campanhas de intervenção.

O enfermeiro é o responsável pelo acompanhamento do ACS da microárea. Também é responsável por atender pacientes para realizar de anamneses, exames, promover campanhas de intervenção e enviar dados mapeados à Secretaria de Saúde.

Todo atendimento realizado ao paciente pelo enfermeiro ou médico é preenchido nas fichas de atendimento individual e de procedimentos, informando quais tipos de procedimentos foram realizados. Para as campanhas de intervenção, são preenchidas fichas de atividade coletiva informando quais atividades foram realizadas na microárea. Todas essas informações são encaminhadas mensalmente à Secretaria pelo enfermeiro responsável pela microárea para inserir os dados coletados no sistema.

Assim, ao mapear o processo descrito acima, nota-se a presença de 4 atores: ACS, enfermeiro, Secretaria de Saúde e Ministério da Saúde.

A Figura 2 apresenta o processo de coleta realizado pelo ACS, o recebimento das fichas físicas pelo enfermeiro que encaminha para cadastro na Secretaria Municipal de Saúde. Ao final dos cadastros, os dados são encaminhados ao Ministério da Saúde. Também foi informado durante o acompanhamento presencial do processo, que o acesso aos dados cadastrados é realizado por meio de relatórios de indicadores quantificados que não facilitam a tomada de decisão mais efetiva e pontual.

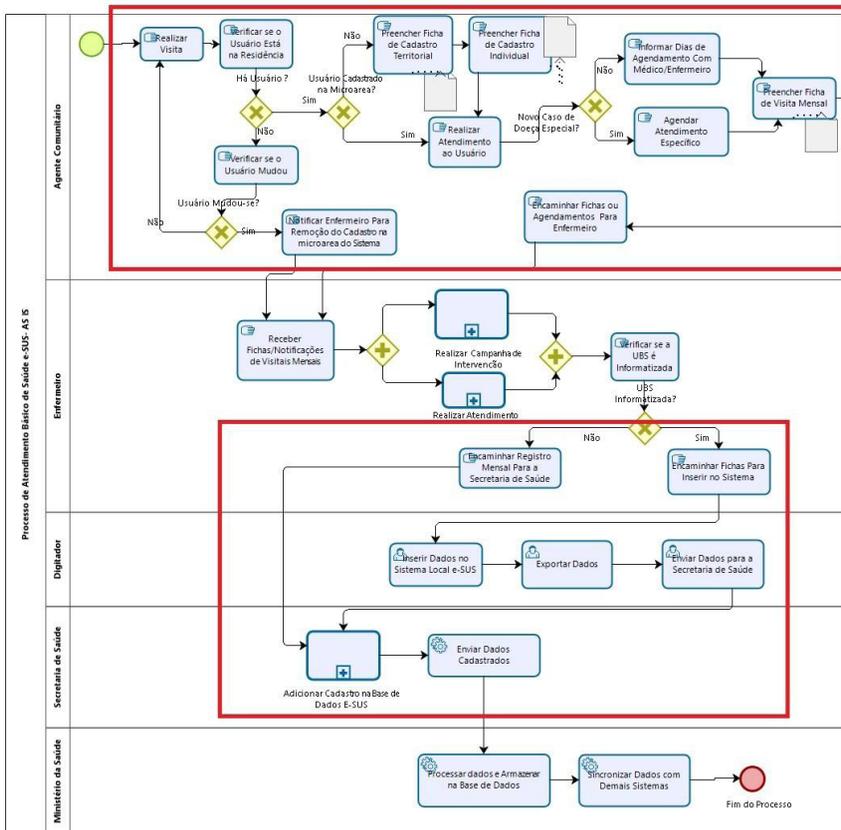


Figura 2. Modelagem do Processo de Coleta e Análise de Dados de Atenção Básica de Saúde – AS-IS

6 | MELHORIAS PROPOSTAS

Após uma análise minuciosa do processo de coleta e manipulação de dados da Atenção Básica de Saúde, nota-se um grande problema de retrabalho por meio dos ACSs e enfermeiros, os quais precisam fazer análises manuais para poder realizar campanhas de intervenção ou para agir na tomada de decisão. Isso se dá devido ao processo atual - AS IS, que demonstra a necessidade de impressões de fichas que são utilizadas nas visitas e atendimentos e o arquivamento das mesmas. A consulta posterior a estas fichas gera dificuldades em realizar análises, pois é preciso levantar dados para obter relatórios daquela microárea.

Considerando, a finalidade de agilizar o processo da coleta de dados, na marcação de consultas e realização das mesmas, bem como na análise de dados e redução de documentos impressos, como principal ponto de melhorias

no processo, sugere-se um sistema unificado de coleta de dados, que extinga a necessidade do preenchimento de várias fichas, e que não necessite de Internet para a coleta de dados, podendo ainda adicionar questões relacionadas a doenças e outros acompanhamentos específicos não contemplados pelo modelo atual das fichas e-SUS AB - onde para cada visita domiciliar é necessário preenchimento de três fichas, e para cada atendimento realizado por médico/enfermeiro também é necessário o preenchimento de mais três - propõe-se um sistema unificado de coleta de dados, um Sistema de Informação (SI) a ser usado pelo ACS, que não necessite o preenchimento de vários documentos e que seja independente de internet para a coleta de dados, ou seja, um sistema que funcione offline.

As fichas poderão ser impressas ao conectar com a Internet, de acordo com o modelo do e-SUS AB, assim como é realizado a sincronização dos dados para o sistema e podendo também realizar por meio da secretaria de saúde a sincronização diretamente para o sistema do e-SUS.

Além dessas melhorias, há também o georreferenciamento desses dados, que auxiliaria a Secretaria de Saúde e as equipes do ABS na tomada de decisão. A análise dos dados seria realizada de forma mais ágil, podendo ser visualizado por cada macroregião filtrando pelos problemas, sem a necessidade de analisar vários relatórios e fichas de coleta de dados.

A Figura 3 descreve graficamente as sugestões de alterações nesse processo de coleta, análise e georreferenciamento dos dados, trazendo agilidades para os usuários.

A primeira raia conta com as atividades desenvolvidas pelo ACS. As melhorias sugeridas estão na inserção dos dados diretamente no sistema, que será realizado durante a visita com uso de *smartphone* ou *tablet*. Caso o usuário tenha se mudado daquela microárea, é possível desvincular o mesmo da microárea. A depender das regras de cada município, é possível que cada ACS disponibilize de um quantitativo de vagas para agendamento médico, sendo assim, essa seria uma funcionalidade no sistema. No final de cada visita realizada, é viável que ao se conectar com Internet, realize a sincronização desses dados com o sistema local. Após a sincronização desses dados, o enfermeiro responsável pela microárea terá acesso para visualizar e analisar os dados a nível estratégico.

Na segunda raia, contém as atividades realizadas pelo enfermeiro. As principais melhorias estão na realização da análise desses dados e na simplificação do atendimento, com inserção dos dados no sistema local, sem a necessidade de preenchimento de várias fichas. O enfermeiro realiza reunião regularmente com as equipes, e nessas reuniões será possível analisar os dados que foram mapeados e que estarão georreferenciados no sistema local. Podendo fazer campanhas de intervenções com a análise simplificada desses dados.

A terceira raia contempla as atividades realizadas pela Secretaria de Saúde. Como atividade principal está a realização da integração de todos os dados mapeados e cadastrados por todas as equipes. Após essa integração, é realizada a atividade de geoprocessamento e georreferenciamento dos dados no sistema local. Logo após a sincronização com o sistema e-SUS AB, seguirá o fluxo normal que existe, sincronizando com o Ministério da Saúde e demais sistemas do governo.

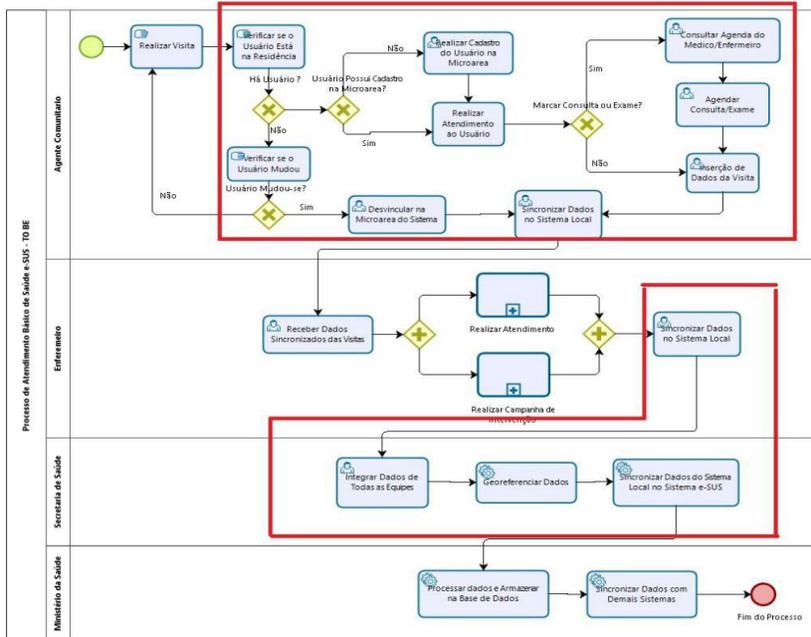


Figura 4. Processo que Descreve a Atividade de Campanha de Intervenção – to be

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho realizou a análise e a modelagem do cenário atual do funcionamento das equipes da Atenção Básica de Saúde, onde foi abordado o contexto por meio de estudo de caso e os principais problemas neste ambiente. A proposta de melhoria sugerida, por meio do modelo To-Be utilizando BPM, permite ações de vigilância e intervenções governamentais efetivas, além de facilitar a tomada de decisão por meio de visualização dos dados com técnicas de georreferenciamento e geoprocessamento dos dados.

Como trabalho futuro, pretende-se criar a documentação de requisitos do software e pesquisar a existência de sistemas próprios de código aberto que

apresentem características semelhantes que permitam uma adaptação.

REFERÊNCIAS

Back, T.J.I. 2016. “**A Importância da Modelagem dos Processos de Negócio Utilizando Business Process Model and Notation (BPMN): Um Estudo de Caso**”. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/84651>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

Baldam et al. **Gerenciamento de processo de negócios: BPM – Business Process Management**. 2a Ed. São Paulo: Érica, 2009.

Brasil, M.S. – Ministério da Saúde, 2010 – **portaria nº 4.279, de 30/12/2010**. Disponível em: <http://dab.saude.gov.br/portaldab/smp_ras.php>. Acesso em: 10 de Outubro de 2018.

Brasil, M.S., Básica, A. – Ministério da Saúde, 2018 – **e-SUS Atenção Básica**. Disponível em: <<http://dab.saude.gov.br/portaldab/esus.php>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2018.

Brasil, M.S., Saúde, P.N. – Ministério da Saúde, 2018 – **Pesquisa Nacional de Saúde (PNS)**. Disponível em: <<http://portals.saude.gov.br/vigilancia-em-saude/indicadores-de-saude/pesquisa-nacional-de-saude-pns>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2018.

Brasil, M.S. – Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Fundação Oswaldo Cruz. **Abordagens espaciais na saúde pública: Série Capacitação e Atualização em Geoprocessamento em Saúde**. Brasília: MS; 2006.

Brasil, M.S. – Ministério da Saúde, 2014. **Sesai realiza oficina sobre Sistema de Georreferenciamento da Saúde Indígena**. Disponível em: <<http://portals.saude.gov.br/component/content/article/15952>>. Acesso em: 08 de Abril de 2019.

Brasil, M.S. – Ministério da Saúde, 2018. **Política Nacional de Atenção Básica**. p. 47. <<http://189.28.128.100/dab/docs/publicacoes/geral/pnab.pdf>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2018.

Cardoso, M. C. B. et al. **Integrando As Vigilâncias Em Saúde: Relato De Experiência Sobre A Construção De Sistema De Informação De Vigilância Em Saúde Do Trabalhador**. Revista de Saúde Coletiva da UEFS, v. 6, n. 1, p. 26-30, 2016.

Carvalho, B. G. et al. **Gerência de unidade básica de saúde em municípios de diferentes portes: perfil e instrumentos gerenciais utilizados**. 2014. Revista da Escola de Enfermagem da USP, 48(5), 907-914.

Mariano, I. C. **Melhoria de Processos pelo BPM: Aplicação no setor público**. 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/65643>> Acesso em: 08 de Abril de 2019.

MORESI, Eduardo et al. **Metodologia da pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília, v. 108, p. 24, 2003.

MÜLLER, Erika Priscila Lisboa; CUBAS, Márcia Regina; BASTOS, Laudelino Cordeiro. **Georreferenciamento como instrumento de gestão em unidade de saúde da família.** *Revista brasileira de enfermagem*, v. 63, n. 6, p. 978-982, 2010.

Pinheiro, A. C.; Lima, E. M.; Batista, H. F. B. **Planejamento, Programação e Avaliação em Saúde.** Brasília: NT Editora, 2015.

Ribeiro, T. D. O., Drumond, G. M., Méxas, M. P., & Costa, H. G. **Benefícios do BPMN na Modelagem dos Processos: Um Estudo Exploratório.** In: **Simpósio de Engenharia de Produção**, 2015, Bauru, São Paulo. Anais do XXII Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, SP: UNESP, 2015.

Smith, H.; Fingar, P. **Business Process Management: the third wave.** Tampa: Meghan– Kiffer Press, 2007.

SOBRE A ORGANIZADORA

LILIAN COELHO DE FREITAS - Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Possui graduação em Engenharia da Computação pela Universidade Federal do Pará (2007) e mestrado em Computação Aplicada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFPA, obtido em 2009. Em 2008, realizou estágio de mestrado no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC/Porto - Portugal). Atuou como pesquisadora membro do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA/UFPA) de 2004 a 2014 e do Laboratório de Sensores e Sistemas Embarcados (LASSE/UFPA) de 2008 a 2012. Atuou como Pesquisadora Visitante no *Georgia Institute of Technology* (Atlanta, Georgia, Estados Unidos), no período de Março/2012 a Fev/2013. Tem mais de 50 trabalhos publicados, envolvendo publicações em livros, revistas e eventos científicos. Atualmente, é doutoranda do PPGEE/UFPA. Seus interesses de pesquisa são: telecomunicações (comunicações sem fio, rádio cognitivo) e *machine learning*.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Ação socioambiental 27

Alternative Transient Program (ATP) 88

Armazenamento de energia elétrica 129, 131, 138, 143, 144

Atenção básica de saúde 193, 201, 203

B

BPMN 193, 194, 195, 197, 198, 204, 205

C

Cálculo estrutural 16

Chuva 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

Compensações sociais 27

Custo operacional 66, 76

D

Descargas disruptivas 3

Desempenho dielétrico 1, 2, 13

Distribuição de energia 144

E

Eficiência energética 53, 54, 55, 56, 61, 62, 64, 66, 67, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 117, 127, 137, 144

Eletrobras 28, 33, 38, 39, 40, 58, 64, 65, 79, 86, 163

Eletronorte 27, 28, 31, 33, 38, 39, 40

Energia solar 66, 67, 68, 73, 76, 114, 115, 116, 127, 128, 136, 139, 141, 145

Energia solar fotovoltaica 66, 76, 127, 128, 136, 139, 141

Envoltórias 146, 148, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 183

Extração de parâmetros 174, 183, 184, 186

F

Filtro morfológico 146, 151, 152, 154, 157, 159

Funções de transferência 88, 89

G

Geração de energia 61, 63, 66, 67, 68, 71, 76, 84, 87, 129, 130, 139, 140, 141

Gerador síncrono 146, 149, 150, 153, 159, 187

H

Harmônicos 160, 161, 163, 164, 165, 167, 171, 172

HarmZs 89, 90, 98, 160, 161, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 172

Hidrogênio 129, 131, 132, 138, 139, 141, 142, 143, 144

I

Iluminação pública 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

Isoladores 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17

M

Máquina síncrona 147, 148, 149, 152, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 184, 185, 186

Modelagem de processos 193, 197

Modelo de acompanhamento 88, 93

Modelos racionais 88, 89, 90

O

Operador nacional do sistema elétrico 41, 133, 143, 161

P

Painéis fotovoltaicos 66, 69, 76, 84, 131, 136, 137, 142

Painéis solares flutuantes 129, 130

Perda de excitação 146, 147, 148, 152, 153, 154, 157, 158, 159

Plano de corte manual de carga 41, 42, 46, 48, 51

Potência ativa 47, 146, 148

Procedimentos de redes 160

Procel Reluz 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

Programa brasileiro de etiquetagem 56, 77, 78, 82, 86, 87

Q

Qualidade da energia 100, 103

R

Reatância 174, 175, 177, 178, 180, 183, 186

S

Sistema interligado nacional 15, 41, 119, 138, 161, 162, 171

U

UHE Tucuruí 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 38, 39, 40

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

**Engenharia Elétrica
e de Computação:
Atividades Relacionadas com
o Setor Científico e Tecnológico**
4