

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

JOÃO DALLAMUTA  
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN  
(ORGANIZADORES)

---

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

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

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
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 Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
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  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
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. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaidy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C697 Collection: applied electrical engineering / Organizadores  
João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta  
Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-858-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.585222801>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João  
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.  
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](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

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

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **A MODEL BASED DESIGN APPROACH FOR KNOCK CONTROL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING MACHINE LEARNING**

Eduardo Vieira Falcão

Vinicius Mafra Melo

Péricles Rezende Barros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228011>

### **CAPÍTULO 2..... 15**

#### **DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR DIMENSIONING AND ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

David Coverdale Rangel Velasco

Elivandro Tavares Lôbo

Welder Azevedo Santos

Wagner Vianna Bretas

Rodrigo Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228012>

### **CAPÍTULO 3..... 21**

#### **OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES MODULARES ATRAVÉS DO USO DE PSEUDO-MÓDULOS**

Augusto Cezar Boldori Vassoler

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228013>

### **CAPÍTULO 4..... 33**

#### **OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS**

Eduardo G. Silva

Alexandre S. Caporali

Cesar da Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228014>

### **CAPÍTULO 5..... 49**

#### **MAPAS COGNITIVOS FUZZY DINÂMICOS ADAPTATIVOS APLICADOS EM PROCESSO INDUSTRIAL**

Márcio Mendonça

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

Lucas Botoni de Souza

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Carlos Alberto Paschoalino

Michele Eliza Casagrande Rocha

Vicente de Lima Gongora

Ricardo Breganon

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Emanuel Ignacio García

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228015>

**CAPÍTULO 6..... 61**

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO SOBRE FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO EM ROBÓTICA MÓVEL

José Lucas Araújo dos Santos

Luciano Buonocore

Luiz Eugênio Santos Araújo Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228016>

**CAPÍTULO 7..... 74**

EFFECTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ESPAÑOLA

Paula Romo Santos

Begoña Lapeña Barrio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228017>

**CAPÍTULO 8..... 90**

INSTALAÇÃO DE MEDIÇÃO NOS ALIMENTADORES DAS SUBESTAÇÕES

Adalberto Leandro da Silva

Fabio Coelho de Santana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228018>

**CAPÍTULO 9..... 106**

PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO

Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228019>

**CAPÍTULO 10..... 114**

DIAGNÓSTICO, CRESCIMENTO E ATENUAÇÃO DE RISCOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM FAVELAS

Márcio Mendonça

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Wagner Fontes Godoy

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Carlos Alberto Paschoalino

Francisco de Assis Scannavino Junior

Vicente de Lima Gongora

Lucas Botoni de Souza

Michele Eliza Casagrande Rocha

José Augusto Fabri

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280110>

**CAPÍTULO 11..... 127**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UMA EDIFICAÇÃO DA CIDADE DE PORTO VELHO - RO**

Angelina Lidiane Moura Cunha  
Felipe Alexandre Souza da Silva  
Antonio Carlos Duarte Ricciotti  
Viviane Barrozo da Silva  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280111>

**CAPÍTULO 12..... 140**

**O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PALMAS - TO: ANÁLISE EM FUNÇÃO DO PONTO CARDEAL E VARIAÇÃO ANGULAR DAS PLACAS**

Aline Silva Magalhães  
Jabson da Cunha Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280112>

**CAPÍTULO 13..... 153**

**SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS**

Murilo Meneghetti Caramori  
Alexandre Dalla Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280113>

**CAPÍTULO 14..... 184**

**PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO**

Lucas Lapolli Brighenti  
Walbermark Marques Dos Santos  
Denizar Cruz Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280114>

**CAPÍTULO 15..... 198**

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS EM BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO**

Harison Franca do Santos  
Arthur Pimentel de Carvalho  
Carlos Toshiyuki Hiranobe  
Eduardo Roque Budenberg  
Gabriel Deltrejo Ribeiro  
Giovanni Barrera Torres  
Jose Francisco Resende  
Leonardo Lataro Paim  
Leandra Oliveira Salmazo  
Miguel Ángel Rodríguez Pérez

Renivaldo José dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280115>

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>210</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>211</b>

## A MODEL BASED DESIGN APPROACH FOR KNOCK CONTROL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING MACHINE LEARNING

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 07/10/2021*

### **Eduardo Vieira Falcão**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande – PB  
<http://lattes.cnpq.br/8249702768753558>

### **Vinicius Mafra Melo**

Universidade Federal da Paraíba  
João Pessoa – PB  
<http://lattes.cnpq.br/4978035137067732>

### **Péricles Rezende Barros**

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande – PB  
<http://lattes.cnpq.br/0722445222056063>

**ABSTRACT:** Knock is the byproduct of an abnormal combustion taking place in the combustion chamber and is associated to high vibration levels, undesirable noise, increased emissions and degraded fuel economy. Conventional control strategies address knock in a corrective fashion by tuning the spark timing in order to decrease in-cylinder pressure and temperature. Although effective in avoiding engine's prolonged exposure to the harmful vibratory forces, it may induce excessive spark retard and is implemented through a considerable number of calibrations. Recent breakthroughs on knock investigation show that knock intensity inherits random behavior and this statement plays a crucial role on how to appropriately design knock control laws. By leveraging this assumption using

machine learning concepts and treating knock occurrence as a classification problem, a logistic regression model dependent on in-cylinder pressure, compressed mixture temperature and engine RPM is defined. The Likelihood Ratio Test is performed to validate the suggested hypothesis and McFadden's pseudo-R<sup>2</sup> is calculated to quantify its accuracy. By leveraging the hypothesis stated, a proportional gain feedback control is designed to account for steady state operation of combustion engines around a target knock rate. Simulation results show the performance of both logistic regression model and proportional gain knock control against a conventionally defined knock control.

**KEYWORDS:** Engine Knock, Logistic Regression, Machine Learning, Model based Design.

**RESUMO:** Knock é o subproduto de uma combustão anormal ocorrendo na câmara de combustão e está associado a altos níveis de vibração, ruído indesejável, aumento de emissões e economia de combustível degradada. As estratégias de controle convencionais tratam da detonação de maneira corretiva, ajustando o tempo de ignição para diminuir a pressão e a temperatura no cilindro. Embora eficaz em evitar a exposição prolongada do motor às forças vibratórias prejudiciais, pode induzir retardo de ignição excessivo e é implementado por meio de um número considerável de calibrações. Avanços recentes na investigação de knock mostram que as variações na intensidade de knock herdaram comportamento aleatório e esta declaração desempenha um papel crucial em como projetar apropriadamente as leis de controle para conter

ou minimizar o fenômeno. Aproveitando essa suposição usando conceitos de aprendizado de máquina e tratando a ocorrência de knock como um problema de classificação, um modelo de regressão logística dependente da pressão no cilindro, temperatura da mistura comprimida e RPM do motor é definido. O Teste da Razão de Verossimilhança é realizado para validar a hipótese sugerida e o pseudo-R<sup>2</sup> de McFadden é calculado para quantificar sua precisão. Aproveitando a hipótese declarada, um controle de feedback de ganho proporcional é projetado para levar em conta a operação em estado estacionário dos motores de combustão em torno de uma taxa de knock alvo. Os resultados da simulação comparam o desempenho do modelo de regressão logística e do controle de detonação de ganho proporcional em relação a um controle de detonação definido convencionalmente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Batida de motor, Regressão Logística, Aprendizagem de Máquina, Desenvolvimento baseado em Modelos.

## 1 | INTRODUCTION

Knock is the audible noise that results from spontaneous ignitions that take place in the unburned zone of the air-fuel mixture enclosed in the combustion chamber and mainly characterized by fast heat releasing chemical reactions (Kiencke and Nielsen, 2005). As torque demand increases, spark timing has to be adjusted in a way that part of the combustion process is proportionally shifted towards the compression stroke in order to deliver more power. This leads to an increase in both temperature and pressure inside the cylinder as well as formation of hot spots in the combustion chamber. These conditions, occasionally, provide the reactive radicals in the fuel molecules with sufficient activation energy to ignite spontaneously. This causes an insufficient pressure equalization within the combustion chamber and high vibration levels are induced in the engine due to the fast expanding flame front colliding with cylinder wall, valves, spark plug and piston head but also from the spontaneous ignition flame front collision with the spark plug ignited flame front. Besides the harmful vibration levels that can damage engine components and undesirable noise, it is also associated to NO<sub>x</sub> formation (Jones et al., 2013).

Different control strategies were developed to address engine knock. A standard approach in the automotive industry is to retard the spark timing upon knock detection and incrementally advance it. This prevents engine's long exposure to the vibratory forces but sacrifices engine efficiency. Such a corrective approach bases itself on the statement that engine knock is a deterministic phenomenon when, in fact, knock intensity possesses strong random nature (Selmanaj et al., 2018). This baseline leads to the conclusion that for an effective control law to be designed there has to be a model that approaches the problem in accordance to the appropriate mathematical framework.

Logistic regression is a powerful predictive analysis technique that attempts to describe the relationship between one dependent categorical random variable and measurable quantities that correlate with it. By addressing knock occurrence as a classification problem

and defining a convenient features vector, it becomes feasible to apply logistic regression to compute statistical models in order to infer how engine knock is unraveling during its operation and define controllers that can prevent spark timing variability upon knock occurrence by maintaining engine operation around a target knock rate.

The work described in the following sections details the development of a predictive proportional gain knock control for internal combustion engines using logistic regression. Section 2 details engine knock and how it is traditionally addressed. Section 3 describes how logistic regression applies to knock detection and Section 4 describes the naturally aspirated combustion engine model. Section 5 shows how both conventional and proposed control strategies behave under the described control approach and Section 6 provides with information about next steps.

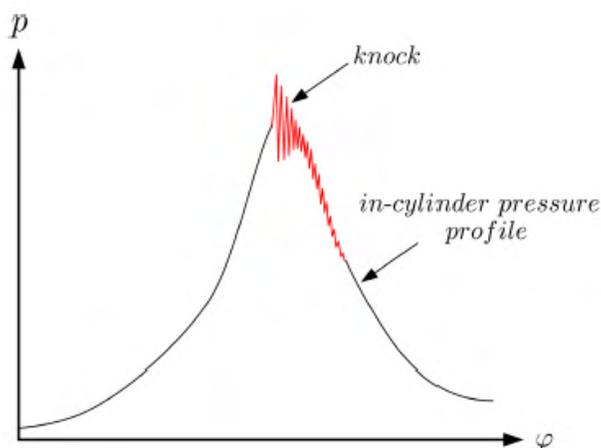


Figure 1: Typical in-cylinder pressure profile for a knocking cycle as function of crankshaft angle  $\phi$ . In red, the sharp pressure peak caused by the fast heat releasing combustion from spontaneous ignitions.

## 2 | ENGINE KNOCK

Knock is defined as the typical sound that may arise when spontaneous ignitions take place in the engine's cylinders causing rapid heat releasing chemical reactions. Figure 1 depicts the typical oscillations in the in-cylinder pressure profile during a knocking cycle. These oscillations induce vibration levels in the engine components such as piston head, valves and connecting rod. A number of attributes play a significant role on the occurrence of knocking cycles including aspirated air pressure and temperature, cylinder geometry, fuel composition and humidity (Guzzella and Onder, 2010). Upon detection of a knocking cycle the controller acts in a way to limit engine performance for the forthcoming cycles and prevent further abnormal combustion.

The torque chain of a combustion engine powered vehicle comprises both slow and

fast paths where the former refers to the air mass ow control and the latter relates to the spark timing. Adjustments in the torque chain are done to account for optimal vehicle driveability and safety compliance. Tuning the spark timing in the context of knock avoidance means retarding the combustion process beyond the optimal timing for maximum engine efficiency to be achieved. In general, the automotive industry addresses knock mitigation by means of the control law described in Equation 1 (Kiencke and Nielsen, 2005)

$$\phi(n) = \phi(n - 1) - \Delta\phi + \beta\Delta E_k(n) \quad (1)$$

Where  $\phi(n)$  is the spark angle for the  $n$ th cycle,  $\Delta\phi$  the incremental spark advance and  $\beta\Delta E_k(n)$  the spark retard applied upon a knocking cycle based on the knock intensity above a threshold  $E_0$ ,  $\Delta E_k(n) = E_k(n) - E_0$ . In other words, retard is applied to the spark timing upon knock occurrence and incrementally advanced in case of increasing vehicle load. This behavior is depicted in Figure 2. Knock has increased severity as load increases and engine speed decreases (Jones et al., 2013) and for higher knock rates, the control law described in Equation 1 leads to substantial variability of the actuator signal. The main downside of this approach lies on the fact that heavy knocking conditions lie in a region of engine operation of optimal fuel economy.

Considering the importance of maximizing the efficiency of combustion engines due to both environmental and driver experience reasons, a number of alternative knock control approaches were proposed throughout the recent years including standard deviation knock occurrence control (Schmillen and Rechs, 1991) and the use of fuzzy sets for spark timing adjustment (Yue and Li, 2004). In fact, the assumption of knock random nature plays a crucial role on knock control advancements and its strong correlation with peak in-cylinder pressure (Lezius and Drewelow, 2007) further supports the usage of a probabilistic framework on the definition of knock controllers.

By leveraging this concept and recent studies on how machine learning techniques can be conveniently applied to forecast knocking conditions (Panzani et al., 2017), this work delivers further research on how to alternatively address the phenomenon.

### 3 | LOGISTIC REGRESSION APPLIED TO KNOCK DETECTION

Assuming knock occurrence as a random variable with two possible outcomes, it is possible to define the knock signal  $k(n)$  as (Panzani et al., 2017)

$$k(x) = \begin{cases} 1, & E_k(n) > E_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Given that  $k$  follows a Bernoulli distribution, its prediction defines a classification problem. One can leverage logistic regression in order to perform statistical inferences about how knocking conditions unravel by cyclically calculating log-linear models to accurately estimate the probability  $p$  of ending up with a knocking cycle. Log-linear models are of the

form

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n = \theta \quad (3)$$

Where  $\theta$  is the linear predictor. The probability  $p$  modeled by the logistic function is

$$p = P(k = 1|X) = \frac{e^\theta}{1+e^\theta} \quad (4)$$

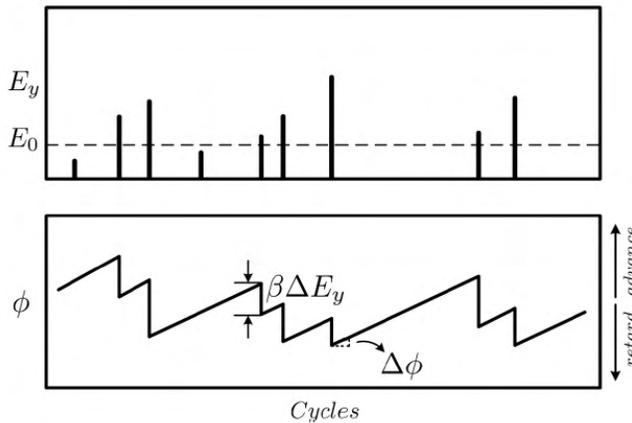


Figure 2: Conventional controller operation sketch (Kiencke and Nielsen, 2005)

The logistic function is defined by the unknown parameter  $\beta_0$  and  $\beta=[\beta_1 \beta_2 \dots \beta_n]^T$  and the features vector  $X=[x_1 x_2 \dots x_n]$ . The value of  $p$  is determined based on the estimation of the unknown that maximize the likelihood function  $L(\beta_0, \beta|x)$  relative to the respective probability density function of the random variable  $k$ , and based on a set of  $n$  observations,

$$L(\beta_0, \beta|x) = \prod_{i=1}^n p^{y_i} (1-p)^{1-y_i} \quad (5)$$

To ease the computational effort in estimating the unknown parameters it is possible to leverage the monotonic property of the logarithm function. In this case, the log-likelihood function  $l(\beta_0, \beta|x)$  is maximized instead, whose defies the cost function

$$l(\beta_0, \beta|x) = \sum_{i=1}^n \ln(1-p) + \sum_{i=1}^n y_i \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \quad (6)$$

The log-linear model proposed in this work is defined by features that correlate with knock occurrence and in order to validate it, a 1.3 liter naturally aspirated SI engine high pressure is modeled. The engine model encompasses combustion, heat transfer and piston kinematics models as well as a knock generator that draws the knock signal based on peak in-cylinder pressure values, a quantity that strongly correlates with knock intensity (Lezius and Drewelow, 2007).

## 4 | INTERNAL COMBUSTION ENGINE MODEL

The 1.3 liter naturally aspirated internal combustion engine model encompasses the compression and expansion strokes of a four stroke spark ignited engine. Its parameters are described in Table 1.

In this model it is assumed that the torque generation can be taken as a lumped parameter process such that the gas states are not space dependent and the laws for ideal gases can be applied, characterizing an one-zone-model.

Rated Engine Parameters	
Displacement volume [L]	1.3
Number of cylinders	4
Compression ratio	13.2:1
Piston bore [mm]	70

Table 1: 1.3L naturally aspirated spark ignited engine specification

According the first law of thermodynamics

$$dU = dQ - pdW \quad (7)$$

Where  $dU$  and  $dQ$  are the incremental quantities for internal energy and supplied heat, respectively, and  $pdW$  the related mechanical work. For a combustion engine model dependent on the crankshaft angle  $\varphi$  the energy balance from Equation 7 can be described in terms of released and transferred heat, fuel properties and piston displacement as (Isermann, 2014)

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ_f}{d\varphi} - p \frac{dV}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} \quad (8)$$

Where  $Q_f$  is the gross released heat from combustion,  $Q_w$  the heat convectively transferred to the cylinder walls,  $m_f$  the fuel mass,  $V$  the cylinder volume and  $p$  the in-cylinder pressure. For the internal energy of the enclosed gas at constant volume, holds

$$\frac{dU}{d\varphi} = m_g c_v \frac{dT_g}{d\varphi} \quad (9)$$

with  $m_g$  and  $T_g$  denoting the mixture mass and temperature, respectively, and  $c_v$  the specific heat at constant volume. Equation 9 assumes that the air-fuel mixture is homogeneous and completely atomized. Based on the ideal gases equation and assuming stationary ideal gas constant  $R$ , the derivative of Equation 9 w.r.t. the crankshaft angle is

$$m_g R \frac{dT_g}{d\varphi} = \left( \frac{dp}{d\varphi} V + p \frac{dV}{d\varphi} \right) \quad (10)$$

Plugging Equation 10 in Equation 9,

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{c_v}{R} \left( \frac{dV}{d\varphi} V + p \frac{dV}{d\varphi} \right) \quad (11)$$

Finally, inserting Equation 11 in Equation 8 and solving for the incremental pressure changes yields

$$\frac{dp}{d\varphi} = \frac{R}{c_v V} \left( \frac{dQ_f}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - \left( 1 + \frac{c_v}{R} \right) p \frac{dV}{d\varphi} \right) \quad (12)$$

Figure 3 shows different in-cylinder pressures profiles for different spark advances w.r.t the Top Dead Center of the compression stroke. Positive spark advances mean that the spark timing happens during the compression stroke.

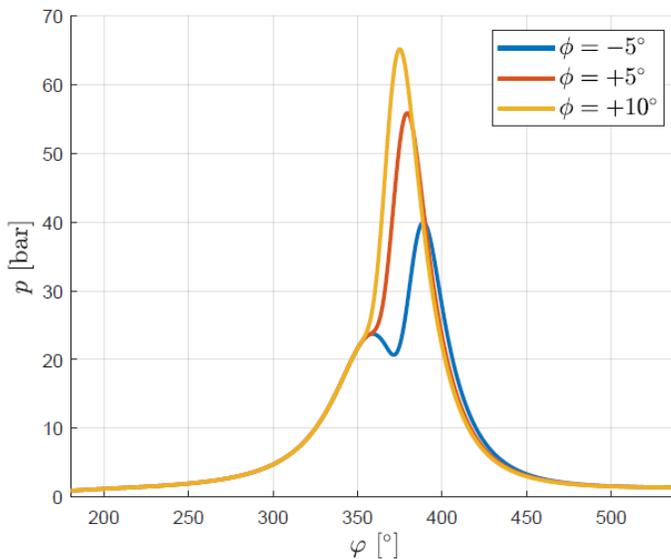


Figure 3: In-cylinder pressure profiles for different spark advance angles  $\phi$

The more spark advance added the greater the peak in-cylinder pressure. Since the compression stroke can be modeled as a polytropic process with sufficient accuracy (Eriksson and Andersson, 2002), the temperature of the homogeneous mixture  $T_g$  can be defined as

$$T_g = T_{IVC} \left( \frac{p}{p_{IVC}} \right)^{k-1} \quad (13)$$

Where  $T_{IVC}$  and  $p_{IVC}$  are the intake manifold air temperature and pressure measured at intake valve closure and  $k$  is the polytropic coefficient. The Equation 12 includes a heat exchange model as well as models for the crankshaft kinematics and the specific

heat for constant volume cv. In this work the Wibe function (Wiebe, 1956) is leveraged in order to estimate the fuel burn rate. It is derived from fuel and combustion properties such as fuel lower heating value  $Hl$ , the combustion duration  $\Delta\varphi_{cd}$  and start and end of combustion angles  $\varphi_{soc}$  and  $\varphi_{eoc}$  respectively. The derivative of the Wibe function yields the combustion heat release rate  $\frac{dQ_f}{d\varphi}$

$$\frac{dQ_f}{d\varphi} = a(m + 1)Hl \frac{\Delta mf}{\Delta\varphi_{cd}} \varphi_{rel}^m e^{-a\varphi_{rel}^{m+1}} \quad (14)$$

The heat transfer to the cylinder walls as well as piston crown can be modeled through the basic equation for one-dimensional conduction (Isermann, 2014)

$$\frac{dQ_f}{d\varphi} = \frac{1}{\omega eng} \zeta A (T_g - T_w)$$

With  $\omega eng$  the engine speed in  $\frac{rad}{sec}$  and  $A$  the heat transfer effective area. The heat transfer coefficient  $\zeta$  is given by (Hohenberg, 1980)

$$\zeta = 130 Vd^{-0.06} p^{-0.8} Tg^{-0.4} (vp + 1.3)^{0.8} \quad (16)$$

where  $Vd$  is the displacement volume and  $vp$  the mean piston speed. The average cylinder wall temperature  $T_w$  can be estimated based on the air excess factor  $\lambda$ , engine speed  $neng$  in RPM and piston bore  $D_{pist}$  (H. and H., 1971). The incremental change in the cylinder volume relates to the crankshaft radius  $r_{cs}$  and connecting rod length  $l_{cr}$  by:

$$\frac{dV}{d\varphi} = \frac{Vd}{2} (\sin\varphi + \frac{\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin 2\varphi}{2\sqrt{1 - (\frac{r_{cs}}{l_{cr}} \sin\varphi)^2}}) \quad (17)$$

## 4.1 Model Validation

In order to validate the accuracy of the combustion engine high pressure cycle model, different wide open throttle operating conditions were simulated and compared against results from dynamometer experiments. Each experiment was carried out during 30 seconds by keeping engine speed constant and slightly rich air-fuel ratios using the fuel blend advertised as E22 (22% hydrous ethanol, 78% gasoline). For each run, the peak in-cylinder pressure values were measured in each cycle and from where the average peak in-cylinder pressure  $P_{MAXavg}$  and maximum peak in-cylinder pressure  $P_{MAX}$  quantities were calculated. The Figure 4 depicts how the estimated peak in-cylinder pressure by the model,  $p_{max}$ , compares to  $P_{MAXavg}$ . Since no friction losses are taken in consideration, the pressure value is the indicated mean effective pressure, or IMEP.

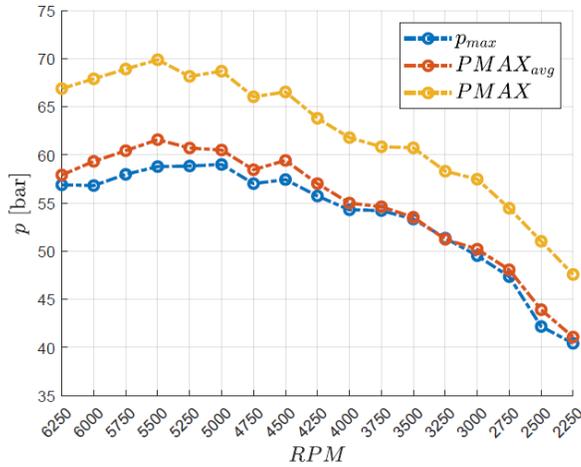


Figure 4: Internal combustion engine model validation against dynamometer data for different engine speeds with fuel E22

## 5 I HYPOTHESIS ASSESSMENT

The idea of correlating measurable quantities and knock occurrence with the intent of predicting the probability of ending up with a knocking cycle was first introduced through the formulation of a features vector composed by the intake manifold temperature at intake valve closure, engine speed and a few coefficients for the in-cylinder pressure trace that represent the projection of the pressure profile in the eigenpressures identified through Principal Component Analysis (Panzani et al., 2017). In this work, the features vector is alternatively defined by the peak in-cylinder pressure,  $p_{max}$ , unburned air-fuel mixture temperature at 10% of burned fuel mass fraction,  $T_{10\%}$ , and engine speed  $n_{eng}$  in RPM. The log-linear model for the alternative hypothesis is, thus, given by

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 p_{max} + \beta_2 T_{10\%} + \beta_3 n_{eng} \quad (18)$$

The motivation behind the definition of the loglinear model in Equation 18 as being dependent on the unburned air-fuel mixture temperature lies on the fact that spontaneous ignitions take place in the end gas of the combustion chamber (Isermann, 2014). The 10% threshold indicates beginning of combustion, after a development delay (Urlaub, 1988), and is taken as a convenient instant to better describe the temperature at which the combustion takes place.

### 5.1 Hypothesis Test and McFadden's pseudo- $R^2$

The hypothesis that describes Equation 18, namely  $H_a$ , represents an alternative approach to describe how knocking conditions unravel during engine's dynamic operating conditions. Test procedures such as the Likelihood Ratio test have to be carried out in order

to determine the consistency of  $H_a$  towards a hypothesis which, prior to the test, is taken as a true statement for the phenomenon investigated and known as null hypothesis, or  $H_0$  (Christensen, 1997). By stating a null hypothesis model  $H_0$  whose parameters  $\beta$  are a subset of those from  $H_a$ , the  $G^2$  statistic defined as

$$G^2 = -2(l_0 - l_1) \quad (19)$$

is calculated. Based on Wilks Theorem (Wilks, 1938), Equation 19 approaches a  $\chi^2$  distribution for a large number of samples used to calculate  $l_0$  and  $l_1$  (Christensen, 1997). Given the significance level  $\alpha$  and the number of degrees of freedom  $df$  of the Likelihood Ratio Test states that if the alternative model holds, then  $G^2 > \chi^2$  and we can reject  $H_0$ .

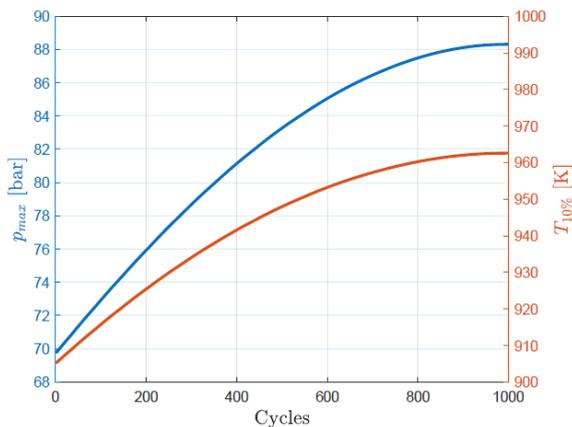


Figure 5: SI engine model data set for  $p_{max}$  and  $T_{10\%}$  used to calculate the  $G^2$  statistic.

To perform the hypothesis test, a 1000 cycles wide open throttle simulation undertaking a linear increase in engine speed from 2000 to 5000 RPM at slightly rich air-fuel mixture and normal temperature and pressure conditions was carried out. Figure 5 depicts how  $p_{max}$  and  $T_{10\%}$  increase during the driving cycle. In the test conducted, the null hypothesis is the intercept model

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 \quad (20)$$

which represents the expected mean value of  $k$  for the  $n = 1000$  cycles considered. The data set produced by the simulation leads to the calculation of  $l(\beta_0, \beta_1 | x) = -686,64$  and  $l(\beta_0, \beta_1) = 584,40$  yielding the  $G^2$  statistic  $G^2 = 276,47$ . Establishing a significance level of  $\alpha = 5\%$ , the null hypothesis can be rejected if the value of the respective  $\chi^2$  distribution with number of degrees of freedom  $df = 3$ , the dimension of the features vector  $\mathbf{X}$ , is less than  $G^2$ . Since  $\chi^2(df = 3)$  for  $\alpha = 5\%$  is approximately 7.81, we can reject the null hypothesis and consider  $H_a$  as a valid assumption.

Coefficients of determination are calculated to quantify the performance of statistical models on describing the variance of a given random variable. For dichotomous random variables, McFadden's pseudo- $R^2$ ,  $R_M^2$  is calculated:

$$R_M^2 = 1 - \frac{l_1}{l_0} \quad (21)$$

Good statistical models will produce values in the range  $0.2 \leq R_M^2 \leq 0.4$ . For the exposed data set,  $R_M^2 = 0.22$ , indicating that the model is a good fit.

## 5.2 Simulation

Performance evaluation for both alternative and null hypothesis on knock probability estimation was conducted in a 1000 cycles wide open throttle simulation at 2500 RPM for fuel blend E22, all the while inducing a dynamic behavior w.r.t. the spark advance and a linear increase in engine speed as in the hypothesis test. Knock events were generated based on knock occurrence probabilities drawn from a table indexed by peak in-cylinder pressure values. At each cycle an uniformly distributed random number within the range  $[0, 1]$  is generated and compared to the knock probability at that operating condition, outputting  $k = 1$  whenever it doesn't exceed the mapped probability. Figure 6 depicts the behavior of the knock generator.

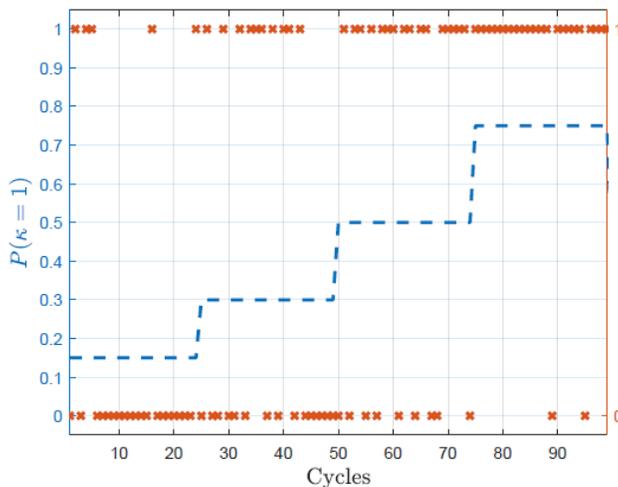


Figure 6: Knock generator behavior

The simulation results are shown in Figure 7. The hypothesis  $H_a$  has better performance regarding tracking variations in the knock probability when compared to the null hypothesis, as expected. Given that the null hypothesis outputs the mean knock occurrence observed within the windowed cycles, its performance is conditioned to observations made on  $k$  only. On the other hand, since  $H_a$  relies on the set of features  $p_{max}$ ,  $T_{10\%}$  and  $w_{eng}$ ,

it is possible to fast track how knocking conditions are evolving, where the reference value is the knock probability fed into the knock generator.

## 6 I ALTERNATIVE KNOCK CONTROL

In order to leverage the information contained in the log-likelihood function  $l(\beta_0, \beta_1, x)$  an alternative control law is hereby proposed. Instead of approaching knock control in a corrective fashion as in Equation 1, one can accurately calibrate the knock intensity threshold  $E_0$  and allow for light knock to occur sporadically without damaging engine components nor degrading driver's experience and, thus, maximize engine efficiency. By defining the error signal  $e_l = e_l(\beta_0, \beta) - e_{l_{tgt}}$  where  $e_{l_{tgt}}$  is given by the target loglikelihood for a given target knock rate  $t_k$

$$e_{l_{tgt}} = \ln(t_k^{n_{tk}}(1 - t_k)^{n(1-t_k)}) \quad (22)$$

it is possible to design a proportional gain closedloop controller whose gain is tuned in a way that the spark advance adjustments follow the dynamic behavior of the log-likelihood function.

### 6.1 Simulation

The simulation carried out in Figure 8 depicts the steady state behavior for both conventional controller and proposed controller for a rather high target knock rate of  $t_k = 10\%$ . The quantities  $\beta \Delta E_y$  and  $\Delta \phi$  in Equation 1 were tuned in a way to achieve such a target. The Table 2 describes the fixed spark retard and advance gains as well as the proportional gain  $K$  for the proposed controller.

Conventional Control	Proposed Control
$\Delta \phi = 0,2^\circ$	$K = 0.01$
$\Delta E_y = 2^\circ$	

Table 2: Spark advance correction quantities for the conventional knock controller and proportional gain for proposed controller.

The Figure 7 shows how the proportional gain controller behaves upon request to control the target knock rate around  $t_{\_}$ . The initial spark advance is  $12^\circ$ , the maximum spark advance for nonknocking cycles at 2000 RPM. The conventional knock control is not ideal for this purpose due to the high variability it induces in the spark advance. To meet torque demand, the control unit has to compensate the retarded spark timing by either rapidly advancing it or adjusting the induced air and fuel injected into the cylinder, and this may have a negative impact in fuel economy for extended engine operation in knocking conditions. On the other hand, the proportional gain controller acts upon changes in the log-

likelihood, which is computed based on data cyclically updated during the simulation. For this particular run, the window size was  $n = 200$ .

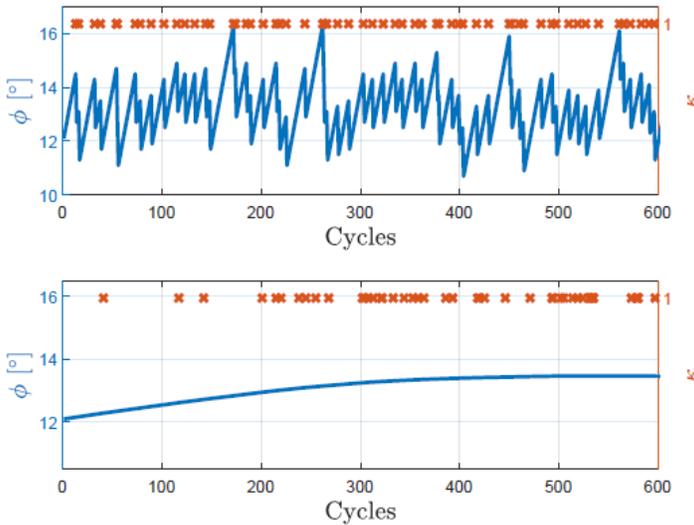


Figure 7: Performance comparison of both controllers for target knock rate  $t_k=10\%$ . High variability of the actuator signal is induced in the conventional controller whereas negligible variability is induced by the proposed controller

It is able of keeping track of how prone the engine is to run into undesirable knocking conditions and slowly adjusts the spark advance to meet the target without overshooting the actuator signal. By keeping the air-fuel-ratio constant, an average indicated torque of 185 Nm was achieved. However, torque variability for the conventional control was 31.3 Nm whereas the proposed controller had negligible variance not considering the transient response.

## 7 | CONCLUSION

This work further concludes that based on the assumption of knock occurrence behaving as a categorical random variable, and addressing engine knock as a classification problem, it is possible to accurately quantify the cyclical knock probability along a driving cycle through data analysis of quantities such as in-cylinder pressure, temperature and engine speed. The Likelihood Ratio Test evidences the relevance of the alternative hypothesis and the simulation results show how it outperforms the null hypothesis. Further work has to be done in, first, expanding the combustion engine model to incorporate air-fuel ratio control and enable fuel economy analysis followed by validation of the proposed strategy in a test bench. Then, better control strategies will be evaluated in order to provide with a quicker response for transient operation. Next studies will also assess how it is possible to leverage

artificial neural networks to accurately predict knocking cycles.

## REFERENCES

Christensen, R. (1997). **Log-Linear Models and Logistic Regression**, Springer texts in statistics, 2nd edn, Springer.

Eriksson, L. and Andersson, I. (2002). **An analytic model for cylinder pressure in a four stroke SI engine**, Society of Automotive Engineers, Inc.

Guzzella, L. and Onder, C. (2010). **Introduction to Modelling and Control of Internal Combustion Engines**, Springer.

H., M. and H., B. (1971). **Programmierte Auswertung von Druckverlaufen in Ottomotoren**, VDI.

Hohenberg, G. (1980). **Experimentelle Erfassung der Wandwarme von Kolbenmotoren**, PhD thesis.

Isermann, R. (2014). **Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines**, 1st edn, Springer.

Jones, J., Spelina, J. and Frey, J. (2013). **Likelihood-based control of engine knock**, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 6

Kiencke, U. and Nielsen, L. (2005). **Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle**, 2nd edn, Springer.

Lezius, U. and Drewelow, W. (2007). **Improvements in knock control**, IAV GmbH, University of Rostock/Institut of Automation

Panzani, G., Ostman, F. and Onder, C. (2017). **Engine knock margin estimation using in-cylinder pressure measurements**, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 1,

Schmillen, K. and Rechs, M. (1991). **Different methods of knock detection and knock control**, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan

Selmanaj, D., Panzani, G., Dooren, S., Rosgren, J. and Onder, C. (2018). **Adaptive and unconventional strategies for engine knock control**, IEEE Transactions on Control Schemes

Urlaub, A. (1988). **Internal combustion engine fundamentals**, McGraw-Hill, New York.

Wiebe, I. (1956). **Semi-empirical expression for combustion rate in engines**, Proceedings of Conference on Piston engines, USSR

Wilks, S. S. (1938). **The large-sample distribution of the likelihood ratio for testing composite hypotheses**, The Annals of Mathematical Statistics.

Yue, S. and Li, P. (2004). **Automatic knock control system**, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation

## DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR DIMENSIONING AND ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 01/12/2021*

### **David Coverdale Rangel Velasco**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

### **Elivandro Tavares Lôbo**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/3664388491683265>

### **Welder Azevedo Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/8847175700677292>

### **Wagner Vianna Bretas**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/0842599717842402>

### **Rodrigo Martins Fernandes**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9013009708304943>

**ABSTRACT:** The economic viability of photovoltaic energy depends on several factors such as associated costs, energy tariffs, capital

cost, energy consumption and production. Aiming to provide a tool that makes it possible to assess the potential of photovoltaic energy in a generic way for different regions and that it is possible to easily change the calculation assumptions, an electronic spreadsheet was developed. The development of this spreadsheet was carried out using Microsoft Excel and programming in Visual Basic for Applications (VBA). Through this spreadsheet, it was possible to simulate several scenarios estimating the annual Internal Rate of Return (IRR), specific Net Present Value (NPV) and Discounted PayBack (DPB). The IRR and NPV were calculated using Excel's native functions, with the specific NPV being the ratio between the NPV and the investment made. The PBD was calculated through a function created through VBA.

**KEYWORDS:** PHOTOVOLTAIC ENERGY, ELECTRONIC SPREADSHEET, ECONOMIC FEASIBILITY.

### DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**RESUMO:** A viabilidade econômica da energia fotovoltaica depende de diversos fatores como custos associados, tarifas de energia, custo de capital, consumo e produção de energia. Visando proporcionar uma ferramenta que possibilite avaliar o potencial da energia fotovoltaica de forma genérica para diversas regiões e que seja possível alterar facilmente as premissas de cálculo foi desenvolvida uma planilha eletrônica.

O desenvolvimento desta planilha foi realizado por meio do Microsoft Excel e programação em Visual Basic for Applications (VBA). Por meio desta planilha foi possível simular diversos cenários estimando a Taxa Interna de Retorno (TIR) anual, Valor Presente Líquido (VPL) específico e PayBack Descontado (PBD). A TIR e VPL foram calculados por meio de funções nativas do Excel, sendo o VPL específico a razão entre o VPL e o investimento realizado. Já o PBD foi calculado por meio de uma função criada por meio do VBA.

**PALAVRAS-CHAVE:** ENERGIA FOTOVOLTAICA, PLANILHA ELETRÔNICA, VIABILIDADE ECONÔMICA.

## 1 | INTRODUCTION

In Brazil, solar photovoltaic and wind energy are the fastest growing energy sources, respectively 92% and 15% between 2018 and 2019[1]. Since 2012, through ANEEL regulation 482 it is possible to generate energy in this way and reduce the amount paid for energy to the minimum rate through a compensation system. One of the types of photovoltaic solar energy generation is distributed generation, normally carried out by means of small generators and from renewable sources, close to consumer units. In this system, the excess of generated energy is stored in the concessionaire's network and remains as a balance for the consumer when there is a need to withdraw energy from the network[2]. According to the Brazilian Association of Photovoltaic Solar Energy (ABSOLAR), micro and mini distributed generation tripled between July 2019 and June 2020, growing by 45% even during the pandemic period[3-4].

The generation of electrical energy through photovoltaic modules is influenced by parameters that vary depending on the geolocation of installations, such as received irradiation and temperature. In this way, each technology has a respective efficiency depending on where it will be installed[5]. In addition to the performance of the modules, there are other variables that affect the feasibility of investing in a photovoltaic system, some of which are specific, regional and national.

This work proposes to create a spreadsheet that scales and assesses the potential for using photovoltaic energy, according to the Brazilian specifics. This worksheet requires the following variables to be informed: time to start generation; Discount Rate (DR); operation and maintenance cost; disaggregation of photovoltaic modules; annual yield of photovoltaic modules; type of connection; energy consumed per month; tariff flag used in the simulation: green, yellow, red or a weighted average according to a history; tariff values referring to the brands; database with prices of photovoltaic systems; federal tax rate, Social Integration Program (PIS) and Contribution to Social Security Financing (COFINS); Tax rate on the Circulation of Goods and Services (ICMS) or formula that allows estimating the same for a given state.

## 2 | MATERIALS AND METHODS

The spreadsheet developed in this work was developed using Microsoft Excel software together with programming in Visual Basic for Applications (VBA). The Annual Internal Rate of Return (IRR) and the Net Present Value (NPV) were calculated using native Excel functions. However, in order to enable a better comparison between results from different simulations, the specific NPV is displayed in the spreadsheet. That is, the ratio between the NPV and the amount invested. On the other hand, the Discounted PayBack (PBD) was calculated using a function that is not native to Excel, which is developed with programming in VBA.

To calculate the aforementioned financial indicators, it was necessary to determine the investment's cash flow and a Minimum Attractiveness Rate (MAR) to be used as DR. The cash flow is automatically determined by the spreadsheet according to the project, but the DR is determined by the user. As a reference for DR, for Brazilians, the IPCA+ treasury is suggested, as it has a similar liquidity to the simulated scenario (15 years) and the lowest credit risk in Brazil. It was considered that the readjustment of the energy tariff was 85% of inflation, and should be added on top of the fixed, net rate, a factor that remunerates an investment risk.

As the performance of a photovoltaic system depends on the technology used and the conditions under which it will be submitted, it is necessary to know the performance of a module to carry out the dimensioning of a system. This performance varies according to several variables that can be regional, such as the climate and temperature the module will be subjected to, or specific to a situation such as shading and the inclination and direction in which the panel is installed.

In this work, the same premises that the Institute for the Development of Alternative Energies in Latin America (IDEAL) adopted to develop its simulator, *América do Sol* were adopted. That is, the system consists of polycrystalline silicon slabs pointing to the north and with a fixed inclination equal to the latitude of the evaluated location, without considering a possible shading of the neighborhood[6]. In this way, in addition to adopting an already established simulation standard, it is possible to use data from *América do Sol* to determine the Annual Yield (AY) of the photovoltaic modules in a given location. Once the AY has been defined, it is necessary to know what the Minimum Rate (MR) the customer will pay regardless of its usage. This MR varies according to the connection type in 30 kWh (single-phase), 50 kWh (two-phase) and 100 kWh (three-phase). As in this work, a flat Energy Consumption (EC) and Energy Production (EP) are considered. That is, it does not vary throughout the year. The Nominal Power (NP) of a photovoltaic system can be calculated using Eq. 1.

$$NP = \frac{(EC - MR) \cdot 12}{AY} \quad (1)$$

However, the Energy Produced (EP) by a photovoltaic system varies with the time it is used, which is generally between 0.2% and 1% per year[7]. The Energy Production Decay (EPD) value is normally provided and guaranteed by for a certain period. Thus, to find the SE in a year (t), one can use Eq. 2.

$$EP_t = (EC - MR) \cdot 12 \cdot (1 - EPD)^{t-1} \quad (2)$$

The Base Tariff (BT) in effect is determined by the National Electric Energy Agency (ANEEL), varying according to the concessionaire and the Federation Unit (FU). BT receives surcharges according to power generation conditions. That is, the tariff flag. The spreadsheet allows simulations to be carried out with a specific flag or with a weighted average based on the history of tariff flags in Brazil. The taxes that can be calculated using Eq. 3 are added to the previous amount. Of these taxes, only ICMS has predefined rates, which vary according to the State and amount of energy consumed. Federal taxes, PIS and COFINS, currently vary from month to month and are usually estimated according to the average amount charged in recent months. Eq. 4 shows how to calculate the Final Tariff (FT) according to BT, Taxes (I) and Addition Referring to Tariff Flag (ARTF).

$$I = \frac{1}{1 - (PIS + CONFINS + ICMS)} - 1 \quad (3)$$

$$FT = (BT + ARTF) \cdot (1 + I) \quad (4)$$

The spreadsheet was developed in order to simulate a 15-year scenario of equipment use without the need for replacement, one of the scenarios simulated by Dantas and Pompermayer[8]. This scenario is simpler, as it does not need to estimate the future price of the equipment to be replaced and has a unit cost close to a 20-year scenario in which the inverter and stringbox need to be replaced[8]. The Project Cost (PC) was estimated through the linear interpolation of a database obtained by contacting companies in the segment in the assessed location. The invested value of the project is the present value of the PC, where it is brought to present value by a DR. It was considered that the time between payment and the start of energy generation is 2 months, given the procedure established by ANEEL[9]. Finally, the remainder of the cash flow is determined by Energy Savings (ES). The ES for a given year (t) can be obtained through Eq. 5, considering the Operation and Maintenance Costs (OMC) estimated at 1% of the CP according to Nakabayashi (2015)[10].

$$ES_t = EP_t \cdot FT - 0,01 \cdot PC \quad (5)$$

### 3 | RESULTS AND DISCUSSION

The developed spreadsheet makes it possible to evaluate the influence of several

variables such as: energy consumed, disaggregation of photovoltaic modules, taxes, connection types, tariff flag, time to implement a project and DT. The main sheet, in which the main variables are changed, can be seen in Fig. 1, with its data referring to a design carried out for Campos dos Goytacazes/RJ, Brazil.

Assumptions of the Photovoltaic System Project	
System Lifetime	15 years
One Year Savings X	R\$ 1.660,66
Savings generated in year X	Year 0
tariff	R\$ 0,92527
Taxes	31,87%
PIS + COFINS (2019)	6,17%
ICMS	18%
Flags	Average
Energy consumed on average per month	208 kWh/month
Connection Type	Biphasic
Energy produced	1894 kWh/year
Rated power	1400 Wp
Annual Yield	1,353 kWh/Wp
Energy Use	100,00%
Breakdown of modules	0,8%/ year
Operation and maintenance	1,00%

Selected System Result	
Invested Value	R\$ 9.143,14
Value per unit produced	R\$ 6,43 /Wp
Time to start generation	2 months
Total energy savings	R\$ 22.013,70
Economic analysis	
Discount Rate/MAR	10,25%
IRR	15,47%
Specific NPV	26,62%
DPB	8,90 Years

Label:

Gray - Constants
Blue - List of predefined values
Green - Variables
Yellow - Secondary Results
Orange - Main Results

Figure 1. Main layout of the elaborated spreadsheet.

By comparing the calculation methodology and the result obtained with other works such as the IDEAL simulator[6] and other works on the development of design sheets[11], we can observe that the worksheet developed in this work meets the design requirements with the differential to also carry out a more detailed and personalized economic evaluation, according to the user's assumptions. In addition to showing capital gain, the financial indicators used in this study also took into account the value of money over time. Furthermore, the spreadsheet allows you to visualize the drop in energy production, as well as its effect on energy savings.

## 4 | CONCLUSIONS

The sizing results were slightly different when compared to sizing performed by companies that made up the project database. This difference is mainly attributed to the consideration of the seasonality of energy consumption and production, as these variables influence the capacity of the installed system. However, considering that the objective of this work is to develop a spreadsheet for a regional assessment, it can be said that it met the proposed objectives.

It was also noticed that most companies considered tariff readjustment and DT scenarios out of date with the current Brazilian scenario. The results obtained through this spreadsheet are in some cases significantly different. Thus, it emphasizes the importance for the consumer to assess the calculation assumptions and for companies to update them,

since the profitability of the direct treasury and inflation in Brazil are not stable. Thus, this work can contribute to those who wish to study, teach, develop research or even simulations on photovoltaic systems, from an energy and/or economic point of view. The use of this spreadsheet also enables initial studies to be carried out on the feasibility of photovoltaic energy in a given region. However, it should be noted that this method does not replace an assessment for a specific project, as there are specific variables that cannot be predicted by a generic dimensioning.

## REFERENCES

- [1] EPE. **Balço Energético Nacional 2020**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 6 set. 2020.
- [2] ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.
- [3] ABSOLAR. **Geração solar distribuída atinge marca de 3 GW de potência instalada no Brasil**. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/geracao-solar-distribuida-atinge-marca-de-3-gw-de-potencia-instalada-no-brasil.html>>. Acesso em: 6 set. 2020.
- [4] \_\_\_\_\_. **Energia solar triplica no país em 1 ano: saiba quanto dá para economizar**. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-triplica-no-pais-em-1-ano-saiba-quanto-da-para-economizar.html>>. Acesso em: 6 set. 2020.
- [5] PINHEIRO, E. et al. **Avaliação do potencial da geração fotovoltaica em diferentes condições climáticas na matriz elétrica brasileira**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Anais...Gramado: 2014.
- [6] AMERICA DO SOL. **Sobre o Simulador Solar**. Disponível em: <<http://americadosol.org/sobre-o-simulador-solar/>>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- [7] BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. **A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 9, p. 4470–4482, dez. 2011.
- [8] DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, M. F. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8400>>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- [9] Brasilagro. **Demanda por energia crescerá 62% impulsionada por veículos elétricos**. Disponível em: <<https://www.brasilagro.com.br/conteudo/demanda-por-energia-crescera-62-impulsionada-por-veiculos-eletricos.html>>. Acesso em: 9 set. 2020.
- [10] NAKABAYASHI, R. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica**. Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos: Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), 2015.
- [11] FERREIRA, R. D. A. et al. **Planilha para a estimação técnica e financeira de um sistema fotovoltaico**. Revista Ciências do Ambiente On-Line, v. 9, nov. 2013.

## OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES MODULARES ATRAVÉS DO USO DE PSEUDO-MÓDULOS

Data de aceite: 10/01/2022

**Augusto Cezar Boldori Vassoler**

Universidade Federal de Santa Catarina  
CTC – Centro Tecnológico  
Campus universitário – Trindade  
Programa de Iniciação Científica - UFSC  
Florianópolis - SC

**RESUMO:** Operações modulares são largamente empregadas em diversas áreas da computação e do processamento de dados, como criptografia[7], mineração de criptomoedas, processamento digital de sinais (DSP) [10], unidades de processamento gráfico (GPUs), entre muitas outras. Em geral essas aplicações costumam trabalhar com números muito elevados, podendo chegar a centenas e até milhares de casas decimais. Por conta disso, é natural esperar-se um tempo de processamento elevado, o que geralmente ocorre por conta da utilização de módulos não otimizados e considerados lentos. Com isso, pode-se dizer que é de extrema importância a escolha correta dos módulos para operação, de modo que possibilitem o menor tempo de operação possível. Um meio de mitigar essa influência negativa no tempo de realização é a substituição do módulo original por pseudo-módulos, que são obtidos através da fatoração e remodelação dos valores originais. Dessa forma, podem ser obtidos módulos em formatos considerados preferíveis, que apresentam menores tempos de operação. Além disso, as formas de implementação podem ser realizadas de formas diferentes em software e em hardware,

o que impacta no desempenho. Dessa forma, o presente trabalho visa verificar a influência do tipo do módulo utilizado no desempenho temporal de operações modulares em hardware e software (a fim de possibilitar futuras aplicações), além da verificação do ganho de tempo de operação ocasionado pela substituição dos módulos originais por pseudo-módulos e também a realização da escolha mais otimizada possível para os mesmos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Processamento digital de sinais, operações modulares, circuitos digitais.

### 1 | INTRODUÇÃO

A aritmética modular é um sistema de aritmética para inteiros, que foi inicialmente introduzido pelo matemático Suíço Euler, com a abordagem da congruência [11]. Apesar disso, a abordagem moderna da aritmética modular foi desenvolvida por Carl Friedrich Gauss [11]. A realização de operações modulares se dá através da recodificação dos operandos pelos restos da divisão de seus respectivos módulos. A operação desejada, seja ela adição, multiplicação, divisão ou outras é então realizada utilizando os restos obtidos, sendo que o resultado da operação será novamente remodelado, obtendo-se assim o resultado final.

Como exemplo se pode considerar um caso onde há duas constantes  $Y=69$  e  $Z=12$  e quer-se realizar as operações de soma ( $Y+Z$ ) e multiplicação ( $Y*Z$ ) entre ambas. Para tanto, deve-se modular  $Y$  e  $Z$  por 7, sendo:

$$Y = 69 \bmod 7 = 6$$

$$Z = 12 \bmod 7 = 5$$

Posteriormente soma-se e multiplica-se os resíduos e modula-se novamente o resultado, como é mostrado a seguir.

$$Y + Z = (6 + 5) \bmod 7 = 4$$

$$Y * Z = (6 * 5) \bmod 7 = 2$$

Realizando a modulação do resultado do cálculo realizado diretamente comprova-se que o método é correto, uma vez que o resultado é exatamente o mesmo:

- **Y+Z:**

$$(Y + Z) = (69 + 12) \bmod 7$$

$$(Y + Z) = 81 \bmod 7$$

$$(Y + Z) = 4$$

- **Y\*Z:**

$$(Y * Z) = (69 * 12) \bmod 7$$

$$(Y * Z) = 828 \bmod 7$$

$$(Y * Z) = 2$$

O emprego desse tipo de operação apresenta grande importância para as mais diversas finalidades, como a implementação de algoritmos de processamento de sinais digitais e filtros digitais[10], aplicação de códigos de criptografia [7], como o algoritmo de Montgomery[9], codificação de vídeo em unidades gráficas de processamento, além de muitas outras que podem ser citadas. É comum que os módulos utilizados nesses contextos sejam de ordem muito elevada, contanto várias casas decimais em seu expoente, o que pode facilmente levar a um aumento considerável no tempo de processamento, aumento esse que é indesejável. A principal causa para esse problema é a utilização de módulos não ótimos, os quais inevitavelmente levam a um elevado tempo de processamento.

Através de testes e estudos previamente realizados sabe-se que módulos temporalmente eficientes possuem o formato  $\{2^n \pm 1\}$  e também  $\{2^n \pm 2^a \pm 1\}$ , onde  $a$  também é um número inteiro [5]. Por outro lado, há também os módulos do tipo  $\{2^n \pm k\}$ , onde  $K$  também é uma constante inteira, que não se encaixam em nenhum dos padrões anteriores, e que apresentarão uma menor eficiência, sendo sua utilização considerada indesejável. Para esse último caso, é sabido que o custo temporal de operação em hardware é inversamente proporcional ao número de 1's na representação binária de  $K$ .

Para casos em que seja necessário realizar uma determinada operação utilizando um módulo considerado ruim, uma solução prática é a sua substituição por pseudo-módulos que se encaixem em algum dos formatos eficientes. Com isso é fácil perceber que pseudo-módulos nada mais são do que valores derivados a partir de outros módulos, por meio do processo de remodulação, em geral com o objetivo de obter-se um K mais eficiente. Para facilitar esse processo, existe uma propriedade que permite obter-se um pseudo-módulo a partir de qualquer módulo, que é enunciada da seguinte forma: “sejam os módulos  $m_1$  e  $m_2$ , o módulo  $m_2$  de uma operação modular realizada em  $m_1$  é igual ao módulo  $m_2$  da própria operação se  $m_1 = k * m_2$ , sendo k uma constante inteira. Ou seja,  $m_1$  deve ser múltiplo de  $m_2$ , então  $m_1$  será pseudo-módulo de  $m_2$  [1]. Matematicamente, a propriedade pode ser traduzida da seguinte forma:

$$\text{mod}(\text{mod}(\text{operação}, m_1), m_2) = \text{mod}(\text{operação}, m_2), \text{ para } m_1 \text{ múltiplo de } m_2$$

Para exemplificação pode ser usada a operação  $(a*b*c) \text{ mod } m_0$ , onde  $a=65536$ ,  $b=256$ ,  $c=4$  e  $m_0=341$ . O resultado da operação direta será 64, e o módulo 341 pode ser reescrito para que se obtenha seu formato:

$$341 = 512 - 171 = 2^9 - 171$$

Então nesse caso tem-se  $k = 171$ , cuja representação binária será  $k=10101011$ , possuindo cinco 1's na mesma. É possível então encontrar o pseudo-módulo de 341 aplicando a propriedade acima definida. Considerando uma constante de 10 bits ( $n=10$ ) tem-se

$$\text{mod}(2^{10}, 341) = 1$$

Logo o pseudo-módulo deverá ser  $2^{10}-1=1023$ , o que leva a um formato ótimo do tipo  $2^n-1$ . Tem-se então que  $1023 = 3*341$ , logo sendo múltiplo e verificando a condição requerida e confirmando ser um pseudo-módulo.

É importante ressaltar que para a realização desse processo consiste na conversão inicial do valor de entrada para o pseudo-módulo desejado, em sequência realizando as operações aritméticas necessárias na base convertida e, apenas posteriormente a realização de todas elas é feita a reconversão do resultado final para o módulo original [1]. Desse modo, matematicamente a reconversão é feita na forma  $\text{mod}(\text{mod}(\text{RESULTADO}, m_1), m_2)$ , da mesma forma que é mostrada no esquemático.

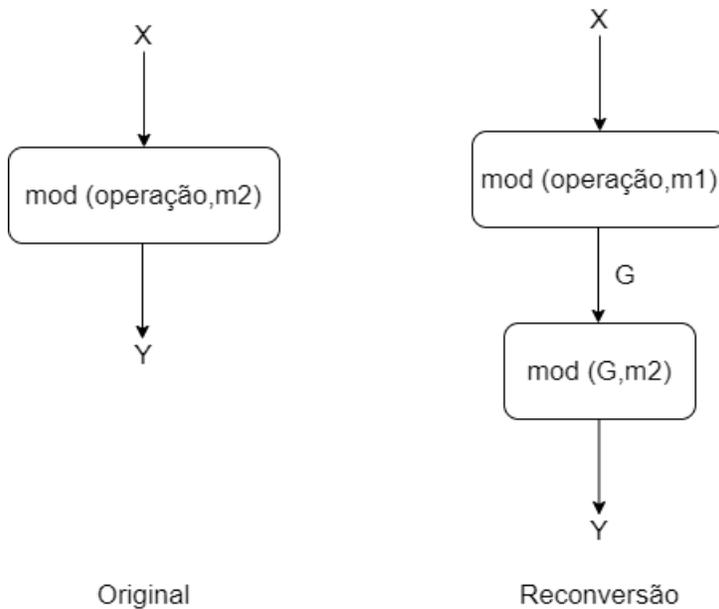


Figura 1 - Conversão e reconversão para pseudo-módulo

A fim de verificar o real impacto temporal dessa mudança em operações realizadas em hardware, foram implementadas multiplicações utilizando aritmética modular, verificando o impacto temporal de diferentes tipos de módulos. Também foram realizados testes utilizando algoritmos em software, a fim de verificar quais parâmetros impactam em seu desempenho.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para a caracterização dos testes em hardware consistiu na implementação de multiplicadores em VHDL, os quais operam com os valores modulares de  $\{2^n\}, \{2^n \pm 1\}, \{2^n \pm k\}, \{2^n + 2^\alpha + 1\}$  e  $\{2^n - 2^\alpha - 1\}$ . A arquitetura de multiplicadores utilizados para implementar as operações com  $\{2^n \pm k\}$  está mostrada na figura 1, enquanto que a usada para  $2^n \pm 1$  é apresentada na figura 2.

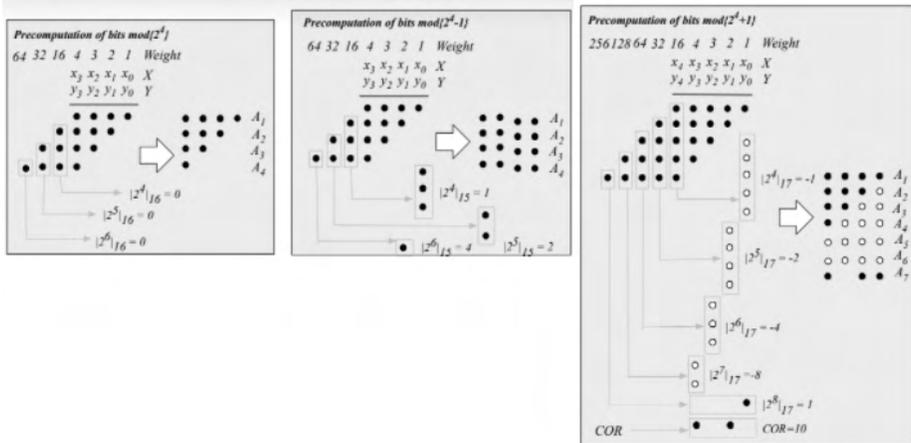


Figura 2 - Pré-computação de módulos  $2^4$  e  $2^4 \pm 1$

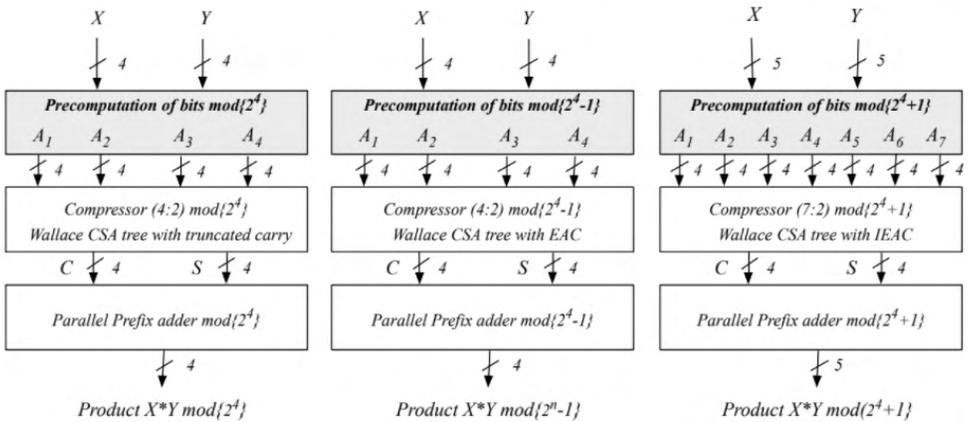


Figura 3 - Multiplicadores para módulos  $2^4$  e  $2^4 \pm 1$

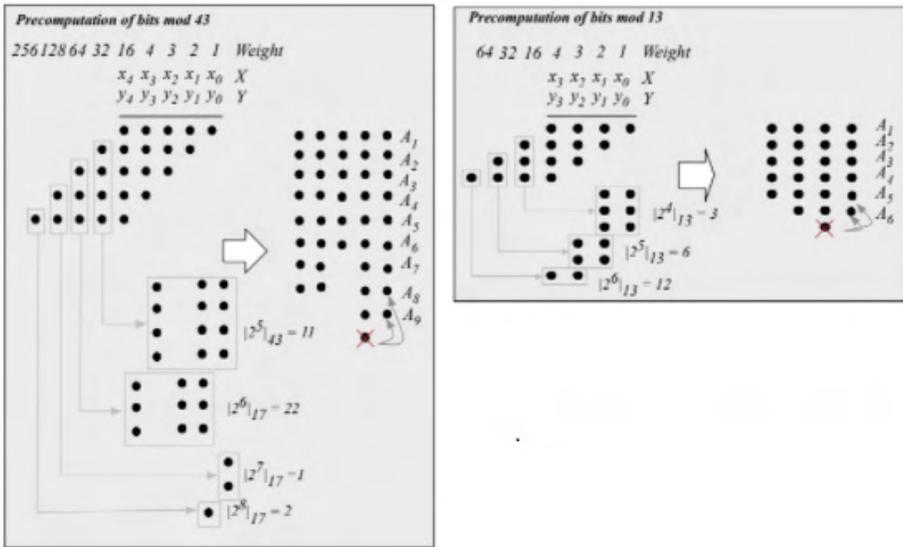


Figura 4 - Pré-computação do módulo 43 ( $2^5 + 11$ ) e módulo 13 ( $2^4 - 3$ )

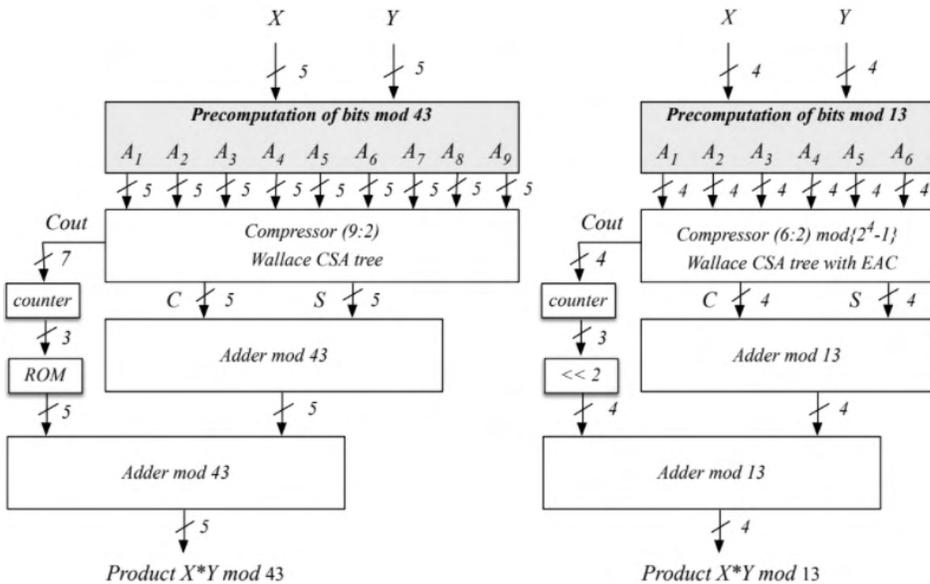


Figura 5 - Multiplicadores para os módulos  $2^4 - 3$  e  $2^5 + 11$

A unidade multiplicadora para  $\{2^n \pm k\}$  utiliza uma memória ROM para armazenamento das contribuições dos carries somados. São claramente menos eficientes em comparação com as unidades de  $\{2^n \pm 1\}$  por exemplo, que não necessitam de memória, realizando toda operação de forma combinacional.

Para a obtenção dos resultados de delay dos circuitos, foi realizada a síntese

dos mesmos em tecnologia ASICs Taiwan Semiconductors de 65 nm, sendo os testes realizados para entradas de até 35 bits. Tendo em mãos os referidos valores, foi realizado um processo iterativo com os dados, a fim de obter as curvas de regressão do delay total em função do número de bits da entrada, para cada um dos conjuntos de módulos testados.

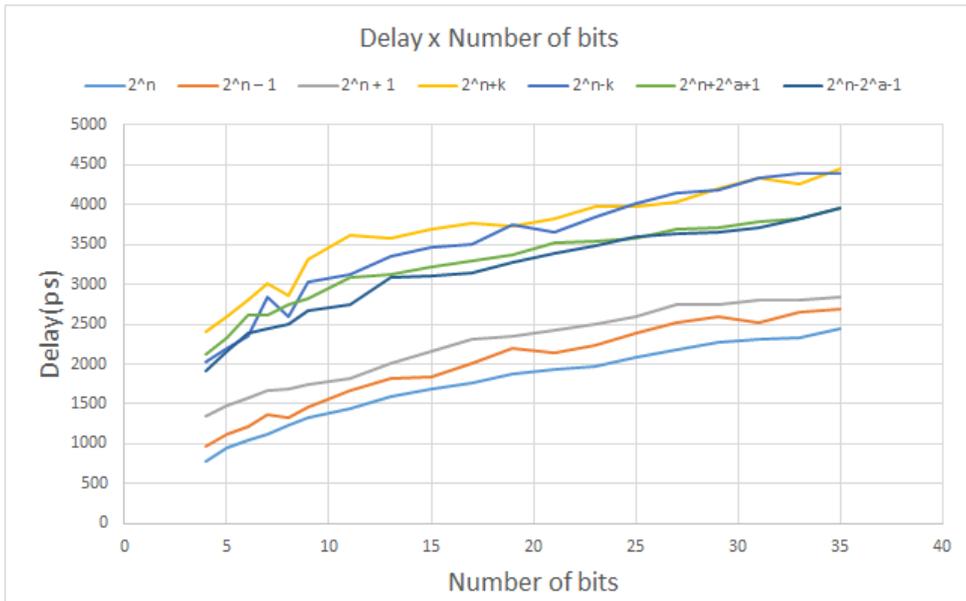


Figura 6 - Curvas de regressão obtidas para o delay

Para a realização dos testes foi escolhido um conjunto de módulos específicos, com seus respectivos pseudo-módulos, para diferentes números de bits ( $n$ ) e números de 1's na representação binária de  $k$ . Os tipos escolhidos foram especificamente  $\{2^n-1\}$ ,  $\{2^n-k\}$  com dois 1's em  $k$  e  $\{2^n+k\}$  com três ou mais 1's em  $k$ .

Pseudomódulo	Valor	1's em K	Módulo	Valor	1's em K
$2^{26} - 1$	67108863	1	$2^{24} + k$	22369621	12
$2^{30} - 1$	1073741823	1	$2^{28} + k$	357913941	14
$2^{25} - 5$	33554427	2	$2^{23} + k$	11184809	11
$2^{28} - 65$	268435391	2	$2^{25} + k$	38347913	8

Tabela 1 - Módulos e pseudo-módulos utilizados para os testes em hardware

Os testes em software foram realizados utilizando a linguagem Python, através de um script que realiza o módulo de uma multiplicação de constantes e contabiliza o tempo total de operação. Foram utilizados os mesmos módulos da Tabela 1.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos estão sobrepostos às suas respectivas curvas nos gráficos abaixo.

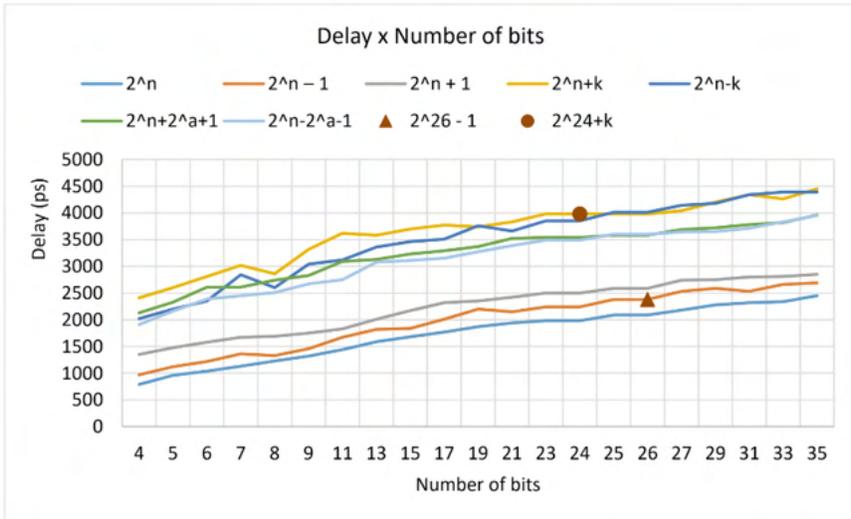


Figura 7 - Delay em hardware para módulo  $2^{24} + k$  e pseudo-módulo  $2^{26} - 1$

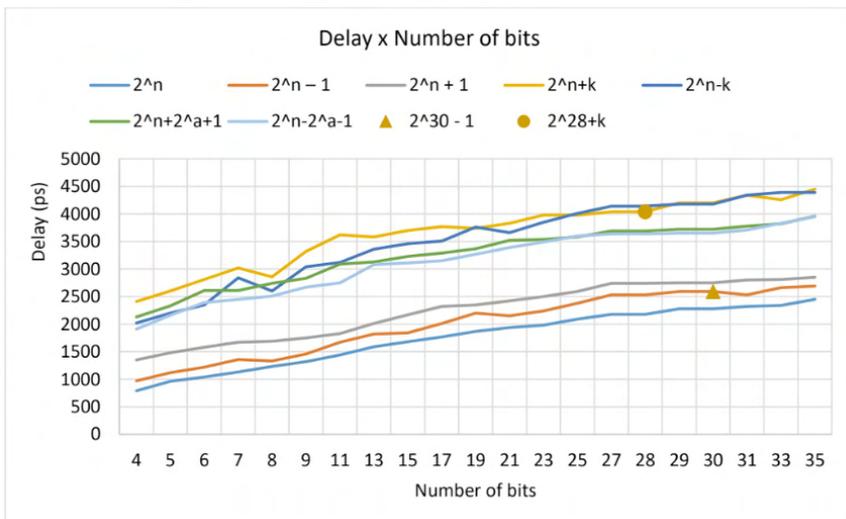


Figura 8 - Delay em hardware para módulo  $2^{28} + k$  e pseudo-módulo  $2^{30} - 1$

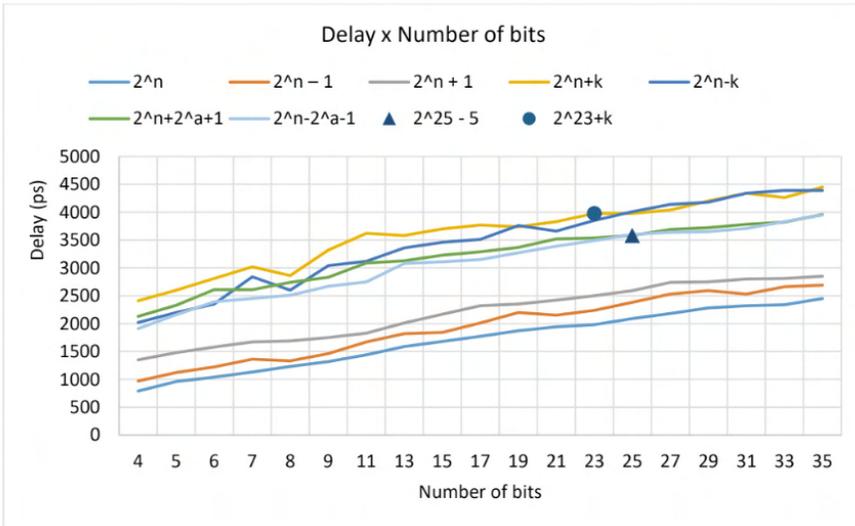


Figura 9 - Delay em hardware para módulo  $2^{23} + k$  e pseudo-módulo  $2^{25} - 1$

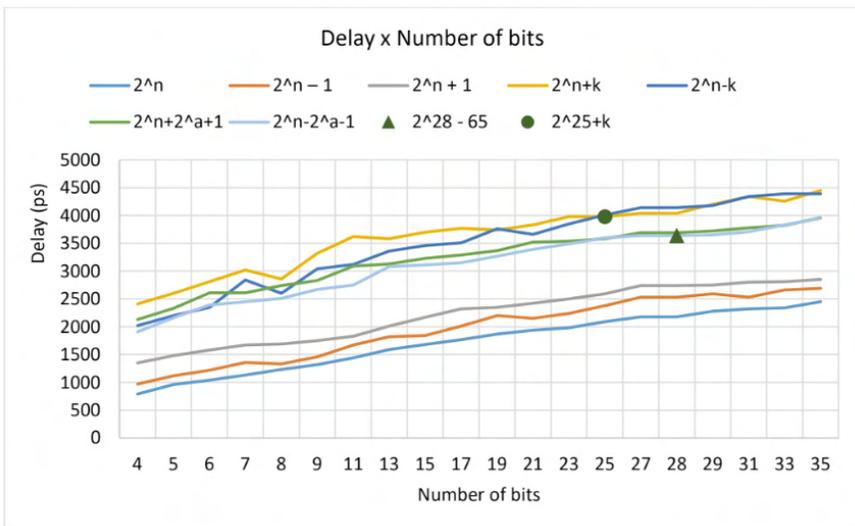


Figura 10 - Delay em hardware para módulo  $2^{25} + k$  e pseudo-módulo  $2^{28} - 65$

Os valores dos pseudo-módulos estão na legenda representados pelos triângulos, enquanto os círculos mostram os delays referentes aos módulos. Observando os resultados obtidos, nota-se que em todos os casos os pseudo-módulos da forma  $\{2^n \pm 1\}$ , embora maiores (maior número  $n$  de bits) apresentem um menor delay em relação aos da forma  $\{2^n \pm k\}$  e até mesmo aos do formato  $\{2^n + 2^a + 1\}$  e  $\{2^n - 2^a - 1\}$  (mais eficientes que os anteriores), o que já era previsto. Já para aqueles que possuem três ou mais 1's, o número de uns da representação binária não terá mais impacto no atraso. Isso se deve ao uso da memória ROM anteriormente evidenciada na arquitetura do multiplicador, a qual eliminará essa

influência. Por esse motivo os tipos  $2^{n\pm 1}$  e aqueles que possuem dois 1's apresentam um melhor desempenho, uma vez que não usam componentes de armazenamento como memórias, que inevitavelmente inserem atraso. Apesar disso, é importante ressaltar a existência de outras implementações que processam a contribuição dos carrys de forma puramente combinacional, sendo que nesses casos a quantidade de números uns terá impacto no tempo de operação.

Pseudomódulo	Delay (us)	1's em K	Módulo	Delay(us)	1's em K
$2^{26} - 1$	2.2745	1	$2^{24} + k$	3.5702	12
$2^{30} - 1$	1.972	1	$2^{28} + k$	3.1465	14
$2^{25} - 5$	2.13	2	$2^{23} + k$	3.475	11
$2^{28} - 65$	1.88175	2	$2^{25} + k$	2.9412	8

Tabela 2 - Tempos de operação em software

Na tabela 2 estão mostrados os resultados de atraso obtidos rodando o script em Python para cada um dos módulos. Analisando o padrão que se apresenta, é possível notar que o número de 1's acaba por impactar o desempenho em software, pois todos os módulos originais com mais de três 1's em k possuem um maior delay que seus pseudo-módulos em formato mais simples. Apesar disso, a relação de tempo em função do número de bits (n) não parece seguir uma tendência previsível, visto que o tempo de operação de  $\{2^{25}-5\}$  é maior que o de  $\{2^{28}-65\}$  por exemplo.

## 4 | CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos é possível notar que a utilização de pseudo-módulos para a substituição de módulos de baixo desempenho para melhorar o tempo de operação é realmente uma boa estratégia, uma vez que o atraso de processamento mostrou-se consideravelmente menor para os testes feitos em hardware, e também houve diminuição para as modulações feitas em software.

Apesar dessas semelhanças, o maior impacto observado com o uso dos multiplicadores deu-se em função da quantidade de bits do módulo, visto que o delay aumenta proporcionalmente ao mesmo, não havendo influência do valor de k, que é mitigada pela arquitetura utilizada. Já para o caso do script em Python, o número de 1's de k apresenta um impacto muito maior para os módulos testados, dado o pior desempenho dos módulos originais. Por outro lado, a influência do tamanho em bits do módulo e o seu tipo/formato não parece seguir nenhuma tendência, logo esses parâmetros podem não

apresentar nenhum influxo sobre o resultado.

É evidente que os valores absolutos obtidos nas simulações realizadas certamente sofrerão alterações se implementadas através de outras ferramentas, como por exemplo se for realizada a síntese do hardware em outra tecnologia, como 45 nm e 90 nm, ou se utilizada outra ferramenta para compilar o código, tal qual MATLAB, C, entre outros. No entanto, é esperado que correlação entre os tempos obtidos mantenha um padrão semelhante, de modo que as análises realizadas nesse trabalho ainda permaneçam válidas. Dessa forma evidencia-se que a presente técnica possui grande potencial para a aceleração de processos em Digital Signal Processors (DSPs) por exemplo, ou outros sistemas que possam realizar as operações requeridas diretamente em chip. Essa possibilidade de melhora também pode ser explorada em aplicações realizadas totalmente em software, como normalmente é o caso de criptografia e mineração de bitcoins, embora os resultados ainda não sejam conclusivos o suficiente para uma análise mais detalhada para esses casos.

## REFERÊNCIAS

[1] B. Parhami; *Computer Arithmetic*, Vol. 1, Oxford University, 2007.

[2] N. Szabo, *Residue arithmetic and its applications to computer technology*. New York: McGraw-Hill, 1967.

[3] J. Bajard, and L. Imbert; *A Full RNS Implementation of RSA*: IEE Transactions on Computers; Vol. 53; pp. 769-774; (2004).

[4] R. Zimmermann; *Efficient VLSI implementation of modulo  $(2n - 1)$  addition and multiplication*: Proceedings of the 14th IEEE Symposium on Computer Architecture; pp.158-167; (1999).

[5] H. Pettenghi, S. Cotofana and L. Sousa; *Efficient Method for Designing modulo multipliers*. Journal of Circuits, Systems, and Computers, v. 23, pp. 1450001(1)-1450001(20), (2013).

[6] R. Zimmermann; *Efficient VLSI implementation of modulo addition*

*and multiplication*: Proceedings of the 14th IEEE Symposium on

Computer Architecture; pp. 158-167; (1999).

[7] J. Bajard, and L. Imbert; *A Full RNS Implementation of RSA*: IEEE Transactions on Computers; Vol. 53; pp. 769-774; (2004).

[8] Mehrabi, M.A. *Improved Sum of Residues Modular Multiplication Algorithm*. *Cryptography* 2019, 3, 14. <https://doi.org/10.3390/cryptography3020014>

[9] Kawamura, S., Komano, Y., Shimizu, H., & Yonemura, T. (2018). *RNS Montgomery reduction algorithms using quadratic residuosity*. *Journal of Cryptographic Engineering*, 1-19.

[10] G. Cardarilli, A. Nannarelli, M. Re; *Reducing power dissipation in FIR filters using the residue number system*: IEEE Proceedings of Midwest Symposium on Circuits and Systems; Vol. 1; pp. 320-323, (2000).

[11] C. Friedrich Gauss; *Disquisitiones arithmeticae*: New York, Springer-Verlag (1986)

## OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 20/10/2021*

### **Eduardo G. Silva**

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)  
São Paulo – SP – Brasil

### **Alexandre S. Caporali**

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)  
São Paulo – SP – Brasil

### **Cesar da Costa**

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)  
São Paulo – SP – Brasil

**RESUMO:** Ao longo da história, os sistemas de distribuição de água apresentam considerável desperdício no volume de água e perda de cargas hidráulicas. O consumo de eletricidade do grupo bomba representa uma proporção significativa do custo total do sistema de distribuição de água. O sistema de distribuição de água representa aproximadamente 2,5% da matriz elétrica do Brasil, e cerca de 95% de seus gastos referem-se a sistemas de bombeamento (conjunto de bombas). Este trabalho apresenta um estudo de bombas de frequência fixa com válvulas de fluxo, que podem ser utilizadas para iniciar, parar e regular o fluxo de água e bombas de frequência variável, utilizando inversor de frequência (VFD), para controlar o fluxo. Na primeira etapa, foi analisado o método de bombas de frequência fixa

com estrangulamento da válvula de fluxo, onde o consumo de energia elétrica era registrado de acordo com o ajuste de uma determinada faixa de fluxo. Na segunda etapa, foram analisadas bombas de frequência variável, utilizando um inversor de frequência, onde era registrado o consumo de energia, mantendo a válvula de fluxo 100% aberta. Uma simulação matemática de um modelo dinâmico de distribuição de água, para as duas condições do grupo de bombas (fixa e variável), foi realizada para comparar os resultados do modelo matemático com o modelo experimental. O modelo permitiu simular o comportamento do sistema e ao mesmo tempo encontrar os caminhos possíveis para a sua otimização. Os resultados indicam que a partir da simulação dos modelos matemáticos é possível otimizar efetivamente o consumo de energia elétrica, no modelo experimental, utilizando um conjunto de bombas de frequência variável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, sistema de distribuição de água, inversor de frequência, bomba centrífuga.

### OPTIMIZATION OF A WATER DISTRIBUTION SYSTEM USING MATHEMATICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL TESTS

**ABSTRACT:** Throughout history, water distribution systems have shown considerable waste in the volume of water and loss of hydraulic loads. The electricity consumption of the pump group represents a significant proportion of the total cost of the water distribution system. The water distribution system represents approximately 2.5% of the electric matrix in Brazil, and about

95% of its expenses refer to pumping systems (group of pumps). This work presents a study of fixed frequency pumps with throttle valves that can be used to start, stop and regulate the flow rate and variable frequency pumps, using a frequency inverter (VFD) to control the flow rate. In the first stage, the method of fixed frequency pumps with throttling of the flow valve was analyzed, where the consumption of electrical energy was registered according to the adjustment of a certain flow range. In the second stage, variable frequency pumps were analyzed, using a frequency inverter, where energy consumption was recorded, keeping the flow valve 100% open. A mathematical simulation of a dynamic water distribution model, for the two conditions of the pump group (fixed and variable) was performed to compare the results of the mathematical model with the experimental model. The model allowed to simulate the behavior of the system and at the same time to find the possible ways for its optimization. The results indicate that from the simulation of the mathematical models it is possible to effectively optimize the consumption of electric energy, in the experimental model, using a group of pumps of variable frequency.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, Water distribution system, Frequency Inverter, Centrifugal pump.

## 1 | INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de água é uma infraestrutura crítica em áreas urbanas (YU et al, 2018). Sua gestão operacional é objeto de crescente interesse, levando-se em consideração os fatores econômicos e ambientais (OLSZEWSKI, 2016). Sua otimização envolve muitos aspectos, como layout da rede de dutos, consumo de água, tipos de grupos de bombas, e custo de eletricidade (ZHANG et al, 2020; ZHANG et al, 2016). O acionamento ideal do grupo de bombas provou ser um método prático e eficaz para reduzir os custos de operação de todo o sistema (MENKE et al, 2017; MARCHI et al, 2012; GEORGESCU et al, 2017). De acordo com o número de variáveis e objetivos de otimização, o problema de acionamento do grupo de bombas pode se tornar muito complexo, especialmente em grandes sistemas. Diversas literaturas têm estudado este problema, introduzindo diferentes abordagens como apresentadas a seguir.

Os principais componentes de um sistema de abastecimento de água, como motores de indução, grupo de bombas e inversores de frequência foram apresentados em (MARCHI et al, 2012). O objetivo do artigo era propor uma avaliação do consumo energético de um sistema de distribuição de água. Os autores abordaram as possibilidades de economizar energia no sistema utilizando bombas de velocidades fixas e bombas de velocidade variável, ou seja, com o uso do inversor de frequência. Além disso, abordaram a seleção dos tipos de motores de indução, dimensionamento, ciclo de trabalho do grupo de bombas e perdas de cargas.

Um sistema eletrônico para acionamento e operação de um grupo de bombas foi desenvolvido por Huang et al, 2019, constituído por um sensor de alto desempenho combinado com um circuito de medição digital e sistema de aquisição de dados. Ao

processar os vários indicadores da bomba medidos pelo sensor e compará-los com os valores teóricos calculados, o desempenho da bomba em teste é avaliado. O sistema de teste tem interação humana-computador, com alto grau de automação, velocidade e precisão de teste. No trabalho de Zhang et al, 2020, o enfoque foi no nível de água de um tanque de água e a otimização combinatória do grupo de bombas de captação de água. O método adota a programação dinâmica para prever a tendência da produção nas próximas 24 horas. Os resultados experimentais mostram que 4,20% de economia de eletricidade pode ser alcançada.

No artigo de Van Rhyne et al, 2018, os autores descrevem a redução no consumo de energia em sistemas de bombas centrífugas acionadas por motor de indução, otimizando os principais componentes do sistema e controlando-os do ponto de vista do sistema. Os mais recentes desenvolvimentos em motores elétricos de indução, com controle de acionamento de frequência variável (VFD) apresentam uma oportunidade para modernizar aplicações de sistemas de distribuição de água mais antigos, com sistemas de bombeamento centrífugo, com frequência fixa, de maneira economicamente viável. Um estudo é proposto em Li et al, 2018, para análise combinada do fluxo de água e energia de redes integradas de eletricidade e abastecimento. Com foco num sistema de distribuição de água regional composto de um sistema de distribuição de energia desequilibrado e rede municipal de distribuição de água. O problema do fluxo de água é formulado com o grupo de bombas. Os resultados numéricos de um sistema de teste que compõe um sistema de distribuição de energia com 33 barramentos e um sistema de distribuição de água com 9 nós são usados para verificar a análise integrada de fluxo de energia e distribuição de água proposta.

Este trabalho analisa o desempenho da eficiência energética de um sistema de distribuição de água. Para a análise experimental foram avaliados dois métodos de acionamento do grupo de bombas: (i) Método de operação por estrangulamento da válvula de vazão de fluxo com bomba de frequência fixa; (ii) Método de operação por variação da rotação da bomba de frequência variável, utilizando inversor de frequência. Por meio da plataforma de software MATLAB/Simulink foi realizada a simulação dos dois métodos analisados experimentalmente, a partir de um modelo dinâmico virtual de acionamento das bombas, configurado com as características de um sistema de distribuição de água real. Os resultados da simulação foram comparados com os dados obtidos experimentalmente, em uma Planta didática de distribuição de água, instalada no IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

## 2 | CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

O desempenho de uma bomba centrífuga está relacionado com uma determinada velocidade, fluxo e altura manométrica da bomba (Q-H), fluxo e potência (Q-P), fluxo e eficiência (Q- $\eta$ ), fluxo e altura de sucção a vácuo e a cavitação (ZHANG et al, 2020). As

curvas Q-H da bomba de frequência fixa podem ser dadas pela Eq. (1).

$$H = H_x - Q^2 \quad (1)$$

Onde:

Q é o fluxo da bomba de frequência fixa, H é a altura manométrica da bomba de frequência fixa e  $H_x$  são parâmetros de ajuste da bomba.

A variação da vazão por efeito do estrangulamento da válvula (fechamento de registro) em sistemas de bomba de frequência fixa provoca a inclinação da curva do sistema podendo deslocar o ponto de operação para uma região de baixo rendimento. Conforme mostra a Fig. 1, observa-se que o deslocamento do novo ponto de operação contribui para o aumento das perdas de cargas e a redução da vazão de trabalho. A energia dissipada provocada pela elevação das perdas de cargas é compensada com o aumento no consumo de energia da bomba, já que ela levará mais tempo para cumprir um determinado trabalho (MARCHI et al, 2012). As fricções provocadas no interior da bomba também são perdas de carga que representam uma parcela da altura manométrica total do sistema. A altura manométrica do sistema já considerando as perdas de cargas existentes na tubulação contribui expressivamente para o aumento do consumo de energia.

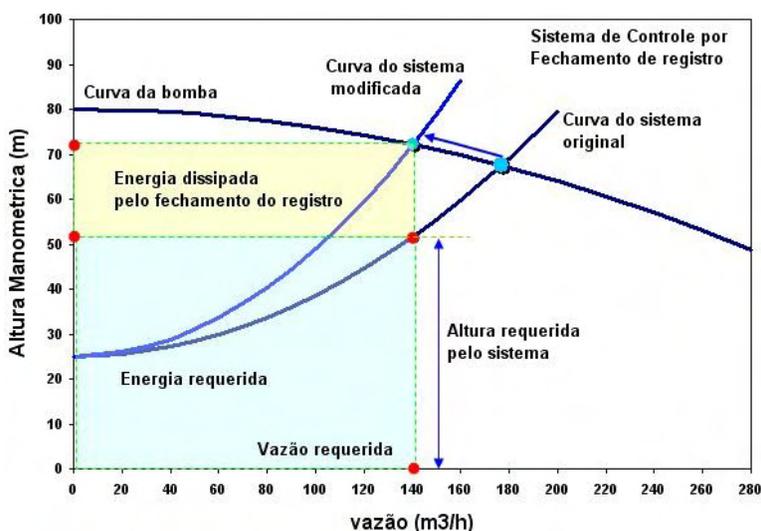


Fig. 1. Efeito na curva da bomba por estrangulamento.

As curvas Q-N (vazão do sistema em função da potência) da bomba de frequência variável podem ser dadas pela Eq. (2).

$$N = a + bQ + cQ^2 \quad (2)$$

Onde:

$N$  é a potência da bomba de frequência variável,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros de ajuste da bomba.

As Leis de Afinidade de bombas definidas pelas Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5), definem mudanças na capacidade da bomba, carga e BHP – potência absorvida pela bomba, quando ocorrem variações na velocidade da bomba [9]. As equações mostram que a relação entre vazão e velocidade são diretamente proporcionais, mas a altura manométrica do sistema, definida como pressão do sistema, tem uma relação quadrática e a potência de consumo do motor tem uma relação cúbica.

$$\frac{Q}{Q_N} = s \quad (3)$$

$$\frac{H}{H_N} = s^2 \quad (4)$$

$$\frac{N}{N_N} = s^3 \quad (5)$$

Onde:

$s$  é a razão de velocidade,  $Q_N$ ,  $H_N$ ,  $N_N$  são fluxo, altura manométrica e potência da bomba de frequência variável, respectivamente sob a velocidade nominal.

A curva de desempenho da bomba de frequência variável é dada pela Eq. (6) e Eq. (7). Os parâmetros são determinados pelo fabricante da bomba.

$$H = s^2 H_x - Q^2 \quad (6)$$

$$N = as^3 + bs^2 Q + cs Q^2 \quad (7)$$

A variação da vazão por controle da rotação em sistemas de bomba de frequência variável, Fig. 2, provoca o deslocamento na curva da bomba e, conseqüentemente, o novo ponto de operação para uma região de alto rendimento. O novo ponto de operação da bomba condiciona a redução proporcional da vazão, porém o efeito provoca uma redução quadrática nas perdas de cargas do sistema e uma redução cúbica no consumo de energia elétrica, que são regidos pela lei da afinidade, conforme Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5).

Quando a bomba está funcionando, sua condição de funcionamento não depende apenas das características da própria bomba, mas também depende do sistema hidráulico da bomba e da mudança do nível de água ou outros fatores.

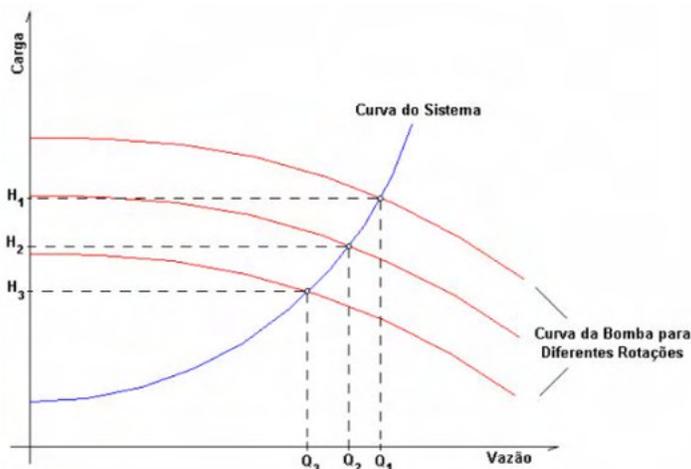


Fig. 2. Efeito na curva da bomba por variação da rotação.

### 3 I MODELAMENTO MATEMÁTICO

Para desenvolver o modelo matemático de uma bomba centrífuga de frequência fixa e frequência variável foi utilizado o software MATLAB/Simulink, a partir das equações da continuidade e a equação de Navier Stokes (GEVORKOV et al, 2018; ENEMUOH et al, 2013; e GEVORKOV et al, 2018). A equação da continuidade representa a conservação do fluido e a equação de Navier-Stokes representa o transporte do fluido no momento linear em todo o domínio computacional.

#### 3.1 Bomba de frequência fixa

O modelo do sistema de uma bomba de frequência fixa em partida direta, simula uma bomba operando em sua máxima rotação, ou seja, na frequência de 60 Hz e um controle de vazão por estrangulamento da válvula reguladora de fluxo. O modelo é constituído por uma fonte de alimentação trifásica, o motor assíncrono de indução trifásico e um bloco de controle manual da vazão, que simula o estrangulamento da válvula reguladora de fluxo. O modelo é apresentado na Fig. 3.

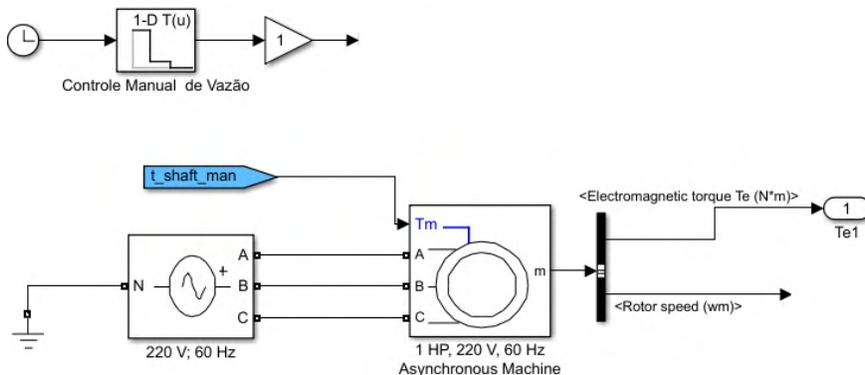


Fig. 3. Modelo de operação de bomba de frequência fixa com controle de vazão por estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

### 3.2 Bomba de frequência variável

O modelo do sistema de uma bomba de frequência variável por inversor de frequência, simula uma bomba operando em velocidade variável e controle de vazão pelo método da variação da rotação da bomba. O modelo é constituído por um inversor de frequência, o motor assíncrono de indução trifásico e um conjunto de blocos, que simulam o disparo dos transistores de potência IGBT do inversor com o objetivo de variar a sua frequência de saída. O modelo é mostrado na Fig. 4.

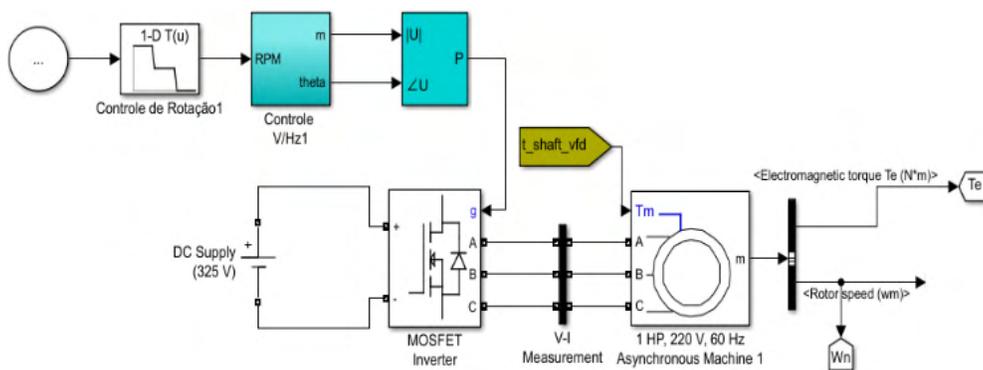


Fig. 4. Modelo operação de bomba de frequência variável com controle de vazão por variação da rotação da bomba.

Quando o modelo simula o controle de vazão com bomba de frequência fixa, o sistema hidráulico é acionado pelo sistema elétrico da Fig. 3, que realiza o controle da abertura da válvula reguladora (estrangulamento) de vazão, através de sinais gerados e mantém a bomba na frequência fixa em sua máxima rotação. Quando o modelo realiza o controle de vazão com bomba de frequências variável, o sistema hidráulico é acionado pelo

sistema elétrico da Fig. 4, que mantém a válvula reguladora de vazão 100% aberta e varia a velocidade da bomba por intermédio da variação da frequência no inversor. Os modelos matemáticos permitem simular o comportamento do sistema de distribuição de água e ao mesmo tempo encontrar os caminhos possíveis para sua otimização.

## 4 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho foi utilizada uma bancada de testes, que se encontra no Laboratório de eficiência energética do Instituto Federal de São Paulo (IFSP). A planta simula um sistema de distribuição de água, que permite ao usuário configurar o sistema para avaliar o desempenho energético de um sistema real de distribuição de água. A Fig. 5 ilustra a Planta de Eficiência Energética.



Fig. 5. Laboratório de eficiência energética do Instituto Federal de São Paulo.

A planta dispõe de um microcomputador, instrumentação, bomba centrífuga, inversor de frequência, tubulação hidráulica, tanques e um sistema supervisório SCADA, que permite simular, controlar e monitorar os ensaios experimentais. A planta de eficiência energética disponibiliza dois motores, sendo um convencional e outro de alto rendimento. O sistema supervisório permite a seleção dos motores de forma automática, sem a necessidade de fazer a instalação elétrica. O sistema hidráulico condiciona a coleta das variáveis de pressão por um sensor transmissor de pressão (PIT-01), a vazão por um sensor transmissor de vazão (FIT-01) e a leitura dos níveis nos reservatórios (LIT-01). O sistema também permite o controle da válvula reguladora de fluxo (FV-01) e seu acionamento manual (bomba fixa - estrangulamento) ou acionamento por inversor de frequência (bomba variável).

A Fig. 6 apresenta a tela principal do sistema supervisório da Planta de Eficiência Energética onde foram realizados os testes experimentais.

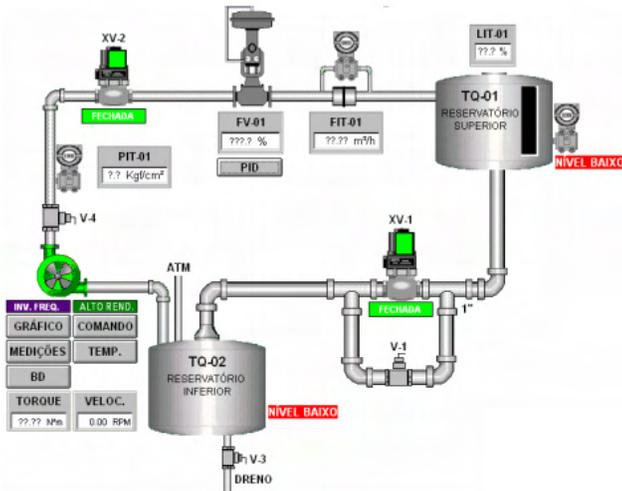


Fig. 6. Tela principal do sistema supervisório da Planta de Eficiência Energética do Instituto Federal de São Paulo.

## 4.2 Metodologia

### 4.2.1 Teste com Bomba de Frequência Fixa

Neste teste experimental do sistema de distribuição de água a bomba centrífuga opera na frequência fixa de 60 Hz (3425 RPM), acionamento por partida direta, controle da vazão pelo método de estrangulamento da válvula controladora de vazão.

Nesta configuração foi avaliado experimentalmente o rendimento energético do sistema de distribuição de água operando na vazão de 2 m<sup>3</sup>/h, pouco acima da vazão mínima da bomba (1,6 m<sup>3</sup>/h), posteriormente, explorou-se outras vazões aumentando a vazão à taxa de 1m<sup>3</sup>/h, para cada avaliação de rendimento, até atingir a vazão máxima que o sistema permitia. Para cada vazão ajustada, o tempo de operação do sistema de distribuição era programado para recalcar durante 20 minutos, a fim de avaliar o comportamento de todas as variáveis relevantes do processo e integrar o consumo de energia para obter-se a potência consumida pelo motor.

O esquema indicado na Fig. 7 ilustra o procedimento de avaliação experimental do desempenho energético da bomba de frequência fixa, operando por partida direta e controlando a vazão pelo método do estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.



Fig. 7. Sistema de distribuição de água operando com bomba de frequência fixa e estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

A Tabela 1 apresenta as variáveis hidráulicas e elétricas medidas na Planta de distribuição de água operando com bomba de frequência fixa, rotação de 3425 RPM com estrangulamento da válvula reguladora de fluxo (FV-01). De acordo com a Tabela 1, observa-se que quando a válvula reguladora de fluxo é estrangulada em 57%, 50,5% e 48,5% para reduzir as vazões em 4m<sup>3</sup>/h, 3m<sup>3</sup>/h e 2m<sup>3</sup>/h, ocorre uma queda da corrente elétrica. Embora ocorra uma redução na corrente elétrica, não significa que o sistema seja eficiente, pois o efeito do estrangulamento da válvula reguladora de fluxo aumenta as perdas de carga que, por sua vez, provocam a inclinação na curva do sistema (Fig. 1) e deslocam o ponto de operação da bomba para uma região de baixo rendimento.

Abertura [%]	Pressão H[bar]	Vazão Q[m <sup>3</sup> /h]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Energia [KWh]
48,50	3	2	212,2	3,1	1080	0,336
50,50	2,7	3	209,6	3,5	1125	0,375
57	2,4	4	209,6	3,6	1201	0,403
100	2,4	4,1	211,3	3,7	1212	0,403

Tabela 1 - Variáveis elétricas e hidráulicas – bomba frequência fixa

#### 4.2.2 Teste com Bomba de Frequência Variável

Nesta fase de teste experimental foi avaliado o desempenho energético do sistema

de distribuição de água, operando com bomba variável por inversor de frequência, na vazão de  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ , pouco acima da vazão mínima da bomba ( $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ), posteriormente, explorou-se outras vazões aumentando a vazão à taxa de  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , para cada avaliação de desempenho energético, até atingir a máxima vazão do sistema. Para cada vazão ajustada, o tempo de operação do sistema de abastecimento foi programado para recalcar durante 20 minutos a fim de avaliar o comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas e integrar o consumo de energia para obter-se a potência consumida pelo inversor. O esquema indicado na Fig. 8 ilustra o procedimento de avaliação experimental do desempenho energético da bomba de frequência variável, controlando a vazão do fluido pela rotação da bomba.

A Tabela 2 apresenta as variáveis hidráulicas e elétricas medidas na Planta de distribuição de água operando com bomba de frequência variável por inversor de frequência. De acordo com a Tabela as rotações foram ajustadas em 3368 RPM, 2570 RPM e 1770 RPM para fixar as vazões de ensaio em  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Os resultados mostraram que a redução de 3368 RPM para 2570 RPM provocaram quedas na vazão para  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , pressão para 1.4 bar e potência para 582W e, posteriormente, na redução para 1770 RPM, as variáveis apresentaram novas quedas para  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ , 0.66 bar e 228W. O consumo de energia medido neste ensaio foi sensivelmente menor com a redução da vazão do que no ensaio com bomba de frequência fixa e estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

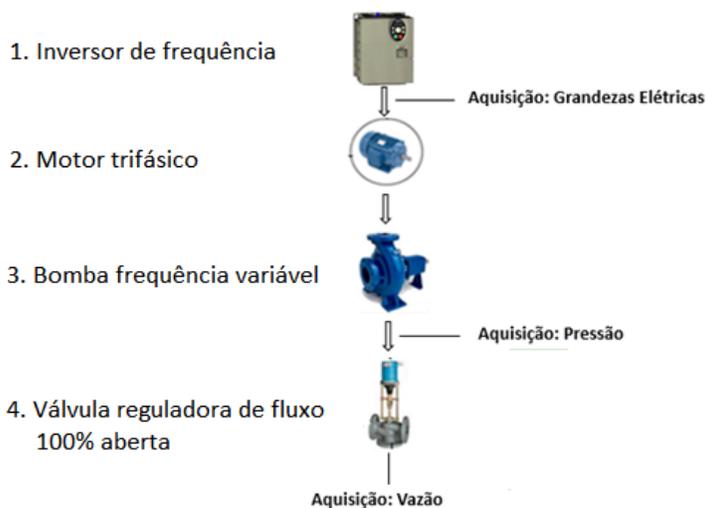


Fig. 8. Sistema de distribuição de água operando com bomba de frequência variável com controle da vazão pela variação da rotação da bomba.

Rotação [RPM]	Pressão H[bar]	Vazão Q[m <sup>3</sup> /h]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Energia [KWh]
1770	0,66	2	212,9	1,3	228	0,075
2570	1,4	3	210,9	2,8	582	0,194
3368	2,5	4	209,5	5,3	1216	0,403

Tabela II - Variáveis elétricas e hidráulicas – bomba frequência Variável

## 5 I SIMULAÇÃO

### 5.1 Simulação da vazão

A Fig. 9 apresenta o gráfico da vazão em função do tempo da simulação do modelo da bomba de frequência fixa (estrangulamento da válvula – linha azul) e bomba de frequência variável (variação da rotação da bomba – linha amarela). Para ambos os modelos a vazão foi ajustada para iniciar em 4m<sup>3</sup>/h com objetivo de comparar o seu comportamento. A linha azul representa a variação da vazão para a bomba de frequência fixa. Nos tempos de 3s e 6.5s, ocorre um estrangulamento na válvula de controle de vazão à taxa de 1m<sup>3</sup>/h, que finaliza em 2m<sup>3</sup>/h. A linha amarela mostra a alteração da vazão para a bomba de frequência variável, em função da variação de sua rotação. Nos períodos de 3s a 4.75s e 6.5s a 8.25s, ocorre uma queda proporcional da vazão, ocasionada pela desaceleração gradativa da rotação da bomba até 1770 RPM, a vazão de 1.8m<sup>3</sup>/h.

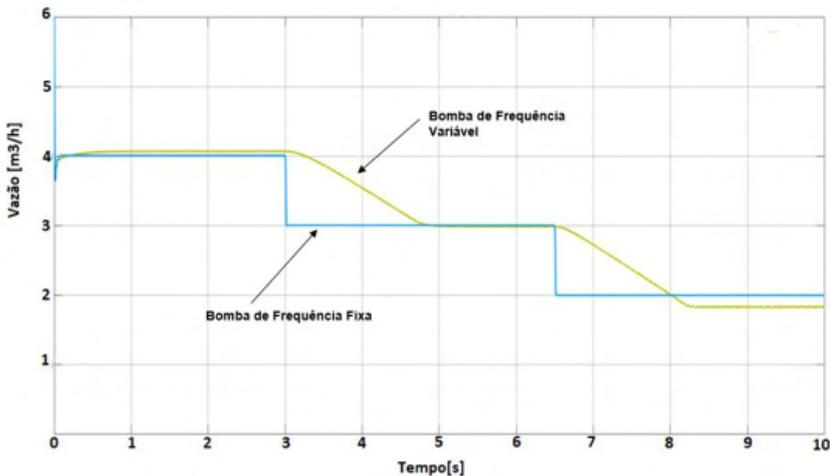


Fig. 9. Gráfico da simulação da vazão em função do tempo

## 5.2 Simulação da potência

A Fig. 10 apresenta o gráfico da potência em função do tempo da simulação do modelo da bomba de frequência fixa (estrangulamento da válvula – linha azul) e bomba de frequência variável (variação da rotação da bomba- linha amarela). A linha azul mostra que durante o início da simulação, o conjunto motor bomba apresenta uma potência elétrica de 1230W e quando as vazões são reduzidas, nos intervalos de 3s e 6.5s, as potências sofrem uma queda de 1130W e 1020W. Neste caso, a curva do sistema sofre um deslocamento em razão das perdas de carga provocada pelo estrangulamento da válvula. Este efeito na curva do sistema não altera a curva característica da bomba, no entanto, a intersecção de ambas as curvas desloca o ponto de operação da bomba para uma região de baixo rendimento.

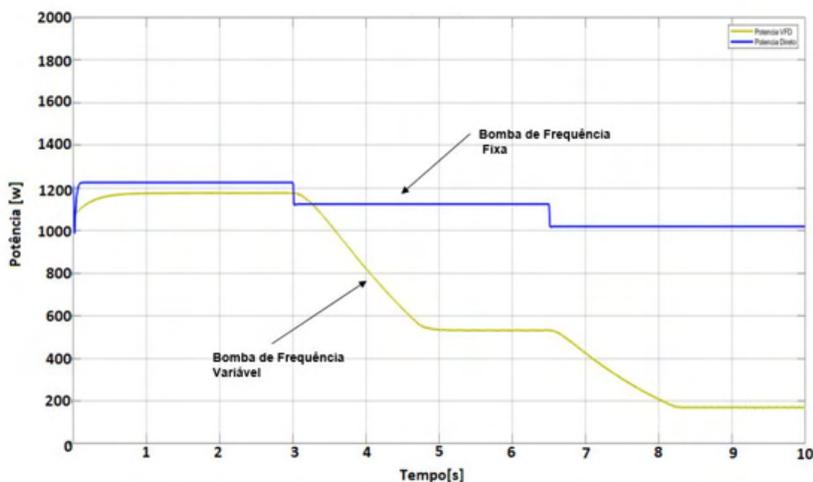


Fig. 10. Gráfico da simulação da potência em função do tempo.

A linha amarela apresenta que a potência inicial é de 1160W, período em que a rotação é ajustada para fixar a vazão em  $4\text{m}^3/\text{h}$ . Durante o processo de redução da rotação da bomba, ocorre uma queda gradativa da potência nos intervalos de 3s a 4.75s, atingindo a potência em 530W. Durante os intervalos de 6.5s a 8.25s ocorre outra queda de potência para 180W que é mantida até o fim da simulação

## 6 | DISCUSSÃO E RESULTADOS

Pode-se observar na Fig. 9, que ocorreu uma diferença entre a vazão final simulada da bomba de frequência variável ( $1,8\text{m}^3/\text{h}$ ) e a vazão obtida (Tabela 2) na bancada de testes ( $2\text{m}^3/\text{h}$ ), na rotação de 1770 RPM. Isto ocorreu em razão da inserção de uma curva

característica aproximada da bomba real na bancada de teste.

Enquanto a rotação e a vazão se reduzem de forma proporcional, a potência reduz-se de forma cúbica Eq. (5), obtendo ganhos consideráveis no consumo de energia. Este efeito ocorre pelo fato da queda rotacional limitar a curva característica da bomba, mantendo fixa a curva do sistema, onde ambas interseccionam o novo ponto de operação da bomba em uma região de melhor rendimento. As Tabelas III e IV apresentam dados comparativos da potência consumida pela bomba centrífuga, na parte simulada e experimental do trabalho.

Vazão Q[m <sup>3</sup> /h]	Potência [W]	
	Simulação	Experimental
4	1230	1201
3	1130	1125
2	1020	1080

Tabela III – Potência consumida – bomba frequência Fixa

Vazão Q[m <sup>3</sup> /h]	Potência [W]	
	Simulação	Experimental
4	1160	1216
3	530	582
2	180	228

Tabela IV – Potência consumida – bomba frequência Variável

## 7 | CONCLUSÃO

Um modelamento matemático desenvolvido no programa MATLAB/ Simulink e ensaios experimentais realizados numa bancada de testes, para otimização de um sistema de distribuição de água é proposto neste artigo. O modelo desenvolvido foi validado com informações de uma configuração experimental real. Os testes experimentais realizados demonstraram que o sistema se aproxima em valores, dos vários valores obtidos nos modos de simulação, que correspondem aos processos que ocorrem em sistemas reais de abastecimento de água.

A principal vantagem do modelo está na possibilidade de poder atuar no processo, durante o controle de vazão por estrangulamento e velocidade da bomba, definindo o ponto de trabalho ideal da bomba. A novidade do modelo baseia-se na possibilidade de combinar dados obtidos a partir da bancada de testes. Além disso, o modelo pode ser uma parte do sistema de controle de um grupo de bombas centrífugas. O modelo desenvolvido pode ser usado na fase de projeto para estimativa de potência e otimização de sistemas de distribuição de água.

## REFERÊNCIAS

- ENEMUOH, F.O.; OKAFOR, E. E.; ONUJEBU, J.C. and AGU, V.N. **“Modelling, Simulation and Performance Analysis of a Variable Frequency Drive in Speed Control of Induction Motor”**. International Journal of Engineering Inventions, Department of Electrical Engineering Nnamdi Azikiwe University, Awka, Nigeria, p.36-41, 2013.
- GEVORKOV, L.; RASSOLKIN, A. G.; KALLASTE, A. and VAIMANN, T. **“Simulink Based Model for Flow Control of a Centrifugal Pumping System”**. 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). University of Technology. Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, Russia. pp.1-4, 2018.
- GEVORKOV, L.; RASSOLKIN, A. G.; KALLASTE, A.; VAIMANN, T. **“Simulation Study of Mixed Pressure and Flow Control Systems for Optimal Operation of Centrifugal Pumping Plants”**. Electrical, Control and Communication Engineering, Vol. 14, no 1, pp. 89-94, 2018.
- GEORGESCU, S.; BUCUR, D.M., DUNCA, G.; GEORGESCU, A.; Nicolae, A. A. and CIUC, P. **“Hydraulic balancing of the cooling water system of a pumped storage power plant”**, 2017 *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, pp. 246-250, 2017.
- HUANG, T. and ZHAI, T. **“The Design and Implementation of Automatic Electronic Water Pump Test System”**, 2019 *IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, pp. 1-4, 2019.
- LI, X.; ZHAO, X. and Yang, L. **“Combined Power- Water Flow Analysis of Regional Integrated Electricity and Water Networks,”** 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, pp. 1-6, 2018.
- MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; ERTUGRUL, N. **“Assessing Variable Speed Pump Efficiency in Water Distribution Systems”**. Drinking Water Engineering and Science. School of Civil, Environmental and Mining Engineering and School of Electrical and Electronic Engineering. p.15-21, 2012.
- MENKE, R.; ABRAHAM, E.; PARPAS, P. and STOIANOV, I. **“Extending the envelope of demand response provision through variable speed pumps,”** *Procedia Eng.*, vol. 186, pp. 584–591, 2017.
- OLSZEWSKI, P. **“Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps,”** *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 527–539, Sep. 2016.
- VAN, R. P. and PRETORIUS, J.H.C. **“Increasing Water Pump Station Throughput by Introducing VFD-Based IE4 Class Synchronous Reluctance Motors with Improved Pump Control,”** 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1-6, 2018.
- YU, H.; ZHAO, T. and ZHANG, J. **“Development of a distributed artificial fish swarm algorithm to optimize pumps working in parallel mode,”** *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 24, no. 3, pp. 248–258, Mar. 2018.
- ZHANG, X.; WANG, D.; JIANG, F.; LIN, T. and XIANG, H. **“An Optimal Regulation Method for Parallel Water-Intake Pump Group of Drinking Water Treatment Process”**, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 82797 - 82803, 2020.

ZHANG, Z.; Zeng, Y. and KUSIAK, A. “**Minimizing pump energy in a wastewater processing plant,**” *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 505–514, Nov. 2012.

ZHANG, Z.; KUSIAK, A.; ZENG, Y. and WEI, X. “**Modeling and optimization of a wastewater pumping system with data-mining methods,**” *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 303–311, Feb. 2016.

# CAPÍTULO 5

## MAPAS COGNITIVOS FUZZY DINÂMICOS ADAPTATIVOS APLICADOS EM PROCESSO INDUSTRIAL

Data de aceite: 10/01/2022

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

### **Wagner Fontes Godoy**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/7337482631688459>

### **Lucas Botoni de Souza**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica (PPGEM-CP)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/5938489268359300>

### **Marta Rúbia Pereira dos Santos**

ETEC – Jacinto Ferreira de Sá  
Ourinhos – SP  
<http://lattes.cnpq.br/3003910168580444>

### **Fábio Rodrigo Milanez**

Faculdade da Indústria SENAI Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

### **Carlos Alberto Paschoalino**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0419549172660666>

### **Michele Eliza Casagrande Rocha**

Universidade Norte do Paraná -Unopar  
Engenheira projetista elétrica  
Londrina-Pr  
<http://lattes.cnpq.br/4411484670091641>

### **Vicente de Lima Gongora**

Faculdade de Tecnologia SENAI Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

### **Ricardo Breganon**

Instituto Federal do Paraná  
Jacarezinho PR  
<http://lattes.cnpq.br/2441043775335349>

### **Marcio Aurélio Furtado Montezuma**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Mecânica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/2487283169795744>

### **Emanuel Ignacio Garcia**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8501809850590859>

**RESUMO:** Neste trabalho, será apresentada uma versão de um controlador Baseado em Mapas Cognitivos Fuzzy, do Inglês Fuzzy Cognitive Maps. (FCM) Entretanto, o então Dynamic Fuzzy Cognitive Maps nesse trabalho foi adaptativo, ou seja, os pesos das suas relações causam e efeitos são refinados conforme erro de saída. Uma breve introdução sobre controle adaptativo, teoria de FCM e uma descrição do processo serão fundamentadas para melhor compressão da proposta. Os resultados são comparados com uma versão Fuzzy Mandani, já validada na literatura para clarificar as ações de controle do controlador proposto. Ressalta a baixa complexidade do FCM comparada a versão clássica do Fuzzy Mandani por meio de uma métrica do Matlab (tempo de processamento). Após a discussão de resultados esse trabalho se encerra com uma conclusão e sugestão de futuras investigações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fuzzy Cognitive Maps, Controle Adaptativo. Misturador Industrial.

## ADAPTATIVE DYNAMIC FUZZY COGNITIVE MAPS APPLIED IN INDUSTRIAL PROCESS

**ABSTRACT:** This work will present a version of a driver based on Fuzzy Cognitive Maps. (FCM) However, the Dynamic Fuzzy Cognitive Maps in this work were adaptive. That is, the weights of their cause and effect relationships are refined according to the output error. A brief introduction about adaptive control, FCM theory, and a description of the process will be supported to compress the proposal better. The results are compared with a Fuzzy Mandani version, already validated in the literature, to clarify the control actions of the proposed controller. It emphasizes the low complexity of the FCM compared to the classic version of Fuzzy Mandani through a Matlab metric (processing time). After discussing the results, this work ends with a conclusion and suggestion for future investigations.

**KEYWORDS:** Fuzzy Cognitive Maps, Adaptive Control, Industrial Mixer.

### 1 | INTRODUCTION

In modern control systems, it is noticed that linear control becomes insufficient when the operating conditions of a system are not fixed. Thus, adaptive control is used. One of its objectives is to compensate variations in the parameters of nonlinear control systems (K. J. ÅSTRÖM, B. WITTENMARK, 2008) which, in general, are an interconnection of components forming a configuration that produces a desired response (K. OGATA, 2010).

An alternative is to use heuristic models or semi-quantitative methods like Fuzzy Cognitive Maps (FCMs), which encode experts' knowledge about the connections among the different parameters of the studied industrial process control. In other words, Fuzzy cognitive maps (FCMs) are a very convenient, simple, and powerful tool for simulation and analysis of dynamics systems (MENDONCA et al., 2019).

These methods could be preferred to other alternatives as they allow modeling of complex system dynamics, without the need for capturing the functional relationships between concepts of the real system by means of complex mathematical equations.

In this way, FCMs can encode control tactics that are imprecise in nature, commonly expressed in linguistic terms, which is helpful when it is difficult to obtain a mathematical

model of the process.

FCMs allow dealing with subjective and vague linguistic variables used by domain experts and handling uncertainties due to their approximate knowledge using Fuzzy Logic (K. M. PASSINO, S. YURKOVICH, 1998), such as the heuristic process used in this work.

There are many applications of FCMs in process control. In the work of Mendonça (M. MENDONÇA, et al, 2013), the authors used a Fuzzy-PID controller development of an alcoholic fermenter process proposed in Maher (M. MAHER, 1995). Also, Lima and Serra (F. LIMA, G. SERRA, G., 2015) proposed a robust Fuzzy controller implemented for visualization and control of a thermal process.

In this work, the objective is to investigate the application of systems based on FCMs, designed using experts' knowledge and compare their results with the more classical methods. We present three examples of industrial processes in this work. Intelligent control methods were used to tune the gains of a classical PID controller of an alcoholic fermenter, were directly applied as controllers in a heat exchange process (Heatex) and a Dynamic Fuzzy Cognitive Map (DFCM) with two weight's adaptation methods: Hebbian learning algorithm (DFCM-Heb) and a weight-scheduling configuration (DFCM-WS).

The paper is organized as follows. Section II describes the processes and presents a brief background about Fuzzy Logic and FCM, presenting our contribution in the intelligent control area. In Section III, we show the obtained results and compare the other techniques. Finally, in Section IV, we outline some conclusions and directions for future work.

## 2 I BACKGROUND AND PROCESSES' DESCRIPTION

A Fuzzy Cognitive Maps (FCM) is a soft computing technique that combines the advantages of Artificial Neural Networks (ANNs) and Fuzzy Logic, using existing knowledge and hu-man experience to model complex systems (E. I. PAPAGEORGIOU, 2014). Due to their simplicity, support for ambiguous (Fuzzy) knowledge, they are applicable in many areas, such as medicine, engineering, software development, etc. FCMs emerged from Kosko's work (B. KOSKO, 1986), which expanded the concepts of Axelrod's (R. AXELROD, 1976) and Tolman's (E. C. TOLMAN, 1948) previous Cognitive Maps works. FCMs introduced fuzziness to Cognitive Maps, by using numeric descriptions (fuzzy binaries) of causal influences instead of positive or negative symbols.

In a FCM, the value  $A_i^{(k+1)}$  of each concept  $C_i$  at iteration  $k+1$  is calculated as a function of the sum of  $A_i(k)$  at iteration  $k$ , with the product of  $A_j(k)$  of the concept  $C_j$  by  $w_{ji}$ , which is the value of the causal link between  $C_j$  and  $C_i$ , given in the range  $[-1 \ 1]$ . The mathematical representation of FCM inference is given by equation (1).

$$A_i^{(k+1)} = f(A_i^{(k)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_j^{(k)} * w_{ji}) \quad (1)$$

In (1),  $f(\cdot)$  denotes a threshold function like sigmoid to squash the values within the

range [0 1], as shown in equation (2), where  $\lambda$  is a real positive number, which determines the steepness of  $f(\cdot)$ , and  $x$  is the value of  $A_i$  at the equilibrium point.

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-\lambda x}) \quad (2)$$

It is not scope of this work to analyze the stability of the FCM. However, these equations combined suggest stability similarly to the work from Boutalis and Kottas (Y. BOUTALIS, T. L. KOTTAS, M. CHRISTODOULOU, 2009), which shows that threshold sigmoid functions have interval previous defined and are continuous differentiable. Also, the calculated values and causes their convergence to the same specific value (V. ELENI, G. PETROS, 2017).

The stability initials analysis and results have been presented by the same authors (V. ELENI, G. PETROS, 2017). This study was done by using an appropriately defined contraction mapping theorem and the non-expansive mapping theorem. In other way, Kosko examined Associative Memories stability by identifying a Lyapunov or energy function with associative memory states (Y. BOUTALIS, T. KOTTAS, 2008), (B. KOSKO, 1988), (M. A. S. MARTCHENKO, et al, 2003).

For the Heatex control, a Fuzzy controller (FLC) and a FCM controller were developed, and were compared to the original PI controller in Matlab®, similarly as seen in Mollon (M. F. MOLLON et al, 2017), which the FCM controller was compared with ANN-FCM and other techniques.

Due to the low complexity of this system, it was unnecessary to use the error integral as expected. For the FCM controller, Simulink® was used to modify the structure of the controller used in Puheim et al. (M. PUHEIM, J. VAŠČÁK, L. A. MADARÁSZ, 2015). The Fig 1 show adaptative architecture.

The causal relationships of the FCM were defined heuristically. The causal weight values were chosen as  $W_{13}=0.75$  and  $W_{23}=0.2$ .

The second step was to create the FLC. In this process, the rule base used was the same as the one proposed by Passino and Yurkovich (K. M. PASSINO, S. YURKOVICH, 1998), to control an inverted pendulum, with 25 rules, three triangular (center) and two trapezoidal (borders) pertinence functions. The inputs, like in the FCM controller, are  $Error$  and  $Error_{diff}$  and the output is the control signal.

We designed an adaptive PID controller with FCM and Fuzzy adjustment mechanisms using Maher's approach (M. MAHER, 1995). Subsequently, as in the Heatex process, the results were compared with the PID controller used as the basis for the tuning mechanisms.

In this work, we used a maximum tank volume ( $V$ ) of 4.75 l and a minimum volume of 1 l. Accordingly, if the former case occurs, the  $F_{in}$  valve is completely closed, and if the latter case occurs, the valve  $F_{out}$  is closed (M. MENDONÇA, et al, 2013). As discussed in this work, equations (4) to (8) were used to simulate this process in Matlab®.

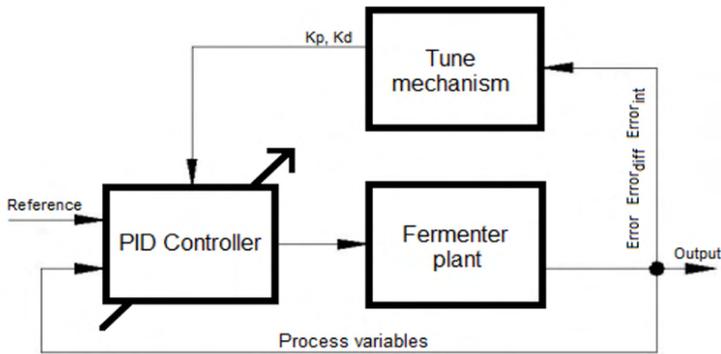


Fig. 1. Auto tune architecture.

The inputs (absolute errors) range from 0 to 1 (100% positive error). The  $K_p$  output range is [0 1.5] and  $K_d$  is [0 2], both adjusted heuristically, obtaining the Fuzzy surfaces, two of which are shown in Fig. 8.

As can be seen in Figs. 4 and 8, in this work the FCM corresponds to a simple acyclic graph, different from Kosko's original proposal (B. KOSKO, 1986). In this way, according to Miao et al. (Y. MIAO, et al, 2001) and Mendonça (M. MENDONÇA, et al, 2013) the construction of large cognitive maps by steps always generates smaller maps usually acyclic, which correspond to well de-fined cause-effect relations. Thus, based on the concepts of repulsive artificial pheromones, this work presents an optimization of the robots' trajectory, thus increasing the search area without increasing the distance traveled. In other words, when a robot detects high concentrations of pheromones – whether they are left by the other robots or itself – it will deflect its course so as not to become trapped in relatively more difficult navigational zones such as narrow corridors.

The proposal of control via FCM is to control an industrial mixer that, due to the low complexity of FCM mathematics for its inference, allowed the controller to be embedded in a low-cost controller, such as Arduino and PIC for example. Figures 9 and 10 show the process and the Adaptive FCM due to its weight adjustment being dynamic with the HEBB rule.

### Process description

To demonstrate the evolution of the proposed technique (DFCM) we will use a case study well known in the literature as seen in (MENDONÇA et al., 2020) and others.

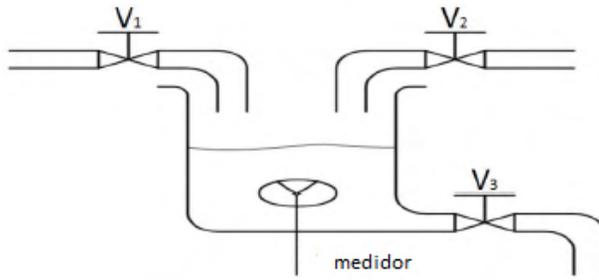


Fig. 2. Industrial Mixer Process.

Valves (V1) and (V2) insert two different liquids (specific gravities) in the tank. During the reaction of the two liquids, a new liquid characterized by its new specific gravity value is produced. At this time, the valve (V3) empties the tank in accordance with a campaign output flow, but the liquid mixture should match the specified levels of the volume and specific gravity. Although being relatively simple, this process is a TITO (Two Inputs and Two Outputs) type with coupled variables. To establish the quality of the control system of the produced fluid, a weighting machine placed in the tank measures the specific gravity of the liquid produced. When the value of the measured variable  $G$ , liquid mass, reaches the range of values between the maximum and minimum  $[G_{min}, G_{max}]$  specified, the desired mixed liquid is ready. The removal of liquid is only possible when the volume ( $V$ ) is in a specified range between the values  $[V_{min}$  and  $V_{max}]$ . The control consists of to keep these two variables in their operating ranges, as:

$$V_{mim} < V < V_{max} \quad (1)$$

$$G_{mim} < G < G_{max} \quad (2)$$

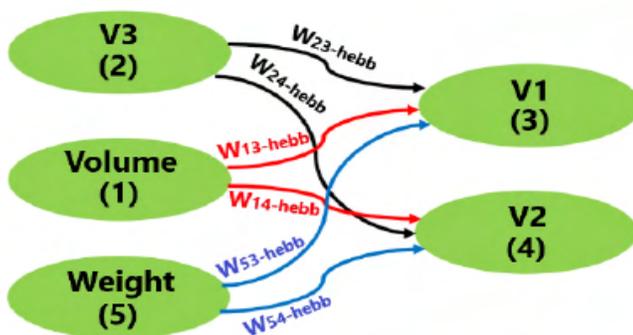


Fig. 3. Industrial Mixer Controller.

In short, In this figure it is possible to observe that we have three valves, two inlet (V1 and V2) for the inlet of two different liquids, such as water and milk in a food process and one for outflow (V3). Two variables must be controlled by range, the weight and the volume of the mixture; what makes the MIMO processes. Figure 4 shows the D-FCM controller.

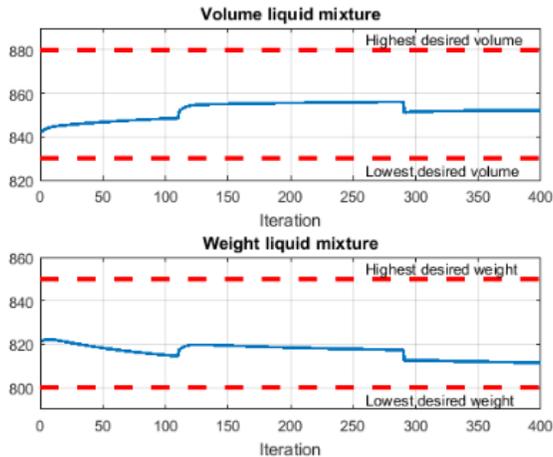


Fig. 4. Valves and results of the DFCM Controller with disturbances.

Já a figura 12\* mostra um exemplo de campanha com distúrbios.

To establish a correlation and a future comparison between techniques, a Fuzzy controller was also developed. The Fuzzy rules base uses the same heuristic control strategy and conditions. Fuzzy logic has proved being able to provide satisfactory non-linear controllers even when only the nominal plant model is available, or when plant parameters are not known with precision (M. MENDONÇA, et al, 2017), (M. MENDONÇA, et al, 2016). Fuzzy Control is a technique used for decades, especially in process controlling (E. H. MAMDANI, 1974). It is a motivation to validate DFCM, so in this study it was used the same approach for two controllers, with two different formalisms. It is not in the scope to discuss the development of the Fuzzy controller, but some details of the structure are pertinent: functions are triangles and trapezoidal and 6 rules are considered in its base. The Fuzzy controller surfaces are shown in Fig. 2. Moreover, the rules are symmetric and similar by two output valves; in this specific case, the surface of valve 1 is the same as in valve 2. The rules base examples rules and its respective weighted weights are:

1. If (Level is low) then (V1 is medium) (V2 is medium)(1);
3. If (Level is high) then (V1 is low) (V2 is low) (1);
5. If (Weight is medium) then (V1 is low) (V2 is low) (0.5);

The figure 5 show Fuzzy Superficial....

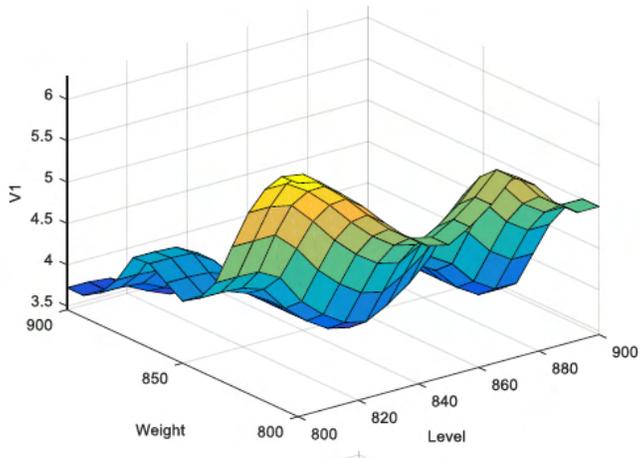


Fig. 5. A shows the nonlinearity of the process with an example of a Fuzzy surface.

Finally, a computational results and complexity metric will be presented in the next figures..

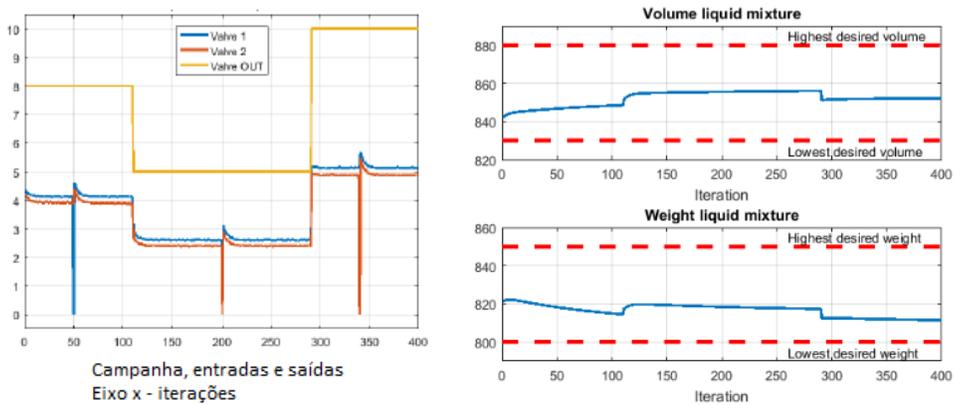


Fig. 6. Example D-FCM campaign with disturbances.

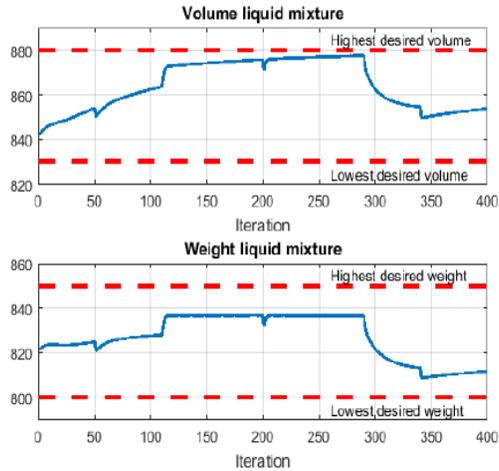


Fig. 7. Example FLC-Mandani campaign with disturbances.

The Fuzzy controller managed to place the variables in the pre-determined ranges, but with a greater variation than the proposed adaptive D-FCM. Table 1 shows the quantitative results of this experiment with disturbance.

	<i>DFCM</i>		<i>Fuzzy Logic</i>		<i>DFCM-Arduino</i>		<i>Fuzzy-ANN</i>	
	Max-min		Max-min		Max-min		Max-min	
Campaign	1	2	1	2	1	2	1	2
Volume mix (mL)	13.8 2	14.79	35.51	38.12	24.79	26.05	36.69	38.10
Weight mix (mg)	14.6 9	14.31	28.02	20.64	13.05	11.49	25.28	25.29

.Table 1. Quantitative results with disturbances.

Finally, a computational complexity metric will be presented in the next figure.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
<a href="#">dfcm_tanque_revista_icas_c1_comruido</a>	1	4.911 s	1.556 s	
<a href="#">close</a>	1	1.438 s	0.002 s	
<a href="#">close&gt;request_close</a>	1	1.298 s	0.028 s	
<a href="#">legend</a>	2	1.252 s	0.012 s	
<a href="#">legend&gt;make_legend</a>	2	1.238 s	0.032 s	
<a href="#">closereq</a>	3	1.225 s	0.850 s	

Fig. 8. Matlab results with time processing.

### 3 | RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we discuss the results of multi robot inspired in swarm robotics system to rescue victims. Inspired by the organization of social insects, such as ants, bees and termites, and the formation of schools of fish and birds in flight, swarm robotics is a field of study that seeks the best computational paths for robots to exchange information and act together, according to a common objective for which they were programmed. They are computational solutions that are in the field of study of several groups of researchers in the world.

Still without commercial examples, swarm robotics has the prospect of use both in closed and open places, such as at sea, in the inspection and repair of underwater platforms, in maritime surveillance and in the air, with drones equipped with systems to monitor borders, for example.

In the third study, by Mendonça et al. (M. MENDONÇA, et al, 2017), the architecture was scaled for its use in systems based on swarm robotics, also applying concepts of Ant Colony Optimization (ACO) for the evolution of the robots trajectory. The approach uses only one robot released into the environment at a time, leaving pheromones along the way. The next robot is released when the previous robot ends the route or collides with obstacles. Finally, the last two contributions use both FLCs and Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) for a group of homogeneous robots working simultaneously. The results of both approaches were compared in two simulation scenarios, with 1 and 4 robots operating (M. MENDONÇA, et al, 2016), (M. MENDONÇA, et al, 2019).

### 4 | CONCLUSIONS

In the mixer's control, the results were satisfactory because the variables were within the desired ranges even with disturbances in the process.

In the case of the alcoholic fermenter process, the FCM-PID mechanism obtained the best responses according to the analyzed parameters, obtaining the lowest values in all of them considering the analyzed campaign.

Finally, These aspects suggest that the DFCM control can be successfully used in autonomous robots since this controller presented optimized results compared to FLC.

Future research will focus on exploiting the potential of the soft computing techniques in industrial process control, including disturbances, new setpoint, and others changes in the processes addressed. Three important research topics are considered. First, we would like to embed all the developed controllers in other platforms, like Raspberry PI, Toradex, and others, to verify the low computational complexity, time response, and software portability of the FCM-based controllers. Secondly, addressing a real-time MIMO controller for temperature and level in an actual tank prototype, for example.

## REFERENCES

- B. KOSKO. **Fuzzy cognitive maps**. *International Journal of Man-Machine Studies*. v. 24, n. 1, p. 65–75, 1986.
- B. KOSKO. **Bidirectional Associative Memories**. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. v. 18, n. 1, p. 49–60, 1988.
- E. BONABEAU, M. DORIGO, G. THERAULAZ. **Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems**. New York, USA: Oxford University Press. 1999.
- E. C. TOLMAN. **Cognitive maps in rats and men**. *Psychological Review*. v. 55, n. 4, p. 189–208, 1948.
- E. H. MAMDANI. **Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. v. 121, n. 12, p. 1585, 1974.
- E. I. PAPAGEORGIOU. **Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering**. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014.
- F. LIMA, G. SERRA, G. **Fuzzy PID controller multiobjective genetic design**. *IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2015.
- K. J. ÅSTRÖM, B. WITTENMARK. **Adaptive Control 2**. ed. USA: Dover Publications. 2008.
- K. M. PASSINO, S. YURKOVICH. **Fuzzy Control 1**. ed. Menlo Park CA USA: Addison Wesley. 1998.
- K. OGATA. **Modern Control Engineering**. [s.l.: s.n.]. v. 17, 2010.
- L. A. ZADEH. **Fuzzy Sets**. *Information and control*. v. 353, p. 338–353, 1965.
- L. BASSI. **Industry 4.0: Hope, hype or revolution?**. *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*. Anais...Modena, Italy: IEEE, 2017.
- L. D. R. S. SILVA JUNIOR, N. NEDJAH. **Distributed strategy for robots recruitment in swarm-based systems**. *International Journal of Bio-Inspired Computation*. 2016.
- M. A. S. MARTCHENKO, et al. **Investigating Stability Analysis Issues for Fuzzy Cognitive Maps**. *11<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation - MED'03*. Anais...Rhodes, Greece: 2003.
- M. F. MOLLON et al. **Control of Non-linear Equation of Submarine Using PI-like Fuzzy Controller**. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. v. 6495, n. 12, p. 85–91, 2017.
- M. MAHER. **Modélisation et élaboration d'algorithmes d'estimation et de commande : application à un bioprocédé**. [s.l.: s.n.]. 1995.

M. MENDONÇA, et al. **A dynamic fuzzy cognitive map applied to chemical process supervision.** *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. v. 26, n. 4, p. 1199–1210, 2013.

M. MENDONÇA, et al. **A cooperative architecture for swarm robotic based on dynamic fuzzy cognitive maps.** *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. v. 59, p. 122–132, 2017.

M. MENDONÇA, et al. **Hybrid Dynamic Fuzzy Cognitive Maps and Hierarchical Fuzzy logic controllers for Autonomous Mobile Navigation.** *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. Anais...Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016.

M. MENDONÇA, et al. **Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps.** *2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. Anais...New Orleans, LA, USA, USA: IEEE, 2019.

M. PUHEIM, J. VAŠČÁK, L. A. MADARÁSZ. **A proposal for Multi-Purpose Fuzzy Cognitive Maps library for complex system modeling.** *SAMI 2015 - IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*. Anais...Herľany, Slovakia: 2015.

P. P. SOARES, et al. **Group of Robots Inspired by Swarm Robotics Exploring Unknown Environments.** *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. Anais...Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2018.

R. AXELROD. **Structure of decisions: the cognitive maps of political elites.** 1. ed. *Princeton, NJ, USA: Princeton University Press*. 1976.

V. ELENI, G. PETROS. **New Concerns on Fuzzy Cognitive Maps Equation and Sigmoid Function.** *25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. Anais...Valletta, Malta: 2017.

Y. BOUTALIS, T. L. KOTTAS, M. CHRISTODOULOU. **Adaptive estimation of fuzzy cognitive maps with proven stability and parameter convergence.** *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. v. 17, n. 4, p. 874–889, 2009.

Y. BOUTALIS, T. KOTTAS. **On the Existence and Uniqueness of Solutions for the Concept Values in Fuzzy Cognitive Maps.** *47<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*. Anais, Cancun, Mexico: IEEE, 2008.

Y. MIAO, et al. **Dynamical cognitive network - an extension of fuzzy cognitive map.** *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. v. 9, n. 5, p. 760–770, 2001.

MENDONÇA, M. et al. **Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps.** 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). Anais...New Orleans, USA: IEEE, jun. 2019Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8858847/>>

MENDONÇA, M. et al. **Multi-robot exploration using Dynamic Fuzzy Cognitive Maps and Ant Colony Optimization.** 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). Anais...Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2020

## DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO SOBRE FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO EM ROBÓTICA MÓVEL

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 13/11/2021*

### **José Lucas Araújo dos Santos**

Universidade Federal do Maranhão  
São Luís – Maranhão  
<http://lattes.cnpq.br/7843103618113059>

### **Luciano Buonocore**

Universidade Federal do Maranhão  
São Luís – Maranhão  
<http://lattes.cnpq.br/4306322037948988>

### **Luiz Eugênio Santos Araújo Filho**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
São José dos Campos – São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/6067438006470805>

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta os resultados das atividades de estágio curricular realizado no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, visando fazer uma pesquisa de implementações de filtros probabilísticos aplicados à solução do problema de localização simulada para robôs em ambientes internos. Como resultados, foram gravadas três videoaulas, disponibilizando material didático a ser usado na disciplina Robótica Móvel Probabilística, um para cada categoria de filtro: Kalman, Kalman Estendido e de partículas conhecido como Adaptive Monte Carlo Localization. Uma vez que o filtro de Kalman é pouco utilizado como solução à localização em robótica móvel, devido à sua dinâmica linear no processo de estimação, ele é apresentado em

uma aplicação de sistema de rastreamento de objeto. As teorias de cada filtro probabilístico, bem como todas as suas implementações em videoaulas são apresentadas, onde é comentando sobre a ação de convergência dos mesmos nas estimações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Localização; Filtros probabilísticos; Videoaulas; Robótica.

### DEVELOPMENT OF INSTRUCTIONAL MATERIAL ON PROBABILISTIC FILTERS USED TO SOLVE THE LOCALIZATION PROBLEM IN MOBILE ROBOTICS

**ABSTRACT:** This study presents the results of the curricular internship activities carried out in the Electrical Engineering Course at Universidade Federal do Maranhão visioning the research of probabilistic filter implementations applied to solve the task of mobile robots simulated localization for indoor environments. As a result, three video lessons were recorded, providing didactic material to be used in the Probabilistic Mobile Robotics course, one for each type of filter: Kalman, Extended Kalman and Particles known as Adaptive Monte Carlo Localization. Once Kalman Filter is rarely used as a mobile robotics localization solution due to its linear dynamics in the estimation process, it is presented in an object tracking system application. The theories for each probabilistic filter and all implementations in the video lessons are presented with discussions about their convergence action on the estimations.

**KEYWORDS:** Localization; Probabilistic filters; Video lessons; Robotics.

## 1 | INTRODUÇÃO

A robótica é um ramo de pesquisa em crescente evolução e tem demonstrado sua importância pela presença cada vez maior de diversos tipos de robôs no cotidiano das pessoas, como lares, serviços, produção industrial e até em pesquisas em outros planetas. Essa gama de aplicabilidade, seja em apoio ou mesmo em substituição ao trabalho humano, torna-os imprescindíveis na sociedade moderna (ROMERO et al, 2017).

Além dos robôs fixos, exemplificados como os braços robóticos amplamente utilizados na indústria automobilística, há outros tipos como os móveis e os híbridos (associação entre robô móvel e fixo). Em particular, os robôs móveis são sistemas capazes de se movimentar e interagir de forma inteligente com o ambiente por onde navegam, podendo realizar três tarefas básicas, no caso, mapeamento, planejamento de trajetória e localização. Outras funções mais complexas são a junção de duas ou três dessas citadas (STACHNISS, 2006). Para tanto, podem ser utilizados diferentes algoritmos, como os filtros probabilísticos, os quais permitem estimar a pose do robô ao longo do tempo em que realiza a tarefa, baseando-se em dados adquiridos pelos sensores na medição dos objetos presentes no ambiente.

Este trabalho apresenta os resultados da pesquisa realizada sobre filtros probabilísticos mais comuns, no caso Kalman (KF), Kalman Estendido (EKF) e filtro de partícula melhorado (AMCL), com objetivo de servir de material didático disponibilizado no formato de videoaulas, servindo para uso na disciplina Robótica Móvel Probabilística, oferecido regularmente ao Curso de Engenharia Elétrica da UFMA (Universidade Federal do Maranhão) desde 2014. Todo o material utilizado na confecção das videoaulas foi extraído de trabalhos disponibilizados na internet, sendo devidamente referenciados quando forem citados.

## 2 | TAREFAS EXECUTADAS EM ROBÓTICA MÓVEL

Como primeira tarefa básica tem-se o mapeamento, onde o sistema robótico possui a priori o conhecimento das suas posições e orientações, denominado poses. A solução a essa tarefa consiste na construção de um mapa que represente o ambiente onde o robô está inserido, por meio de medidas adquiridas nesse espaço. A depender do tipo de sensor empregado na aquisição dessas medidas, elas apresentam maior (ex, sonar e infravermelho) ou menor ruído (ex, scanners a laser) (WOLF e SUKHATME, 2007).

O problema de planejamento de trajetória tenta responder à pergunta: “Qual o melhor caminho para se chegar do ponto A ao B?” (KOUBAA et al., 2018). Nele, o robô deve encontrar um percurso que o leve com segurança e no menor tempo possível ao objetivo, uma vez que estas duas variáveis influenciam no tempo de processamento, consumo de energia e no sucesso em alcançar certo objetivo, entre outros motivos (KOUBAA et al., 2018).

Por fim, a localização tem por objetivo estimar as poses do robô no ambiente, utilizando-se do pré-conhecimento do ambiente por meio de um mapa fornecido a priori. O robô utiliza de seus sensores para adquirir medidas do ambiente que serão incorporadas em uma fase do algoritmo probabilístico, usado na solução a esse problema (HUANG e DISSANAYAKE, 2016).

### 3 I FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS EM LOCALIZAÇÃO

O desafio apresentado ao se realizar localização em robótica móvel é descobrir a pose de um robô móvel ao longo do tempo. Todavia, os meios que o robô se utiliza para obter dados de distâncias e ângulos do seu ambiente são através de sensores, os quais sempre possuirão certo grau de incerteza em suas medidas (ruídos). Desta forma, algoritmos de localização foram desenvolvidos de modo a se criar estimações, com a incerteza de sua pose mantida em níveis que permitem o gerenciamento das mesmas, de forma que aconteça a convergência do filtro durante toda a sua execução.

Estes algoritmos são variações do filtro de Bayes que possibilitam realizar a estimação de variáveis que não podem ser medidas diretamente (pose), porém utilizam da inferência estatística para fazê-la a partir dos dados de distâncias e ângulos medidos pelos sensores (THRUN *et al.*, 2005). A Eq. 1 descreve a regra de Bayes.

$$p(x | y) = \frac{p(y | x) \cdot p(x)}{p(y)} \quad (1)$$

Na equação acima, duas variáveis aleatórias são utilizadas, onde  $x$  representa o estado atual e  $y$  as medidas efetuadas nas poses preditas do robô. Desta forma,  $p(x | y)$  constitui a distribuição de probabilidade do estado posterior, ou seja, a probabilidade de se obter um estado  $x$  dado conhecida as medidas  $y$ . O termo  $p(x)$  indica a distribuição de probabilidade do estado anterior ou predito, enquanto  $p(y | x)$  corresponde à probabilidade das medidas adquiridas e conhecidas  $y$ , considerando-se a pose predita  $x$ , referida como inferência estatística. A esse tipo distribuição dá-se o nome de modelo generativo, pois permite produzir conhecimento não disponível de forma direta. Por fim,  $p(y)$  normaliza a função  $p(x | y)$ , trazendo-a para o intervalo entre 0 e 1, onde seu valor não depende da variável aleatória (THRUN *et al.*, 2005).

Dessa forma, os filtros probabilísticos ainda que sejam implementados considerando aspectos como a dinâmica dos sistemas, formas de tratamento do espaço de estado (contínuo ou discreto), além de outros fatores, possuem duas fases consecutivas sequenciais de operação, ocorrendo de forma recursiva em tempos discretos de estimação dos estados (THRUN *et al.*, 2005):

- a) Predição: obtido a partir de uma transição de estados, envolvendo a aplicação do controle que promove o movimento do robô, normalmente ampliando as incertezas

sobre a estimação do estado; e

b) Atualização: realização e incorporação das medidas na estimação do estado, normalmente relacionado à diminuição da sua incerteza.

O filtro probabilístico essencialmente deve ser capaz de gerenciar incertezas na estimação dos estados que caracterizam a tarefa em execução (pose, no caso de localização). A convergência do filtro, que significa a sua capacidade em resolver o problema, envolve tanto a ampliação das incertezas (fase de predição) quanto sua minimização (atualização). Neste artigo serão apresentados exemplos implementados de três filtros bastante empregados não só em robótica.

### 3.1 Filtro de Kalman

O KF (Kalman Filter) consiste em uma técnica de filtragem de dados e aplicação em sistemas lineares gaussianos. Por meio da parametrização de momentos, a confiança do estado (belief) é representada, no momento discreto  $t$ , por uma média  $\mu_t$  (vetor de poses) e uma covariância  $\Sigma_t$  (matriz quadrada), sendo aplicada somente a estados contínuos com ruídos gaussianos (THRUN et al., 2005).

Este algoritmo utilizado em localização é executado recursivamente, durante a navegação do robô, nas duas etapas sequenciais já mencionadas: predição e atualização. A Figura 1 descreve em alto nível o algoritmo KF.

- 1: **Algoritmo de filtro e Kalman ( $\mu_{t-1}, \Sigma_{t-1}, u_t, z_t$ ):**
- 2:  $\bar{\mu}_t = A\mu_{t-1} + Bu_t$
- 3:  $\bar{\Sigma}_t = A\Sigma_{t-1}A^T + R_t$
- 4:  $K_t = \bar{\Sigma}_t C_t^T (C_t \bar{\Sigma}_t C_t^T + Q_t)^{-1}$
- 5:  $\mu_t = \bar{\mu}_t + K(z_t - C_t \bar{\mu}_t)$
- 6:  $\Sigma_t = (I - K_t C_t) \bar{\Sigma}_t$
- 7: **retornar  $\mu_t, \Sigma_t$**

Figura 1 - Representação do algoritmo de filtro de Kalman.

Fonte: Adaptado de Thrun et al. (2005).

As linhas 1 e 2 da Figura 1 representam a fase de predição no estado  $t$ , onde o vetor média e a matriz covariância predita,  $\bar{\mu}_t$  e  $\bar{\Sigma}_t$ , respectivamente, são calculadas através da incorporação do controle ( $u_t$ ) dependendo do estado anterior ( $t - 1$ ). A fase de atualização inicia na linha 4, é calculado o ganho de Kalman ( $K_t$ ) que indica o grau em que o erro na medição ou inovação ( $z_t - C_t \bar{\mu}_t$ ) é incorporado à média do estado posterior (linha 5) e também na covariância (linha 6), atualizando a estimação do filtro em relação ao predito.

### 3.2 Filtro de Kalman Estendido

Na prática, os problemas em robótica e demais áreas envolvem dinâmicas de

comportamentos não lineares. Dessa forma, estendeu-se o conceito do KF para que se pudessem abordar também problemas em que os modelos de medição e transição de estados sejam governados por funções não lineares. A essa variante, também de ruído gaussiano, deu-se o nome de filtro EKF (Extended Kalman Filter). Na Figura 2 é apresentado um comparativo entre os dois tipos de dinâmica do sistema, linear (KF) e não linear (EKF) dos filtros parametrizados por funções gaussianas. Na Figura 2a pode-se ver a transformação que o estado 'x' (prior) é conduzido na estimação do posterior 'y', considerando a função de densidade de probabilidade gaussiana na computação das incertezas inerentes a estimação.

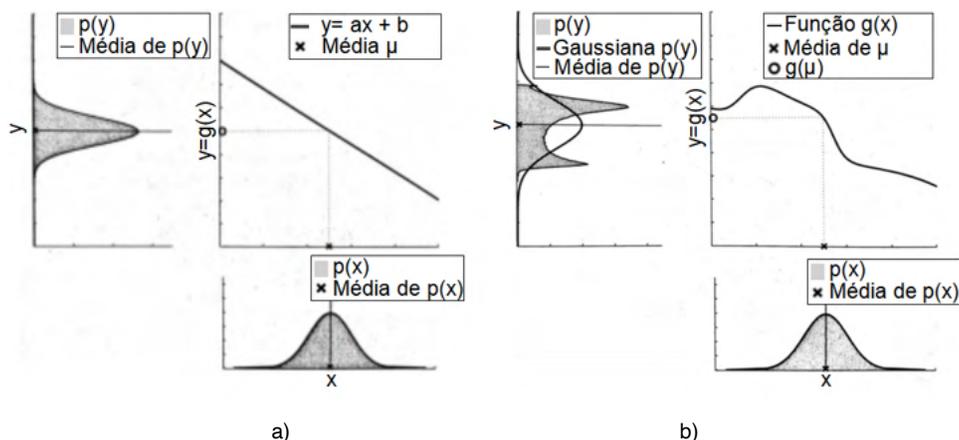


Figura 2 – Comportamento da dinâmica dos filtros: a) Linear (KF) e (b) Não linear (EKF).

Fonte: Adaptado de Thrun et al. (2005).

Entretanto, na Figura 2b o estado 'x' de entrada (prior), representado por uma distribuição gaussiana, passa por uma função não linear, gerando um estado 'y' (posterior) não gaussiano, devido a não linearidade dos modelos. Como é necessário que a saída seja expressa também na forma gaussiana, faz-se uma simplificação dos modelos (medição e transição de estado) no ponto de interesse, onde a dinâmica não linear é transformada em linear através da expansão em série de Taylor de primeira ordem. Pode-se perceber que a média produzida está levemente deslocada do ponto de interesse, introduzindo erros na estimação (THRUN et al., 2005).

Em termos de algoritmo, a diferença entre o KF e EKF é a substituição das variáveis constantes  $A_t$ ,  $B_t$  do modelo de transição e  $C_t$  da medição pelas funções jacobianas nos modelos de movimento ( $G_t$ ) e medição ( $H_t$ ) obtidas na linearização em série de Taylor no ponto de interesse,  $g(u_t, x_{t-1}) \approx g(u_t, \mu_{t-1}) + G_t(x_{t-1} - \mu_{t-1})$  e  $h(x_t) \approx h(\bar{\mu}_t) + H_t(x_t - \bar{\mu}_t)$  respectivamente, mantendo a mesma estrutura da Figura 1 (THRUN et al., 2005).

### 3.3 Filtro de Partículas

O FP (Particle Filter), ao contrário dos KF e EKF, é uma proposta de solução não paramétrica, ou seja, aproxima a posterior por um número finito de valores, sendo largamente aplicado para representação da belief (multimodal complexa) onde se encontra o robô no ambiente. Ao invés de operar com incertezas na forma parametrizada gaussiana, discretiza o espaço de possibilidades, criando um número grande de hipóteses (característica multimodal) representadas pelas partículas.

A Figura 3a ilustra a discretização do estado prior ('x') contínuo, produzindo a posterior ('y') a partir de um modelo não linear (THRUN et al., 2005). Nesse processo, as distribuições das partículas se concentram em regiões de maior probabilidade, mostrada por uma função gaussiana em 'x' e 'y'. Funções de densidade de probabilidade contínuas, não necessariamente gaussianas, porém conhecidas, são usadas no FP na fase de predição, durante o processo de amostragem de partículas, quando elas são propagadas do estado  $t-1$  para  $t$ . Nessa fase (linhas 3 a 7 do algoritmo na Figura 3b), o modelo de movimento ou transição de estado é empregado ( $p(x_t^{[m]}|u_t, x_{t-1})$ ) para gerar as partículas da posterior ( $x_t^{[m]}$ ) que, utilizando das medidas realizadas no ambiente ( $p(z_t | x_t^{[m]})$ ), adiciona o peso ou importância dessa partícula ( $w_t^{[m]}$ ) como hipótese da pose real do robô.

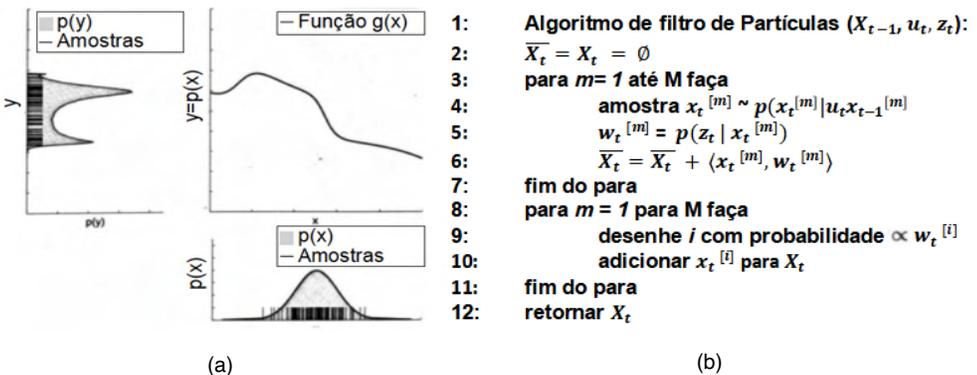


Figura 3 – Filtro de partículas: a) dinâmica não linear entre estados; e b) Algoritmo.

Fonte: Adaptado de Thrun et al. (2005).

A tupla (partícula e seu peso) é adicionada ao conjunto predito da posterior ( $\bar{X}_t$ ). Na fase seguinte, que representa a atualização do FP (linhas 8 a 11), ocorre o ponto chave desse tipo de filtro, processo conhecido como reamostragem de partículas ou amostragem da importância ou de seu peso. Nesse procedimento somente as partículas de maior peso tendem a sobreviver (adicionar  $x_t^{[i]}$  para  $X_t$ ), normalmente se aproximando do estado real do robô. É o fenômeno darwiniano de sobrevivência do mais forte, no caso partículas de maior peso no estado posterior ( $X_t$ ). Na reamostragem existe a diminuição do número de

hipóteses de estado em relação ao de partículas, fenômeno conhecido como depleção de partículas e existem formas no FP de contorná-lo (THRUN et al., 2005).

#### 4 | EXEMPLO DO EMPREGO DO FILTRO DE KALMAN

Para a implementação da videoaula usando KF<sup>1</sup>, utilizou-se uma adaptação do experimento de Rhudy et al. (2017).

Foi o único empregado neste trabalho sem a aplicação à robótica, devido ao difícil acesso a exemplos didáticos na literatura, por ser um filtro pouco usado.

Desta forma, o experimento consiste na seguinte problemática (Figura 4): considera-se um objeto caindo da altura de um prédio de 30 m em queda livre, desconsiderando-se a resistência do ar. No solo tem-se um sensor a laser para medir a distância que o objeto está do solo, o qual acompanha a trajetória deste projétil e faz medições a cada 1 ms para que, após a fase de predição, seja computada a atualização da estimativa da pose (altura do objeto) pelo KF.

Uma videoaula foi produzida de forma a apresentar a solução do experimento em duas etapas. A primeira foi a apresentação de todo o desenvolvimento matemático para obter os valores de variáveis necessárias a serem utilizadas no código. Na sequência foi feita a apresentação do código em MATLAB com explicações passo a passo que referenciam as etapas do algoritmo do KF.

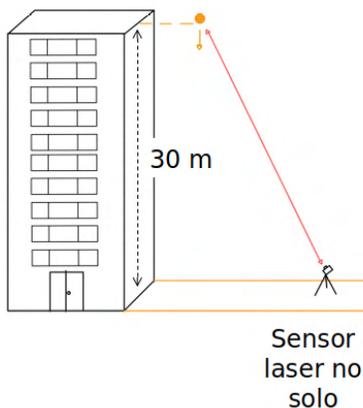


Figura 4 – Emprego do Filtro de Kalman no rastreamento da posição de um objeto.

Fonte: Adaptado de Rhudy *et al.* (2017).

Ao final do experimento foi apresentada uma análise gráfica dos resultados obtidos da execução do código proposto, conforme mostra a Figura 5.

<sup>1</sup> Site: <https://drive.google.com/file/d/13H8KqRJXZT6CO3-NZSziQM3v8RHR81r9/view>

São plotados os três tipos de poses do objeto no tempo, com destaque ampliado logo nas primeiras iterações do filtro: o real calculado através da teoria da cinemática clássica (vermelho), o da medição simulada com a inserção de ruídos no medidor a laser (verde) e o estimado pelo KF. Percebe-se claramente a convergência do filtro, quando a pose estimada tende ao valor calculado (ideal). Este experimento foi escolhido de modo a simplificar e facilitar o entendimento prático dos conceitos do KF de modo a proporcionar um entendimento prático com a teoria ensinada na disciplina de Robótica Móvel Probabilística.

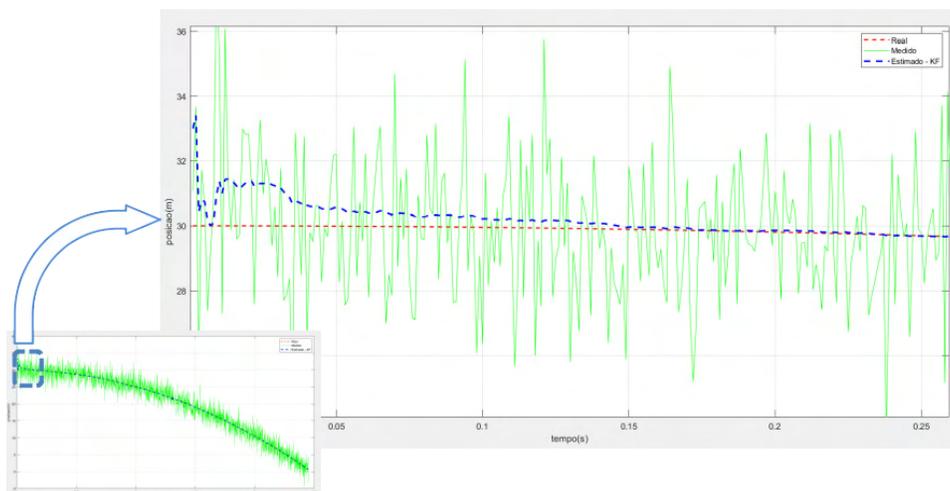


Figura 5 – Representação gráfica do resultado gerado pelo experimento com o KF.

Fonte: Autor.

## 5 | EXEMPLO DO EMPREGO DO FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO

Diferente do KF, o EKF, mesmo sendo o que apresenta menor custo computacional dos que abordam o problema de localização de robôs que são representados por modelos de movimento e medição com dinâmica não linear (ver Figura 2b), é ainda bastante empregado em pesquisas.

O exemplo usado para a construção dessa videoaula<sup>2</sup>, apresenta o comportamento do EKF na localização de um robô móvel de forma simulada e foi disponibilizado no repositório do GitHub do usuário Joedavid91<sup>3</sup>. Para a problemática proposta, considera-se um robô móvel livre em um ambiente de escritório. O objetivo é implementar localização utilizando EKF em um mapa previamente fornecido com base em locais conhecidos no ambiente (pontos de referência ou landmarks). Para a resolução deste experimento é proposta a utilização de algumas ferramentas computacionais: a) sistema operacional Ubuntu 14.04;

2 Site: <https://drive.google.com/file/d/1pTDS8Tjkse23pRrP6bHpFG8Q3Aw0LfFr/view>

3 Site: <https://github.com/joedavid91/FOMR-2>

b) ROS (Robot Operating System) versão Indigo<sup>4</sup>; c) Simulador de robôs Gazebo<sup>5</sup>; e d) MATLAB. Com as três primeiras ferramentas citadas é criado um ambiente com um robô simulado que deve ser teleoperado, gerando uma rede de comunicação por intermédio do ROS entre a máquina virtual, onde a simulação robô-ambiente ocorre, e a principal que executa o algoritmo EKF no MATLAB. A Figura 6 apresenta o ambiente de simulação proposto com o robô pronto para execução, o qual deve percorrer as áreas do ambiente, passando por todos os pontos de referência (três bolas coloridas: azul, verde e vermelha).

Durante a videoaula foi apresentada toda a preparação do ambiente de simulação (Gazebo) necessária para a execução do experimento.

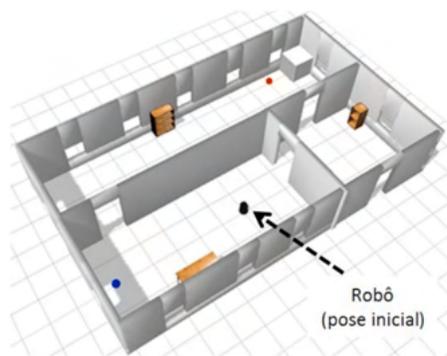


Figura 6 – Representação gráfica do resultado gerado pelo experimento com o KF.

Fonte: Autor.

Posteriormente, a matemática do EKF aplicada à localização foi apresentada, explicitando detalhadamente os principais pontos do algoritmo. Ao final foram comentados os resultados com uma síntese dos conhecimentos adquiridos ao longo do experimento. Na Figura 7 é mostrado o slide usado na videoaula com os resultados (gráfico à direita) em que foi possível comparar as trajetórias real (vermelho) e estimada (azul) do robô no Gazebo. Percebe-se nas trajetórias mostradas, que à medida que o robô avança, o algoritmo EKF gera uma estimação (linha azul) que se distancia de sua trajetória real (linha vermelha), a partir somente do seu sinal de controle, fazendo o filtro divergir. Uma vez que o robô visualiza um ponto de referência (bola colorida), o algoritmo incorpora as medidas da mesma à sua estimação, minimizando-a.

<sup>4</sup> Site: <https://www.mathworks.com/support/product/robotics/v3-installation-instructions.html>

<sup>5</sup> Site: idem.

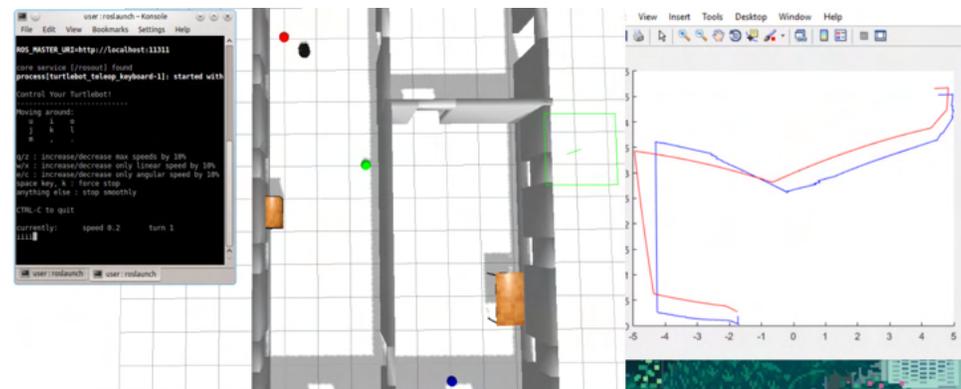


Figura 7 – Apresentação dos resultados do EKF na solução do problema de localização.

Fonte: Autor.

Este processo permite a convergência do filtro, a qual pode ser percebida visualmente pela aproximação cada vez maior entre a estimação e a trajetória real do robô nas proximidades dos pontos de referência. Desta forma, observa-se a importância da incorporação de medidas para que o mesmo tenha uma melhor convergência, o que sugere a presença de obstáculos em pontos estratégicos do ambiente.

## 6 | EXEMPLO DO EMPREGO DO FILTRO DE PARTÍCULAS

O experimento de Filtro de partículas utiliza-se da problemática e solução propostos pela MathWorks e disponível em seu site<sup>6</sup>. O problema baseia-se em considerar um robô móvel livre em um ambiente de escritório (Figura 8) e o objetivo é implementar uma solução de localização utilizando filtro de Partículas também conhecido como AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization). Para a resolução deste experimento é proposta a utilização de algumas ferramentas computacionais: a) sistema operacional Ubuntu 18.4.04; b) ROS versão Melodic<sup>7</sup>; c) Simulador Gazebo; e d) MATLAB. Por meio das três primeiras ferramentas é montado um ambiente de simulação como uma rede ROS responsável por comunicar a máquina virtual Ubuntu (execução da simulação) com a máquina principal (onde o código em MATLAB contendo o algoritmo de Filtro de Partículas é executado).

6 Site: <https://www.mathworks.com/support/product/robotics/v3-installation-instructions.html>

7 Site: <https://www.mathworks.com/support/product/robotics/ros2-vm-installation-instructions-v3.html>

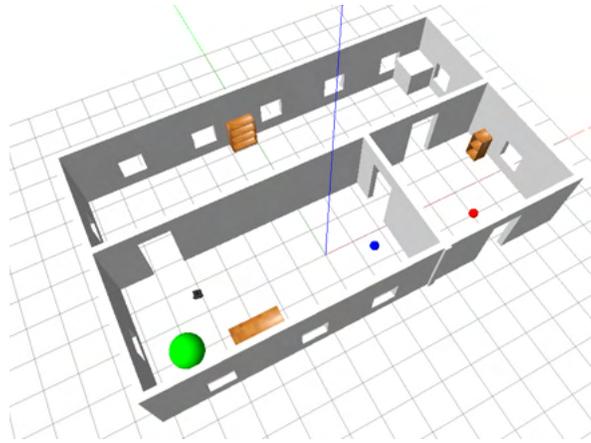


Figura 8 - Ambiente de simulação no Gazebo para o experimento do filtro AMCL.

Fonte: Autor.

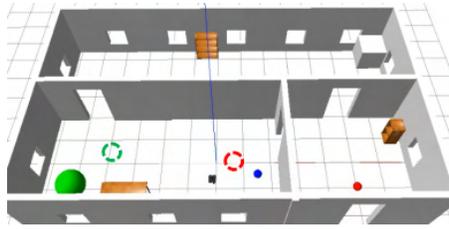
Informações sobre controles de movimento do robô, leitura de medidas do sensor (scanner a laser). são trafegados nessa rede por intermédio de recursos denominados Tópicos<sup>8</sup>.

Durante a videoaula<sup>9</sup> é apresentado o passo-a-passo da preparação do ambiente simulado onde o robô irá executar uma trajetória pré-determinada. Em seguida, o código AMCL implementado em MATLAB é explicado em seus principais pontos, destacando dois tipos de soluções em localização: a) Global, onde não se conhece uma estimativa da pose inicial do robô e as partículas são espalhadas por todo o ambiente; e b) Local, onde as partículas do filtro são espalhadas em uma região inicialmente conhecida com uma incerteza pré-definida. O KF e o EKF só conseguem dar solução ao problema de localização local em função de carregar a estimação da pose em um uma única hipótese (unimodal). De forma distinta, o AMCL discretiza o espaço das variáveis de estado do filtro, dotando-o de um número grande de hipótese na estimação da pose do robô, ou seja, com característica multimodal (THRUN et al., 2005). Ao final do experimento são apresentados os resultados das simulações para diferentes momentos de amostragem de partículas, além de ser feito um comparativo obtido pelo emprego das localizações global e local.

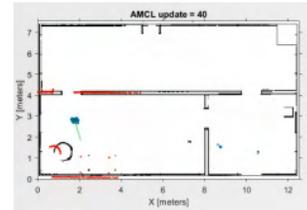
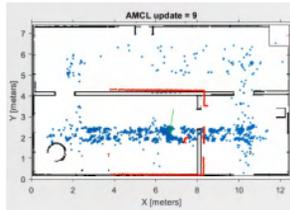
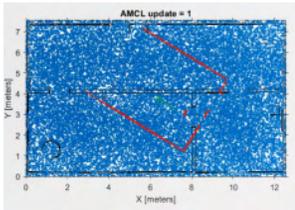
Na Figura 9 é mostrado um slide dessa videoaula, onde são indicados os resultados com a comparação de três momentos de amostragem do filtro de partículas em execução.

<sup>8</sup> Site: <http://wiki.ros.org/Topics>

<sup>9</sup> Site: <https://drive.google.com/file/d/1mwwmrvPSEt3hnhZpieHTiNmzIUdy3fV/-view>



(a)



(b)

Figura 9 – Resultados obtidos na simulação AMCL: a) ambiente com objetos de referência em seu interior e b) distribuição das partículas na localização global no início em três iterações.

Fonte: Autor.

Na Figura 9a é mostrado o ambiente de simulação percorrido pelo robô, onde três obstáculos são usados para referenciá-lo no ambiente. Na Figura 9b são apresentadas as partículas (azul) no ambiente em três iterações distintas do AMCL global: a) no início, quando as partículas são espalhadas por todo o ambiente, já que sua pose inicial é desconhecida (gráfico da direita); b) na iteração 9 quando o robô já fez algumas medições do ambiente e a nuvem de partículas começa a se concentrar (centro); e c) na iteração final 40 em que se percebe a núvem concentrada em um ponto do ambiente, indicando a convergência do filtro (direita). As poses inicial e final são destacadas no ambiente pelos círculos tracejados vermelho e verde, respectivamente.

## 7 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foram implementados e testados com sucesso três filtros probabilísticos usados na solução ao problema de localização: KF, EKF e PF melhorado (AMCL). Foi o resultado obtido em um estágio de pesquisa desenvolvido no LRC/DEE/CCET da UFMA, onde é ofertada a disciplina Robótica Móvel Probabilística que envolve o tema. O objetivo foi gerar material didático na forma de videoaulas para uso nessa disciplina. Um importante ponto observado nos resultados de todos os filtros foi a sua convergência, quando medidas de obstáculos no ambiente conseguem minimizar as incertezas sobre sua pose no ambiente, o que é reforçado na literatura com fator importante.

## REFERÊNCIAS

HUANG, S.; DISSANAYAKE, G. **Robot Localization: An Introduction**. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 2016. pp. 1 – 10.

KOUBAA, A; BENNACEUR, H.; CHAARI, I.; TRIGUI, S.; AMMAR, A. et al. **Robot Path Planning and Cooperation: Foundations, Algorithms and Experimentations**. 1 ed., Springer, 2018. 190 p.

RHUDY, M, B; SALGUERO, R, A; HOLAPPA, K. **A Kalman Filtering Tutorial For Undergraduates**. International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES) Vol.8, No.1, February 2017. pp. 1 – 18.

ROMERO, R. A. F; JUNIOR, E. P. S.; OSÓRIO, F. S; WOLF, D. F. **Robótica Móvel**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 302 p.

STACHNISS, C. **Exploration and Mapping with Mobile Robots**. Tese de Doutorado. University of Freiburg, Department of Computer Science, 2006, 244 p.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. **Probabilistic Robotics**. Cambridge: The Mit Press, 2005. 647 p.

WOLF, D. F.; SUKHATME, G. S. **Localization and mapping in urban environments using mobile robots**. Journal of the Brazilian Computer Society. Vol 13. No 4. Campinas. 2007. pp. 69 – 79.

## EFFECTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ESPAÑOLA

*Data de aceite: 10/01/2022*

**Paula Romo Santos**

IES Río Duero

**Begoña Lapeña Barrio**

IES Río Duero

**RESUMEN:** Hoy en día, el vehículo eléctrico se presenta como una de las grandes soluciones a los problemas medioambientales actuales. Sin embargo, su implantación a nivel masivo podría conllevar consecuencias negativas como lo es el aumento en la demanda energética a nivel nacional. En este trabajo se analiza el impacto que supondría en la red de distribución eléctrica, la implantación del vehículo eléctrico de forma homogénea en el territorio español. Con este fin se han estudiado las principales características de la red de distribución española, así como las particularidades de los distintos tipos de vehículos eléctricos y los diferentes tipos de recarga. Con todos estos datos se ha desarrollado un simulador en Excel que predice cómo variaría la curva de demanda energética en función de la penetración del vehículo eléctrico, la capacidad de sus baterías, el consumo de cada tipo de vehículo y el porcentaje de cargas lentas o rápidas. Utilizando dicho simulador, se ha comprobado que aun en el peor de los escenarios, en el que hay un 100% de vehículos eléctricos y un 100% de cargas rápidas, la demanda energética máxima es muy inferior a la máxima potencia instalada en la red. Consecuentemente, se puede afirmar que el sistema de distribución eléctrico es totalmente

capaz de hacer frente a la implantación masiva del vehículo eléctrico. No obstante, con el fin de reducir las variaciones en la demanda energética a lo largo del día y lograr así un funcionamiento más eficiente, cobran especial importancia algunas propuestas de interacción entre el vehículo y la red como lo son los *Smart Grids*.

**PALABRAS CLAVE:** Vehículo eléctrico, red de distribución eléctrica, Smart Grid.

### EFFECT OF THE IMPLEMENTATION OF THE ELECTRIC VEHICLE ON THE SPANISH ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

**ABSTRACT:** Nowadays, the electric vehicle is presented as one of the main solutions to the current environmental problems. However, its massive implementation could lead to negative consequences, such as an increase in the national energy demand. In this paper we analyse how the homogenous implementation of the electric vehicle on the Spanish territory would affect the electrical distribution network. To this end, the main characteristics of the Spanish distribution network have been studied, as well as the features of the different types of electric vehicles and recharging systems. All this data has been used to develop an Excel simulator that can predict how the energy demand curve would vary depending on the penetration of the electric vehicle, the capacity of their batteries, the consumption of each type of vehicle and the percentage of slow or fast charges. Using this simulator, it has been found that even in the worst-case scenario, in which there is a 100% of electric vehicles and a 100% of fast charging,

the maximum energy demand is much lower than the maximum power installed in the grid. Consequently, it can be affirmed that the electric distribution network is able to cope with the massive deployment of electric vehicles. However, in order to reduce variations in energy demand over the course of the day and achieve a more efficient performance, some proposals for interaction between the vehicle and the network, such as *Smart Grids*, become particularly important.

**KEYWORDS:** Electric vehicle, Electric Grid, Smart Grid.

## 1 | ANÁLISIS DE VARIABLES

### 1.1 Sistema eléctrico español y demanda energética

Toda la red de transporte de energía de alta tensión de España es gestionada por la empresa Red Eléctrica de España, cuya misión es garantizar el correcto funcionamiento del sistema de suministro, así como la continuidad y abastecimiento de energía eléctrica en todo momento.

Desde su creación en 1985, la red se ha enfrentado a diferentes adaptaciones para hacer frente a incrementos de la demanda eléctrica motivados por agentes externos como la aparición del AVE (Alta Velocidad Española), en el año 92. Otro factor que podría acentuar las necesidades energéticas podría ser la implantación del vehículo eléctrico, por lo que es importante estimar cómo influirá en la demanda energética. No obstante, es necesario conocer también cuáles son las características y limitaciones de la red de distribución, así como los hábitos de consumo eléctrico a nivel nacional.

La potencia instalada en el conjunto del territorio nacional registró 104.122 MW al finalizar el año 2017[1]. Esta sería la máxima cantidad de potencia que podría suministrar el sistema utilizando al 100% sus plantas de producción. Sin embargo, se trata de un dato poco realista ya que sería imposible alcanzar un rendimiento tan alto.

En cuanto a la demanda energética, a partir de datos de Red Eléctrica de España [2], se ha recogido el consumo energético en cuatro días distintos: dos días laborales, uno de invierno y otro de verano y dos sábados, también uno de invierno y otro de verano. Estos representarán la tendencia de los demás días del año.

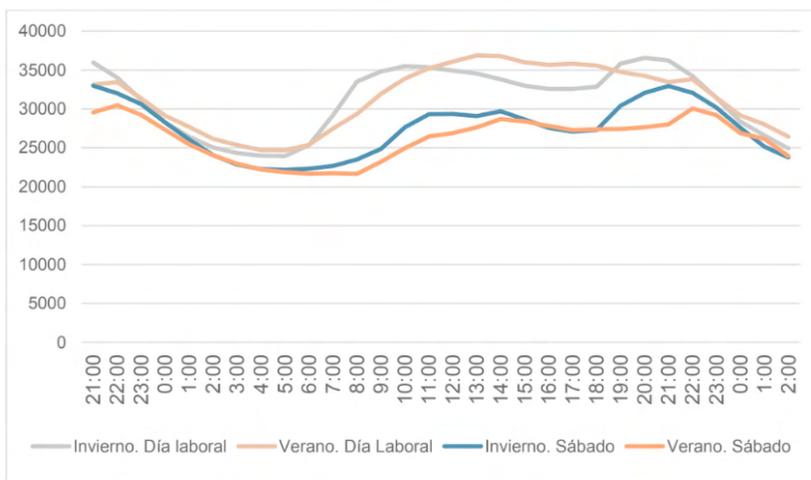


Figura 1. Gráfica de la demanda de consumo de energía eléctrica a lo largo de un día. (MW)

Como podemos ver en el gráfico, durante todo el año, a partir de las nueve de la noche comienza a disminuir la demanda energética, dando así lugar a un periodo de valle que dura toda la madrugada y en el que la demanda se aproxima a los 25.000 MW. Los días laborales la demanda vuelve a ascender entre las seis y las siete de la mañana, cuando comienza la actividad de la mayoría de comercios y empresas. Los sábados en cambio, la demanda no asciende hasta las nueve y media de la mañana, pero sin alcanzar los valores de los días laborales. En torno al medio día se alcanza el primer pico: en torno a los 35.000 MW los días laborales y 30.000 MW los festivos. Este pico se produce un poco antes los días laborales de invierno. Posteriormente, la demanda disminuye ligeramente y se mantiene más o menos estable, aunque en los días de invierno hay un pequeño valle alrededor de las cuatro. A partir de las seis la demanda comienza a aumentar hasta las ocho y media, horario en el que se produce el segundo pico, todavía un poco más acentuado que el anterior. No obstante, los días de diario de verano no se manifiesta este pico debido a que muchos negocios tienen horarios reducidos por las tardes.

## 1.2 Características del vehículo eléctrico y tipos de carga

Una vez analizadas las características de la red de distribución y los hábitos de consumo, falta estudiar otras variables relacionadas con el vehículo eléctrico como la cantidad de vehículos, la capacidad de sus baterías o su consumo. También se deben valorar otros aspectos referentes a la recarga del vehículo y que afectan directamente a la demanda energética, como lo son en tipo y el horario de recarga.

### *Cantidad y distribución de vehículos*

La cantidad de vehículos eléctricos en circulación es uno de los factores que claramente determinará la cantidad de energía demandada. Además, debemos conocer también la proporción de cada tipo de vehículo, dado que las capacidades de sus baterías son muy diferentes.

Según datos de AEDIVE (Asociación Empresarial para el Desarrollo e Impulso del Vehículo Eléctrico) [3] [4], en 2018 se vendieron un total de 15495, lo que representa un 1,01% de las ventas de vehículos totales. La distribución de las matriculaciones en función del tipo de vehículo se describe en la Figura 2.

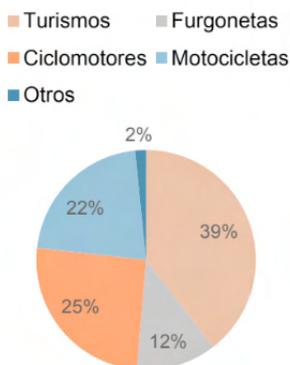


Figura 2. Matriculaciones de vehículos eléctricos según el tipo.

### *Capacidad de las baterías y consumo*

La capacidad de las baterías depende principalmente del tipo de vehículo.

- **Turismos**

Los turismos representaron casi el 40% de las matriculaciones de vehículos eléctricos en 2018. Según datos de Europa Press [5], el número de vehículos eléctricos en circulación se ha triplicado entre 2013 y 2017, de 10.356 unidades en 2013 a 27.598 al cierre de 2017, según recoge el Informe Anual 2017 de la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (Anfac).

Modelo	Capacidad de la batería (kWh)	Matriculaciones en 2018 según Aniacam	Consumo (Wh/km)[6]
Renault ZOE	41	1.418	133
Nissan Leaf	30 – 40	1.264	150
Smart EQ forfour	17.6	761	129 -131
Smart EQ fortwo	17.6	698	129
BMW i3	42.2	682	129
Volkswagen e-GOLF	24,2 – 35,8	436	127
Hyundai Kona	39 – 64	220	139
Hyundai Ioniq	38,3	202	94 – 115
Tesla Model S	60 – 100	166	170-188
Tesla Model X	60 -100	160	

Tabla 1. Coches eléctricos más vendidos en España en 2018. Modelo, capacidad de la batería, número de matriculaciones y consumo.

Para establecer la capacidad de la batería de los turismos se ha tomado como referencia los diez modelos de turismos más vendidos en 2018 y se ha calculado la media ponderada entre la capacidad de sus baterías y las unidades matriculadas, obteniendo un valor medio de **35,75 kWh**. De la misma manera se ha calculado el valor medio del consumo de **131,82 Wh/km**.

#### • Furgonetas

Las matriculaciones de furgonetas representaron en 2018 casi el 12% de las ventas totales de vehículos eléctricos. Atendiendo a los datos de Red Eléctrica de España, los modelos de furgonetas más vendidos son:

Modelo	Capacidad de la batería (kWh)	Consumo (Wh/km)
Renault Kangoo ZE	33	155
Nissan e-NV200	40	165
Peugeot Partner EV	22,5	177 – 259
Citroen Berlingo EV	22,5	177
Goupil G4	7,2 – 15,4	72 - 154

Tabla 2. Furgonetas más vendidas. Modelo, capacidad de sus baterías y consumo.

Para calcular la media de la capacidad de sus baterías se ha hallado la media aritmética de los valores recogidos en la tabla, obteniendo **25,86 kWh**. Igualmente se ha calculado el valor medio del consumo: **165,5 Wh/km**.

- **Autobuses**

Los autobuses son el tipo de vehículo eléctrico más escaso en número; sin embargo, por su alto consumo y su creciente implantación prevista para los próximos años juegan un papel considerable en la demanda energética.

Ciudad	Modelo	Capacidad de la batería (kWh)	Consumo (Wh/km)	Unidades
Madrid [8]	Rampini Wolta Bus-car.net	100		18 [9]
	Irizar i2e	376	1790	15
	Castrosua Teempus			5 (De un total de 13 autobuses, 8 son híbridos y 5 han sido modificados para ser eléctricos) [10]
Badajoz [11]	Byd2912-TZA	348	1300	15
Barcelona [12]	Irizar i2e	376kWh	1790	6
	Solaris Urbino 18e	120kWh	1460	5
Bilbao [13]	Irizar i2e	376	1790	6
Pamplona [14]	Vectia CAF Veris 12	44	1400	6
Valencia [15] [16]	Irizar i2e	376	1790	1
	BydK9UB	324	1290	1
Sevilla	Yutong E12 /CC9/ IC12	342		1
San Sebastián	Irizar ietram	150	1900	1

Tabla 4. Autobuses eléctricos por ciudades españolas. Modelo, capacidad de la batería, consumo y unidades.

A partir de los datos de capacidad de la batería y consumo de cada autobús junto con la cantidad de unidades de los mismos, se ha calculado la media ponderada obteniendo: **244,23 kWh** para las baterías y **158,54 Wh/km** para el consumo.

- **Ciclomotores y motocicletas**

Las matriculaciones de ciclomotores y motocicletas representaron en 2018 el 25,4% y 21,6% respectivamente. Según datos de Red Eléctrica de España [7], los modelos de ciclomotores y motocicletas más vendidos fueron los siguientes:

	Modelo	Capacidad de la batería (kWh)	Consumo (Wh/km)
Ciclomotores	Scutum SO2 Electric	2 – 6	45
	NIU NSPORT	4,2	26
	Lifan E3	1,44	28
	NIU MPRO	4	33
	Askoll ES1	1,045	40
Motocicletas	TorrotMuvi Electric	2,4	28
	Scutum SO2 Electric	2 – 6	45
	BMW C Evolution Electric	8 – 12,5	78
	Going Green The Core Electric	2,82	40
	Askoll ES Pro 70 Electric	2,82	29

Tabla 3. Ciclomotores y motocicletas más vendidas. Modelo, capacidad de la batería y consumo.

Para calcular el valor medio de la capacidad de la batería de los ciclomotores y las motocicletas se ha hallado primero la media aritmética con los datos de los modelos más vendidos de cada tipo, obteniendo un valor medio de 2,137 kWh para las baterías de los ciclomotores y de 4,458 kWh para las motocicletas. A continuación, se ha hallado la media ponderada de dichos datos con la proporción en matriculaciones de cada grupo (54% de ciclomotores y 46% de motocicletas), obteniendo un valor de **2,58 kWh**.

Se ha empleado el mismo procedimiento para calcular el valor medio del consumo. Este ha sido de 34,4 Wh/km para los ciclomotores y de 44 Wh/km para las motocicletas, de tal manera que el valor medio ponderado es **38,82 Wh/km**.

### *Tipo de recarga*

Existen tres tipos de recarga eléctrica en función de la rapidez de la misma. Cuanto más rápida sea, mayor intensidad y potencia demandará al sistema eléctrico [17].

**Recarga convencional.** Tiene una duración aproximada de 8 horas, por lo que tan solo necesita 16 amperios y 3,7 kW. Es la que menos energía requiere por lo tanto jugará un papel imprescindible para hacer posible la continuidad de suministro en la red de distribución.

**Recarga semi-rápida.** El vehículo tarda unas 4 horas en recargarse por completo, para ello requiere 32 amperios de intensidad y una potencia de 7,3 kW.

**Recarga rápida.** En tan solo 30 minutos se recarga el 80% de la batería, por lo que necesita una potencia mucho superior: 50 kW. Pese a ser la opción más equiparable a un repostaje normal y por tanto la más cómoda para el usuario, supone un gran impacto para la red de distribución.

Tipo de recarga	Duración (h)	Intensidad (A)	Potencia (kW)
Convencional	8	16	3,7
Semi-rápida	4	32	7,3
Rápida	0,5	63	50

Tabla 5. Comparación de la duración, intensidad y potencia de cada tipo de recarga.

No obstante, a modo de simplificación, a la hora de elaborar los modelos solo se han tenido en cuenta dos tipos de recarga: una rápida y otra lenta.

### *Horario de recarga*

La distribución del horario de recarga, junto al tipo de la misma, será un factor clave para alcanzar o no la mayor eficiencia del sistema de distribución. En un caso ideal, combinando ambas variables, se lograría rellenar los valles existentes en la curva de demanda eléctrica. En el caso contrario, si se realizase un gran número de recargas rápidas, muy demandantes, en las horas donde la demanda energética es mayor, podría llegar a saturarse la red eléctrica.

Para realizar las simulaciones se han establecido dos curvas de Gauss que representan la distribución de las recargas en función de su tipo, de tal manera que la mayoría de las recargas lentas se concentran durante la noche y las rápidas durante el día.

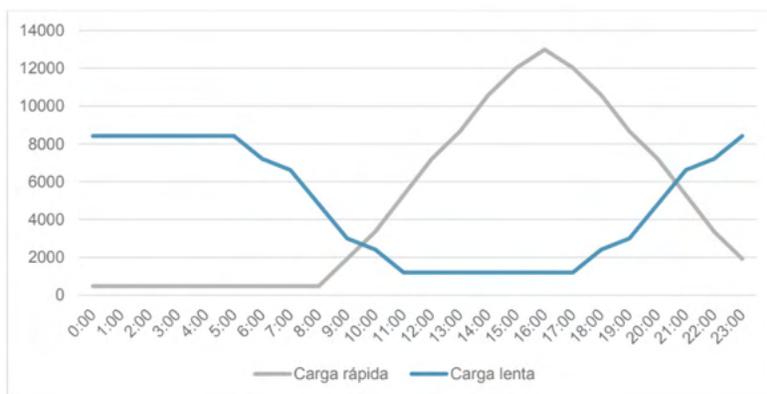


Figura 3. Gráfica de distribución de la demanda de energía eléctrica de las recargas a lo largo del día según el tipo de carga en (MW)

## 2 | ANÁLISIS DE DATOS

### 2.1 Simulación de posibles escenarios

Para medir el impacto del vehículo eléctrico se ha elaborado un simulador interactivo en Excel que permite modificar distintas variables como la penetración del vehículo eléctrico

según el tipo, capacidad de las baterías, km diarios recorridos, consumo y porcentaje y distribución de recargas rápidas o lentas; y ver cómo estas alteraciones afectan a la curva de demanda energética. Utilizando esta herramienta se han estudiado distintos escenarios.

*Impacto en función de la penetración con un 25% de recargas rápidas*

Utilizando los datos que se han ido exponiendo a lo largo del estudio y las curvas anteriores se ha elaborado un modelo de cómo podría afectar a la curva de la demanda la implantación del vehículo eléctrico con un 25% de recargas rápidas. Se ha considerado que la distancia recorrida media diaria es de 50km para los turismos, ciclomotores y motocicletas; 100km para las furgonetas y 150km para los autobuses.

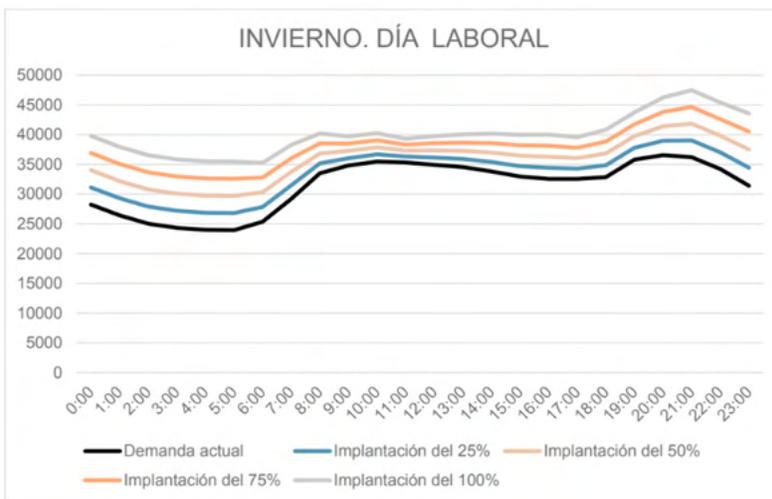


Figura 4. Gráfica del impacto del vehículo eléctrico, con un 25% de recargas rápidas, en la demanda de energía eléctrica de un día laboral de invierno en función de la penetración. (MW)

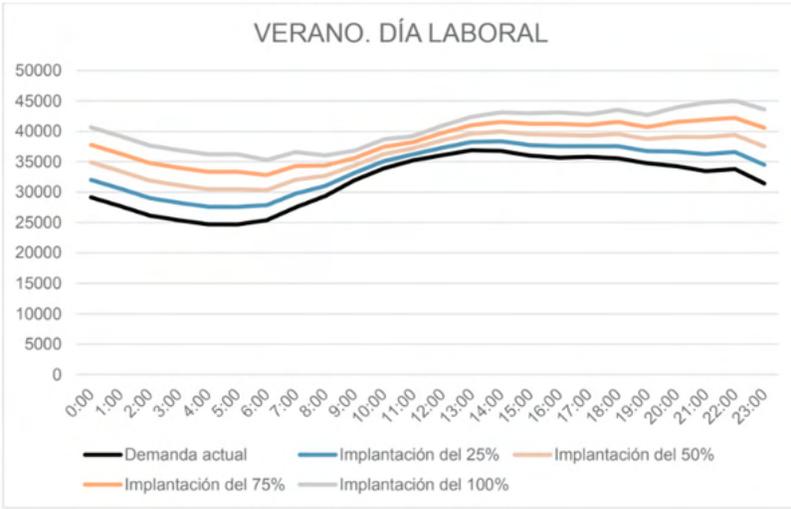


Figura 5. Gráfica del impacto del vehículo eléctrico, con un 25% de recargas rápidas, en la demanda de energía eléctrica de un día laboral de verano en función de la penetración. (MW).

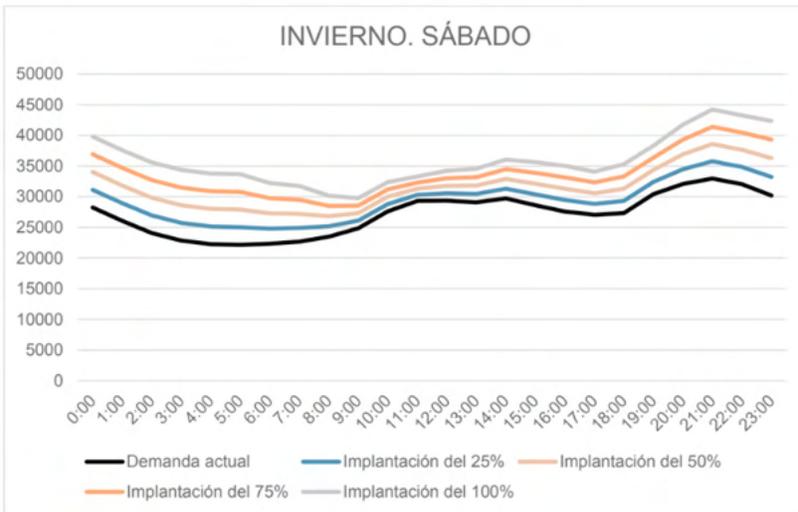


Figura 6. Gráfica del Impacto del vehículo eléctrico, con un 25% de recargas rápidas, en la demanda de energía eléctrica de un sábado de invierno en función de la penetración. (MW)

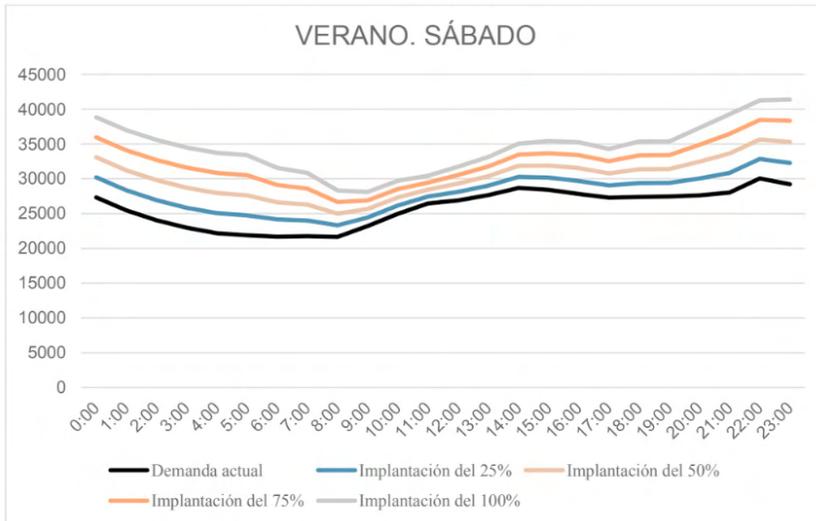


Figura 7. Gráfica del impacto del vehículo eléctrico, con un 25% de recargas rápidas, en la demanda de energía eléctrica de un sábado de verano en función de la penetración. (MW)

*Impacto en función del porcentaje de recargas rápidas en un día laboral de invierno con un 100% de implantación*

De nuevo se han utilizado los datos y las distancias recorridas citadas anteriormente; y se ha jugado con la proporción del tipo de recargas. Se puede comprobar que a medida que aumenta el porcentaje de recargas rápidas el pico energético es mayor y por tanto disminuye la eficiencia del sistema. Sin embargo, también es cierto que, si este modelo fuese real, a medida que aumentase la cantidad de recargas rápidas se modificaría la curva anteriormente establecida, de tal manera que un mayor porcentaje de las mismas se realizaría durante la noche. De esta manera el pico energético no sería tan acentuado.

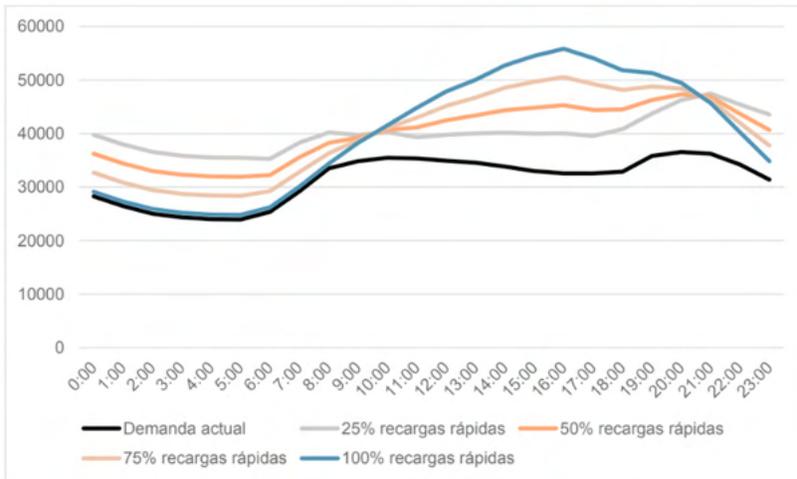


Figura 8. Gráfica del impacto de la implantación de vehículo eléctrico, con un 100% de penetración, en la demanda de energía eléctrica, en función del porcentaje de recargas rápidas. (MW).

En este modelo se observa claramente cómo el reparto de las recargas a lo largo del día, mejoraría la eficiencia del sistema eléctrico.

*Modelo óptimo con una implantación del 100% en un día laboral de invierno*

En este modelo ideal se refleja cómo sería la demanda energética con una implantación del vehículo eléctrico del 100%. En este caso, para lograr la máxima eficiencia del sistema eléctrico no se han considerado las curvas del reparto de recargas, empleadas en los otros modelos, sino que estas se han redistribuido a lo largo de todo el día reduciendo por completo las horas de valle y pico. En este caso no importaría el tipo de recarga empleado.

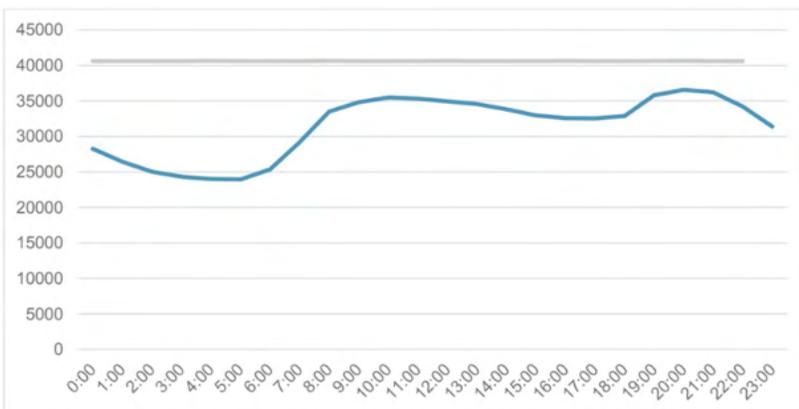


Figura 9. Modelo óptimo de la curva de demanda de energía eléctrica con una penetración del 100% del vehículo eléctrico. (MW).

Debido a su eficiencia, este sería el modelo ideal. Pese a ser prácticamente inalcanzable sí que se debe tomar como referencia. Para aproximarse el máximo posible, es indispensable el uso de sistemas inteligentes que gestionen la energía demandada y redistribuyan el suministro.

### 3 I PROPUESTAS DE MEJORA

En un hipotético escenario de máxima eficiencia del sistema de distribución eléctrico, como el que se ha analizado en el apartado anterior, la curva de la demanda sería completamente recta, sin valles ni picos. Para intentar acercarse a este escenario ideal se están desarrollando distintos sistemas de inteligencia, que tienen como objetivo utilizar los datos de consumo de los usuarios para redistribuir la demanda y por tanto el suministro de energía. Estos sistemas se denominan *Smart Grids*.

En el caso de los vehículos eléctricos, los *Smart Grids* podrían recoger la capacidad de las baterías, tiempo de carga o número de vehículos conectados a la red, así como el uso que el usuario va a hacer de su vehículo. Supongamos que un usuario conecta su vehículo a la red para que cargue a las 19:00, hora del pico energético. En este momento el *Smart Grid*, preguntaría al usuario cuándo va a necesitar que su coche esté cargado, imaginemos que a las 6:00 del día siguiente. Entonces el *Smart Grid* retrasaría la recarga del vehículo a una hora en la que la demanda energética sea menor, asegurándose de que estará cargado a la hora que lo va a necesitar el usuario. En este caso una solución inteligente sería que el vehículo no comenzase a cargarse hasta las 10 de la noche, cuando comienza el valle energético. Este sistema trabajaría de forma conjunta con los datos de todos los usuarios distribuyendo las cargas en función de la demanda conjunta.

Para mejorar aún más la eficiencia del *Smart Grid* se podría utilizar la energía contenida en las baterías de los vehículos para hacer frente a los picos de energía. Volviendo al ejemplo anterior, cuando el usuario llega a casa y enchufa su vehículo, el *Smart Grid* sumaría la energía que queda en la batería, a la red de distribución para hacer frente a la demanda energética durante el pico y luego recargar el vehículo en horario de valle. Además, el usuario podría ser recompensado económicamente por dejar hacer uso de la energía de su vehículo en un momento de alta demanda. Este sistema se denomina *Vehicle-to-Grid (V2G)*.

Sin embargo, podría haber ocasiones en las que no interesase tener una curva de demanda energética plana sino una curva inversa a la natural. Igual que los usuarios pueden ofrecer la energía de sus vehículos a cambio de una remuneración; una región también puede vender energía a otras regiones para suplir sus necesidades energéticas cuando la demanda sea mayor. Esta ha sido precisamente la medida adoptada por el estado de California en Estados Unidos. Allí, el pico de energía se produce durante la noche, cuando hay exceso de producción y por tanto la energía es más barata. En cambio, se produce

un valle en la demanda durante las horas centrales del día. De esta manera el estado de California puede vender el exceso de energía producida durante las horas centrales del día a un precio elevado, ya que es cuando hay déficit energético en otras regiones. Además, este modelo permite un mejor aprovechamiento de las energías renovables.

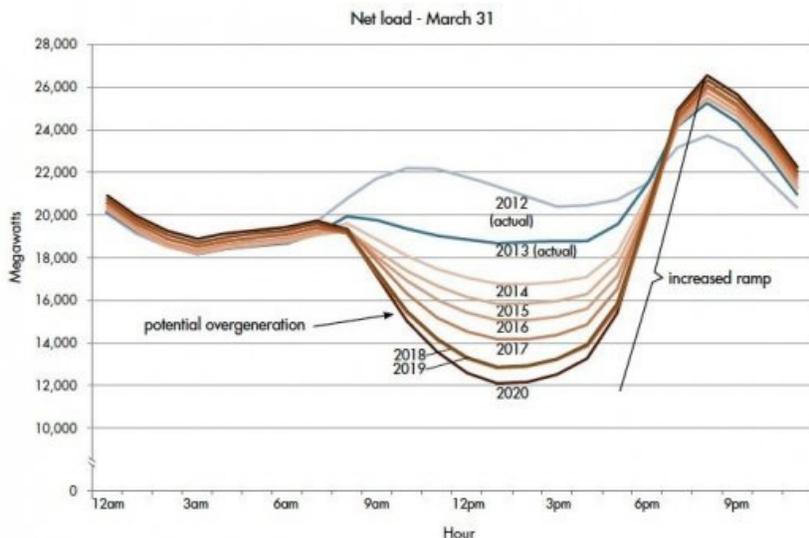


Figura 10. Curva de demanda diaria de consumo de energía eléctrica California (USA):<https://elperiodicodelaenergia.com>.

## 4 | CONCLUSIONES

En base a los posibles escenarios y la potencia instalada en la red de distribución cabe decir que la implantación del vehículo eléctrico, aun con un gran nivel de penetración, es totalmente asequible para el sistema. Ni siquiera con la máxima penetración y el reparto de recargas menos eficiente, el pico de demanda energética se aproxima a la máxima potencia instalada (104.122 MW en 2017).

No obstante, a medida que aumenta la penetración cobra mayor importancia el desarrollo de sistemas inteligentes que gestionen y distribuyan la demanda energética.

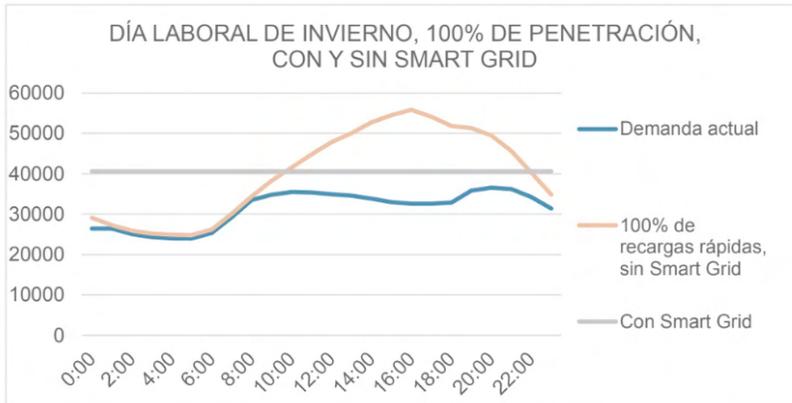


Figura 11. Gráfica de la demanda de energía de un día laboral de invierno con un 100% de penetración utilizando Smart Grid. (MW)

En el gráfico anterior, se compara la variación de la demanda energética en un día laboral de invierno, con una penetración total del vehículo eléctrico, en función de si se utiliza o no un sistema *Smart Grid*. En el primer caso, sin *Smart Grid*, en la hora de pico, la demanda energética supera los 55000 MW, mientras que con la implantación del *Smart Grid*, la demanda apenas alcanza los 4000 MW. Por lo tanto, estos sistemas podrían llegar a reducir la demanda energética hasta en un 27%, siendo así un factor clave a la hora de lograr una mayor eficiencia energética.

Por último, una curva de energía menos acentuada no solo supone una mayor eficiencia del sistema energético, sino también un mayor aprovechamiento de las energías renovables. Hoy en día, debido al valle energético, se producen excesos de energía por las noches, por lo que en muchas ocasiones se paraliza el funcionamiento de los parques eólicos y posteriormente, durante los picos diurnos, hay que suplir toda la demanda energética mediante energías no renovables. Es por ello, que si se lograra redistribuir la demanda energética mediante los *Smart Grids* se produciría también un mejor aprovechamiento de las energías renovables.

Con la vista puesta en el futuro, el *Vehicle-to-Grid* (V2G) que suministra electricidad a la red a través de las baterías de los vehículos cuando estos no se usan, hará que la implantación e integración del coche eléctrico en la red eléctrica, no sea solo posible, sino también necesaria.

## REFERENCIAS

[1] EL sistema eléctrico español 2017. **Red Eléctrica de España**, [ s/ ], p. 9, 18 de junio. 2018.

[2] DEMANDA de energía eléctrica en tiempo real, estructura de generación y emisiones de CO2. *In: Red Eléctrica de España*. [S. l.], 31 dic. 2018. Disponible en: <https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demanda/total>.

- [3] HOME. In: **Asociación AEDIVE**. [S. l.], 31 dic. 2018. Disponible en: <https://aedive.es/>.
- [4] LAS ventas de coches eléctricos se disparan en 2018, pero aún hay mucho por hacer. In: **Diario Motor**. [S. l.], 3 ene. 2019. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/noticia/ventas-coches-electricos-2018/>.
- [5] EL número de vehículos eléctricos en circulación se ha triplicado en cinco años, hasta 27.689 unidades. In: **Europa Press**. [S. l.], 27 ago. 2018. Disponible en: <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-numero-vehiculos-electricos-circulacion-triplicado-cinco-anos-27689-unidades-20180827114619.html>.
- [6] GRUNDTITZ, Emma Arfa. Electric Drive Systems and their Energy Consumption in Electric Vehicles. **Chalmers University of Technology**, [s. l.], 15 mayo 2017.
- [7] GUÍA de movilidad eléctrica para entidades locales. **Red Eléctrica de España**, [s. l.], 20 feb. 2019.
- [8] NUESTRA flota. **EMT Madrid. Empresa Municipal de Transportes de Madrid, S.A.**, [s. l.], 31 dic. 2017. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/Empresa/Somos/NuestraFlota>.
- [9] LA EMT de Madrid presenta los nuevos minibuses Rampini Wolta. In: **Madrid Mobilite**. [S. l.], 11 feb. 2019. Disponible en: <https://madridmobilite.com/2019/02/11/la-emt-de-madrid-presenta-los-nuevos-minibuses-rampini-wolta/>.
- [10] LA línea 76 de la EMT será desde finales de enero la primera 100% eléctrica con carga por inducción. In: **TeleMadrid**. [S. l.], 29 dic. 2017. Disponible en: <https://www.telemadrid.es/noticias/madrid/EMT-finales-primera-electrica-induccion-0-1971402853--20171229100419.html>.
- [11] ESPAÑA: Badajoz estrena 15 autobuses eléctricos BYD. In: **EcoInventos**. [S. l.], 14 mayo 2019. Disponible en: <https://ecoinventos.com/badajoz-estrena-15-autobuses-electricos-byd/>.
- [12] BARCELONA compra 7 autobuses eléctricos articulados por 5,7 millones de euros. **La Vanguardia**, [S. l.], 18 jul. 2017. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/vida/20170718/424203084120/barcelona-compra-7-autobuses-electricos-articulados-por-57-millones-de-euros.html>.
- [13] EL ayuntamiento de Bilbao suma dos nuevos autobuses eléctricos a la flota de Bilbobus. **Bilbao.eus**, [S. l.], 22 feb. 2019. Disponible en: [https://www.bilbao.eus/cs/Satellite?language=en&c=BIO\\_Noticia\\_FA&cid=1279187056670&pageid=3000005580&pagename=Bilbaonet/BIO\\_Noticia\\_FA/BIO\\_Noticia](https://www.bilbao.eus/cs/Satellite?language=en&c=BIO_Noticia_FA&cid=1279187056670&pageid=3000005580&pagename=Bilbaonet/BIO_Noticia_FA/BIO_Noticia).
- [14] LA línea 9, la primera 100% eléctrica. **Noticias de Navarra**, [S. l.], 21 mar. 2019. Disponible en: <https://www.noticiasdenavarra.com/navarra/pamplona/2019/03/21/linea-9-primera-100-electrica/816805.html>.
- [15] LA EMT de València se pasa al autobús eléctrico. **Levante**, [S. l.], 15 fev. 2018. Disponible en: <https://www.levante-emv.com/valencia/2018/02/15/emt-valencia-pasa-autobus-electrico-12063784.html>.
- [16] EMPRESA Municipal de Transportes de Valencia. **Wikipedia**, [S. l.], 17 maio 2019. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Empresa\\_Municipal\\_de\\_Transportes\\_de\\_Valencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Empresa_Municipal_de_Transportes_de_Valencia).
- [17] TIPOS de recarga en coches eléctricos. **Endesax**, [S. l.], 15 jul. 2018. Disponible en: <https://www.endesax.com/es/recursos/historias/tipos-carga-coche-electrico>.

## INSTALAÇÃO DE MEDIÇÃO NOS ALIMENTADORES DAS SUBESTAÇÕES

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 06/10/2021*

**Adalberto Leandro da Silva**

Recife – PE

<http://lattes.cnpq.br/6809031235706134>

**Fabio Coelho de Santana**

Salvador – BA

<http://lattes.cnpq.br/3160637044863180>

O presente trabalho foi apresentado no **XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**, ocorrido em setembro de 2018, em Fortaleza – CE – Brasil.

**RESUMO:** A redução de perdas e a qualidade no fornecimento de energia elétrica são temas de estudos entre várias empresas distribuidoras de energia do Brasil e do Mundo. Com objetivo de melhorar a apuração dessas perdas e monitorar a qualidade da energia elétrica fornecida, o grupo Neoenergia vem investindo em tecnologias para medição dos dados de grandezas elétricas e da qualidade da energia fornecida nos alimentadores de suas subestações. De forma inovadora foram desenvolvidos pela Neoenergia dois sistemas de medição para alimentadores: interno e externo a casa de comando da subestação, utilizando armário de medição e conjunto encapsulado de medição respectivamente, ambos contendo medidor de qualidade de energia para atendimento ao Procedimento de Distribuição

de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. A instalação de um dos sistemas de medição supracitados, viabilizará a construção de balanços energéticos, confrontando a energia entregue pelos alimentadores com o consumo faturado e medido dos clientes. Através dessa análise, será possível identificar qual alimentador apresentou maior percentual (%) de perdas de energia, direcionar equipes para realizar inspeções em campo com maior assertividade, assim como realizar a análise dos registros de eventos de qualidade de energia elétrica, e o levantamento detalhado das curvas de cargas e a validação dos balanços energéticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Perda de energia; Qualidade de energia; Medição de alimentadores; Alimentadores; Balanço Energético.

### MEASUREMENT INSTALLATION IN SUBSTATION FEEDERS

**ABSTRACT:** The reduction of losses and the quality of electric energy supply are subjects of studies among several energy distribution companies in Brazil and the world. In order to improve the calculation of these losses and monitor the quality of the electrical energy supplied, the Neoenergia group has been investing in technologies for measuring data on electrical quantities and the quality of energy supplied in the feeders of its substations. In an innovative way, two measurement systems for feeders were developed by Neoenergia: internal and external to the substation control house,

using a measurement cabinet and an encapsulated measurement set respectively, both containing a power quality meter to comply with the Electricity Distribution Procedure in the National Electric System – PRODIST Module 8 - Quality of Electric Energy of the National Electric Energy Agency - ANEEL. The installation of one of the measurement systems will enable the construction of energy balances, comparing the energy delivered by the feeders with the billed and measured consumption of the customers. Through this analysis, it will be possible to identify which feeder had the highest percentage (%) of electricity losses and thus direct the inspection teams to actions in the field with better accuracy, as well as carry out the analysis of records of electricity quality events, and detailed survey of load curves and validation of energy balances.

**KEYWORDS:** Loss of energy; Power quality; Metering of feeders; Feeders; Energetic Balance.

## 1 | INTRODUÇÃO

A redução de perdas de energia elétrica e a qualidade do fornecimento de energia são temas citados nas regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que cada vez mais exige investimentos aplicados de forma mais eficiente, através de indicadores de qualidade. A cada ano as distribuidoras de energia vêm investindo em tecnologias que auxiliem nas decisões dos seus processos, com aumento de ganho econômico e avanços tecnológicos.

O objetivo desse trabalho é apresentar dois sistemas de medição para alimentadores das subestações, sendo um interno na casa de comando da subestação, com instalação de armário de medição e outro externo com conjunto encapsulado de medição. Ambos com a finalidade de registro dos dados de grandezas elétricas e fenômenos de qualidade de energia.

Os dois sistemas, foram fruto de um processo de inovação na Neoenergia, pois unem equipamentos de alta tecnologia de medição e comunicação com os sistemas de comunicação disponíveis nas subestações.

A instalação desses sistemas, auxiliará na construção do balanço energético dos alimentadores, identificando o alimentador com maior percentual de perdas e controle de eventos de qualidade. O processo ocorrerá através da comparação entre a energia entregue versus o consumo faturado e medido dos clientes. Dessa forma teremos como benefício, o aumento da assertividade das ações de prospecção e inspeção de perdas, furto de energia em campo.

Em 2017 Neoenergia criou o projeto piloto para prova de conceito, o qual possui os dois tipos de sistemas de medição, que já foram instalados em algumas subestações, por exemplo: SE CIA III – Coelba, SE Imbiribeira – Celpe, com a instalação interna e na SE Potengi - Cosern com instalação externa de conjuntos encapsulados e sistema de comunicação WI-FI.

## 2 | OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os dois sistemas de medição para alimentadores, ambos completamente concluídos com seus benefícios para o processo de apuração das perdas de energia.

### 2.1 Objetivos Específicos

Entre os diversos fatores que a instalação das medições nos alimentadores pode contribuir para o monitoramento e melhorias do sistema de distribuição destacam-se:

- Redução de Perdas de Energia (%), através do cálculo detalhado de perdas técnicas e comerciais via balanços energéticos;
- Atendimento a legislação vigente PRODIST, Módulo 5.0, Seção 5.2 – Especificação dos Sistemas de Medição, para apuração de perdas técnicas e a qualidade de energia;
- Otimizar as previsões para compras de energia;
- Planejamento da seleção de grandes blocos de perdas na distribuição;
- Ação de combate de perdas de energia em campo (aumento da assertividade das prospecções).

Para uma excelente gestão, as concessionárias de energia elétrica buscam métodos eficientes e acessíveis aplicados ao controle do índice de perdas, minimização dos prejuízos relativos às perdas técnicas e comerciais, identificando regiões através dos balanços energéticos dos alimentadores com os maiores (%) de perdas calculadas, para atuação de equipes de campo.

## 3 | DESENVOLVIMENTO

Para conhecer como estava o processo de instalação de medição nos alimentadores nas distribuidoras do Brasil, realizamos uma consulta em 05 de janeiro de 2017 no GT de Medição da ABRADDEE - Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica e obtivemos a seguinte posição:

Consulta as Distribuidoras de Energia do Brasil:

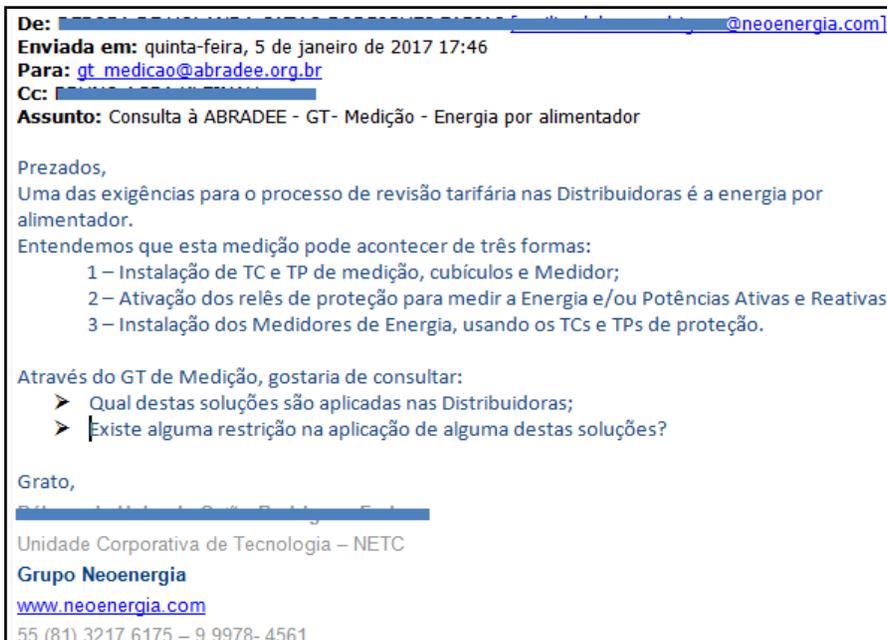


Figura 1 - Consulta feita ao GT-Medição ABRADDEE.

<b>Consulta ABRADDEE</b>				
<b>Empresa</b>	<b>Perda Global (2016)</b>	<b>1) TC/TP medição + Cubículo + Medidor</b>	<b>2) Relês de Proteção registrando Pot. Ativa e Reativa</b>	<b>3) TC/TP proteção + Cubículos + Medidor</b>
ENERGIZA SE	8,20%			Oficial
COPEL	8,30%		Oficial	
ENERGIZA PB	11,70%			Oficial
EDP ENDESA	13,50%		Em uso	Oficial
ENERGIZA MS	14,90%			Oficial
ENERGIZA TO	15,40%			Oficial
CEMAR	17,60%		Em uso	Oficial
DMED	??			Oficial

Legenda:  
Oficial - Corresponde a regra adotada atualmente.  
Em uso- Possui alguns alimentadores com o sistema.

Figura 2 - Tabulação - Resposta à consulta – Energia por Alimentador.

Das empresas que retornaram, 80% utilizam Transformador de Corrente - TC e Transformador de Potencial – TP, com classe de exatidão de proteção, e instalaram os medidores de energia em cubículos dentro da casa de comando da Subestação.

Para atendimento de sua demanda interna, a Neoenergia desenvolveu duas especificações técnicas para atendimento as condições mínimas, exigidas para o

fornecimento dos componentes, que foram utilizados nos sistemas de medição.



Figura 3 - Foto do Armário de Medição.

### 3.1 Especificação Técnica de Armário para Subestação – Medição

Refere-se ao sistema com instalação de armário de medição na área interna da casa de comando da subestação.

Nesse modelo de instalação, está contemplado um armário, switches, medidores, componentes adicionais (disjuntores, chave de aferição, cabos etc.).

#### *Medição Convencional*

Características Mínimas para o Sistema de Medição:

- Classe de Acessante: Levantamento de curva de carga;

- Classe Exatidão do TP e TC de 0,6;
- Medidor de Energia 4 Quadrantes;
- Registros mínimos: kW, kvar e MM.

(Tabela 1 – PRODIST – Modulo 5, Sessão 5.2, Ver. 4, pg. 19, 07/06/2016)

**Aplicação:** Obrigatório para todos os novos projetos e *retrofits* (obras de manutenção/ ampliação) de subestações existentes com espaço na casa de comando.

### 3.2 Especificação Técnica de Conjunto de Medição 15 kV

Nessa especificação, a instalação é feita na área externa da casa de comando da subestação, com uso do conjunto de medição encapsulado contendo: Medidor de Energia 4 quadrantes, Transformadores de Instrumentos (TCs e TPs), roteador com comunicação via WI-FI e componentes principais (chave de aferição, tomadas etc.).

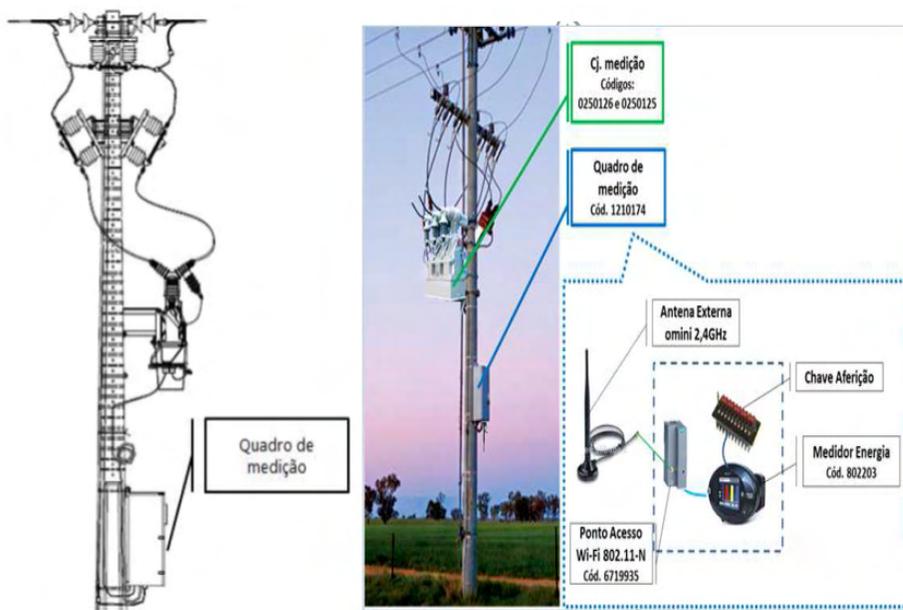


Figura 4 - Conjunto de Medição.

**Aplicação:** Subestações existentes, sem espaço na casa de comando e/ou sem TC/TP com núcleo duplo.

## 4 | PROJETOS CONCLUÍDOS

Nessa sessão serão apresentados casos reais e seus resultados já apurados das instalações concluídas.

## 4.1 Caso da SE CIA III (CIT) – Coelba (06 Alimentadores)



Figura 5 - SE - CIA III ( CTI), Coelba.

Na fig. 5 acima, temos as fotos do início da inspeção até a instalação do armário de medição.

O projeto da SE CIA III começou com uma inspeção na subestação, para avaliar a possibilidade de instalação do armário de medição e confirmar a disponibilidade dos TCs e TPs de medição.

Vale ressaltar que, na maioria das SE's do grupo Neoenergia, os TCs e TPs já possuem núcleos duplos (medição e proteção), fato que facilita a instalação da medição nos alimentadores.

Abaixo extensão de um dos alimentadores da SE CIA III:

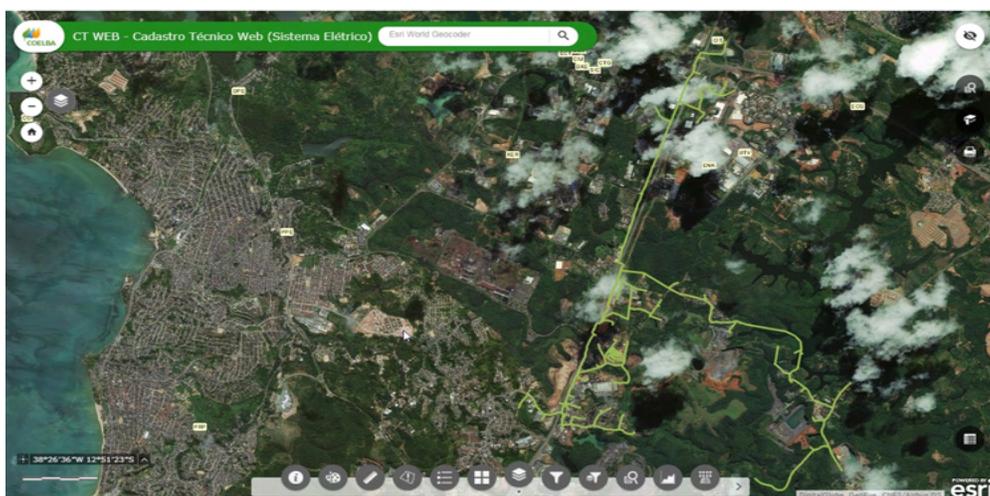


Figura 6 - Extensão de um dos alimentadores da SE CIA III.

## 4.1.1 Balanço por Alimentador da Subestação – 06 alimentadores da Subestação CIA III

### Curva de Carga dos alimentadores

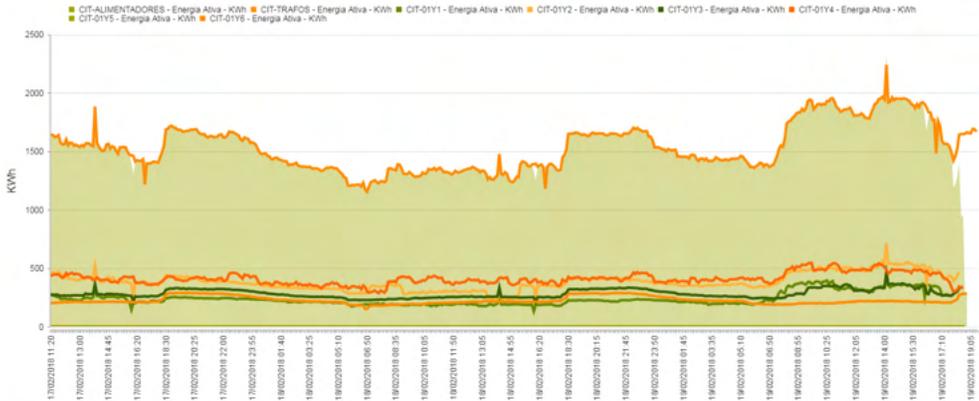


Figura 7 - Gráfico das curvas de cargas dos alimentadores – SE CIA III. Fonte: PIM (Fev/18).

As obras, o comissionamento e o sistema de comunicação, foram concluídos em meados de Fev/18, assim o primeiro Balanço Energético, coletou dados completos de 8 dias, o que já permitiu realizar a 1ª rodada do balanço energético da subestação, conforme visto abaixo, na figura 8.

#### Arquivo - GSE (GIS) Fev18

Alimentador	MWH_BT	MWH_MT	A			
			MWh - Tot	UCS BT	UCS MT	UCS Tot
CIT-01Y1	488,21	1.953,00	2.441,21	3.415	28	3.443
CIT-01Y2	872,77	786,46	1.659,23	7.112	20	7.132
CIT-01Y3	1.502,19	315,24	1.817,43	11.252	14	11.266
CIT-01Y4	979,42	1.653,55	2.632,97	5.837	24	5.861
CIT-01Y5**	0,00	0,00	0,00	0	0	0
CIT-01Y6	1.112,92	80,83	1.193,75	9.739	4	9.743
<b>Total CIT</b>	<b>4.955,51</b>	<b>4.789,08</b>	<b>9.744,59</b>	<b>37.355</b>	<b>90</b>	<b>37.445</b>
	50,9%	49,1%		99,8%	0,2%	

\* Valores estimados. Consumo médio diário x Nr dias mês civil.

#### Arquivo SAP-CCS - Fev18:

Alimentador	B		C
	MWh Med.(E*)	MWh Fat. (E*)	UC's
CIT-01Y1	2.539,61	1.718,00	3.425
CIT-01Y2	1.581,27	1.619,77	7.122
CIT-01Y3	1.826,65	1.880,85	11.235
CIT-01Y4	2.411,93	2.461,07	5.847
CIT-01Y5	0,00	0,00	0
CIT-01Y6	1.206,78	1.251,21	9.687
<b>Tot</b>	<b>9.566,25</b>	<b>8.930,90</b>	<b>37.316</b>
	103,2%	103,1%	

\*\* Alimentador em expansão, obra embargada.

#### Comparação dos resultados

	MWh (lido)	MWh (fat)	Qde Ucs
SAP-CCS	9.566,25	8.930,90	37.316
GSE (GIS)	9.744,59	9.744,59	37.445
DIF	-178,34	-813,69	-129
%	-1,9%	-9,1%	-0,3%

Figura 8 - Dados coletados do GSE(GIS) e SAP-CCS da SE CIA III.

#### Legendas:

**GSE (GIS)** – Sistema Gestor Sistema Elétrico (Cadastro Técnico);

**SAP-CCS** – Sistema Comercial;

**MWH\_BT** e **MWH\_MT** – Consumo de BT e MT dos alimentadores carregado no GSE(GIS);

**[A] MWh – Tot** – Consumo total por alimentador carregado no GSE(GIS);

**UCS BT** e **UCS MT** – Quantidade de unidades consumidoras de BT ou MT por alimentador no GSE(GIS);

**UCS Tot** – Qde de unidades consumidoras totais vinculados ao Alimentador no Sistema GSE(GIS);

**SAP-CCS** – Sistema Comercial;

**[B] MWh Med.(E\*)** – Consumo medido estimado registrado no SAP-CCS;

**[C] MWh Fat.(E\*)** – Consumo faturado estimado registrado no SAP-CCS;

**UC`s** – Qde de Unidades que tiveram faturamento no mês.

Foram coletados dados dos medidores instalados nos alimentadores CIT-01Y1, CIT-01Y2, CIT-01Y3, CIT-01Y4 e CIT-01Y6, e feita uma estimativa para adequação ao um mês civil apurado. O alimentador CIT-01Y5, estava sem carga, pois teve a obra embargada por questões de licenciamento ambiental.

**Medição Extrapolada - CIT - Coelba\***

Alimentador	D		Lido Est		Fat Est		GSE (GIS)		Máx (ABS)
	MWh (e)	T1 + T2	D - B	Desvio %	D - C	Desvio %	D - A	Desvio %	
CIT-01Y1	1.900,53		- 639,08	-33,6%	182,53	9,6%	- 540,68	-28,4%	33,6%
CIT-01Y2	3.395,55		1.814,28	53,4%	1.775,78	52,3%	1.736,32	51,1%	53,4%
CIT-01Y3	2.301,69		475,03	20,6%	420,84	18,3%	484,26	21,0%	21,0%
CIT-01Y4	3.439,00		1.027,06	29,9%	977,92	28,4%	806,03	23,4%	29,9%
CIT-01Y5	0,00		-	-	-	-	-	-	-
CIT-01Y6	1.993,48		786,70	39,5%	742,27	37,2%	799,73	40,1%	40,1%
<b>Tot</b>	<b>13.030,25</b>	<b>13.020,13</b>	<b>3.464,00</b>	<b>26,6%</b>	<b>4.099,35</b>	<b>31,5%</b>	<b>3.285,66</b>	<b>25,2%</b>	<b>31,5%</b>

\*Média 8 dias extrapolados 99,92%

Figura 9 - 1º Balanço Energético por Alimentador - SE CIA III.

**Legendas:**

**[D] MWh(e)** – Consumo medido da saída do alimentador extrapolado. Consumo médio diário x Nr dias mês civil;

**T1 + T2** – Soma dos consumos medidos dos trafos da SE;

**Lido Est** – Cálculo do desvio sobre o Lido estimado e o Lido na saída dos alimentadores;

**Fat Est** – Cálculo do desvio sobre o Faturado estimado e o Lido na saída dos alimentadores.

A figura 09, mostra os desvios calculados entre as grandezas estudadas: Energia ativa lida (Lido Est) com 26,6% e Energia ativa faturada (Fat Est) com 31,5%. Ainda na figura 08, temos um desvio 0,3% na quantidade de UCs, fato que indica necessidade de validação também do cadastro comercial x técnico. Parte dos desvios apurados das Energias, podem ser fruto das estimativas para ajuste ao mês civil, o que afeta a precisão da análise.

# Estudo de Caso SE CIT (CIA III) – COELBA



SGR - Superintendência de Gestão da Receita  
 CRE - Departamento de Recuperação de Energia  
 CRMM - Unidade de Monitoramento da Medição

EMPRESA	SUBESTAÇÃO	ALIMENTADOR
COELBA	CIT_CIA_III	CIT-01Y2

Seleção: Empresa / Subestação / Alimentador



COORDENAÇÃO



REALIZAÇÃO



NEOENERGIA

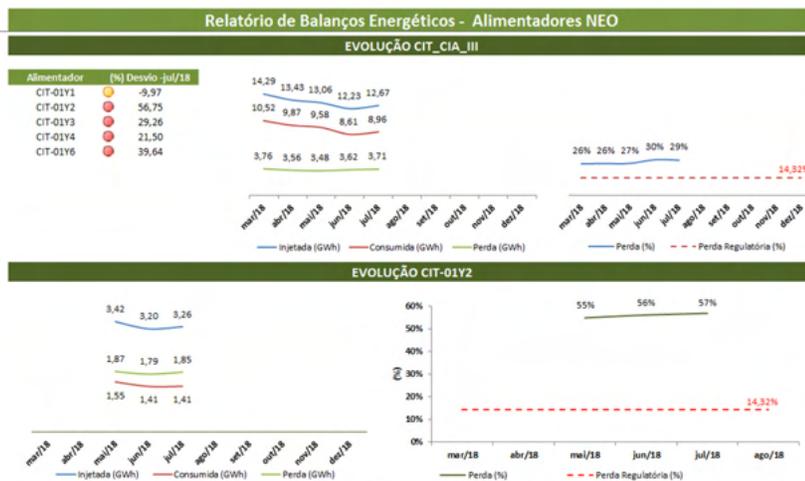


Figura 10 - Balanço Energético de SE CIA III - Coelba, Jul18.

Na figura 10, onde já temos medições completas de 5 meses, observamos o resultado do balanço do alimentador CIT-01Y2, que apresenta uma perda média muito elevada da ordem de 56%.

Assim foi recomendado, que para uma análise mais apurada, era necessário validar a base cadastral e garantir as medições completas dos períodos analisados, para melhorar a assertividade do balanço. Na SE CIA III, todos os alimentadores apresentaram perdas superiores a 20%, e solicitamos ação de campo prioritária para CIT-01Y2 (56,75%) e CIT-01Y6(39,64%) com objetivo de mapear causas raízes do problema e ações de correção.

## 4.2 Caso da Subestação Imbiribeira (IBR) – Celpe (08 Alimentadores)



Figura 11 - SE Imbiribeira (IBR), Celpe.

A fig.11 mostra o pátio da SE Imbiribeira (IBR), que foi construída já conforme Política de Balanço Energético, com medição nos 08 alimentadores.

Abaixo extensão de um dos alimentadores da subestação:

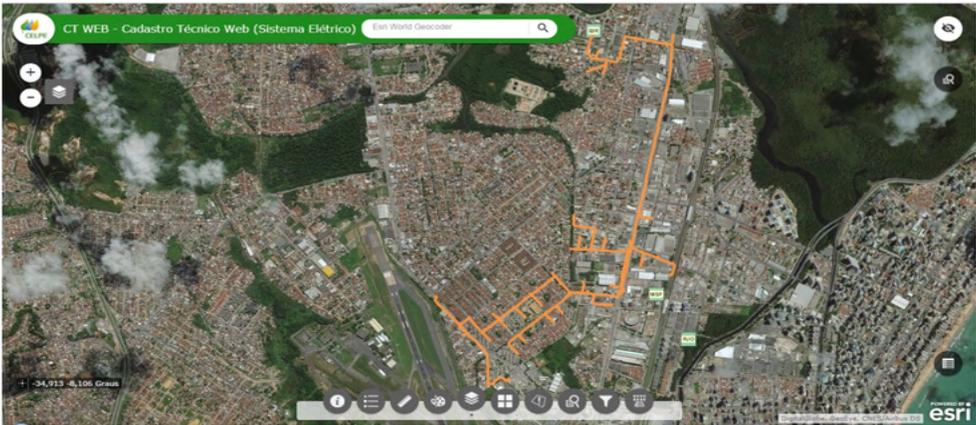


Figura 12 - Extensão de um dos Alimentado SE Imbiribeira (IBR).

#### 4.2.1 Balanço por Alimentador e Subestação – 08 alimentadores da Subestação – Imbiribeira

Curva de Carga da Subestação x Soma Alimentadores:

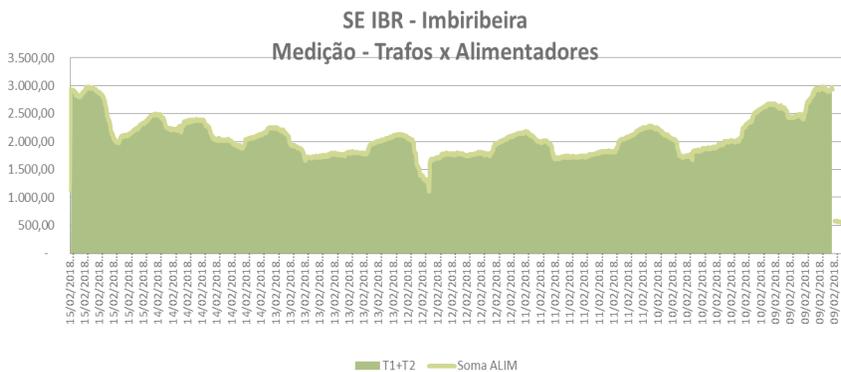


Figura 13 - Curva de Carga da SE Imbiribeira.

Fonte: PIM(Fev/18)

As obras e o comissionamento foram concluídos em Dez/17, mas o sistema de comunicação e a validação das grandezas coletadas, só foram concluídas em meados de Fev/18, este fato só nos permitiu coletar dados completos de 4 dias, os quais usamos para

realizar a 1ª rodada do balanço energético da subestação, conforme visto abaixo.

Arquivo - GSE (GIS) Fev18

Alimentador	MWH BT	MWH MT	A			
			MWH - Tot	UCS BT	UCS MT	UCS Tot
IBR-0112	1.240,03	978,16	2.218,19	3.991	22	4.013
IBR-0113	855,32	189,65	1.044,97	3.993	9	4.002
IBR-0114	2.047,50	1.075,26	3.122,76	8.414	35	8.449
IBR-0115	1.603,33	603,76	2.207,09	8.051	13	8.064
IBR-0116	592,09	782,43	1.374,52	2.196	19	2.215
IBR-0117	744,55	553,20	1.297,75	2.408	16	2.424
IBR-0118	1.564,41	1.151,52	2.715,93	4.567	23	4.590
IBR-0119	2.196,35	985,78	3.182,13	5.406	17	5.423
<b>Total IBR</b>	<b>10.843,58</b>	<b>6.319,76</b>	<b>17.163,34</b>	<b>39.026</b>	<b>154</b>	<b>39.180</b>

63,2%

36,8%

99,6%

0,4%

Arquivo SAP-CCS - Fev18:

MWh Med.	MWh Med.(E*)	kWh Fat.	C	
			kWh Fat. (E*)	UC's
2.133,58	2.274,19	1.596,46	1.745,97	3.982
946,01	1.020,63	963,08	1.038,74	3.940
2.862,52	3.121,60	2.841,59	3.083,64	8.181
2.211,75	2.358,78	1.778,65	1.943,15	7.969
1.116,55	1.203,88	1.132,21	1.220,52	2.005
1.222,62	1.337,06	1.182,70	1.293,75	2.378
1.479,39	1.491,93	1.540,02	1.537,90	4.256
2.979,26	3.167,48	2.384,13	2.574,94	5.274
<b>14.951,69</b>	<b>15.975,55</b>	<b>13.418,83</b>	<b>14.438,61</b>	<b>37.985</b>

106,8%

107,6%

Figura 14 - Dados coletados do GSE(GIS) e SAP-CCS da SE Imbiribeira.

**Legendas:**

**MWH\_BT** e **MWH\_MT** – Consumo de BT ou MT dos alimentadores carregado no GSE(GIS);

**[A] MWH – Tot** – Consumo total por alimentador carregado no GSE(GIS);

**UCS BT** e **UCS MT** – Qde de unidades consumidoras de BT ou MT por alimentador no GSE(GIS);

**UCS – Tot** – Qde de unidades consumidoras totais vinculados ao Alimentador no GSE(GIS);

**[B] MWh Med.(E\*)** – Consumo medido estimado registrado no SAP-CCS;

**[C] MWh Fat.(E\*)** – Consumo faturado estimado registrado no SAP-CCS;

**UC's** – Qde de Unidades que tiveram faturamento no mês.

Medido Extrapolado - IBR - Celpo \*

Alimentador	D		Lido Est		Fat Est		GSE (GIS)	
	MWh (e)	T1 + T2	D - B	Desvio %	D - C	Desvio %	D - A	Desvio %
IBR-0112	2.111,76		- 162,43	-7,7%	365,80	17,3%	-106,43	-5,0%
IBR-0113	1.320,20		299,57	22,7%	281,45	21,3%	275,23	20,8%
IBR-0114	3.504,13		382,52	10,9%	420,49	12,0%	381,37	10,9%
IBR-0115	2.956,97		598,19	20,2%	1.013,82	34,3%	749,88	25,4%
IBR-0116	1.439,05		235,16	16,3%	218,53	15,2%	64,53	4,5%
IBR-0117	1.474,61		137,56	9,3%	180,86	12,3%	176,86	12,0%
IBR-0118	2.367,82		875,89	37,0%	829,92	35,1%	-348,11	-14,7%
IBR-0119	2.579,29		- 588,19	-22,8%	4,35	0,2%	-602,84	-23,4%
<b>Total IBR</b>	<b>17.753,83</b>	<b>17.786,88</b>	<b>1.778,29</b>	<b>10,0%</b>	<b>3.315,23</b>	<b>18,7%</b>	<b>590,49</b>	<b>3,3%</b>

\*Média 4 dias extrapolados 100,2%

Figura 15 - 1º Balanço Energético por Alimentador - SE Imbiribeira.

**Legendas:**

**[D] MWh(e)** – Consumo medido na saída do alimentador extrapolado. Consumo médio diário x Nr dias mês civil;

**T1 + T2** – Soma dos consumos medidos dos trafos da SE;

**Lido Est** – Cálculo do desvio sobre o Lido estimado e o Lido na saída dos alimentadores;

**Fat Est** – Cálculo do desvio sobre o Faturado estimado e o Lido na saída dos alimentadores.

De posse dos dados coletados dos medidores instalados nos alimentadores (IBR-0112, IBR-0113, IBR-0114, IBR-0115, IBR-0116, IBR-0117, IBR-0118 e IBR-0119) e extrapolando para o mês civil, comparamos com a base cadastral GSE x SAP/CCS, constatamos inicialmente uma perda de 18,7%.

# Estudo de Caso SE IBR (IMBIRIBEIRA) - CELPE



SGR - Superintendência de Gestão da Receita  
 CRE - Departamento de Recuperação de Energia  
 CRMM - Unidade de Monitoramento da Medição

EMPRESA	SUBESTAÇÃO	ALIMENTADOR
CELPE	IBR_IMBIRIBEIRA	IBR-0113

Seleção: Empresa / Subestação / Alimentador



COORDENAÇÃO



REALIZAÇÃO

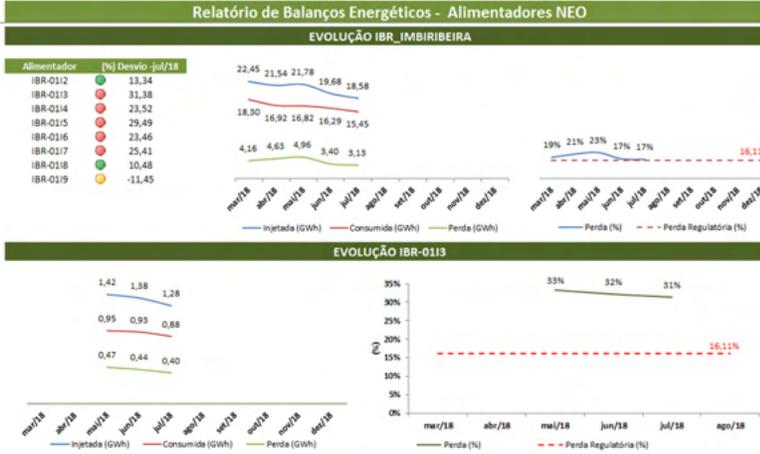


Figura 16 - Balanço Energético da SE Imbiribeira - Jul18.

Já com 5 meses de dados apurados, ver figura 16, vemos que há vários alimentadores com perda acima de 20%, e um destaque para o IBR-0113 que apresenta perda média de 32%.

Para SE Imbiribeira, também foi solicitado avaliação em campo dos alimentadores IBR-0113, IBR-0115, IBR-0118 e IBR-0119.

## 4.3 Caso da Subestação Potengi (PGI) – COSERN (05 Alimentadores)

A Subestação Potengi (PGI), teve a instalação da medição nos alimentadores, via conjuntos de medição encapsulados e com comunicação via rede de WI-FI.

# Estudo de Caso SE PGI (POTENGI) - COSERN

## Conjunto de Medição



Potengi [5]

## SISTEMA WI-FI



Figura 17 - SE Potengi (PGI), COSERN com WI-FI.



SENDI 2018  
FORTALEZA

COORDENAÇÃO



REALIZAÇÃO



Como demonstrado na figura 17, foram instalados os conjuntos em pontos distintos, mas dentro do raio de cobertura da antena WI-FI, que ficou instalada na casa de comando da Subestação.

Por se tratar de uma inovação tecnológica, a instalação de rádio WI-FI no pátio da subestação, o qual fechou um enlace de comunicação com os medidores, pinos amarelo da figura 17, instalados depois do muro da subestação.

Essa nova tecnologia instalada na Subestação, gerou vários desafios que foram superados, desde a configuração da tecnologia aos riscos de Cibersegurança, que depois de superados, começamos a coletar os dados no sistema de medição, fato que só nos permitiu executar o 1<sup>a</sup>. Balanço energético no início em Jun/18.

# Estudo de Caso SE PGI (POTENGI) - COSERN



SGR - Superintendência de Gestão da Receita  
 CRE - Departamento de Recuperação de Energia  
 CRMM - Unidade de Monitoramento da Medição

EMPRESA	SUBESTAÇÃO	ALIMENTADOR
COSERN	PGI_POTENGI	PGI-01P3

Selecione: Empresa / Subestação / Alimentador



SENDI 2018  
 FORTALEZA

COORDENAÇÃO



REALIZAÇÃO



REALIZAÇÃO

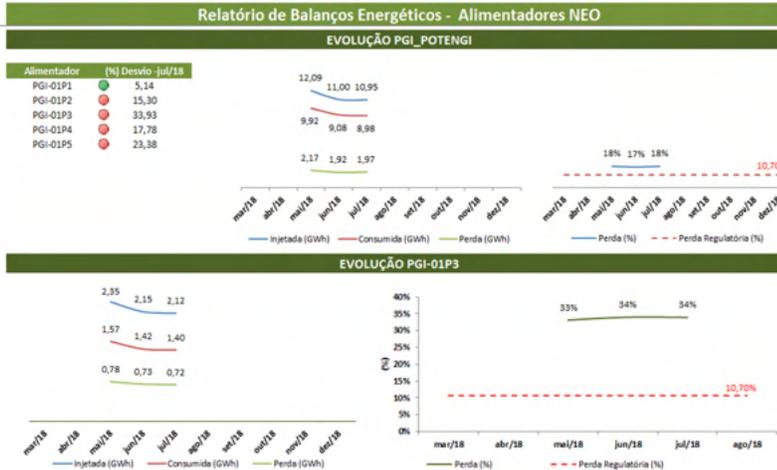


Figura 18 - Balanço Energético - SE Potengi.

A figura 18 traz o histórico das perdas do alimentador PGI-01P3 em destaque, com perda de 33,94% para Jul/18, onde também temos os alimentadores PGI-01P2 e PGI-01P4 com perda entre 15 e 18% e o PGI-01P5 com 23,38%. Na Cosern também foi solicitado ações de campo para os alimentadores com maior perdas apuradas.

## 5 | CONCLUSÕES

A instalação da medição nos alimentadores possibilitará as distribuidoras ampliar seus controles de energia injetada e distribuída nas subestações, através de balanços energéticos por alimentador.

Nos casos apresentados das distribuidoras, ficou claro a necessidade de validação dos dados comerciais e técnicos para reduzir a incerteza cadastral, além da necessidade da medição completa dos ciclos medidos e faturados para identificação dos valores reais de perdas e evitando estimativas que podem afetar a precisão do cálculo das perdas reais.

Com base nas perdas calculadas por alimentador, as equipes de campo poderão ser acionadas para validar, a existência de fraudes e assim aumentar a assertividade da seleção e do combate a redução das perdas nos alimentadores indicados pelos maiores desvios calculados.

Em alguns casos é recomendado a instalação de sensores inteligentes para medir trechos menores dos alimentadores e detecção das fraudes. Dessa forma será possível aplicar a regra do Pareto (80/20), e atuar com menor esforço e melhores resultados.

Novas rodadas de balanços energéticos, com os dados medidos e faturados completos e algumas correções cadastrais são necessárias para acompanhar o comportamento das perdas nos alimentadores e melhorar a assertividade alvo do trabalho de redução dos custos operacionais.

Os dados medidos são a chave para detectar os bolsões de perdas e priorizar investimentos com retorno mais rápido das ações de redução de perdas em campo.

## REFERÊNCIAS

SILVA, A. L., SANTANA, F. C. **5418 - Instalação de Medição nos Alimentadores das Subestações**. In: **XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**, 2018, Fortaleza – CE – Brasil. Anais.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST - Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição**, site <<https://www.aneel.gov.br/modulo-7>>, acesso em 29/03/2018.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST - Módulo 5 – Sistemas de Medição**, site <<https://www.aneel.gov.br/modulo-5>>, acesso em 29/03/2018.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, site <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>, acesso em 29/03/2018

Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica - **Resolução Normativa nº 414/2010**, site <<https://www.aneel.gov.br/ren-414>>, acesso em 28/09/2010.

## PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 07/10/2021

**Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus**

Ouvidoria e Qualidade EDP SP Distribuição de Energia S.A  
Mogi das Cruzes/ São Paulo

**RESUMO:** O artigo visa apresentar o projeto ADMI – Análise de Demanda de Maior Impacto, realizado pelas Ouvidorias das Distribuidoras do Grupo EDP no Brasil. Ele identifica e avalia minuciosamente a causa fundamental da demanda de Ouvidoria com maior impacto, considerando volumetria ou criticidade, bem como, impactos ao consumidor e à organização. O plano de ação é desenvolvido em parceria com a gestão de Qualidade do Serviço e do Sistema, e as áreas de negócios envolvidas. Através da metodologia o ciclo do PDCA, aplicado as reclamações de **prazos comerciais** na Ouvidoria da EDP Distribuição SP. Após a implantação do plano de ação tivemos como resultado a redução da demanda de reclamações no canal, de custo, de prazo de análise da manifestação ao cliente e a melhoria da qualidade do serviço, alinhado à Visão do Grupo, Valores, Propósito, Princípios e Pilares Estratégicos.

**PALAVRAS – CHAVE:** Cliente, ADMI, Satisfação, Ouvidoria, Prazos Serviços Comerciais.

### OMBUDSMAN PROJECT OF EDP SÃO PAULO'S DISTRIBUTION - GREATER IMPACT DEMAN ANALYSIS

**ABSTRACT:** The article aims to present the project GIDA - Greater Impact Demand Analysis, accomplished by the Distributors' Ombudsman of EDP Group in Brazil. It identifies and assess thoroughly the main cause of the ombudsman demand of greater impact, considering volumetry and criticality, as well as the impacts on both consumer and organization. The action plan is developed in partnership the Service and System Quality management, and other business areas involved. Through methodology the PDCA cycle, applied to commercial deadlines complaints on EDP SP Distribution Ombudsman. After the implementation of the action plan, the result was a reduction of the demand of complaints in the channel, of the cost, of the deadline for analysis of the manifestation to the consumer and the improvement in the service's quality, align to Group's Vision, Values, Purposes, Principles and Strategic Pillars.

### 1 | INTRODUÇÃO

Após o processo de reestruturação do setor em 1995, uma das principais consequências foi a desverticalização de toda a cadeia produtiva: geração, transmissão, distribuição e comercialização tornando segmentos de negócios diferentes. Os setores de transmissão e distribuição continuaram sendo tratados como serviços públicos regulados (considerados

monopólios naturais), enquanto a competição foi incentivada nos segmentos de geração e comercialização. Esse fato abriu caminho para que a energia elétrica passasse a ser tratada como uma mercadoria passível de negociação, seguindo uma tendência mundial (ABRADEE, 2017).

Entretanto, o processo de abertura do setor elétrico não ocorreu de forma completa, de maneira que coexistem hoje no Brasil dois mercados distintos de energia: o Mercado Cativo e o Mercado Livre (ABRADEE, 2017).

O Mercado Cativo é o ambiente de contratação de energia elétrica no qual o papel do consumidor é totalmente passivo. A energia é fornecida exclusivamente pela distribuidora local, com o preço e as demais condições de fornecimento reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Já o Mercado Livre é o ambiente no qual o consumidor pode comprar montantes de energia de comercializadores e/ou geradores em condições livremente pactuadas entre as partes. A principal vantagem desse ambiente de contratação é a possibilidade de negociar produtos customizados, com prazos, volumes, preços e índices de reajustes que atendam às expectativas do comprador.

Atualmente, aproximadamente 27% da energia produzida no Brasil é negociada no Mercado Livre, que movimentava anualmente negócios em torno de R\$ 30 bilhões. Sendo um ambiente em contínua evolução, os agentes que nele atuam precisam estar constantemente atualizados das regras e procedimentos de mercado, para que tenham o conhecimento e o profissionalismo necessários no processo de tomada de decisões.

As distribuidoras estão em constante mudanças, a fim de atender a demanda do mercado e suas tendências atuais, como a liberalização parcial do mercado e as fontes alternativas de energia.

Um exemplo de fonte de energia alternativa, é o crescimento do uso da micro e mini geração distribuída como fontes alternativas de energia e a proximidade delas com os consumidores finais também tem sido crescente e algo fundamental para o crescimento energético e sustentável, alinhado a três pilares: ambiental, econômico e social. Dentre as fontes mais utilizadas pelos chamados “consumidores geradores” estão a solar, eólica e a biomassa.

Regulamentada pela ANEEL desde 2012, a micro geração distribuída tem crescido fortemente nos últimos anos. No fim do ano passado, a ANEEL aprovou aperfeiçoamentos na regulamentação, que passou a vigorar em março/2017. As novas regras possibilitam a instalação de geração distribuída em condomínios. Nessa configuração, a energia gerada poderia ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores. Foi criada também a “geração compartilhada”, na qual diversos interessados se unem em um consórcio ou cooperativa.

Desde a publicação da Resolução em 2012 até o fim do ano passado, já foram instalados cerca de 12 mil novas centrais geradoras.

“A ANEEL prevê que até 2024 perto de 1,2 milhão de unidades consumidoras produzam sua própria energia em um total de 4,5 gigas watts de potência instalada” ( ANEEL, 2017).

Trazendo estes fatores para o nosso dia a dia, entendemos que para a sustentabilidade do negócio, além das alterações do segmento, é importante considerar também os inputs relacionados às demandas oriundas do consumidor.

O Grupo considera ser primordial a satisfação dos nossos clientes com os serviços que prestamos.

No projeto, além do contexto regulatório, são considerados a qualidade na prestação do serviço, satisfação e valoração do consumidor final à organização. Também os impactos nos indicadores estratégicos e custos ao negócio.

Nas seções seguintes deste artigo, apresentam as principais etapas do desenvolvimento deste projeto, que inicia através das manifestações recebidas pelo canal de Ouvidoria, a qual é uma instituição que representa os legítimos interesses dos cidadãos dentro da organização, na busca de soluções definitivas alinhadas às estratégias do Grupo.

O Grupo EDP possui 12 mil Clientes pelo mundo, está presente em 14 países. Atua nos segmentos de Geração, Distribuição, Transmissão, Comercialização e Serviços de energia elétrica e renováveis.

## **2 | DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Sobre o projeto**

O ADMI tem por objetivo, fomentar internamente as áreas sobre a demanda recepcionada pelo canal Ouvidoria, como uma oportunidade estratégica, buscando atender as expectativas de nossos clientes e revertendo a sua insatisfação inicial manifestada através do canal é uma atividade de rotina e estratégica da área.

Mais recentemente, facilitada pela nova estrutura organizacional ocorrida em 2016, por meio de reestruturação, com foco no fortalecimento da estratégia da organização, a Ouvidoria foi alocada na Gestão Executiva de Excelência ao Cliente, juntamente a Gestão de Qualidade do Sistema e Gestão de Qualidade dos Serviços ao Cliente, fortalecendo e facilitando o aprimoramento dos processos da distribuidora, decorrentes da análise das manifestações dos clientes acolhidos pelo canal de Ouvidoria. Estrutura que, possibilita a formação de equipes multifuncionais, foi implementado o projeto ADMI – Análise de Demanda de Maior Impacto.

### **2.2 Impacto ao negócio**

No decorrer da aplicação do Projeto ADMI, ao recebimento da demanda de reclamações pela Ouvidoria, além da preservação do direito do consumidor e da organização, imparcialidade e isonomia na apuração, foram observados outros aspectos

relevantes para aprofundamento das análises com visão estratégica e considerando os impactos para as partes.

Tais como:

- Insatisfação do cliente;
- Valor intangível e tangível, como o resultado pesquisas de satisfação oficiais segmentadas, valoração na percepção do cliente;
- Custos elevados com as tratativas de reclamações e compensações financeiras ao consumidor;
- Resultados nos indicadores estratégicos;
- Risco regulatório, considerando o cenário de serviço público de atividades com base no que determina a Regulamentação do setor elétrico;
- Dentre as questões citadas, a insatisfação do cliente fere diretamente o valor e um dos princípios da organização;
- Visto o pilar estratégico e a missão da Ouvidoria, já citados.

### **2.3 Demandas avaliadas pelo projeto**

No decorrer de 2016 foram objetos de análise as manifestações registradas sobre os temas: cobrança de consumo irregular; faturamento; atendimento ao cliente e, por último, manifestações sobre prazo de execução de serviços, para o qual passaremos a demonstrar a seguir as etapas percorridas e resultados obtidos.

O foco da análise, que a princípio se mostrou necessária pela elevada demanda de reclamações na Ouvidoria, demonstrando criticidade face à insatisfação e vulnerabilidade da empresa em virtude de descumprimento dos prazos para execução de serviços, contou com grupo de trabalho envolvendo colaboradores da Ouvidoria, Qualidade do Serviço, Atendimento 1º nível - SAC – Serviço de Atendimento ao Consumidor e o COI – Centro de Operação Integrado.

Após análise das causas fundamentais, restou elaborado plano de ação, com vistas à redução desta demanda - implementada em dez/16.

O resultado foi à redução da demanda de reclamações na ouvidoria e, conseqüentemente, reflexo na redução de custos com tratamento de reclamações, na satisfação do cliente com a redução do prazo e oportunidade de melhoria de processo.

## 2.4 Aplicação do método PDCA às reclamações de Prazo de Serviço Técnico Comercial

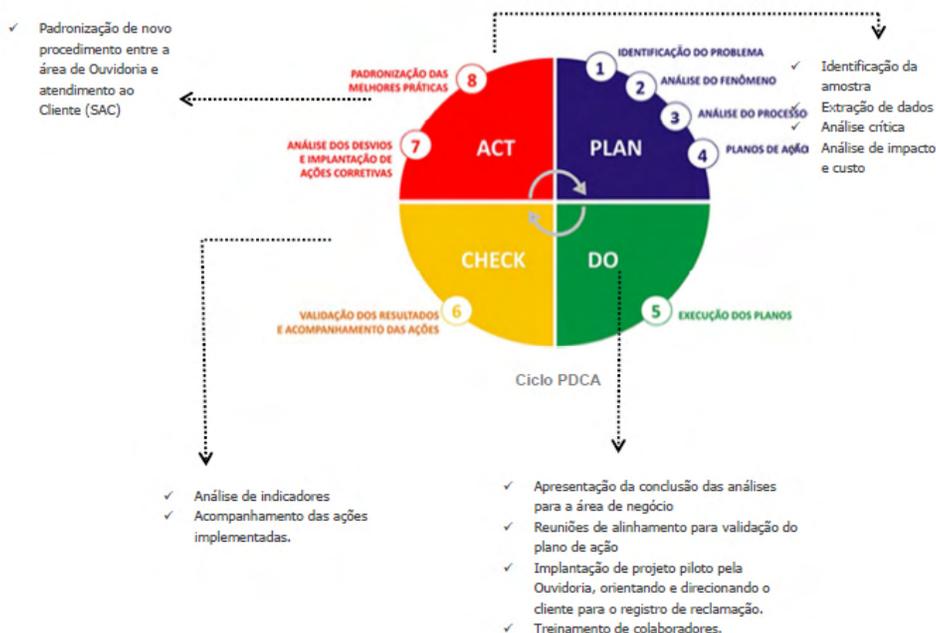


Figura 1 – Etapas do ciclo de gestão PDCA

## 2.5 Etapas percorridas pelo projeto

### Análises:

- Análise crítica da causa raiz da tipologia de prazo de serviços técnicos comerciais: ligação nova, alteração de carga/modificação de padrão e religação de fornecimento
- Avaliação do cenário atual do canal de atendimento e demanda na Ouvidoria
- Avaliação do caminho do atendimento até a reclamação na Ouvidoria
- Avaliação dos custos com a reclamação no canal de Ouvidoria
- Avaliação dos custos com pagamento de transgressão
- Avaliação de cases
- Avaliação da solução dadas para atendimento ao consumidor

### Plano de ação: Implantado em dezembro/16.

- Alteração de fluxo de atendimento das reclamações dos consumidores
- Alteração de procedimentos no Canal de Atendimento ao Cliente

- Treinamento de Colaboradores
- Implantação de projeto piloto para o atendimento das necessidades
- Medição do plano

### Resultados:

- Redução de 78% de reclamações na demanda de reclamações na Ouvidoria
- Redução de 70% de reclamações no órgão regulador, demonstrando a melhoria da satisfação do cliente, maximizando o valor intangível da concessionária
- Redução de 77% no custo de reclamações no Canal de Ouvidoria
- Redução do prazo de atendimento à reclamação/Serviço
- Melhoria da qualidade do serviço prestado ao cliente

### Medição dos principais resultados – Prazos Técnicos Comerciais

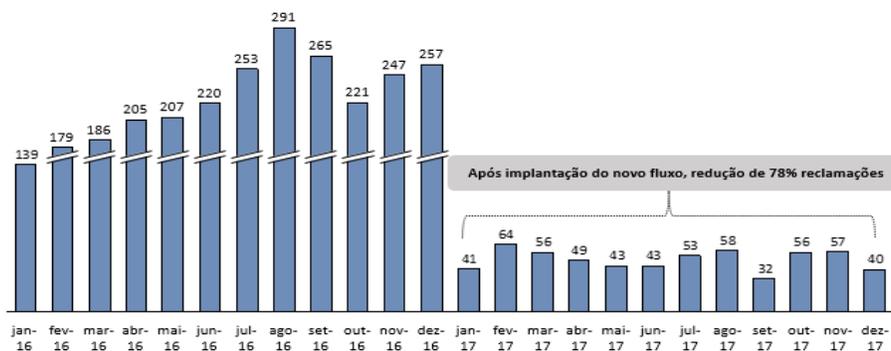


Figura 2 – Gráfico da Redução do Cenário de Reclamações de Ouvidoria

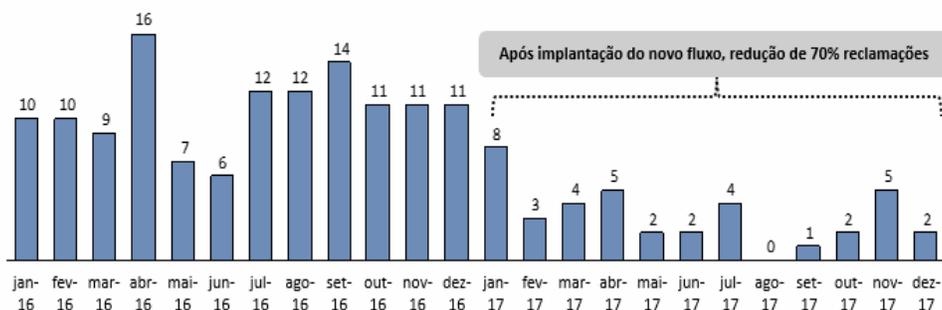


Figura 3 – Gráfico da Redução do Cenário de Reclamações ANEEL

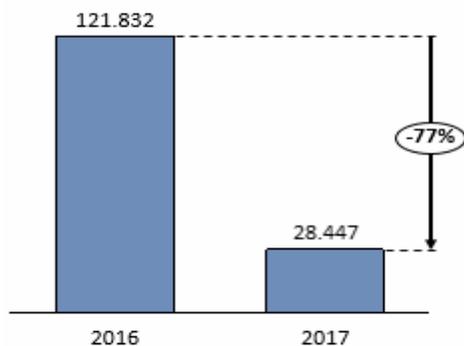


Figura 4 – Gráfico da Redução de Custo de Reclamação no Canal de Ouvidoria

### 3 | CONCLUSÃO

A metodologia do projeto, aplica-se aos processos da Distribuição e outros do setor, que avalia minuciosamente as causas fundamentais do problema, considerando o cenário em que o processo está alocado, bem como, seus impactos para a organização e o Cliente. A **satisfação do cliente** está relacionada com o sentimento na realização no momento que o cliente recebe o serviço. A satisfação resulta em clientes encantados e altamente satisfeitos. Sendo assim, a retenção dos clientes torna-se fundamental para o sucesso e sustentabilidade da empresa.

A aplicabilidade nas reclamações de prazos técnicos comerciais possibilitou um maior conhecimento sobre o caminho do atendimento ao consumidor tanto para a Ouvidoria, quanto para os responsáveis direto dos processos e deliberação de ações assertivas e eficientes, melhorando o serviço prestado ao consumidor final, nossos **Clientes**.

#### **Resultados do projeto para a EDP Distribuição SP:**

- Melhoria na qualidade dos processos da distribuição;
- Melhoria da percepção do cliente quanto à prestação de serviços, refletindo nas pesquisas oficiais;
- Redução com o custo de reclamações na Ouvidoria e órgão regulador;
- Redução de risco regulatório;
- Adequação às tendências de mercado (exigências do consumidor);
- Sustentabilidade do negócio;
- Sinergia entre as áreas.

#### **Resultados do projeto para o Cliente:**

Primeiramente, fazendo –se cumprir a missão da Ouvidoria: acolher o cliente de forma humanizada e, como representante dos seus direitos, tratar suas manifestações de

maneira imparcial e justa, internalizando suas expectativas junto à organização, alinhados com o nosso princípio 12 da Cultura EDP que é Cliente: nossa razão de ser, entre outros:

- Melhoria da eficiência na prestação de serviço pela EDP;
- Melhoria dos prazos de atendimento à demanda na distribuidora;
- Voz dentro da organização;
- Representação de seus direitos dentro da organização;
- Atendimento humanizado.

A prática foi reconhecida pelo **Prêmio Ouvidorias Brasil 2017**, criado pelo comitê de Ouvidores da Abrarec (Associação Brasileira das Relações Empresa Cliente, 2017) em parceria com a ABO (Associação Brasileira de Ouvidores). O objetivo da premiação é “reconhecer e premiar organizações e Ouvidores que trabalham para fortalecer o instituto da Ouvidoria no Brasil e no mundo”.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos colaboradores da Distribuição EDP SP, que atuaram para que esse projeto fosse implementado.

Em especial, ressaltar o envolvimento de toda equipe da Ouvidoria da EDP SP para que pudéssemos colher os melhores resultados, com foco na satisfação dos nossos Clientes, zelando por um serviço isonômico e de qualidade.

## REFERÊNCIAS

POLITO, Rodrigo. Abraceel. Reforma do setor de energia pode gerar economia de R\$ 2 bi. Valor Econômico, 2017. Disponível em <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2017/11/23/abraceel-reforma-do-setor-de-energia-pode-gerar-economia-de-r-2-bi.ghtml>>. Acesso em 23/11/2017.

ASSOCIAÇÃO, Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. ABRADÉE. Visão Geral do Setor Elétrico. ABRADÉE, 2017. Disponível em <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em 05/06/2017.

Capital, Carta. Carta Capital. Energia solar deve ser aposta no setor. Carta Capital 2017. Disponível em <<https://www.cartacapital.com.br/especiais/infraestrutura/tendencia-do-setor-energiasolar-deve-ser-aposta-do-governo.>>. Acesso em 05/06/2017. ABRAREC, Comitê de Ouvidoria.

ABRAREC. Manual de boas práticas Ouvidoria Brasil, 2015. Disponível em [http://abrarec.com.br/wp-content/uploads/2015/07/Vs\\_pb.pdf](http://abrarec.com.br/wp-content/uploads/2015/07/Vs_pb.pdf). Acesso em 05/06/2017.

GOOGLE. Google. Conceito de satisfação do cliente 2017. Disponível em [https://www.google.com.br/search?safe=active&sa=X&rlz=1C1GGRV\\_enBR756BR756&q=conceito%20de%20satisfa%C3%A7%C3%A3o%20do%20cliente&ved=0ahUKewiE06KbqcLZAhVMxVkkHY46CMAQsKwBCKMBKAewDA&biw=1366&bih=598](https://www.google.com.br/search?safe=active&sa=X&rlz=1C1GGRV_enBR756BR756&q=conceito%20de%20satisfa%C3%A7%C3%A3o%20do%20cliente&ved=0ahUKewiE06KbqcLZAhVMxVkkHY46CMAQsKwBCKMBKAewDA&biw=1366&bih=598). Acesso em 05/06/2017.

# CAPÍTULO 10

## DIAGNÓSTICO, CRESCIMENTO E ATENUAÇÃO DE RISCOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM FAVELAS

Data de aceite: 10/01/2022

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica (PPGEM)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Marta Rúbia Pereira dos Santos**

ETEC – Jacinto Ferreira de Sá  
Ourinhos – SP  
<http://lattes.cnpq.br/3003910168580444>

### **Fábio Rodrigo Milanez**

Faculdade da Indústria SENAI Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

### **Wagner Fontes Godoy**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/7337482631688459>

### **Rodrigo Henrique Cunha Palácios**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica (PPGEM)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0838678901162377>

### **Marco Antônio Ferreira Finocchio**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8619727190271505>

### **Carlos Alberto Paschoalino**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0419549172660666>

### **Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

### **Vicente de Lima Gongora**

Faculdade de Tecnologia SENAI Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

### **Lucas Botoni de Souza**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica (PPGEM)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/5938489268359300>

### **Michele Eliza Casagrande Rocha**

Universidade Norte do Paraná -Unopar  
Engenheira projetista elétrica  
Londrina-Pr  
<http://lattes.cnpq.br/4411484670091641>

### **José Augusto Fabri**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Informática  
(DAINF) - UTFPR  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/1834856723867705>

**RESUMO:** O conceito de responsabilidade social na engenharia é a obrigação de seus profissionais avaliarem o impacto de seu trabalho no bem-estar público. Apesar de ser um conteúdo apresentado em sala de aula, os alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Cornélio Procópio (UTFPR-CP) não têm contato com situações do mundo real de risco de choque elétrico e incêndios causados por instalações elétricas inadequadas. Para atenuar esse déficit, foi criado o projeto de extensão de graduação “Análise e Correção de Instalações Elétricas em Habitações de Baixa Renda na cidade de Cornélio Procópio” na UTFPR-CP. Este trabalho tem como foco a inspeção das condições de segurança de instalações elétricas e ações corretivas em habitações de baixa renda em Cornélio Procópio, Brasil. A inspiração é a Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP), na qual os alunos são inseridos em ambientes do mundo real para apontar e analisar problemas de instalações elétricas. No projeto, um grupo de alunos e um professor supervisor inspecionam as situações de risco de acordo com uma árvore de decisão e reparam as instalações elétricas nas habitações visitadas. Ao final, os alunos responderam a um formulário qualitativo que verificou o impacto do projeto no aprendizado e nas habilidades práticas e na consciência da responsabilidade social como engenheiros. Além disso, verificou-se que os reparos melhoraram a qualidade de vida dos moradores. Finalmente, trabalhos futuros quantitativos são abordados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Engenharia Elétrica, Aprendizagem Baseada em Projetos, Responsabilidade Social, Atenuação de Riscos.

## DIAGNOSIS, GROWTH AND RISK ATTENUATION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS IN FAVELAS

**ABSTRACT:** The concept of social responsibility in engineering is the obligation of its professionals to assess the impact of their work on public welfare. Despite being content presented in the classroom, students at the Federal Technological University of Paraná – Cornélio Procópio (UTFPR-CP) have no contact with real-world situations of risk of electric shock and fires caused by inadequate electrical installations. To alleviate this deficit, the graduation extension project “Analysis and Correction of Electrical Installations in Low-Income Housing in the city of Cornélio Procópio” was created at UTFPR-CP. This work focuses on the inspection of the safety conditions of electrical installations and corrective actions in low-income housing in Cornélio Procópio, Brazil. The inspiration is Project Based Learning (PBL), in which students are inserted in real-world environments to point out and analyze electrical installation problems. In the project, a group of students and a supervising teacher inspect the risky situations according to a decision tree and repair the electrical installations in the houses visited. At the end, students answered a qualitative form that verified the project’s impact on learning and practical skills and awareness of social responsibility as engineers. Furthermore, it was found that the repairs improved the residents’ quality of life. Finally, future quantitative work is addressed.

**KEYWORDS:** Electrical Engineering, Project-based Learning, Social Responsibility, Risk Attenuation.

## 1 | INTRODUÇÃO

As condições de vida e moradia de uma grande quantidade de pessoas no Brasil é um tema que demanda atenção. O direito humano à moradia é um dos direitos sociais assegurado constitucionalmente, no artigo 6º da Constituição Federal. Além disso, deve-se considerar a responsabilidade social do engenheiro ser crucial é crucial para o desenvolvimento sustentável e a prevenção de acidentes ambientais que causam danos à natureza e até matam, dependendo do caso, seres humanos.

A Figura 1 mostra a realidade da população brasileira em termos de renda. Nela, o pico ocorreu em 2014 seguido por uma tendência negativa até 2020. Uma melhoria ocorre apenas em 2021, em especial após o período mais crítico da pandemia no país. Com uma renda mais baixa diversos fatores diminuem a qualidade de vida dessa população. Neste contexto, 6,5 milhões de brasileiros não possuem acesso a uma moradia digna, muitas vezes sem saneamento básico e com acesso ilegal à energia elétrica. Uma análise estatística acurada da renda no Brasil é apresentada em Neri (2018).

A piora nas condições de vida da população brasileira, principalmente como visto na Figura 1, é uma das motivações do presente trabalho, que objetiva uma análise dos riscos de incêndio e choque devido à baixa qualidade das moradias.

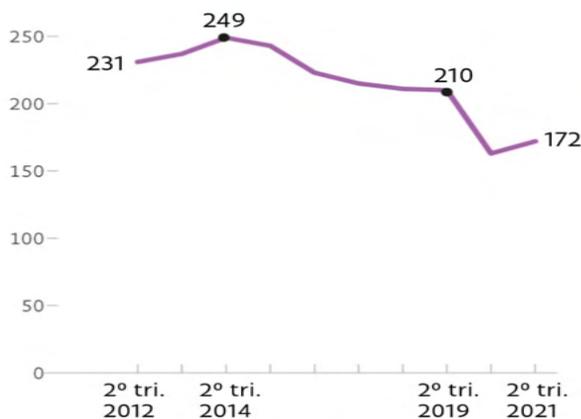


Figura 1 – Renda da população brasileira

A eletricidade é na atualidade um bem indissociável da sociedade, na qual seu acesso é visto como qualidade de vida. Entretanto, mesmo inerente aos modos de vida da sociedade, nem sempre tal acesso se dá de maneira organizada e segura para toda população, principalmente em regiões carentes: tanto das grandes cidades como no campo. É possível afirmar que, dentre este grupo citado, boa parte das instalações são executas pelos próprios cidadãos de maneira não organizada e pautado em normas de segurança. Desta forma, os cidadãos ficam submetidos a situações de risco, expondo-se a acidentes.

Nesse contexto, noções de segurança são importantes para que pessoas em condições de vulnerabilidade social não sejam expostas ao acesso precário à energia elétrica. Assim, para evitar riscos de incêndio e choques elétricos, um ambiente seguro deve obedecer às regulamentações de circuitos elétricos, como a NBR-5410 e a NR-10 (ABNT, 2008; MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2016).

Entretanto, na execução do trabalho, as condições eram tão precárias que as normas foram aplicadas para orientações das ações a serem tomadas. Nesse sentido a prefeitura da cidade foi notificada da situação para uma ação de construção de casas populares, as quais poder-se-ia aplicar as normas nas suas integralidades. Ressalta que os estudantes por falta de experiência ou prática em instalações reais devem ser assistidos pelo orientador, como por exemplo o trabalho de (JUHANA; PRIHATMANTO, 2020), o qual objetiva atenuar essa real dificuldade de forma simulada.

Conseqüentemente, o choque elétrico pode ser caracterizado como uma perturbação de natureza e efeitos diversos que se manifestam no organismo humano ou animal quando este é percorrido por uma corrente elétrica (KINDERMANN, 2013). Em outras palavras, é o efeito patofisiológico resultante da passagem de uma corrente elétrica, a chamada corrente de choque, através do corpo de uma pessoa ou de um animal (ABNT, 2008). Essa situação, além de poder causar sustos, também pode causar queimaduras, parada cardíaca ou a morte em casos mais graves (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2016).

Durante o período de 2007 a 2011, a *National Fire Protection Association* (NFPA) estimou que um corpo de bombeiros nos EUA respondeu, em média, 3,34 incêndios em escritórios comerciais por ano. Distribuição elétrica e equipamentos de iluminação foi o segundo maior causador de incêndios (12%), acarretando em 15% de danos às propriedades analisadas (CAMPBELL, 2013).

Assim, diversos fatores podem contribuir para a utilização de instalações elétricas precárias, como escassez de recursos, falta de conhecimento de normas técnicas e construção de casas improvisadas em terras expropriadas ou invadidas, sem saneamento básico etc. Desse modo, a necessidade de energia elétrica para iluminação e tarefas de uso diário induzem a prática de instalações que proporcionam risco de vida.

De maneira a ilustrar tal fato, trazemos o incêndio do edifício Joelma (São Paulo, Brasil), ocorrido em 1974, que fora causado por um curto circuito elétrico, devido à má instalação de um ar condicionado, um exemplo de riscos de instalações não padronizadas e supervisionadas (SHARRY, 1974). Recentemente, o edifício Wilton Paes de Almeida, também cidade de São Paulo, alvo de invasões desde a década de 2000, sofreu um incêndio devido à má instalação elétrica, o que causou o colapso do prédio, com mortes e prejuízos para a União (DARLINGTON, 2018).

Com base na problemática apresentada, o objetivo do presente estudo é apresentar o trabalho realizado no projeto de extensão “Análise e Correção de Instalações Elétricas em Habitações de Baixa Renda na cidade de Cornélio Procópio-PR”. Nele, um grupo de quatro

estudantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP), sob a orientação de um professor supervisor, realizaram visitas a cada duas semanas a moradias de baixa renda, durante dois semestres letivos, com aproximadamente dez meses de duração.

A motivação dessa pesquisa consiste em aprimorar e incentivar o ensino de habilidades práticas na UTFPR-CP proporcionando ao estudante uma visão mais ampla dos conceitos científicos aliados à realidade e às problemáticas sociais. Partindo de tal pressuposto, compreende-se que a missão da universidade é a excelência na educação tecnológica por meio de projetos de ensino, pesquisa e extensão. Entretanto, os projetos de extensão que visam a engenharia de responsabilidade social não são facilmente encontrados no ambiente acadêmico da UTFPR-CP.

Devido à dificuldade de quantificar os riscos de choques elétricos e incêndios, as atividades inicialmente foram analisadas qualitativamente. O estudo pautou-se na Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP), inspirada em técnicas inovadoras de aprendizado em ambientes reais, como em (FONSECA; GÓMEZ, 2017; MARTINEZ-RODRIGO et al., 2017; WELTMAN, 2007).

A estrutura do trabalho é descrita como segue. Na Seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos e a metodologia usada no trabalho. A Seção 3 mostra o desenvolvimento do projeto, apresentando também os dados das famílias e das habitações. Na Seção 4 são analisados alguns dos casos encontrados, mostrando os reparos e as considerações sobre as ações tomadas. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo e aborda futuros trabalhos.

## **2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Esta seção abordará conceitos para a elaboração do projeto de extensão.

### **2.1 Choques elétricos e acidentes decorrentes**

No projeto de extensão, a análise das habitações levou em consideração a ocorrência de choques elétricos e suas consequências nos seres humanos, assim como o possível aumento no risco de incêndios decorrente da instalação incorreta de circuitos elétricos. Entretanto, não é escopo desse trabalho a análise do risco de incêndios, devido à necessidade de consulta de normas locais e do levantamento da carga de incêndio.

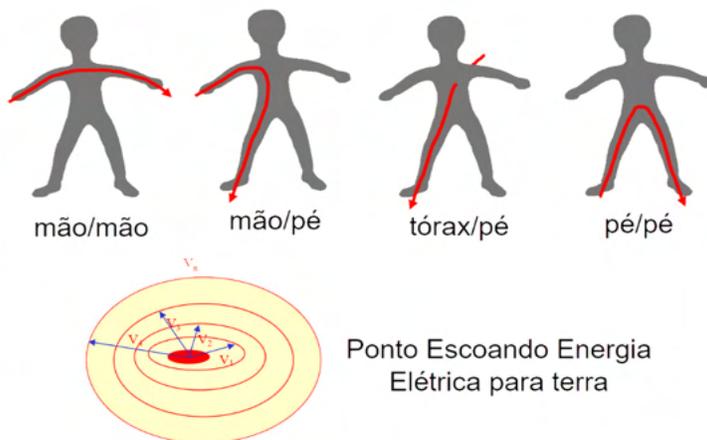


Figura 2 – Percurso da corrente elétrica no corpo humano de acordo com contato

A passagem de corrente elétrica pelo corpo humano o torna parte de um circuito energizado. Os choques elétricos podem causar diversos danos fisiológicos e patológicos ao organismo. Seus efeitos estão relacionados a intensidade da corrente elétrica que circula pelo organismo, o valor da tensão elétrica, a área de contato, a umidade presente na superfície de contato e o percurso da corrente e a resistência elétrica do corpo humano, Figura 2 (DIMOPOULOS et al., 2012).

Do total de acidentes, 822 são casos envolvendo choques elétricos, com 627 fatalidades. Ocorreram 311 acidentes decorrentes de curto-circuito, com alguns casos evoluindo para incêndios, causando 20 mortes. Os acidentes causados por descargas atmosféricas foram 89, com 46 vítimas fatais (ABRACOPEL, 2018).

## 2.2 Técnicas de aprendizado

Um dos conceitos abordados neste trabalho é a Aprendizagem Ativa (AA), introduzido por R. W. Revans (WELTMAN, 2007). Em suma, a AA é um método de aprendizagem na qual os alunos estão ativamente envolvidos no processo de aprendizagem. Conseqüentemente, o conhecimento adquirido depende do envolvimento do aluno (BONWELL; EISON, 1991). De forma sucinta, a AA é definida por um conjunto de práticas pedagógicas que abordam a questão da aprendizagem do aluno a partir de uma perspectiva diferente das técnicas clássicas de aprendizagem, como aulas expositivas em que aluno é visto como ser passivo no processo de aprendizagem.

No presente trabalho a inspiração principal é a ABP. Nela, a proposta de atividade pedagógica é direcionada pela apresentação de problemas aos alunos, que devem buscar ativamente métodos para sua resolução. Seu uso é particularmente interessante em disciplinas de engenharia e ciências.

Para apresentar em um ambiente real a necessidade de utilizar padrões técnicos

e de segurança, a ABP é utilizada para sugerir e aplicar soluções práticas baseadas em conceitos científicos para atenuar problemas. É importante salientar que as experiências de ensino que levam em conta a realidade multifacetada possuem potencial para contribuírem de maneira efetiva na aprendizagem em diversos níveis e modalidades de ensino. O diferencial de tal prática em relação às metodologias de ensino mais tradicionais refere-se principalmente ao contato direto com o contexto e à forma de abordagem do conteúdo técnico/científico problematizando, levantando hipóteses e soluções colocando o estudante como sujeito de sua própria aprendizagem.

Outro aspecto a ser destacado é o caráter social da aprendizagem. Parte-se do pressuposto que os conteúdos não são neutros e que a sociedade é perpassada por contradições. Nesta perspectiva, a aprendizagem estimula o desenvolvimento do pensamento crítico tendo como ponto de partida a realidade (FELDER; SILVERMAN, 1988).

### **2.3 Trabalhos correlatos**

Na literatura pode-se encontrar trabalhos que apresentam aplicações de metodologias ativas, como AA e ABP. Em (OLEAGORDIA et al., 2014) foram descritos os aspectos de um conjunto de ABP e aprendizagem cooperativa na área do ensino superior na Europa. O uso de metodologias ativas é apresentado em (FONSECA; GÓMEZ, 2017) para o ensino de engenharia de software em engenharia da computação no Chile. Nesse caso, os autores procuraram melhorar as notas dos alunos com a integração dos conteúdos aprendidos com o desenvolvimento de projetos dentro de um contexto industrial.

No Brasil, o uso de metodologias ativas pode ser observado em (GAZZONI; MIYOSHI; DE LIMA, 2017) com o ensino de Cálculo em engenharia. O objetivo do artigo foi inserir conteúdo técnico na rotina dos alunos, facilitando a associação de conceitos com as matérias, permitindo que os alunos façam suas próprias contribuições e alcancem níveis mais altos de compreensão.

Também se pode mencionar (PRASAD; WICKLOW; TRAYNOR, 2018). Esse projeto interdisciplinar utilizou um grupo de estudantes e professores dos departamentos de Ciência da Computação e Biologia para resolver um problema social. Em (FONSECA; GÓMEZ, 2017; GAZZONI; MIYOSHI; DE LIMA, 2017; OLEAGORDIA et al., 2014) os alunos alcançaram melhores notas e apresentando uma ampliação de sua consciência crítica.

## **3 | DESENVOLVIMENTO**

Por meio do ensino dos conceitos da AA e ABP, um grupo de quatro estudantes realizou visitas técnicas periódicas, a cada duas semanas, em quatro habitações na periferia do município de Cornélio Procópio (Paraná, Brasil), investigando a situação dos circuitos elétricos das habitações com o intuito de identificar possíveis riscos em instalações elétricas. Nos casos considerados mais severos, procurou-se atenuar a precariedade segundo os padrões de segurança da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A priori, as ações foram conduzidas de forma corretiva, visando atenuar a segurança dos moradores, objetivando diminuir o risco de choques elétricos e incêndios. Assim, o professor orientador analisava as propostas de melhorias e correções, concluindo as ações e reparos realizados com o grupo de alunos em reuniões antecedentes as visitas técnicas.

Além disso, uma palestra foi realizada pelo grupo de extensão e apresentada pelo coordenador do projeto, oferecida para toda a universidade. A exigência de participação foi a doação de alimentos.

A ontologia completa das vistas e reparos é composta de quatro etapas, observadas na Tabela 1. Elas sumarizam os principais conceitos abordados. Dessa forma, como metodologia de avaliação e validação do projeto de extensão, assumiu-se que um formulário era capaz de fornecer os dados necessários para a interpretação do impacto do projeto nos alunos.

<b>Etapa</b>	<b>Ação</b>
<b>1</b>	Visita a habitação para verificar os problemas elétricos
<b>2</b>	Verificação das possíveis soluções de acordo com ABNT e ANEEL
<b>3</b>	Definição das ações de reparação total ou parcial dos problemas encontrados
<b>4</b>	Execução das ações em pares, explorando os conceitos de AA e ABP
<b>5</b>	Conscientização dos moradores dos riscos encontrados

Tabela 1 – Ontologia do projeto de extensão

A análise de dados acompanhou a dinâmica e a construção de indicadores qualitativos e quantitativos, que auxiliaram na tomada de decisão e no planejamento estratégico das etapas deste trabalho. A primeira etapa do projeto consistiu em uma análise realizada por professor e alunos dos problemas encontrados através da viabilidade das soluções pelos padrões técnicos.

As correções foram feitas formalmente de acordo com uma árvore de decisão proposta pelo professor supervisor, mostrada na Figura 3. Em suma, uma árvore de decisão consiste em nós (atributos) e folhas (decisões ou ações) ligadas através dos resultados possíveis dos ramos (WANG et al., 2018).

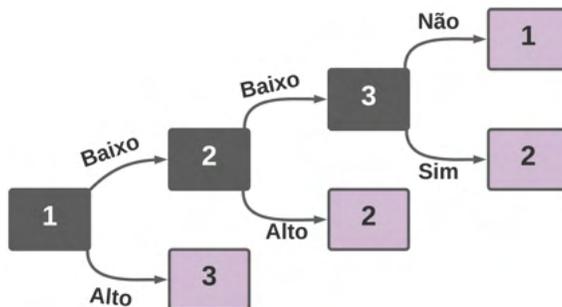


Figura 3 – Árvore de decisão utilizada nas visitas

Neste trabalho, abordaram-se os atributos da precariedade das fiações e equipamentos de iluminação, risco de incêndio (1) e choque elétrico (2), composto pela qualidade do isolamento e quantidade de remendos de fiação. O último atributo é a falta de iluminação adequada (3). Vale ressaltar que o atributo 1 corresponde automaticamente à substituição completa das instalações elétricas. A Tabela 2 mostra um exemplo de conjunto de dados para orientar o processo de tomada de decisão do grupo de alunos.

Id	Atributos			Ação
	1	2	3	
1	baixo	baixo	sim	2
2	baixo	baixo	não	1
3	baixo	alto	sim	2
4	alto	baixo	sim	3
5	alto	alto	não	3

Tabela 2 – Exemplo de conjunto de dados

Os riscos de incêndio e choque elétrico foram divididos em “baixo” e “alto”, e a falta de iluminação adequada é composta de “sim” ou “não”. Assim, as folhas da árvore de decisão são as ações de correção do grupo, descritas a seguir.

- (i) *Aconselhamento*: condições sem riscos alarmantes para os moradores.
- (ii) *Pequenos reparos*: condições com risco iminente de choques elétricos
- (iii) *Substituição total*: condições graves, quando as instalações elétricas podem imediatamente prejudicar várias vidas humanas e causar incêndios.

### 3.1 Aspectos socioeconômicos

De acordo com os dados coletados a partir da observação e documentação das habitações, verificou-se que nenhuma delas estava dentro dos padrões das normativas utilizadas (NBR-5410 e NR-10). As habitações não possuíam instalação elétrica adequada,

tampouco algum dispositivo de proteção contra descargas elétricas, devido à falta de condições financeiras e/ou técnicas dos moradores. As diretrizes para instalações, cálculo da bitola dos fios, disjuntores, demanda, aterramento, entre outros, foram feitas de acordo com os padrões da ABNT e ANEEL.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições estruturais das habitações analisadas eram precárias, com paredes frágeis que dificultavam a reparação dos componentes elétricos. Consequentemente, foi presenciada grande quantidade de situações de risco iminente de choques elétricos e incêndios. Nesta seção, foram relatadas as principais situações encontradas.



Figura 4 – Interruptor de luz não afixado

Por questões éticas, não serão revelados nomes e nem dados das moradias e sim alguns problemas nevrálgicos nas instalações elétricas. Conforme discutido anteriormente, selecionaram-se quatro habitações pelo projeto de extensão. Neste ponto será mostrado e discutido os casos encontrados, sugerindo as correções e soluções de segurança realizadas pelos alunos. Na Figuras 4 e 5, observa-se os terminais de fiação expostos, causando um risco elevado de choques elétricos, especialmente para crianças.

As Figuras 4 e 5 mostram outras situações de risco. Nestes casos, o grupo de alunos dedicava-se a melhorar os pontos de risco isolando adequadamente os condutores desencapados, fixando-os sempre que possível em tomadas, interruptores e pontos de iluminação. A fiação solta e/ou excedente foi removida ou realocada para minimizar o risco de choque elétrico ou curtos-circuitos. Para uma melhoria do conforto visual, em alguns casos, foram implementados novos pontos de iluminação e realocados os comutadores para outros locais para melhor acesso dos idosos e crianças.



Figura 5 – Fiação exposta, alto número de emendas

Como visto na Figura 5, foi instalado um novo conjunto de interruptor de luz no banheiro. No entanto, as paredes estavam em más condições, impossibilitando a reparação correta e efetiva. A fiação que conectava o interruptor à lâmpada foi substituída, enquanto a fiação derretida do chuveiro foi reparada, removendo as partes danificadas.

A falta de disjuntores e de separação dos circuitos foi observada nas habitações. Foram encontrados disjuntores em apenas duas, quando os padrões indicam um disjuntor por circuito. Além disso, todas as habitações visitadas tinham algum tipo de conserto de fiação inadequada e nenhuma possuía aterramento.

Devido à baixa luminosidade, cuidados adicionais de segurança foram tomados durante as visitas, feitas principalmente ao entardecer, de acordo com a disponibilidade dos alunos. Esse fato foi agravado pela falta de disjuntores, já que induziu o desligamento total para a realização das correções e melhorias.

A estrutura das habitações também caracterizou um obstáculo para a realização do trabalho. Paredes frágeis, acabamentos de má qualidade e falta de tetos impediram a fixação dos elementos em alguns casos.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados pelo trabalho desenvolvido foram promissores e proporcionaram a melhoria nas instalações elétricas das casas abordadas. Ao vivenciarem uma experiência de ensino e aprendizagem de cunho técnico, os alunos também são capazes de uma tomada de consciência acerca do contexto da sociedade que vive abaixo da linha da pobreza, exaltando que problemas de riscos de segurança eram presentes.

Os ganhos visíveis a partir da experiência vão além da apropriação de conteúdos científicos, ao permitirem uma análise da realidade em suas diferentes dimensões. Os estudantes claramente tomaram consciência de que os problemas diagnosticados não se

restringem somente aos aspectos técnicos, mas são imbricados na cultura, nas condições materiais e históricas do grupo analisado.

Finalmente, após as orientações do professor responsável pelo projeto de extensão e os alunos, observaram que as famílias se mostraram cientes acerca dos riscos de acidentes causados pelo uso de energia elétrica. Nos trabalhos futuros ações serão direcionadas nesse sentido, além da busca de empresas que auxiliem na aquisição de dispositivos elétricos, como lâmpadas, interruptores, fios e cabos entre outros necessários para ações de melhorias para atenuação de risco de choques elétricos e até incêndios.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Cornélio Procopio e a todos que apoiaram a realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR-5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.].

ABRACOPEL. **Anuário Estatístico Abracopel de Acidentes de Origem Elétrica - Ano Base 2017**. Salto, SP, BR: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.abrinstal.org.br/docs/abracopel\\_anuario18.pdf](http://www.abrinstal.org.br/docs/abracopel_anuario18.pdf)>.

BONWELL, C. C.; EISON, J. A. **Active Learning: Creating Excitement in the Classroom**. 1. ed. Washington, USA: School of Education and Human Development, The George Washington University, 1991.

CAMPBELL, R. **U.S. Structure Fires in Office Properties** National Fire Protection Association - Fire Analysis and Research Division. Quincy, MA, USA: [s.n.].

DARLINGTON, S. **Fire in São Paulo, Brazil, Brings Down a High-Rise Building**. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2018/05/01/world/americas/sao-paulo-brazil-fire-collapse.html>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

DIMOPOULOS, A. et al. Probability Surface Distributions for Application in Grounding Safety Assessment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 4, p. 1928–1936, 2012.

FELDER, R. M.; SILVERMAN, L. K. Learning and teaching styles in engineering education. **Engineering education**, v. 78, n. 7, p. 674–681, 1988.

FONSECA, V. M. F.; GÓMEZ, J. Applying Active Methodologies for Teaching Software Engineering in Computer Engineering. **Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, v. 12, n. 3, p. 147–155, 2017.

GAZZONI, W. C.; MIYOSHI, J.; DE LIMA, V. D. P. Active Methodologies for Calculus in Engineering Courses (December 2016). **Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, v. 12, n. 4, p. 193–198, 2017.

JUHANA, A.; PRIHATMANTO, A. S. Basic Electrical Installation Trainer Boards. n. Icidm, 2020.

KINDERMANN, G. **Choque elétrico - 4ª edição modificada e ampliada**. 4. ed. Florianópolis, SC, Brasil: Do autor/FPOLIS, 2013.

MARTINEZ-RODRIGO, F. et al. Using PBL to Improve Educational Outcomes and Student Satisfaction in the Teaching of DC/DC and DC/AC Converters. **IEEE Transactions on Education**, v. 60, n. 3, p. 1–9, 2017.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Rio de Janeiro, BR: [s.n.]. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR10.pdf>>.

NERI, M. **Desigualdade, Democracia e Desenvolvimento**. Disponível em: <[https://www.cps.fgv.br/cps/bd/docs/FGV\\_Social\\_Desigualdade\\_Democracia\\_e\\_Developolvimento\\_Marcelo\\_Neri.pdf](https://www.cps.fgv.br/cps/bd/docs/FGV_Social_Desigualdade_Democracia_e_Developolvimento_Marcelo_Neri.pdf)>. Acesso em: 1 nov. 2021.

OLEAGORDIA, I. J. et al. Active methodology applied in engineering by PBL. I-Approach. **Proceedings of XI Tecnologias Aplicadas a la Ensenanza de la Electronica (Technologies Applied to Electronics Teaching), TAAE 2014**, 2014.

PRASAD, R.; WICKLOW, B.; TRAYNOR, C. **Practical Problem-Based Learning: An Interdisciplinary Approach**. 2018 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC). **Anais...**Princeton, NJ, USA: IEEE, 2018

SHARRY, J. A. South America Burning. **Fire Journal**, v. 68, n. 4, p. 23–33, 1974.

WANG, L. et al. Region compatibility based stability assessment for decision trees. **Expert Systems with Applications**, v. 105, p. 112–128, 1 set. 2018.

WELTMAN, D. **A Comparison of Traditional and Active Learning Methods: An Empirical Investigation Utilizing a Linear Mixed Model**. [s.l.] The University of Texas at Arlington, 2007.

## ANÁLISE COMPARATIVA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UMA EDIFICAÇÃO DA CIDADE DE PORTO VELHO - RO

*Data de aceite: 10/01/2022*

### **Angelina Lidiane Moura Cunha**

Fundação Universidade Federal de Rondônia  
- UNIR  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/1438396502405730>

### **Felipe Alexandre Souza da Silva**

Tribunal de Contas do Estado de Rondônia –  
TCE/RO  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/6495189325235413>

### **Antonio Carlos Duarte Ricciotti**

Fundação Universidade Federal de Rondônia  
- UNIR  
Porto Velho – RO  
<https://orcid.org/0000-0002-4986-6601>  
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

### **Viviane Barrozo da Silva**

Fundação Universidade Federal de Rondônia  
- UNIR  
Porto Velho – RO  
<https://orcid.org/0000-0002-1948-1532>  
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

### **Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira**

Fundação Universidade Federal de Rondônia  
- UNIR  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

**RESUMO:** As mudanças climáticas associadas as emissões de gases do efeito estufa por queima de combustíveis, tem gerado uma intensificação dos

fenômenos meteorológicos como as tempestades e em consequência as descargas atmosféricas, especialmente nas metrópoles, onde existem as ilhas de calor. Estudos indicam que as ilhas de calor por ocorrerem nas grandes cidades e causarem uma elevação da umidade para a formação das nuvens de tempestades, tem-se tornado mais intensas ano após ano. O Brasil é um dos países com uma das maiores incidências de raios do mundo, sabendo disso, constata-se que este é um quadro preocupante e em algumas cidades é alarmante em dadas épocas do ano, as proteções contra este fenômeno são o campo de estudo de muitas pesquisas para o Grupo de Eletricidade Atmosféricas (ELAT), que integra o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As proteções necessárias para tornar uma edificação segura contra descargas atmosféricas devem seguir os procedimentos de instalação em que todos os elementos que compõem o dado sistema deve estar efetivamente projetados para que a edificação de análise esteja protegida contra danos de qualquer natureza elétrica causados por uma descarga atmosférica. Levando em conta as medidas de proteções necessárias para diminuir os riscos e danos causados pelas descargas atmosféricas, tem-se a seguir o estudo de um desses sistemas em fase de instalação em uma edificação na cidade de Porto Velho, em que se é possível analisar a pluralidade dos parâmetros da maioria das construções no entorno da área de estudo. O estudo de caso é comparativo com um projeto elaborado para o mesmo propósito, que considera as diretrizes da normativa responsabilizada para tal fim, bem como o projeto de análise, porém

com visões diferenciadas de cada projetista no que se associa a sua implantação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Descargas atmosféricas, Sistemas de Proteções Contra Descargas Atmosféricas.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF AN ATMOSPHERIC DISCHARGE PROTECTION SYSTEM IN A BUILDING IN THE CITY OF PORTO VELHO - RO

**ABSTRACT:** Climate change associated with emissions of greenhouse gases by burning fuels, has generated an intensification of meteorological phenomena such as storms and, as a result, atmospheric discharges, especially in metropolises, where there are heat islands. Studies indicate that heat islands, because they occur in large cities and cause an increase in humidity for the formation of storm clouds, have become more intense year after year. Brazil is one of the countries with one of the highest lightning incidences in the world, knowing that this is a worrying picture and in some cities it is alarming in certain times of the year, the protections against this phenomenon are the study field of many researches for the Atmospheric Electricity Group (ELAT), which integrates the National Institute for Space Research (INPE). The protections needed to make a building safe against lightning discharges must follow installation procedures in which all the elements that make up the given system must be effectively designed so that the building under analysis is protected against damage of any electrical nature caused by a lightning discharge. Taking into account the necessary protection measures to reduce the risks and damage caused by lightning discharges, the following is a study of one of these systems being installed in a building in the city of Porto Velho. The case study is comparative with a project prepared for the same purpose, which considers the guidelines of the normative responsible for this purpose, as well as the analysis project, but with different visions of each designer in what is associated with its implementation.

**KEYWORDS:** Lightning Strikes, Lightning Protection Systems.

## 1 | INTRODUÇÃO

Considerando que as mudanças climáticas causadas pelo homem, associadas ao aumento das emissões de gases do efeito estufa por queima de combustíveis fósseis, queimadas, desmatamentos, etc, que traz consigo a formação das ilhas de calor, fenômeno que associa diferentes condicionantes derivados das ações humanas sobre o ambiente urbano, ou seja, nas grandes cidades, tem causado um aumento da temperatura e em consequência uma intensificação dos fenômenos meteorológicos, em especial as tempestades elétricas, assim a necessidade do aprimoramento nas medidas de proteção contra descargas atmosféricas é uma demanda que requer atenção no país.

Neste sentido, apresenta-se nesse estudo uma análise comparativa entre projetos de proteção contra descargas atmosféricas para a mesma edificação, um deles em fase de instalação, com o intuito de averiguar a eficiência dos métodos adotados a critério da normativa correspondente para esse fim e as dificuldades encontradas na execução do projeto tendo em vista as incompatibilidades e interferências da edificação de análise,

bem como os métodos utilizados em cada projeto para garantir a eficiência das proteções exigidas.

## **2 | INCIDÊNCIA DE TEMPESTADES ELÉTRICAS EM FUNÇÃO DA POLUIÇÃO E URBANIZAÇÃO**

Segundo ECO (2021), o Brasil é um dos países com a maior incidência de raios do mundo, com mais de 75 milhões por ano. Esse levantamento é inédito do INPE que mostra que existe uma relação entre as emissões de gases do efeito estufa e o maior número de descargas elétricas nas grandes capitais do país.

ECO (2021) reforça que as razões para a ocorrência de tantos raios são conhecidas pelos cientistas, sendo algumas delas a questão das regiões tropicais serem as mais quentes e favorecem a formação de tempestades, além da urbanização acelerada e aumento da temperatura média no planeta.

Para Garcia (2013), o primeiro fator a contribuir para a alta incidência de raios nas cidades é a substituição de cobertura vegetal por asfalto e concreto, que cria uma ilha de calor no perímetro urbano, isso torna a cidade de 3°C a 5°C mais quente. A poluição alimenta o problema, pois partículas de fuligem e subprodutos da queima de combustíveis servem como “núcleos de condensação”, pontos a partir dos quais as moléculas se agregam e formam gotículas.

A influência da urbanização na eletricidade atmosférica tem um impacto econômico e social perceptível, mas difícil de calcular em escala regional. No Brasil todo, os raios causam anualmente cerca de 130 mortes e prejuízos de R\$ 1 bilhão (GARCIA, 2013).

## **3 | PERIGOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Halliday David e Resnick (2009) destacam que as tempestades elétricas são perigosas por várias razões, alguns exemplos são o de se um relâmpago atingir uma pessoa ou um objeto que a pessoa estiver segurando, se um relâmpago atingir um objeto próximo, parte da carga poderá saltar e atingir a pessoa (um efeito conhecido como descarga lateral), se um relâmpago atingir o solo nas proximidades da pessoa, parte da carga produzida no solo poderá atravessar seu corpo.

Cotrim (2009) afirma que qualquer atividade biológica, seja ela glandular, nervosa ou muscular, é estimulada ou controlada por impulsos de corrente elétrica. Se essa corrente fisiológica interna se somar a outra corrente de origem externa, devido a um contato elétrico, ocorrerá uma alteração das funções vitais normais do organismo humano, que pode levar o indivíduo à morte, dependendo da duração da corrente.

No Brasil, os boletins do ELAT informam as mortes e consequências decorrentes da incidência de raios no período de 2000 a 2019 em todo o país, conclui-se que o número total de mortes nesse período foi de 2.194 pessoas sendo 26% na zona rural, 21% dentro

de casa, 9% na água ou próximo, 9% embaixo de árvore, 8% em área coberta, 7% em área descampada, 6% em meios de transporte e 4% em rodovias. Por estações do ano, 76% das mortes ocorreram no verão e na primavera, período do ano onde ocorrem cerca de 80% das descargas atmosféricas no Brasil.

Jr (2005) reforça que, por causa de sua grande extensão territorial e a proximidade do equador geográfico, o Brasil é um dos países de maior incidência de raios no mundo. Estima-se, com base em dados obtidos por sensores óticos a bordo de satélites na última década, que nosso país ostente o título de campeão mundial na ocorrência de raios em termos absolutos, com cerca de 50 a 70 milhões de incidências por ano em média. São dois raios por segundo, ou ainda sete raios por km<sup>2</sup> por ano. Diversos setores são afetados: telecomunicações, agricultura, aeronáutica, construção civil, indústria em geral e até o cidadão comum. O setor elétrico é de longe o mais atingido.

#### **4 I REGULAMENTAÇÃO DA NBR 5419 – 2015**

Cavalin e Cervelin (2011) exprimem que uma edificação é considerada segura contra descargas atmosféricas apenas quando todo o procedimento de “instalação de proteção for projetado e construído de tal maneira que os componentes da estrutura, as pessoas, os equipamentos e instalações, que estejam permanentemente ou temporariamente em seu interior, fiquem efetivamente protegidos contra os raios e seus efeitos pelo maior intervalo de tempo possível”.

A ABNT NBR 5419 é a norma responsabilizada pela proteção contra descargas atmosféricas no Brasil, no ano de 2015 uma nova versão foi publicada e dividida em quatro partes:

- Parte 1: Princípios gerais;
- Parte 2: Gerenciamento de risco;
- Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida;
- Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

As conexões entre as partes da ABNT NBR 5419 são ilustradas na Figura 1.

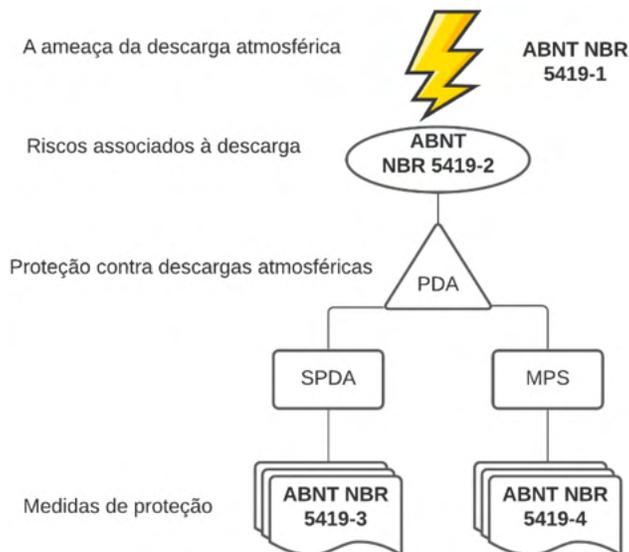


Figura 1. Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419. Fonte: Adaptado de (NBR 5419-1, 2015).

## 5 | GERENCIAMENTO DE RISCO DE ACORDO COM A NBR 5419 DE 2015

A ideia central desse estudo é realizar uma análise comparativa de um sistema de proteção em fase de instalação na edificação Sede do Tribunal de Contas do Estado de Rondônia (TCE-RO), com um projeto de referência de autoria própria, levantando as diferenças entre ambos os projetos com apontamentos na eficácia das medidas de proteção adotadas a partir das diretrizes da NBR 5419.

O cenário analisado foi o Edifício Sede do Tribunal de Contas do Estado de Rondônia, localizado na Av. Pres. Dutra, 4229 - Olaria, Porto Velho - RO, 76801-327, conforme pode ser observado na Figura 2, e o foco foram os sistemas e subsistemas interno e externo de um SPDA em fase de instalação. Toda a análise foi feita de maneira hipotética em um comparativo da utilização de um projeto já pronto, elaborado pelo engenheiro eletricista da empresa *Oficina Arquitetura & Design* versus um projeto com o mesmo objetivo, porém de autoria própria.



Figura 2. Tribunal de Contas do Estado de Rondônia.

Fonte: Própria Autora.

Para a elaboração do gerenciamento de risco, seguiu-se as diretrizes da NBR5419-2:2015. Assim, todos os cálculos foram elaborados com uma relação de perdas analisadas sem as medidas de proteção e com as medidas de proteção, para verificação do risco em que a edificação se encontrava antes e depois da instalação de um sistema de proteção.

Primeiramente, ao se analisar a estrutura e suas perdas relevantes, através dos componentes de riscos, é possível averiguar que o risco de perda de vida humana (L1) e perda econômica (L4) são relevantes para este tipo de estrutura, como trata-se de um tribunal tem-se os problemas resultantes da perda de comunicação, falha de computadores e perda de dados de grande relevância. Assim, dá-se a implicação da determinação do risco  $R_1$  para perda de vida humana (L1) com os componentes de risco determinados na norma,  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_U$  e  $R_V$ , para compará-los com o risco tolerável  $R_T = 10^{-5}$ , conforme visto na Tabela 1.

TIPOS DE PERDAS		$R_T(Y^{-1})$
L1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	$10^{-5}$
L2	Perda de serviço ao público	$10^{-3}$
L3	Perda de patrimônio cultural	$10^{-4}$

Tabela 1. Valores típicos de risco tolerável  $R_T$ .

Para adquirir os dados dos riscos aos quais a edificação está sujeita, é necessária uma série de cálculos que envolve analisar a estrutura: sua localização; a determinação da

área de risco; as zonas da edificação a serem protegidas; o levantamento da quantidade aproximada de pessoas presente em cada zona de risco; as informações das linhas de energia e sinal que adentram a edificação; etc. Todas essas informações devem ser levantadas e enfim os parâmetros devem ser dispostos conforme as Tabelas determinadas na Parte 2 da NBR 5419. Uma vez que todos os cálculos são elaborados sem as medidas de proteção é possível adquirir o risco da edificação para uma provável incidência de descargas atmosféricas em sua estrutura. Conforme pode ser observado na Tabela 2.

<b>RISCO R1 PARA ESTRUTURAS NÃO PROTEGIDAS (VALORES <math>\times 10^{-5}</math>)</b>				
<b>Tipo de dano</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Estrutura</b>
<b>D1</b> <b>Ferimentos devido a choque</b>	$RA$	0,0457	0,2744	<b>0,3201</b>
	$RU = RU/P + RU/T$	0,0000	0,0007	<b>0,0007</b>
<b>D2</b> <b>Danos físicos</b>	$RB$	0,0000	68,5999	<b>68,5999</b>
	$RV = RV/P + RV/T$	0,0000	0,1722	<b>0,1722</b>
<b>Total (R1)</b>		0,0457	69,0472	<b>69,0930</b>
<b>Não-Tolerável</b>		$R1 > RT$ : proteção contra descargas atmosféricas é necessária		<b>RT=1</b>

Tabela 2. Resultado do Gerenciamento de Risco SEM medidas de proteção.

Ao se observar a Tabela 2 adquirida a partir da análise do gerenciamento de risco, conclui-se que o risco calculado é muito superior ao risco tolerável, assim se faz necessária a adoção de medidas de proteção para a edificação sede do tribunal.

O risco R1 na estrutura é concentrado principalmente na zona Z2 (área interna da edificação) devido ao  $R_b$  que é o componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente e em que todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem aumentar.

Estes componentes de danos podem ser reduzidos provendo à edificação com um SPDA de acordo com a Parte 3 da NBR5419-3:2015 que podem reduzir  $R_b$  por meio da probabilidade  $P_b$ , ligação equipotencial em função do nível de proteção (NP), e acrescentando também dentro da zona Z2 medidas de proteção contra consequências de incêndio (extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape etc.). Essas medidas devem reduzir os componentes  $R_b$  e  $R_v$  por meio da redução do fator  $r_p$  que é o fator redutor de perda devido às precauções contra incêndio.

Considerando o nível de proteção NP calculado para a edificação do tribunal através dos riscos e perdas associados a ela foi constatado a necessidade de uma interligação equipotencial em seu interior, assim foram combinados diferentes elementos de medidas

de proteção, a seguinte solução pode ser adotada:

**Solução:**

1. Proteger o edifício com um SPDA classe II de acordo com a ABNT NBR 5419-3, para reduzir a componente  $R_B$  ( $P_B = 0,05$ ).
2. Este SPDA inclui a interligação equipotencial de descargas atmosféricas obrigatória na entrada com DPS projetados para NP ( $P_{EB} = 0,02$ ) e reduzir componentes  $R_U$  e  $R_V$ .
3. Utilizar sistemas de extinção de incêndio (ou detecção) para reduzir componentes  $R_B$  e  $R_V$ . Instalar um sistema de incêndio na zona Z2 ( $r_p = 0,5$ ).

De posse das informações adquiridas a partir do gerenciamento de risco, observou-se que a solução reduz o risco para valores abaixo do tolerável, estando sujeita aos critérios: melhor solução técnica devido maior eficiência na redução do risco de perdas, conforme Tabela 3.

<b>RISCO R1 PARA ESTRUTURAS NÃO PROTEGIDAS (VALORES <math>\times 10^{-5}</math>)</b>				
<b>Tipo de dano</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Estrutura</b>
<b>D1</b> <b>Ferimentos devido a choque</b>	$RA$	0,0002	0,0014	<b>0,0016</b>
	$RU = RU/P + RU/T$	0,0000	0,0000	<b>0,0000</b>
<b>D2</b> <b>Danos físicos</b>	$RB$	0,0000	0,3430	<b>0,3430</b>
	$RV = RV/P + RV/T$	0,0000	0,0034	<b>0,0034</b>
<b>Total (R1)</b>		0,0002	0,3478	<b>0,3481</b>
<b>Tolerável</b>		<b>R1 &lt;RT: proteção contra descargas atmosféricas</b>		<b>RT=1</b>
<b>Medidas Adotadas:</b>	1 – Proteger o edifício com um SPDA Classe II (Probabilidade de danos físicos à estrutura - $P_B = 0,05$ )			
	2 – Este SPDA inclui a interligação equipotencial de descargas atmosféricas obrigatória na entrada com DPS projetados para NP II - $PEB=0,02$ )			
	3 – Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape (fator de redução - $r_p=0,5$ ) na zona 2			

Tabela 3. Resultado do Gerenciamento de Risco COM medidas de proteção.

## 6 I APLICAÇÃO DO SPDA DETERMINADO NO GERENCIAMENTO DE RISCO

Para a elaboração de um SPDA Classe II foi utilizado o método eletrogeométrico, ou da esfera rolante, considerando a NBR 5419-3 que dispõe dos valores máximos dos raios da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção correspondentes a classe do SPDA, visto que como a edificação supera a altura de 30m acima dos valores da curva de

uma classe de SPDA, são aplicáveis apenas os métodos da esfera rolante e das malhas. Portanto o ângulo de proteção é  $30^\circ$  com o máximo afastamento dos condutores da malha de 10m, conforme se observa na Figura 3, em que o plano de referência adotado está na base da edificação, e a altura vai da base até o topo do captor.

Em função da necessidade de uma melhor proteção na cobertura, optou-se pela implantação de 3 captosres tipo Franklin equidistantes na cobertura, que embora não atendam a área exposta completamente, foi utilizado um subsistema de captação para suprir a área desprotegida.

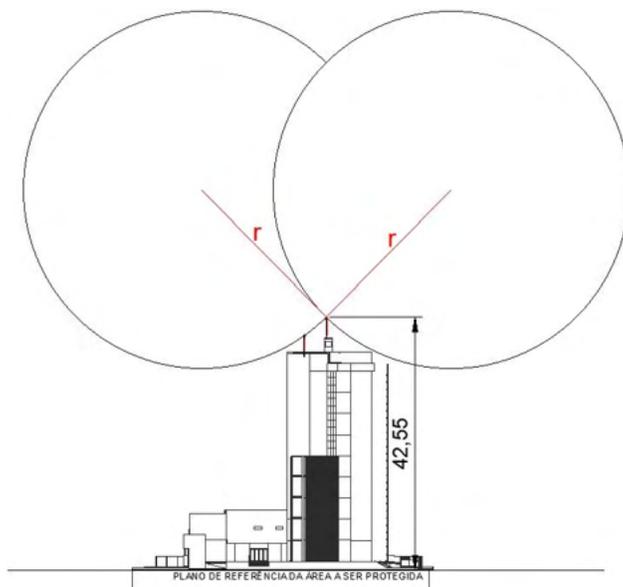


Figura 3. Método das esferas rolantes observado pela lateral da edificação do tribunal.

Fonte: Própria Autora.

Para o sistema de aterramento com proteção Classe II, é importante ressaltar que é necessário o cálculo do raio para o aterramento do anel, de acordo com a NBR5419-3:2015, na Figura 4 tem-se parte da malha de aterramento implantada no projeto.

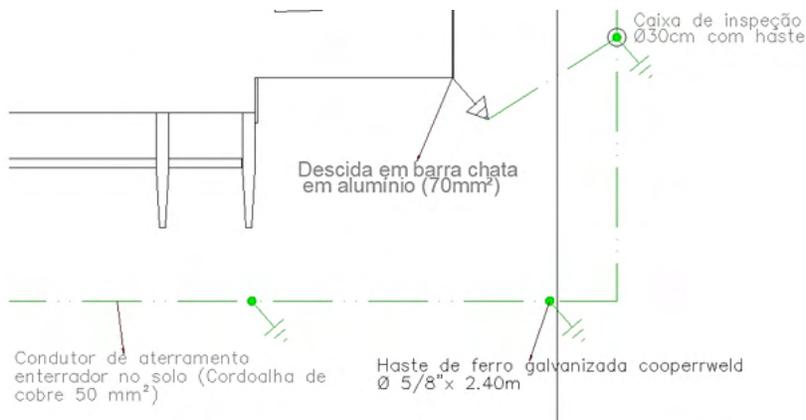


Figura 4. Representação de parte da malha de aterramento implantada no projeto elaborado para comparação.

Fonte: Própria Autora.

A NBR 5419-3 destaca que as classes III e IV são independentes da resistividade do solo, porém, como trata-se de um SPDA Classe II, se faz necessário o cálculo. Esse cálculo foi realizado com dados do Laudo Técnico de Resistividade do Solo, realizado pela empresa contratada para a elaboração do projeto, dos dados disponibilizados, consta que a maior resistividade encontrada foi de 497, 62 $\Omega$ .m, sendo assim o raio médio do anel de aterramento tem que ser no mínimo 5 metros, o mesmo atende as exigências da NBR 5419/2015. A alta resistência se deve pelo tipo de solo, sendo solo muito seco e com rochas ao seu redor, fazendo com que o solo se torne mais resistente para a condução da corrente elétrica.

Na elaboração do projeto comparativo do sistema de SPDA, foram consideradas as informações levantadas pela empresa e o laudo técnico de resistividade, uma vez que as hastes e a malha foram posicionadas a aproximadamente 1m da edificação e o distanciamento entre as hastes de aterramento foi adotado um valor de 5m, sendo que a distância não pode ser inferior ao comprimento da haste, que é de 3m, para que assim não comprometa a resistividade do solo nos pontos de instalação das hastes. Além disso foram adicionadas caixas de inspeção próximas de cada descida do sistema, sendo necessárias adequações para uma melhor distribuição a critério do projetista.

Com relação ao sistema de descidas, foi adotada uma malha em volta da edificação de em média 10m, exigido para a classe de SPDA adotada na NBR 5419. Houveram adequações especificamente para a edificação de estudo, para evitar a passagem de descidas próximos de áreas que impossibilitem a instalação da barra chata de alumínio, deve-se ressaltar que todos os materiais utilizados em todos os sistemas e subsistemas são permitidos na norma e que suas adequações não comprometem qualquer condução de corrente que possa ocorrer por uma descarga atmosférica. Portanto, o uso da barra

de alumínio se justifica tanto por ser esteticamente mais discreta é também tão eficiente quanto qualquer outro material para a aplicação no SPDA, conforme determina a normativa.

No sistema de equipotencialização, pode-se observar na Figura 5 a representação do condutor de 16mm<sup>2</sup> em que interliga cada quadro do barramento de equipotencialização local - BEL ao barramento de equipotencialização principal - BEP, os BELs foram alocados em cada pavimento, e o BEP encontra-se no subsolo, interligando todo o sistema de BELs e levando para a malha de aterramento. Cada BEL deve interligar em seu pavimento de alocação todos os quadros elétricos de distribuição, eletrocalhas, tubulações de incêndio e qualquer parte metálica viva, sujeita a condução de corrente elétrica em decorrência de descargas atmosféricas.

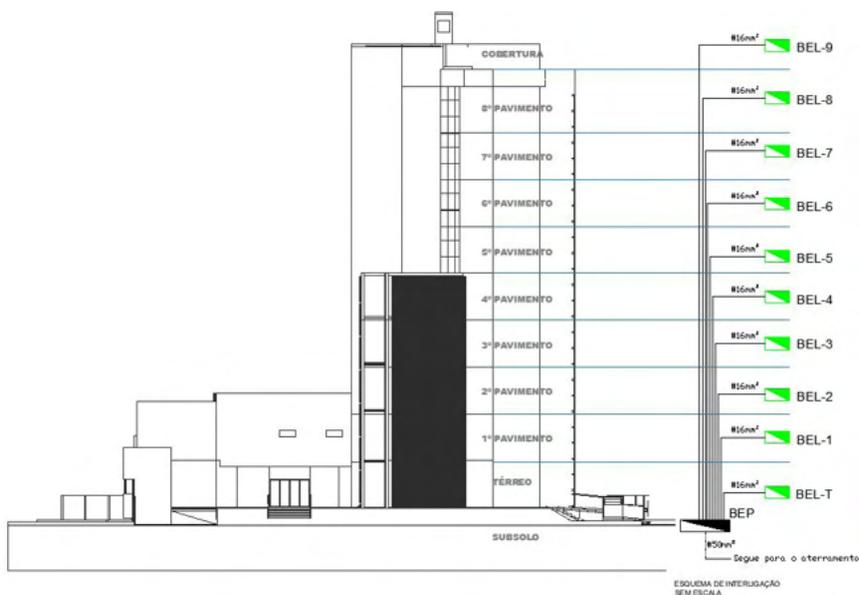


Figura 5. Representação da disposição de quadros de equipotencialização local e principal nos pavimentos da edificação.

Fonte: Própria Autora.

Após a análise de todos os sistemas que compõem o SPDA, tanto no projeto analisado quanto no projeto elaborado para comparação, observou-se que ambos têm a mesma eficiência quanto a proteção contra descargas atmosféricas, porém possuem muitas diferenças no que diz respeito a distribuição e quantidade de elementos do SPDA.

Das implicações, pode-se pressupor que as maiores distinções entre um projeto e outro é de valor econômico. Com essas considerações é possível concluir que o custo benefício não se aplica em casos em que a utilização de um projeto para outro com valor mais elevado e que implicam na mesma eficiência não é vantajoso para uma empresa que deseja cortar custos.

## 7 | CONCLUSÃO

Sabendo que a incidência de raios tem aumentado a cada ano no Brasil, é de vital importância que haja a melhoria dos meios de proteção contra descargas atmosféricas, seja por perda de vida humana ou por perda de patrimônio.

Conforme análise realizada no Edifício Sede do Tribunal de Contas do Estado de Rondônia, pode-se afirmar que a edificação está sendo protegida contra descargas atmosféricas, considerando que o sistema ainda está em fase de instalação, com algumas pequenas diferenças entre o projeto analisado e o projeto elaborado para comparação.

No que diz respeito ao gerenciamento de risco, observou-se que as medidas adotadas para proteger as zonas interna e externa ao Tribunal foram similares entre ambos os projetos, embora com alguns detalhes, não alterou no método utilizado e nas proteções adotadas para diminuição dos riscos.

Para todos os efeitos, a experiência é válida, e o aprendizado obtido através da prática e da vivência ao se acompanhar o avanço da instalação de um projeto em uma obra foi legítimo e vantajoso para a vida profissional, proporcionando uma visão abrangente para a área de Engenharia Elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo é o resultado obtido a partir da análise do projeto do SPDA que está sendo executado no Tribunal de Contas do Estado de Rondônia, do qual foi possível realizar o acompanhamento presencial e analisar os métodos de instalação implantados na edificação, desta forma os autores expressam seus agradecimentos à gestão que tornou isso possível, bem como todos os envolvidos que disponibilizaram seu tempo para responder os questionamentos que surgiram no decorrer do desenvolvimento desde projeto.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão.** Rio de Janeiro, 2008. 217 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 1: Princípios gerais.** Rio de Janeiro, 2015. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 2: Gerenciamento de risco.** Rio de Janeiro, 2015. 116 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida.** Rio de Janeiro, 2015. 61 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.** Rio de Janeiro, 2015. 99 p.

AZEVEDO, T. et al. Ilhas de calor e aedes aegypti: um estudo preliminar para a cidade de Santa Bárbara d'oeste, SP-BRA, utilizando sensoriamento remoto. In.: [S.l.: s.n.], 2012.

CAVALIN, G.; CERVELIN, S. **Instalações Elétricas Prediais: Conforme Norma 5410:2004.** 21. ed. São Paulo: Editora Erica Ltda, 2011. 422 p. ISBN 978-85-7614-541-8.

COTRIM, A. A. **Instalações elétricas.** Revisão e adaptação técnica: José Aquiles Baesso, Gromoni e Hilton Moreno. 5. ed. São Paulo: PEARSON Prentice Hall, 2009. 498 p. ISBN 978-85-7605-208-1.

ECO, Repórter. **Levantamento mostra relação entre poluição e aumento no número de raios - INPE.** Repórter ECO - TV Cultura (3:02 min), 2021. Disponível em: <[http://www.inpe.br/webelat/elatMidia/arquivos/20210526093318Levantamento\\_mostra\\_relacao\\_entre\\_emissao\\_de\\_gases\\_do\\_efeito\\_estufa\\_e\\_aumento\\_no\\_numero\\_de\\_raios.mp4](http://www.inpe.br/webelat/elatMidia/arquivos/20210526093318Levantamento_mostra_relacao_entre_emissao_de_gases_do_efeito_estufa_e_aumento_no_numero_de_raios.mp4)>. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

GARCIA, R. **Poluição e urbanização estimulam raios.** Folha de São Paulo, volume, n. C5, p. 1, 2013.

HALLIDAY DAVID E RESNICK, J. W. **Fundamentos de Física 3. Eletromagnetismo.** [S.l.]: LTC, 2009. v. 3.

INPE. ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. 2021. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

JR, Osmar Pinto. **A arte da guerra contra os raios.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005. ISBN 978-85-7975-023-6.

MAMEDE, J. F. **Instalações elétricas industriais.** 9 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2017. ISBN 978-85-216-3372-3.

MAGARÃO, R. V. Q.; GUIMARÃES, H. P.; LOPES, R. D. Lesões por choque elétrico e por raios. Rev Bras Clin Med. São Paulo, v. 9, n. 4, p. 288{93, 2011.

PEREIRA, P.; MORAIS, L. **Clima urbano e evolução da temperatura estival em Lisboa no século XX.** Tendência, número de noites quentes e amplitude térmica diária. Finisterra, v. 42, n. 83, 2007.

# CAPÍTULO 12

## O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PALMAS - TO: ANÁLISE EM FUNÇÃO DO PONTO CARDEAL E VARIAÇÃO ANGULAR DAS PLACAS

Data de aceite: 10/01/2022

**Aline Silva Magalhães**

Discente do Curso de Engenharia Eletrica do Centro Universitário Católica do Tocantins

**Jabson da Cunha Silva**

Professor de Matemática - SECRETARIA MUNICIPAL DE EDUCAÇÃO, Professor Mestre do Centro Universitário Católica do Tocantins, Tutor à distância - Curso de Física da UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL - UFT

**RESUMO:** De forma objetiva, a temática destacasse pela busca em definir a direção ideal para obter eficiência na instalação de sistemas fotovoltaicos, definindo o posicionamento adequado baseando-se nos pontos cardeais e nas variações angulares. De maneira mais especifica, há uma abordagem sobre o direcionamento adequado e a inclinação para uma máxima geração visando a minimização de custos e por outro lado o ganho em eficiência. Será demonstrado o comportamento de sistemas já instalados no municipio com direcionamento diferente entre eles, em diferentes localidades. Busca-se formalizar e concretizar esses resultados por meio da análise de sistemas fotovoltaicos instalados na região do municipio de Palmas-TO.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia solar; eficiência energética; direcionamento e angulação.

PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN PALMAS - TO: ANALYSIS AS A FUNCTION OF CARDINAL POINT AND ANGULAR VARIATION OF THE PLATES

**ABSTRACT:** Objectively, the theme stands out for the search to define the ideal direction to obtain efficiency in the installation of photovoltaic systems, defining the appropriate positioning based on the cardinal points and the angular variations. In a more specific way, there is an approach on the appropriate direction and inclination for maximum generation aiming at minimizing costs and, on the other hand, gaining efficiency. It will be demonstrated the behavior of systems already installed in the municipality with different direction between them, in different locations. It is sought to formalize and concretize these results through the analysis of photovoltaic systems installed in the region of the municipality of Palmas-TO.

**KEYWORDS:** Solar energy; energy efficiency; targeting and angulation.

### 1 | INTRODUÇÃO

A energia solar vem tomando grandes dimensões em todo o mundo, de maneira alternativa e limpa, é cada vez mais frequente a busca por sua utilização com fins de redução de gastos com energia convencional e seus aumentos constantes, por meio dos sistemas fotovoltaicos. Contudo, dentro dessa esfera que hoje move um mercado gigantesco de

investidores e consumidores, a energia derivada dos raios solares necessita de um estudo antecipado na localidade de atuação, para no mínimo atingir um bom desempenho em busca de maior eficiência em geração de energia.

Apesar de parecer óbvio, a energia produzida por células fotovoltaicas expostas à radiação solar, somente surtirá o efeito esperado se antes mesmo de sua instalação serem observados parâmetros. O Brasil tem um grande potencial de energia solar ainda pouco explorado, com valores de irradiação total variando de 1550 kWh/m<sup>2</sup> a 2.400 kWh/m<sup>2</sup> (matérias da ABSOLAR) ao longo do território nacional.

Hoje, o sol é peça fundamental e fonte de combustível para este processo de produção energética, somado às tecnologias desenvolvidas para absorção, as quais consistem em transformar calor em energia elétrica. Devido ao constante movimento de rotação e translação, em diferentes pontos do nosso planeta, haverá uma maior quantidade de incidência solar do que em outras regiões.

Ademais, a influência dos pontos cardeais em relação à posição onde o sistema solar estará, bem como a angulação a qual se encontra após sua instalação, é que determinará o desempenho adequado do sistema e a busca em de maior eficiência. Os baixos rendimentos das tecnologias para a conversão em calor ou eletricidade e os elevados investimentos iniciais constituem, no entanto, obstáculos importantes para seu aproveitamento aqui no país.

Não basta somente que seja exposto ao sol, apesar de que somente com essa ação, já é possível conseguir que seja produzido a energia elétrica. É com base no exposto que haverá o estudo aprofundado na influência causada pelo direcionamento e a angulação com base nos pontos cardeais, nas aplicações de sistemas fotovoltaicos. Tendo também a busca por parâmetros que levarão a uma eficiência elevada e ótimo desempenho em sua produção energética.

O presente trabalho se justifica pelo crescimento do mercado de energia fotovoltaica no Brasil, além da grande procura por fontes de energias renováveis e que causam um menor impacto ao meio ambiente. A produção de energia vinda da radiação solar chamou a atenção não apenas de consumidores, mas também de investidores neste segmento.

Desta forma, este mercado ganhou uma grande importância para o país, tornando-se importante pesquisar novas maneiras de melhorar a produtividade e a eficiência com um bom desempenho. A pesquisa irá caracterizar as principais variações da trajetória do sol, além de direcionar com base nos pontos cardeais e variações angulares dos sistemas fotovoltaicos e avaliando o desempenho dos sistemas fotovoltaicos com diferentes dimensões e direcionamentos.

Sendo a qualidade, eficiência e ótimo desempenho um fator determinante para o crescimento ainda mais desse mercado, contribuindo ao estabelecer bases para futuros estudos e novas aplicações. Assim aumentando a posição do nosso país no mercado internacional. As fontes de energias renováveis cada vez mais crescem, e esse crescimento

está relacionado com a busca de uma energia alternativa e limpa, juntamente com o impulsionamento do pensamento mais ecológico e preservador. É notório que grandes empresas investem cada vez mais e apostam nesse segmento.

Uma das principais motivações para investimentos nesse setor, é a busca por reduções de poluentes e a baixa nos custos. Na maioria dos casos, a energia renovável se torna alternativa viável, uma vez que a matéria prima para produção de energia, decorrem da força dos ventos, da radiação solar, movimento das ondas e pela força das marés, por exemplo.

Hoje em regiões de grande exposição à luz solar, a energia desenvolvida através de sistemas fotovoltaicos ganha diariamente novos membros, de uma forma que o crescimento anual e a movimentação do produto tornam-se chamativas para esse segmento. Seguindo o conceito, aparentemente parece ser tarefa fácil obter energia uma vez que o sol aparentemente predomina todas as regiões, mas a depender do seu direcionamento o sistema solar pode ter diferentes comportamentos.

Devido a variações na rotação da terra em seu eixo e através do sol, chamados de rotação e translação, respectivamente, a trajetória durante o ano do sol é bastante distinta. Alinhado com isso, a inclinação da terra faz com que o Sol passe mais próximo da linha do equador do que de regiões mais próximas aos polos.

Frente a esse contexto, levanta-se um questionamento: Como obter desempenho e eficiência positiva nos sistemas fotovoltaicos em Palmas, utilizando pontos cardeais e as variações angulares das placas. Busca-se compreender a influência dos pontos cardeais e variações angulares dos sistemas fotovoltaicos de modo a trazer eficiência e melhor desempenho.

Além disso, conhecer a radiação que incide em diferentes pontos cardeais e variações angulares no município de Palmas, avaliando o desempenho dos sistemas fotovoltaicos com diferentes dimensões e direcionamentos. E por fim descrever a influência de direção e angulação para obter eficiência em sistemas fotovoltaicos.

É de suma importância a pesquisa científica para qualificar e trazer um melhor desenvolvimento ao acadêmico, sendo que através desta, é obtido amplo conhecimento no campo de atuação. O aprendizado ganha mais riqueza além do incremento de pontos não oportunos em aula, além de agregar temas outrora conhecidos, usando a metodologia como parte integrante e fonte de saber, essencial para a elaboração de forma alinhada de obtenção de atingir os objetivos pretendidos.

Por meio da pesquisa exploratória a finalidade de analisar o desempenho e eficiência de sistemas fotovoltaicos em Palmas, utilizando de meios técnicos e práticos e com um profundo estudo das funções dos pontos cardeais e a variação angular do sistema de absorção fotovoltaica.

O estudo terá caráter essencialmente quali-quantitativa com ênfase na observação e estudo documental, e a pesquisa de campo, onde será feita a busca de informações

referentes aos pontos cardeais, variações angulares, e a diferentes aplicações no campo energético. Portanto, a pesquisa destina-se no aprendizado de modo exploratório nas inovações tecnológicas que regem as novas aplicações energéticas, de forma a obter uma compreensão da magnitude do benefício que pode ser conquistado com o direcionamento adequado.

A matriz de amarração, apresentada a seguir, possui objetivo essencial na demonstração e argumentação da presente pesquisa, constituindo em sua esquematização a presença da problemática, objetivos, vínculos e referenciais ao qual possibilitam o leitor uma completa imersão na análise e compreensão da matéria de estudo.

## 2 | INFLUENCIAS DOS PONTOS CARDEAIS EM SISTEMAS SOLARES

O pensamento ao se falar em energia solar, volta-se à possibilidade de obtenção de fonte matéria gratuita e renovável. Defende que “a energia solar apresenta grande versatilidade e pode ser aproveitada de muitas formas. Entre as formas mais comuns de aproveitamento, podemos citar a geração de energia elétrica” (BARROS, 2015, p.114).

Nessa vertente, é por meio da propagação dos raios solares até um determinado dispositivo que capta o calor e trabalha como inversor dessa fonte de energia em um combustível, propriamente elétrico. O passo seguinte é a utilização em aparelhos secundários, iluminação na ausência de luz, entre outras aplicações.

Para obtenção de eficiência de energia solar, é necessário primeiramente observar diversos fatores que irão contribuir para essa finalidade, são exemplos a direção, angulação, incidência solar entre outros fatores. Define que “a energia solar como fonte primária de energia apresenta disponibilidade variável ao longo do dia, do ano e do lugar considerado” (VIAN, 2021, p.75).

Desta maneira, o levantamento da área e as possibilidades de instalações, é o primeiro passo para a futura execução do projeto outrora elaborado. De forma sucinta, a irradiação solar ocorre de diferentes formas, dependendo da localização onde se encontra o sistema solar.

O meio mais utilizado para direcionar é em relação a trajetória que o sol passa pela terra, devido o constante movimento de translação, em diferentes épocas do ano teremos o sol mais próximo do hemisfério sul ou mais longe. Dessa forma, há que se analisar além do que uma breve tarde, com projeções anuais para que contribuir na eficiência.

Dentre as variáveis possíveis de aplicação, em primeiro modo, tem se a posição latitude, defende:

Por outro lado, na sua grande maioria, os edifícios de escritório são verticais, com muitas unidades consumidoras independentes, ou seja, pouca área de cobertura para uma grande área de fachada. Sendo assim, as coberturas, local ideal para instalação de SFV em baixas latitudes, não seriam capazes de abrigar sistemas com grandes potências nominais (BENDER, 2020, p.4).

Devido ao seu formato orbicular, à medida que a localização se distancia da linha imaginária central do planeta terra, conhecida como linha do equador, surge a necessidade de aplicabilidade de uma determinada angulação. A importância dessa compensação de vértice, é que fará com que o sistema solar trabalhe de forma eficiente.

Sistemas solares com o posicionamento ideal, obterão o desempenho maior e melhor em relação aos demais, define que “a orientação da superfície coletora deve estar, tanto quanto possível, perpendicular em relação aos raios solares para se obter incidência máxima” (SOUZA, 2020, p.55).

Objetiva-se o correto posicionamento, não apenas de forma a atender uma produção energética, mas de modo que o resultado obtido seja o melhor possível para um bom aproveitamento da irradiação solar. De fato, quanto maior seja a área de produção, maior é o ganho de captação.

Em diferentes aplicações e cenários, a instalação de um equipamento fotovoltaico dependerá em uma primeira hipótese do ambiente que receberá essa instalação. Telhados de materiais diversos, aplicações em solo, módulos operando e superfícies aquáticas, são algumas das possíveis maneiras de aplicação.

O que torna a tarefa difícil em cada hipótese, é a necessidade de ampliação devido às diretrizes do local. Em outras palavras, a eficiência e o desempenho caem quando para alcançar a mesma produção energética a potência e a quantidade de painel fotovoltaico têm que se elevados.

Outra característica importante é a Angulação que ficará o sistema de captação, defende que “Ângulo da altura solar: é o ângulo vertical entre a direção do sol e o plano horizontal” (VIAN, 2021, p. 84). Seguindo essa definição, será obtido o fatorial de inclinação necessária e ideal.

Em outras palavras, devido ao fator geográfico, quanto maior a aproximação dos polos terrestres, mais faz com que a amplitude de ângulo aumenta. Dessa maneira, conseqüentemente necessitará de um meio de correção dessa diferença, a fim de obter a irradiação plena.

Quanto ao quesito eficiência, exemplifica:

O controle apurado do uso de energia reativa tem como objetivo estimular o consumidor a reduzir as perdas e melhorar o desempenho de suas instalações, proporcionando ao setor elétrico nacional a melhoria das condições operacionais e a liberação do sistema para atendimento a novas cargas com investimentos menores (BARROS, 2015, p.51).

A melhor maneira de evitar essas perdas de energia do sistema solar a ser instalado, de forma concreta é corrigir possíveis erros na execução. Dentre variadas ocorrências, as principais estão na posição incorreta do sistema fotovoltaico, a inviabilidade de alteração do telhado, sombreamento proporcionado por edificações e árvores.

Apesar de parecer que há uma abundância de luz solar durante o longo do dia,

pequenos fatores podem fazer com que o desempenho seja diferente do pretendido. Por funcionarem em conjunto, os painéis solares são ligados em série, o que faz que a energia percorra módulo por módulo até chegar no inversor, onde a energia será convertida em elétrica.

Ocorre que devido a essa mecânica, se por defeito ocasionado por má instalação, aplicação ou de fábrica, ocorrerá a incorreta funcionalidade desse produto. O mesmo vale para sombreamento, uma vez esse sistema não exposto a irradiação, ou antes que esta chegue, encontra pelo caminho um obstáculo e como consequência há o comprometimento integral do sistema.

Isso tudo pelo fato de que para evitar possíveis surtos energéticos, os módulos ativos reduziram a sua potência ao módulo de menor potência, para que ambos trabalhem em igualdade.

Para uma boa geração, implica:

A área ocupada por uma instalação fotovoltaica é, via de regra, maior que aquela ocupada pelos painéis que a compõem, pois quando a montagem dos painéis é coplanar deve-se adicionar áreas para compensar a existência de cones de sombra produzidos por obstáculos nas cercanias ou no próprio campo, por exemplo: chaminés e antenas de televisão. (VIAN, 2021, p 51).

Definido os pilares da busca pela eficiência com grande desempenho, tanto a inclinação quanto o direcionamento são peças importantes para o melhor aproveitamento. Somado a isso, tem também a inclinação de desempenhará função essencial para que os raios solares percorram e atinjam a superfície do módulo solar com maior intensidade.

De fato, quanto a importância da observância dessas prerrogativas, conclui que:

Entre a projeção da normal à superfície do painel solar e a direção norte-sul. Para o hemisfério sul o azimute é o norte e, portanto, o deslocamento angular será a partir deste ponto cardinal, sendo positivo em sentido horário (leste) e negativo no sentido anti-horário (oeste) (SOUZA, 2020, p 22).

Para cada região do globo temos as coordenadas definidas para que se consiga chegar com precisão em determinado local, ou ao menos definir um ponto fixo. São utilizadas as direções dos pontos Cardinais, colaterais e subcolaterais.

O Clima e o território da cidade de Palmas coloca o município como destaque em irradiação solar, oferecendo um ótimo potencial para a utilização no seguimento de sistemas fotovoltaicos. Conforme, dados dispostos no site da CRESESB – Centro de Referências Para Energia Solar e Eólica Sergio de S. Brito, é possível observar a irradiação solar horizontal do município (figura 1) sendo ela igual a 5,22 KWh/m<sup>2</sup>/dia, um valor bem maior, comparados com outros países.

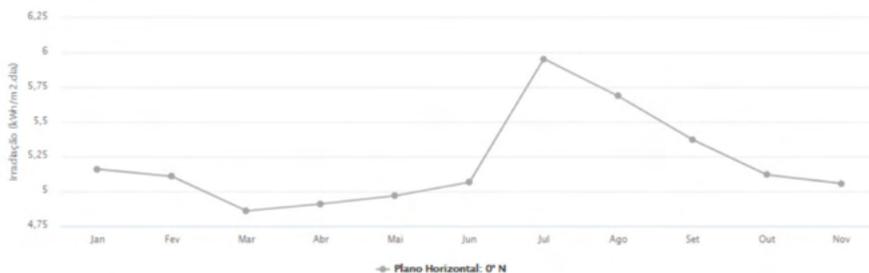


Figura 1 – Irradiação solar no plano inclinado

Fonte: CRESESB (2021)

### 3 | O COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS COM DIFERENTES DIREÇÕES

Com base no território brasileiro e de seus estados, o país está predominantemente na porção Sul com a Oeste do planeta terra. Dessa maneira, todo sistema no Brasil a ser aplicado estará dentro dessas coordenadas, variando apenas de região para região, sendo o primeiro passo para um direcionamento ideal a inclinação voltada ao hemisfério norte.

Da mesma maneira informa:

É recomendado, segundo metodologias internacionais, que o coletor seja instalado com uma inclinação equivalente à latitude da região onde será instalado o sistema solar, acrescida de 10°. Tomando a cidade São Paulo como exemplo, localizada à latitude aproximada de 23°, recomenda-se a instalação dos coletores com 33° de inclinação (BARROS, 2015, p.72).

A inclinação terá como base para sua definição, a altura que se encontra o local em graus partindo da linha do equador sentido o polo Sul. É importante lembrar que apesar da existência de demais pontos cadeias e seus colaterais, para sistemas solares com a direção norte, é que utilizaremos os graus da localidade.

A grande questão é que as demais direções os graus de inclinação devem ser reversos, para minimizar as possíveis perdas que podem vir a acontecer, devido exclusivamente a esse fato. Uma vez que pelo simples motivo de sua direção não estava diretamente ao norte, a irradiação ao longo do dia fará com que em determinado momento haja mais incidência e em outro não.

Vian, conclui sobre o assunto para que o sistema alcance o seu objetivo pretendido:

Nas instalações em terreno plano ou sobre um telhado plano é prática corrente distribuir, geometricamente, o campo em diversas filas que são oportunamente sobre-elevadas na direção do sol de modo a garantir a máxima irradiação incidente sobre os painéis.

Em aplicações de sistemas fotovoltaicos que serão expostos nos telhados, surge a dificuldade de multiplicidade de direções, com pequenas áreas uniformes que fazem com que a eficiência seja cada vez mais distante. Devido as placas solares conectem-se uma

a uma para forma um arranjo, é essencial que todas estevam na mesma direção e sem qualquer interferência.

A seguir (Figura 2) temos o índice de perda anual em porcentagem de acordo com o grau de inclinação desse sistema e a sua direção.

Orientações inclinações	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5°	0,20	0,28	0,50	0,84	1,25	1,68	2,05	2,31	2,41	2,31	2,05	1,68	1,25	0,84	0,50	0,28
10°	0,00	0,14	0,55	1,18	1,98	2,84	3,63	4,19	4,39	4,19	3,63	2,84	1,98	1,18	0,55	0,14
15°	0,41	0,60	1,14	2,02	1,98	4,47	5,70	6,60	6,94	6,60	5,70	4,47	3,17	2,02	1,14	0,60
20°	1,42	1,64	2,28	3,33	4,80	6,54	8,25	9,54	10,04	9,54	8,25	6,54	4,80	3,33	2,28	1,64
25°	3,02	3,25	3,93	5,11	6,84	9,01	11,24	12,97	13,65	12,97	11,24	9,01	6,84	5,11	3,93	3,25
30°	5,21	5,43	6,09	7,32	9,27	11,85	14,62	16,85	17,75	16,85	14,62	11,85	9,27	7,32	6,09	5,43

Figura 2 – Índice de perda de eficiência

Fonte: JÚNIOR e SANTANA (2017).

Assim, o sistema fotovoltaico que for direcionado para a direção norte e com a sua inclinação no plano horizontal, ou seja, com zero graus de inclinação terá uma ótima eficiência, mas não será a mais eficaz. Nota-se que quando a inclinação é um fator também primordial, uma vez que estando essa em dez graus, se alcançara sua máxima capacidade.

Contudo, mantendo-se dez graus de inclinação, mas mudando o sentido do sistema, as perdas na geração começam a aparecer, isso por que a incidência solar já não será a mesma. Ocorre que quanto maior seja o conjunto de captação, por efeitos de cargas e correntes elétricas, a quantidade de arranjos, que seriam o conjunto de painéis ligados entre si, aumenta. Então, na mesma estrutura solar podem haver placas direcionadas para sentidos diferentes.

Não é o ideal e de longe a melhor solução para obter-se eficiência, mas devido as circunstâncias se faz necessária a utilização de mais de uma direção para tornar viável a aplicação do sistema. Além disso, por vezes temos a necessidade de construção de uma estrutura totalmente desproporcional ao telhado para aplicação do sistema.

Veremos o comportamento de cada sistema solar e como a localidade, direção e a angulação afetam em uma geração elétrica eficiente. Para isso, serão utilizados para coleta de dados, sistemas fotovoltaicos já instalados em Palmas, em diferentes pontos em torno da cidade.

Ao todo foram analisados 3 sistemas, distribuídos entre as regiões sul, leste e oeste do município. Nesta análise será apontando as características de cada um deles, o seu potencial energético, capacidade de geração e o seu comportamento ao longo do dia, bem como a influência causada pelo seu direcionamento.

Local de instalação	Quadra 507 Sul
Direcionamento	Sul
Ângulo de inclinação	25°
potência instalada	6,7 KWP
Quantidade de painéis	20
potência das placas	335W

Quadro 1 - Sistema fotovoltaico 1

Fonte: Produção do autor

Devido as dificuldades de instalação e não existência de um telhado que fosse direcionado para o norte, o sistema acima, encontra-se direcionado para o sul. Dessa forma a sua produção de energia sofre uma perda 13,65 % da sua capacidade total de geração, como pode ser observado na tabela da (Figura 2) onde a orientação é para o Sul(S) e inclinações é de 25°, isso por que o percurso dos raios solares em alguns meses do ano segue uma trajetória que incide menos.

Podemos explicar melhor através da (figura 3) como ocorre o percurso do sol ao longo do ano e de que forma isso afeta os sistemas fotovoltaicos ao longo do ano:

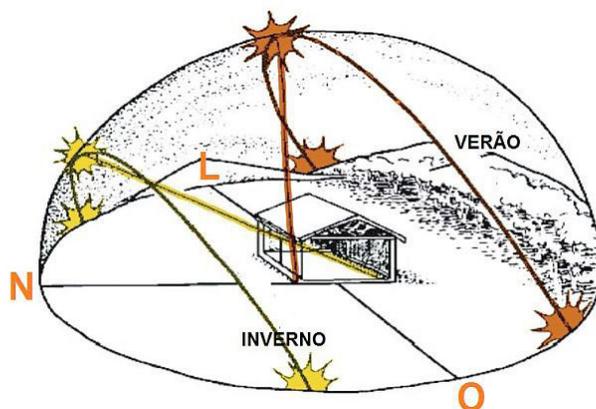


Figura 3 – Trajetória do sol ano longo do ano.

Fonte: VIANA (p. 40)

Pode-se observar que para sistemas com o direcionamento ao norte e a inclinação de 10 graus, a sua eficiência é superior aos demais, devido justamente a essa trajetória do sol que faz com que em todo o ano haja incidência de raios ao sistema. Exemplo disso é o (quadro 2) que apresenta informações de um sistema direcionado de forma ideal.

Local de instalação	SETOR MORADA DO SOL
Direcionamento	NORTE
Ângulo de inclinação	10°
potência instalada	7,2 KWP
Quantidade de painéis	18
potência das placas	400W

Quadro 2 - Sistema fotovoltaico 2

Fonte: Produção do autor

Podemos ver através da (Tabela 1) um comparativo da geração do sistema 1 e do sistema 2, disponibilizados através do monitoramento integrado ao inversor. Nota-se que os sistemas em grande parte do ano possuem uma geração diferenciada, não somente pelo fato de ser menor, mas por que a direção influencia diretamente para obter-se uma melhor eficiência.

	Sistema 1	Sistema 2
jan/21	786.5	987.0
fev/21	671.8	687.2
mar/21	825.3	918.8
abr/21	656.2	843.2
mai/21	673.1	983.2
jun/21	526.0	937.4
jul/21	530.3	1038.9
ago/21	602.4	1093.0
set/21	831.9	912.2

Tabela 1 - Geração nos últimos 9 meses em KWm

Fonte: Produção do autor.

No terceiro caso, já temos um sistema voltado as direções leste e oeste, fazendo com que a geração seja afetada ao longo dia. Temos isso pois no período da manhã, a parte do equipamento voltada ao leste tem uma maior incidência da irradiação solar, acontecendo o mesmo no período da tarde com a parte voltada ao oeste.

Local de instalação	Aureny III
Direcionamento	Leste / Oeste
Ângulo de inclinação	20°
potência instalada	5,4 KWP
Quantidade de painéis	12
potência das placas	450W

Quadro 3 - Sistema fotovoltaico 3

Fonte: Produção do autor.

Quanto a sua geração, o sistema mostra-se relativamente eficiente, com uma perda apenas de 4.8 % ao longo do ano, como pode ser observado na tabela da (Figura 2) onde a orientação é para o Leste(E) e a inclinação é de 20°. Dentro dessa prerrogativa, a modificação na estrutura do telhado por vezes se torna menos viável, se considerar o custo benefício ao longo do tempo que esse sistema proporcionará.

#### 4 | A INFLUENCIA DO DIRECIONAMENTO PARA OBTER EFICIÊNCIA

Como vimos, é importante definir a direção do painel solar, pois há uma grande importância na captação de energia. Ao utilizar a direção do painel solar correta levará com que o projeto de energia solar custe por vezes menos recursos e faça com que ganhemos tempo para finalizar a obra, além de aumentar a eficiência do painel solar.

Então, na ocorrência de um telhado com face voltada ao norte e que também não haja sombras nesta parte do telhado, a instalação do painel solar fotovoltaico deve-se proceder nesta face. Desta forma o gerador de energia para residência e comercial produzirá mais energia.

Quando temos os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o ângulo de inclinação igual ao da Latitude é normalmente o melhor ângulo para se instalar um painel fotovoltaico. Para aqueles que não têm uma face do telhado voltada ao Norte, não há uma perda grande na geração da energia solar fotovoltaica nos sistemas que forem instalados nas faces voltadas ao Leste e Oeste, de modo que torne inviável a instalação.

Normalmente as perdas direcionais para telhados com face Leste ou Oeste, haverá a perda entre 1% e 9,27%, como pode ser observado na tabela da (Figura 2) onde as orientações é para o Leste(E) e Oeste(O) e as inclinações varia de 0° à 30°. Para face Sul, pode até parecer que as perdas são muito grandes, mas como vivemos na região norte do país, mesmo com o direcionamento ao sul as perdas não ultrapassam os 20% se considerarmos a inclinação desses painéis até 30°.

Quanto a angulação, é importante definir que em um plano horizontal a eficiência não é a melhor, isso por que a trajetória do sol faz com que na época do inverso o sol, os seus raios tenham menor incidência no plano horizontal. Podemos corrigir essa deficiência

nessa época do ano, inclinando os painéis, que normalmente acompanham o telhado.

## 5 | CONCLUSÃO

O setor de energia solar cresce cada vez mais, junto com esse crescimento vem o aumento na geração de emprego, a melhoria do profissionalismo e a competição entre empresas do seguimento. Alinhado a essa ideia, temos a necessidade de um estudo mais aprofundado que busque além da disponibilização de material de qualidade, um serviço exemplar com a assistência adequada, sem necessariamente visar o lucro da empresa.

Faz-se necessário que se crie uma maior abordagem para passar conhecimento das economias ao longo do tempo quando o estudo de direcionamento e angulação é feito de forma correta. Não basta que seja simplesmente realizado a instalação em qualquer dos telhados da residência, mas uma série de fatores devem ser observadas afim de apresentar a melhor assessoria.

A cada dia que passa o mercado fotovoltaico vem se destacando de forma exponencial, e cada vez mais os sistemas vêm sendo utilizados de forma integrada à edificação. A partir disso, surge a necessidade de novos modelos, com diferentes materiais e colorações para serem locados não só nos telhados, mas em fachadas também.

Desta forma o lugar onde vivemos está susceptível à diversos riscos como: aquecimento global acelerado, altos níveis de investimento em fornecimento de energia, alta poluição atmosférica regional e local, rápida exaustão do petróleo e continuidade da desigualdade.

O direcionamento com sentido para o norte do globo, fara com que o sistema tenha incidência de sol o máximo possível, principalmente nas horas de pleno sol, os quais são as essências para uma ótima geração. Além disso, a inclinação é o segundo fator importante nesse dimensionamento, visto que nem se pode inclinar demais, nem utilizar os painéis em um plano horizontal, pois ao invés de melhorar a eficiência, podemos perder geração de energia.

## REFERÊNCIAS

BARROS, B.F.D.; BORELLI, R.; GEDRA, R.L. **Eficiência Energética - Técnicas de Aproveitamento, Gestão de Recursos e Fundamentos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.

BENDER, Lívia Vasques et al. **Estudo da paridade econômica e do desempenho energético de fachadas solares fotovoltaicas no extremo sul do Brasil**. Ambiente Construído [online]. 2020, v. 20, n. 4, p. 489-508. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400484>>. Epub 05 Out 2020. ISSN 1678-8621. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400484>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRAGA, Renata Pereira. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. Orientador: Nascimento, Jorge Luiz do. 2008. 80 p. Trabalho de Conclusão de Graduação (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica, Ribeirão Preto/SP, 2008. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7372/1/monopoli10001103.pdf>. Acesso em: 14 out. 2021.

OTHON, Lucas Procopio. **Modelo Analítico para Avaliação do Desempenho Térmico e Elétrico de Módulos Fotovoltaicos Acoplados a Coletores Solares de Placa Plana Tipo Tubo-aleta e Serpentina**. Orientador: FERREIRA, Andre Guimaraes. 2016. 116 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2016. Disponível em: [https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id\\_trabalho=4986169#](https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=4986169#). Acesso em: 29 out. 2021.

SOUZA, Ronilson di. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. 1. ed. Ribeirão Preto/SP: BlueSol Energia Solar, 2020. 100 p. v. 1. Disponível em: [https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/db05ca1f44f703ba4ad62072ec041839/Os\\_Sistemas\\_de\\_Energia\\_Solar\\_Fotovoltaica\\_by\\_BlueS\\_11005950\\_\(z-lib.org\).pdf](https://pdf.zlibcdn.com/dtoken/db05ca1f44f703ba4ad62072ec041839/Os_Sistemas_de_Energia_Solar_Fotovoltaica_by_BlueS_11005950_(z-lib.org).pdf). Acesso em: 20 out. 2021.

VIAN, Â. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

Mercado de energia solar é promissor no Brasil. **ABSOLAR**. São Paulo, 05 out. 2017. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/mercado-de-energia-solar-e-promissor-no-brasil/>. Acesso em: 16 setembro 2021.

**\_ A Melhor Direção do Pannel Solar Fotovoltaico**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-pannel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em: 25 out. 2021.

## SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 06/12/2021

### Murilo Meneghetti Caramori

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC  
Chapecó, Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/7065127663698484>

### Alexandre Dalla’Rosa

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC  
Chapecó, Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/0596224519125364>

**RESUMO:** Este documento apresenta o estudo e desenvolvimento de um protótipo simulador de carga para máquinas elétricas, utilizando o princípio de um freio eletromagnético microcontrolado. No andamento do trabalho, foi executada a montagem de uma bancada para testes de uma máquina trifásica e assíncrona e um módulo fonte retificador CA/CC para o controle em malha aberta das bobinas de campo. O objetivo é mensurar parâmetros gerais da máquina trifásica, através de ensaios de laboratório, simulando cargas variáveis pela indução de correntes parasitas sobre um disco de material condutor acoplado em seu eixo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Correntes de Foucault. Freio eletromagnético. Conversor CA/CC.

LOAD SIMULATOR USING  
ELECTROMAGNETIC BRAKING  
SYSTEM FOR BEHAVIOR TESTING OF

### ASYNCHRONOUS MACHINES

**ABSTRACT:** This document presents a study and development of a load simulator prototype for electrical machines using the principle of a microcontrolled electromagnetic brake. In the course of the work, were built a bench for testing a three-phase asynchronous motor and an AC/DC rectifier module for non-feedback control of the electromagnet coils. The objective is to measure general parameters of the three-phase machine through laboratory tests, simulating variable loads through the induction of eddy currents in a disk of conductive material coupled to its axis.

**KEYWORDS:** Foucault current. Magnetic brake. DC/AC Converter.

### 1 | INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância das máquinas elétricas para soluções industriais onde é necessário o acionamento de diferentes tipos de cargas. O motor elétrico é um dispositivo rotativo que converte energia elétrica em energia mecânica, sendo este processo denominado de princípio da conversão eletromecânica da energia (KOSOW, 1979, p. 2). Estes dispositivos são amplamente empregados em escala industrial, auxiliando populações em centros urbanos e nas mais diversas aplicações cotidianas. Os motores elétricos são encontrados frequentemente em eletrodomésticos, prensas, elevadores de carga, esteiras rolantes, tornos, fresas ou em qualquer outro mecanismo que precise converter energia elétrica em força ou

em movimento (FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 2014, p. 193).

Em aplicações onde deseja-se simular uma carga posta em um eixo de um motor elétrico, é necessário criar um instrumento que representa as condições reais de operação independente de sua função. É fundamental a execução de ensaios dinâmicos que possibilitem mensurar e determinar as mais importantes características da máquina. Para obtenção desses parâmetros, faz-se necessário um sistema composto por elementos capazes de representar as diversas condições de uma carga, sendo que é neste ponto que reside a problemática central do trabalho aqui proposto. Uma alternativa para promover o controle de força de frenagem seria recorrer a um dispositivo de fricção mecanicamente acoplado ao eixo do motor. Entretanto a fricção depende das superfícies em contato o que implica na necessidade de materiais de elevada resistência ao desgaste. Já a utilização de um freio eletromagnético por correntes induzidas dispensa essa necessidade, onde a potência é dissipada por efeito Joule (PEREIRA, 2006, p. 14-18).

Este projeto consiste em uma atividade desenvolvida através do Laboratório de Máquinas Elétricas (LABMAQ-IFSC) com o estudo do comportamento de máquinas elétricas assíncronas trifásicas, assim como análise de seus parâmetros de funcionamento a partir da realização de ensaios, simulados por uma bancada de freio eletromagnético. Destina-se o estudo do presente projeto a ser utilizado para fins didáticos e de pesquisas futuras no IFSC Campus Chapecó.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

As máquinas assíncronas, também denominadas de motores de indução, são máquinas puramente de corrente alternada (CA). Por serem versáteis e economicamente viáveis, seu emprego industrial é amplo, correspondendo na maior parte das máquinas elétricas existentes na sociedade em geral (KOSOW, 1979, p. 164).

A máquina assíncrona é composta por um rotor, estator e demais elementos de carcaça. As correntes e tensões são transferidas ao rotor através do fluxo magnético. Normalmente não há contato externo com o rotor, que é alimentado pelo efeito Faraday de indução eletromagnética (KOSOW, 1979, p. 43). A equação (1) representa a lei de indução, proposta por Faraday.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:

$\vec{E}$  – Campo Elétrico [V/m];

$\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$  – Taxa de variação do fluxo magnético;

Desde a antiguidade, o homem já detém conhecimento da existência da força magnética. Os primeiros registros conhecidos de observações acerca das propriedades magnéticas dos ímãs datam da Grécia antiga. Grande parte da fundamentação teórica do

eletromagnetismo conhecida até então sustenta-se nas relações apresentadas por James Clerk Maxwell e suas quatro equações que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos e sua mútua afinidade. Os estudos de Ørsted relataram oficialmente, em 1820, a observação da criação de campos magnéticos por influência de correntes elétricas. Ampère desvendou o fenômeno da indução magnética como efeito de correntes elétricas e Faraday decifrou o mecanismo da indução elétrica por meio da variação do fluxo magnético, conectando definitivamente a eletricidade ao magnetismo (SADIKU, 2012).

Até o século passado o fenômeno das correntes parasitas (correntes de Foucault ou *eddy current*) se tornava visto muito mais como um problema a ser minimizado do que um fenômeno a ser desvendado em benefício da ciência e tecnologia. No século XIX, o francês Léon Foucault foi o primeiro a elaborar uma aplicação tecnológica a empregar as correntes parasitas, conhecida então como freio de Foucault (demonstrado na Figura 1) (RIVAL, 1997; ROONEY, 2013).

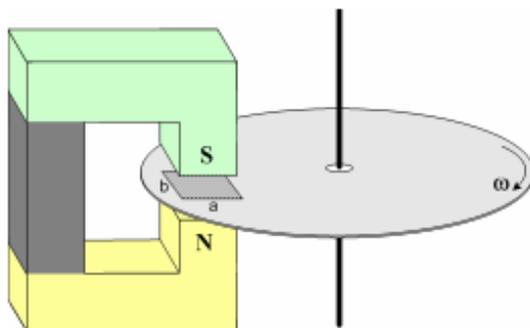


Figura 1 - Freio de Foucault (Disco condutor posicionado entre polos de um ímã)

Fonte: Pinheiro Filho (2014, p. 16)

O surgimento das correntes parasitas é uma consequência direta do efeito da indução eletromagnética descrito por Faraday (YOUNG; FREEDMAN; ZEMANSKI, 2009). Se uma variação de fluxo é capaz de induzir diferenças de potencial e corrente elétrica em um condutor imerso nesse fluxo, se espera que em um material condutor percorrido por esse mesmo fluxo variante no tempo passe a existir uma corrente elétrica que o circunde, circulando paralelamente a sua superfície transversal, formando circuitos fechados tangenciais ao longo do percurso longitudinal do fluxo magnético no interior do material (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 16).

No interior do material também ocorre o surgimento de correntes induzidas ao redor de cada linha de fluxo, mas em seu percurso elas se anulam mutuamente, ao passo que se concatenam ao redor da superfície, conforme a Figura 2, formando uma corrente circulante ao redor do somatório de todas as linhas de fluxo no interior do elemento ferromagnético

(PINHEIRO FILHO, 2014, p. 16).

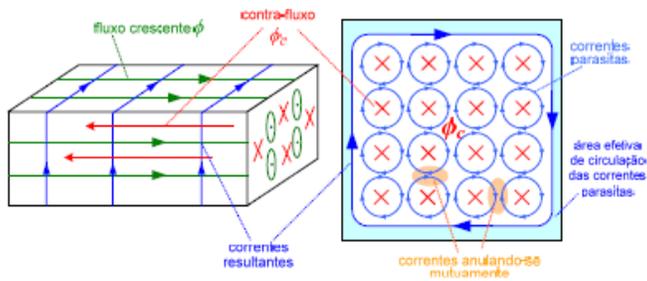


Figura 2 - Fenômeno das correntes parasitas numa seção de material magnético percorrido por um fluxo variante no tempo

Fonte: Pinheiro Filho (2014, p. 17)

O evento direto dessa circulação indesejada de correntes é o desprendimento de energia na forma ativa, por calor em Watts ou Jaule, aquecendo o material magnético e reduzindo a eficiência (PEREIRA, 2006, p.14-18). A área do material condutor (disco) é diretamente proporcional à sua capacidade de dissipação de calor.

No freio eletromagnético a dissipação de energia na forma de calor decorre principalmente da soma das perdas causadas pela circulação das correntes parasitas e perdas por histerese (BARAN, 1970, p. 260-263). O primeiro termo da equação 2 descreve as perdas por correntes parasitas, que são proporcionais ao quadrado da espessura do disco condutor, e inversamente proporcional a resistividade do material. Caso a espessura do disco seja dobrada, as perdas se quadruplicarão (SALZMAN; BURKE; LEA, 2001, p. 586-590). O segundo termo da equação 2 representa a formula empírica para o cálculo das perdas por histerese baseado em estudos de Oliveira (2013, p. 48-53):

$$P_{total} = \left[ \iiint_{vol} \sigma E^2 dvol \right] + [k_h (B_{max})^\alpha] \quad (2)$$

Em 1991, J. H. Wouterse formalizou as expressões que descrevem de forma generalizada o comportamento de um freio eletromagnético empregado em extensões rotativas. O modelo de Wouterse considerou a influência do campo magnético gerado pelas correntes induzidas sobre o campo magnético aplicado diretamente ao disco (WOUTERSE, 1991, p. 153-158).

As equações (3) e (4) são modelos teóricos para o comportamento da frenagem.

$$F(v) = c' \cdot \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B_o^2 \quad (3)$$

$$c' = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot h} \right)^2 \right) \quad (4)$$

Sendo para (2), (3) e (4):

$F$ – Força [N];

$\sigma$ – Condutividade elétrica [ $\Omega m^{-1}$ ];

$E$ – Campo elétrico [V/m];

$v$ – Velocidade [m/s];

$\alpha$ – Expoente de Steinmetz;

$c'$ – Fator de eficiência geométrico;

$P_{TOTAL}$ – Soma das perdas [ $W/m^3$ ];

$k_h$ – Constante de histerese característica do material;

$vol$ – Volume do disco sob a ação do campo magnético [ $m^3$ ];

$B_o$ – Indução magnética [T];

$D$ – Diâmetro do polo magnético [m];

$h$ – Altura da bobina [m];

Para obtenção dos parâmetros do motor, será utilizado o modelo de circuito elétrico equivalente visualizado na Figura 3. Neste modelo,  $R_1$  é a resistência ôhmica do estator da máquina e  $R_2$  é a resistência do rotor. Os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  são as reatâncias do estator e rotor respectivamente,  $b_m$  a susceptância de magnetização e  $g_m$  a condutância que modela as perdas de correntes parasitas e laço de histerese do núcleo da máquina. Além disso  $s$  é o escorregamento que irá variar de acordo com as tensões e frenagens aplicadas na máquina elétrica. Mais detalhes serão tratados na seção 04.

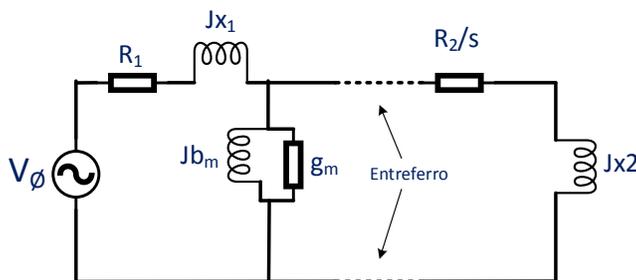


Figura 3 - Modelo CEE

Fonte: o próprio autor

A partir destes estudos referenciais, iniciou-se a etapa de desenvolvimento de um

protótipo de freio eletromagnético, apresentado no seguinte tópico do documento.

### 3 I IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

O objetivo geral do protótipo prático é o desenvolvimento de um sistema capaz de simular uma carga mecânica, por meio de um freio eletromagnético controlado, para obtenção de parâmetros de uma máquina elétrica assíncrona em função da tensão aplicada.

A estrutura do trabalho divide-se entre o projeto de um freio eletromagnético integrando-o com uma máquina assíncrona de baixa potência, o dimensionamento de um conversor CA/CC manipulado por *software*, e seção dos resultados finais, testes de laboratórios e aquisição dos parâmetros, de forma que seja possível entender as ideias apresentadas.

O diagrama da Figura 4 especifica a proposta e objetivos do projeto, dividindo suas respectivas etapas, elementos desenvolvidos e utilizados.

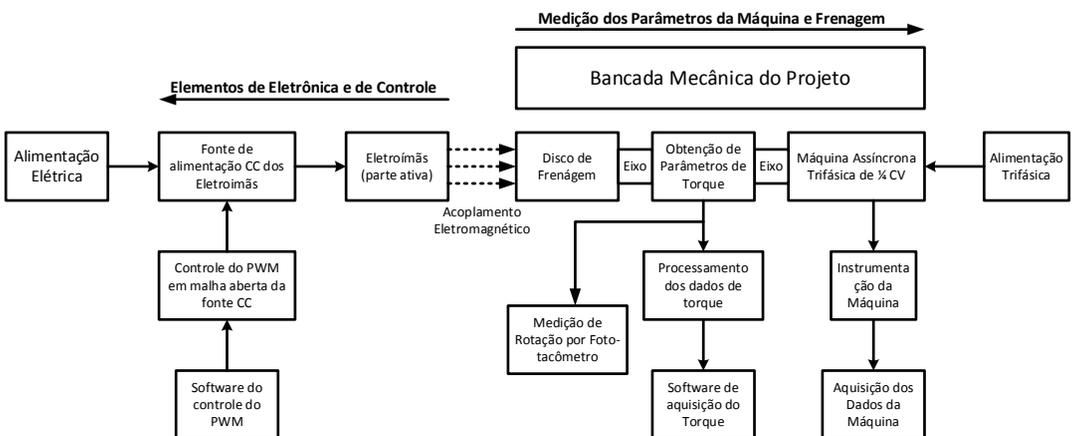


Figura 4 - Diagrama do projeto

Fonte: o próprio autor

### 3.1 Montagem Mecânica

Idealizou-se um modelo de protótipo por meio de software de desenho assistido por computação (demonstrado nas Figuras 5 e 6). O dimensionamento dos demais elementos foram definidos de acordo com os parâmetros do motor elétrico assíncrono trifásico WEG NBR 7094. É possível visualizar os principais parâmetros nominais do motor utilizado na bancada do freio ilustrados na Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Potência Mecânica	0,18kW- ¼cv
Tensão de linha	380 V
Rotação nominal	1710RPM
Número de Polos	4
Corrente de partida $I_p / I_N$	4,5
Corrente nominal de operação	0,66 A
Torque em carga plena	≈ 1 N.m

Tabela 1 - Parâmetros nominais do motor elétrico

Fonte: Placa do motor WEG NBR 7094

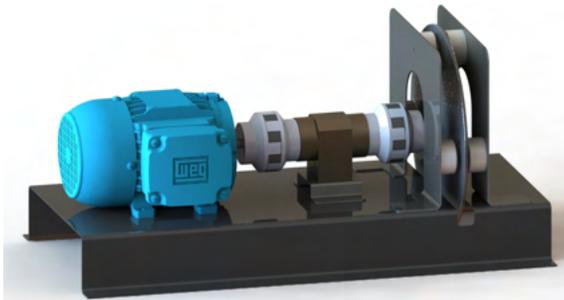


Figura 5 - CAD do projeto (a)

Fonte: o próprio autor

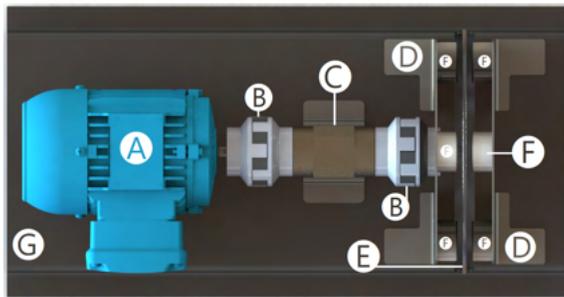


Figura 6 - CAD do projeto (b)

Fonte: o próprio autor

A bancada do freio eletromagnético, demonstrada no desenho da Figura 6 é composta pelos elementos reunidos na Tabela 2:

Legenda	Significado
A	Motor elétrico assíncrono trifásico WEG NBR 7094;
B	Acopladores de eixo;
C	Transdutor de torque rotativo MKDC-20 <i>N.m</i>
D	Suporte estático para fixação dos eletroímãs de 20,5 <i>cm</i> de altura e 22 <i>cm</i> de largura, com furo central passante;
E	Disco de alumínio de 23 <i>cm</i> de diâmetro e 4 <i>mm</i> de espessura;
F	Eletroímã cilíndrico de elevação;
G	Base de alumínio da bancada de 65 <i>cm</i> de comprimento e 24 <i>cm</i> de largura, com 1,5 <i>cm</i> dobrados em suas extremidades laterais.

Tabela 2 – Legenda figura 6

Fonte: o próprio autor

Para efeitos de análise inicial, grande parte dos elementos compostos na bancada foram selecionados de material paramagnético e isotrópico objetivando reduzir efeitos eletromagnéticos indesejáveis (PAGI FERREIRA, 2017, p. 9).

Os materiais condutores de baixa permeabilidade (como é o caso do alumínio) são mais propícios ao emprego em sistemas de frenagem de Foucault, devido a maior facilidade de penetração do fluxo magnético através de sua superfície em baixa frequência, e de maior intensidade das correntes parasitas que podem ser induzidas em seu interior (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 20). Estes fatores estão relacionados tanto por causa da sua baixa resistividade como também devido a sua baixa permeabilidade magnética que permite uma maior penetração do campo, submetido a uma maior relutância, apresentando menor decaimento da distribuição da densidade de corrente ao longo da profundidade do meio (SARKIS, 2000). O disco acoplado no eixo e suportes fixos à base foram elaborados no processo de usinagem eletroerosão a fio.

O fluxo pontual no disco ( $\phi$ ) é aproximado pela expressão senoidal em função do tempo descrito em (5):

$$\phi(t) = \phi_0 \cdot \text{sen} \left( \frac{p \cdot n \cdot t}{60} \right) \quad (5)$$

Onde:

$p$ – Pares de polos de bobinas de freio;

$n$ – Revoluções por minuto [*RPM*];

$t$ – Tempo [*s*];

A disposição estratégica dos eletroímãs (conforme visualiza-se na Figura 7) é

consequência de uma solução que visa a efetivar o desempenho de frenagem, avaliando a relação entre momento de inércia do disco e do motor. Quando polos de ímãs são postos em oposição entre uma superfície metálica condutora, a profundidade do campo magnético variante no tempo tende a ser elevada pela continuidade das linhas de fluxo magnético, que nunca são interrompidas (GRIFFITHS, 2011, p. 182). Os pares de bobinas com suas faces confrontantes e *airgap* <1 mm em relação ao disco, situados na periferia do mesmo, mostrou-se ser a melhor opção para o arranjo físico resultando num maior torque de frenagem alcançado e o menor efeito de borda entre os pares de bobinas.

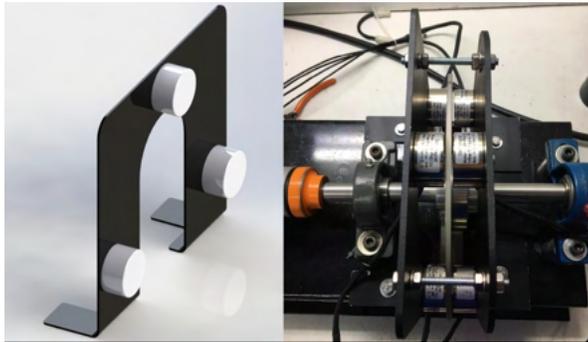


Figura 7 - Suporte estático dos eletroímãs

Fonte: o próprio autor

A Figura 8 demonstra a montagem final do protótipo da bancada do freio eletromagnético.

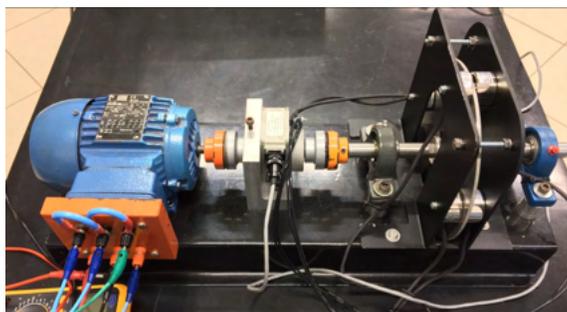


Figura 8 - Protótipo final da bancada do freio eletromagnético

Fonte: o próprio autor

### 3.2 Montagem Eletroeletrônica

A primeira etapa da construção do projeto eletrônico se deu na seleção de modelo

de eletroímã. Como se objetivou realizar ensaios com cargas variáveis e modelos distintos de frenagem na bancada, optou-se pela utilização de eletroímãs comerciais cilíndricos de elevação, amplamente empregados em projetos de robótica e automação.

Na bancada, é possível manipular facilmente a posição dos suportes, permitindo o usuário substituir os eletroímãs atuais por unidades de maior valor magnético, caso haja a necessidade de se executar frenagens com discos e motores de proporções maiores. Segundo *datasheet* do fabricante, a potência do eletroímã é diretamente proporcional à altura da base do cilindro.

Eletroímãs cilíndricos de elevação possuem alta eficácia magnética com baixo consumo de corrente e podem ser alimentados em  $V_{CC}$  (tensão em corrente contínua).

Se objetiva trabalhar com  $V_{CC}$  em aplicações onde visualiza-se o fenômeno das correntes de Foucault para se evitar o efeito pelicular, manifestado exclusivamente em aplicações de corrente alternada. O efeito pelicular é proporcional à intensidade de corrente e aumenta com a raiz quadrada da frequência, com a permeabilidade magnética e com a condutividade elétrica do condutor (PINHEIRO FILHO, 2014, p. 58).

Quando se trabalha com  $V_{CC}$  no enrolamento do eletroímã para efeitos de frenagem no emprego das correntes parasitas, tem-se controle de aceleração suave, com alta eficiência e rápida resposta dinâmica (HEALD, 1988, p. 521-522).

O projeto eletrônico é composto por um circuito (demonstrado no diagrama da Figura 9) fonte retificador de onda completa com dois diodos mais filtragem capacitiva, baseado no circuito integradoregulador de tensão  $U1$  que ajusta a alimentação final dos eletroímãs denominada  $V_E$  (BOYLESTAD, 2000, p. 666).

Utilizou-se as portas digitais da plataforma *Arduino* UNO R3 para um controle em malha aberta da corrente que flui nas bobinas de campo, manipulando o ciclo de trabalho do PWM em alta frequência conforme necessidade do usuário. O optoacoplador  $U2$  foi empregado para proteção do circuito de controle e o mosfet de potência  $Q1$  para o chaveamento do sinal (HART, 2011, p. 111).

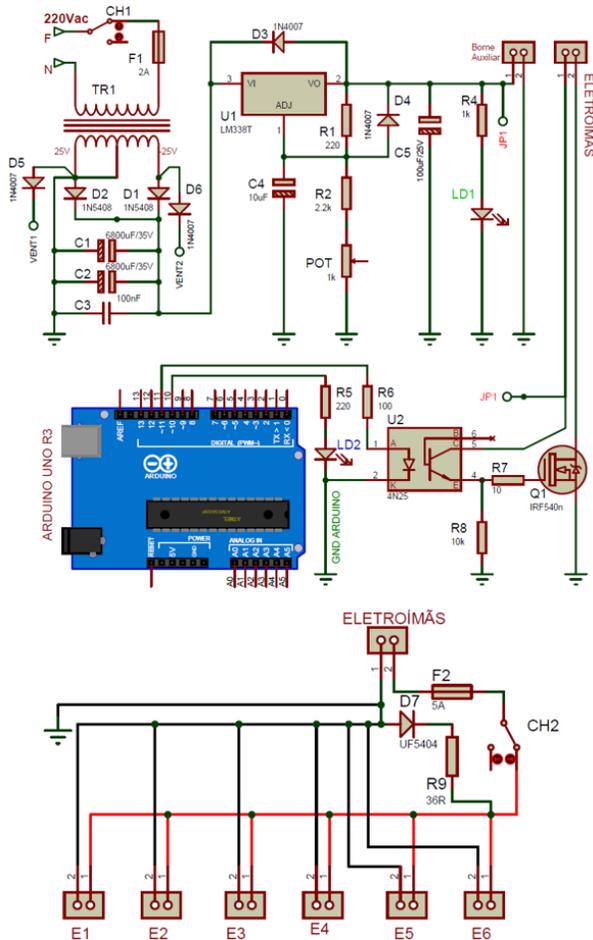


Figura 9 - Diagrama eletrônico das placas 1 e 2

Fonte: o próprio autor

De acordo com informações do fabricante, para longos períodos de utilização dos eletroímãs, sua alimentação deve permanecer em  $12 V_{CC}$  para evitar o sobreaquecimento das espiras. Porém, ensaios realizados na bancada mostraram a efetividade dos eletroímãs com uma faixa de alimentação maior em períodos curtos de frenagem.

A partir dessas conclusões iniciais, dimensionou-se o projeto eletrônico conforme visualizado na Figura 9. A alimentação dos eletroímãs  $V_E$  altera-se conforme a posição de *POT* e ajusta-se entre o *span* de  $12 V_{CC} \leq V_E \leq 20 V_{CC}$ . O estágio de teste 1 (ET1) considera a posição de *POT* em  $V_E$ ;  $12 V_{CC}$ . O estágio de teste 2 (ET2) considera a posição de *POT* em  $V_E$ ;  $20 V_{CC}$ , resultando em aproximadamente o dobro de consumo de corrente nominal em cada eletroímã, aprimorando a ação da frenagem conforme visualizado nas Tabelas 4 e 5 da seção 4 do documento.

Como consequência recorrente de perdas nas limitações do sistema eletrônico, foi

imposta, conseqüentemente, uma queda em  $V_E$  de aproximadamente  $3 V_{CC}$  no estágio de teste 2.

Para evitar retorno de tensão negativa por efeito indutivo é empregada a série  $R9$  com  $D7$  (diodo *flyback* para altas frequências) (HART, 2011, p. 81).

O led  $LD1$  sinaliza na cor verde quando o sistema é ligado. O led  $LD2$  possui a mesma programação de ciclo de trabalho do PWM dos eletroímãs, assim de forma intuitiva, sinaliza na cor azul o efeito de frenagem (a iluminação de  $LD2$  e o ciclo de trabalho do PWM possuem uma relação constante e síncrona).

Utiliza-se dois ventiladores conectados nos bornes do secundário do transformador para resfriamento do módulo.

Os eletroímãs são finalmente conectados em paralelo nos bornes  $E_n$ . A Figura 10 mostra o protótipo final do projeto eletroeletrônico com as PCBs confeccionadas, definido como módulo fonte CA/CC.

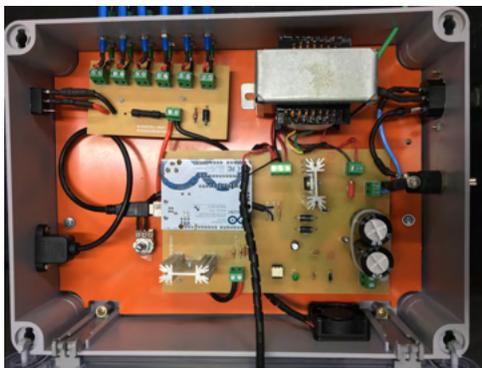


Figura 10 - Projeto eletroeletrônico (a)

Fonte: o próprio autor

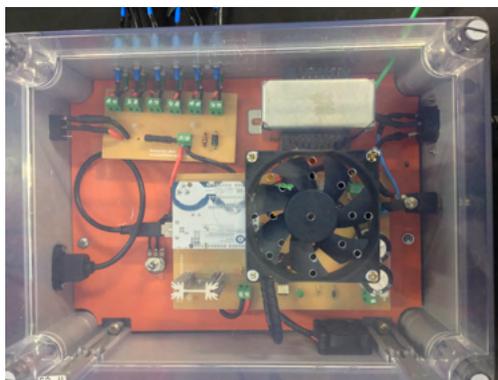


Figura 11 - Projeto eletroeletrônico (b)

Fonte: o próprio autor

### 3.3 Software IHM

Com o objetivo de se aprimorar a experiência de manuseio da bancada do freio eletromagnético, desenvolveu-se uma interface homem-máquina (IHM) digital em formato de *software*, responsável pela manipulação dos comandos que definem diferentes níveis e comportamentos de frenagem.

A tela única foi projetada no intuito de fornecer à bancada do freio eletromagnético uma ferramenta adicional que possibilite, de forma simplificada e intuitiva, o manuseio do parâmetro da razão cíclica do PWM injetado nas bobinas de campo. O módulo proporciona ao operador a manipulação computacional do efeito de frenagem conforme o ensaio de sua necessidade.

Para a programação e elaboração da tela utilizou-se o *software Visual Studio*. O *software* realiza uma comunicação serial com a bancada (STELLMAN; GREENE, 2021, p. 169-175, p. 385-395, p. 589-600).

A Figura 12 apresenta o formato da tela, dividida em duas seções: parâmetros e comandos de operação. Na primeira seção, localizada à esquerda da tela, é possível selecionar a porta conectada via cabo USB entre o computador do operador e o módulo controlador da bancada, botões de “ligar/desligar” (sinalizado pelo *status* verde/vermelho) e também o valor do *baudrate*, que define a velocidade da comunicação.

Na aba “Operação”, localizada à direita da tela, é possível aplicar, manipulando os únicos dois botões, um degrau de frenagem em porcentagem (0% á 100%) e uma rampa crescente de frenagem em função de um valor de tempo pré-definido em segundos, para simular uma carga crescente ao longo de um período.

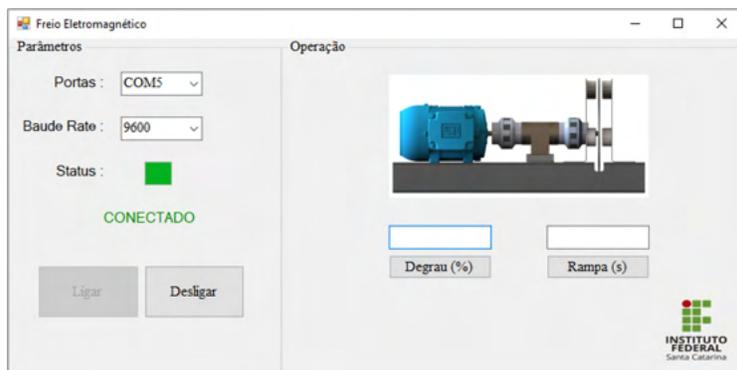


Figura 12 - Software de operação da bancada

Fonte: o próprio autor

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção do documento serão apresentadas discussões e resultados extraídos do sistema da bancada do freio eletromagnético, esses que definem os objetivos gerais do projeto.

O diagrama da Figura 13 demonstra a configuração do sistema para os ensaios e extração de dados. Integrou-se todos os elementos da bancada do freio eletromagnético com instrumentos de aquisição de parâmetros da máquina assíncrona, seu eixo e do módulo fonte controlador dos eletroímãs.

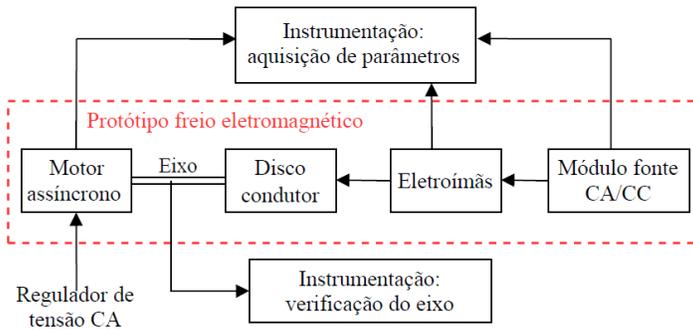


Figura 13 - Diagrama funcional dos ensaios

Fonte: o próprio autor

### 4.1 Parâmetros do motor

Os ensaios anexados nas Tabela 4 e 5 objetivam o estudo e análise do comportamento do motor em diferentes faixas de tensões de entrada. O modelo de frenagem utilizado para os ensaios é um degrau de 100% da razão cíclica e frequência  $1\text{kHz}$  do PWM. O estágio de teste 1 (ET1) considera  $V_E \approx 12 V_{CC}$  (tensão nominal) e o estágio de teste 2 (ET2) considera  $V_E \approx 17 V_{CC}$ . A Tabela 3 apresenta a legenda para os parâmetros do sistema.

Simbologia	Parâmetro	Unidade
$V_\phi$	Tensão por fase de entrada do motor	$[V_{cr}]$
$V_E$	Tensão nos eletroímãs	$[V_{cc}]$
$I_{SF} / I_{CF}$	Corrente por fase de entrada do motor sem frenagem / com frenagem	$[A]$
$P_{SF} / P_{CF}$	Potência do motor sem frenagem / com frenagem	$[W]$

$n_{SF} / n_{CF}$	Velocidade do motor sem frenagem / com frenagem	[RPM]
-------------------	---	-------

Tabela 3 - Parâmetros do sistema

Fonte: o próprio autor

$V_{\phi}$	$I_{SF}$	$I_{CF}$	$P_{SF}$	$P_{CF}$	$n_{SF}$	$n_{CF}$
90	0,35	>1*	23,70	>65*	1660	<1000*
100	0,30	0,61	22,50	50	1703	1477
125	0,30	0,45	22,50	43	1742	1662
150	0,35	0,45	25,50	46	1760	1714
175	0,41	0,47	31,00	50	1770	1740
200	0,49	0,52	36,50	53	1776	1756
220	0,58	0,59	42,80	58	1781	1763

Tabela 4 - Parâmetros do motor elétrico estágio de teste 1 (ET1)

Fonte: o próprio autor

$V_{\phi}$	$I_{SF}$	$I_{CF}$	$P_{SF}$	$P_{CF}$	$n_{SF}$	$n_{CF}$
90	0,35	--	23,70	--	1660	<1000*
100	0,30	>1*	22,50	>80*	1703	<1000*
125	0,30	0,65	22,50	63	1742	1582
150	0,35	0,50	25,50	60	1760	1675
175	0,41	0,52	31,00	63	1770	1716
200	0,49	0,55	36,50	66	1776	1738
220	0,58	0,63	42,80	70	1781	1750

\* = Teste interrompido devido a possibilidade de travamento do motor.

Tabela 5 - Parâmetros do motor elétrico estágio de teste 2 (ET2)

Fonte: o próprio autor

Os dados expostos nas Tabelas 4 e 5 foram coletados utilizando um analisador de qualidade de energia *Fluke 435* e um foto-tacômetro digital. A Figura 14 mostra o sistema em funcionamento.

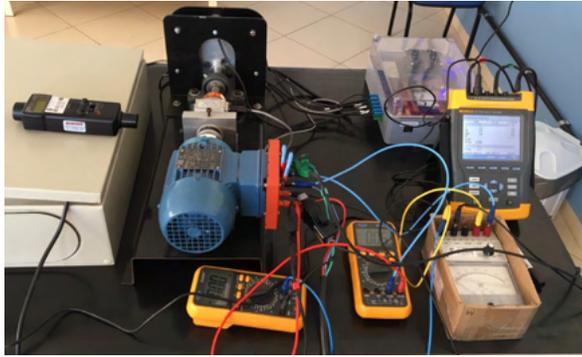


Figura 14 - Ensaio realizado na bancada

Fonte: o próprio autor

## 4.2 Circuito Elétrico Equivalente do Motor

Para o estudo correto do dimensionamento do motor, realizou-se o levantamento do circuito elétrico equivalente (CEE) da Figura 3, este definido pela estimação de resistências e impedâncias da máquina elétrica (KOSOW, 1979, p. 321; FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 1975, p. 351). Esta etapa é necessária para o estudo do torque estimado desenvolvido e posteriores comparações com o torque mensurado através do sistema da Figura 26.

Definem-se os parâmetros da Figura 3:

$V_\phi$  – Tensão por fase de entrada do motor;

$s$  – Escorregamento;

$R_1$  e  $R_2$  – Resistências das bobinas do estator e rotor respectivamente (perdas ôhmicas);

$jX_1$  e  $jX_2$  – Reatâncias de dispersão de fluxo do estator e do rotor respectivamente;

$jb_m$  e  $g_m$  – Parâmetros do circuito magnético do motor (susceptância e condutância respectivamente).

Para obtenção dos parâmetros da máquina elétrica foram realizados dois ensaios: ensaio de rotor bloqueado e ensaio a vazio (FITZGERALD; KINSLEY JUNIOR; KUSKO, 2014, p. 369).

Os dados extraídos de ensaios laboratoriais do rotor bloqueado ' $b'$ ' e vazio ' $av$ ' são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Simbologia	Valor	Unidade
$V_{bl}$	41,5	[V <sub>ca</sub> ]
$i_{bl}$	0,66	[A]
$P_{bl}$	25	[W]

Tabela 6 - Ensaio de rotor bloqueado

Fonte: o próprio autor

Simbologia	Valor	Unidade
$V_{av}$	220	[V <sub>ca</sub> ]
$i_{av}$	0,65	[A]
$P_{av}$	20	[W]

Tabela 7 - Ensaio a vazio

Fonte: o próprio autor

A partir dos parâmetros rotor bloqueado e a vazio, encontra-se  $R_1$ ,  $X_1$  (estator) e  $R_2$ ,  $X_2$  (rotor) conforme (6)-(11) .

$$R_{eq} = \frac{P_{bl}}{I_{bl}^2} \cong 57,4\Omega \quad (6)$$

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \cong 62,9\Omega \quad (7)$$

$$R_{eq} = \frac{P_{bl}}{I_{bl}^2} \cong 57,4\Omega \quad (8)$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{eq}^2} \cong 25,73\Omega \quad (9)$$

Considera-se  $R_1 = R_2$  e  $X_1 = X_2$ , portanto:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{eq}}{2} \cong 28,7\Omega \quad (10)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bl}}{2} \cong 12,9\Omega \quad (11)$$

Os parâmetros do circuito magnético são obtidos com base no ensaio a vazio, considerando as perdas no rotor ( $P_{rot}$ ) e as perdas no ferro ( $P_{fer}$ ):

$$P_{fer} = P_{rot} = \frac{P_{av} - R_1 \cdot I_{av}^2}{2} \cong 3,94W \quad (12)$$

$$R_{eq} = R_1 + R_{fer} = \frac{P_{av} - P_{rot}}{I_{av}^2} \cong 38,01\Omega \quad (13)$$

Logo:

$$R_{fer} \cong 9,31\Omega$$

Para determinar  $X_{fer}$  utiliza-se as equações (14) e (15):

$$Z_{eq} = \frac{V_{av}}{I_{av}} \cong 338,46\Omega \quad (14)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_{fer} = \sqrt{Z_{eq}^2 + R_{eq}^2} \quad (15)$$

Deste modo:

$$X_{fer} \cong 323,42\Omega$$

Ainda por comparação, conclui-se que  $X_{fer} > R_{fer}$  e baseado em Renato (1990), determina-se a equivalência da Figura 15.

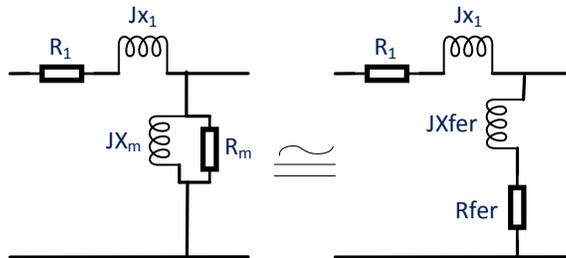


Figura 15 - Modelo CEE equivalência entre admitância e impedância de ramo de magnetização

Fonte: o próprio autor

Os valores de  $b_m$  e  $X_m$  são determinados conforme (16) e (17). Já  $g_m$  e  $R_m$  podem ser desconsiderados pois o resultante do paralelo entre  $X_m$  e  $R_m$  resulta apenas em uma reatância de magnetização  $X_m$ , por simplificação do modelo:

$$b_m = \frac{X_{fer}}{R_{fer}^2 + X_{fer}^2} \cong 3,09mS \quad (16)$$

$$X_m = b_m^{-1} \cong 323,45\Omega \quad (17)$$

A Figura 16 apresenta o circuito magnético simplificado.

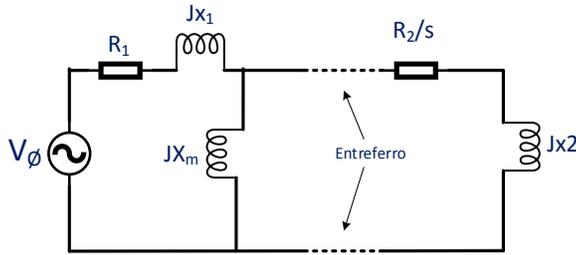


Figura 16 - Modelo CEE simplificado

Fonte: o próprio autor

Aplica-se o equivalente de *thevenin* para obter-se o modelo definitivo de tratamento matemático do motor, resultando no circuito da Figura 17:

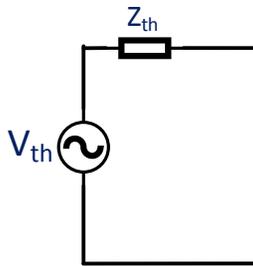


Figura 17 - Modelo CEE simplificado através do equivalente de thevenin

Fonte: o próprio autor

Neste modelo, os parâmetros  $V_{th}$ ,  $R_{th}$  e  $X_{th}$  são obtidos conforme (18-20), as quais são boas aproximações ao modelo, segundo Fitzgerald, Kinsley Junior e Kusko (1975, p. 360):

$$V_{th} = V_{\phi} \cdot \frac{X_m}{X_1 + X_m} \quad (18)$$

$$Z_{th} = \frac{(R_1 + jX_1) \cdot jX_m}{(R_1 + jX_1) + jX_m} \simeq 26,35 + j14,65 \text{ } [\Omega] \quad (19)$$

Logo:

$$R_{th} = 26,35 \text{ } \Omega \quad (20.a.)$$

$$X_{th} = 14,65 \text{ } \Omega \quad (20.b.)$$

### 4.3 Torque

Neste tópico a partir dos valores de torque mensurados através do sistema de medição do transdutor de torque (Figura 26), tentou-se estabelecer um comparativo entre os valores calculados e medidos, conforme CEE do motor do capítulo 4.2.

Para os ensaios realizados, foram consideradas duas faixas de tensão para obtenção do torque:  $V_\phi = 125 V_{CA}$  (onde o desempenho de frenagem foi superior, conforme visualizado nas tabelas 4 e 5) e  $V_\phi = 220 V_{CA}$  (tensão nominal do motor).

A fonte dos eletroímãs operou em ET1 ( $V_E 12 V_{CC}$ ) e ET2 ( $V_E 17 V_{CC}$ ), assim sendo, possível analisar uma relação entre torque e intensidade de corrente nas bobinas de campo.

Segundo Kosow (1989, p. 322), a equação (21) determina o cálculo do torque desenvolvido ( $T_{des}$ ).

$$T_{des} = \frac{1}{\omega_s} \cdot q \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left[ \left( R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right]} \quad (21)$$

O parâmetro  $V_{th}$  é calculado através de (18) para cada faixa de tensão de entrada  $V_\phi$  onde deseja-se obter o valor de torque desenvolvido.

O parâmetro  $q$  é o número de fases do motor, neste caso 3 fases (motor trifásico). Já o escorregamento  $s$  é determinado conforme (22) e depende da velocidade de rotação do motor ( $n_{SF}$  e  $n_{CF}$  apontados nas Tabelas 4 e 5). A Tabela 8 relaciona os parâmetros listados, para o cálculo final do torque desenvolvido.

$$s = \left( \frac{n_s - n_{frenagem}}{n_s} \right) \quad (22)$$

Onde:

$n_s$  – velocidade síncrona do motor (1800 RPM);

$n_{frenagem}$  – velocidade do motor a partir da frenagem aplicada.

$V_\phi$	Ensaio	$V_{th}$	$s_{SF}$	$s_{CF}$
125	ET1	120,20	0,03222	0,07666
125	ET2	120,20	0,03222	0,12111
220	ET1	211,56	0,01055	0,02055
220	ET2	211,56	0,01055	0,02777

Tabela 8 - Parâmetros ensaios

Fonte: o próprio autor

A velocidade angular síncrona ( $\omega_s$ ) é calculada conforme a equação (23).

$$\omega_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{p} \cong 188,5 \text{ rad/s} \quad (23)$$

Portanto, os valores calculados para o torque desenvolvido são apresentados na Tabela 9.

$V_\phi$	Ensaio	$T_{SF}$	$T_{CF}$
125	ET1	243,30	533,55
125	ET2	243,30	777,33
220	ET1	256,81	491,14
220	ET2	256,81	654,49

Tabela 9 - Cálculo do torque por ensaios em  $[10^{-3} \text{ N.m}]$

Fonte: o próprio autor

Nos gráficos apresentados na seção, é possível fazer um comparativo com os valores de torque mensurados através do sistema de medição do transdutor de torque (visualizado na Figura 26) e dos dados apresentados na Tabela 9.

A Figura 18 mostra a legenda dos gráficos. A Figura 19 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando um degrau de 100% de frenagem para  $V_\phi = 125 V_{CA}$ .

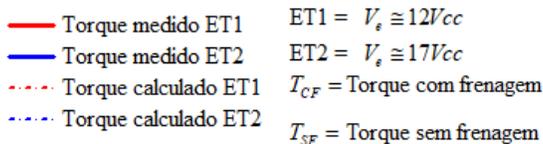


Figura 18 - Legenda dos gráficos de torque

Fonte: o próprio autor

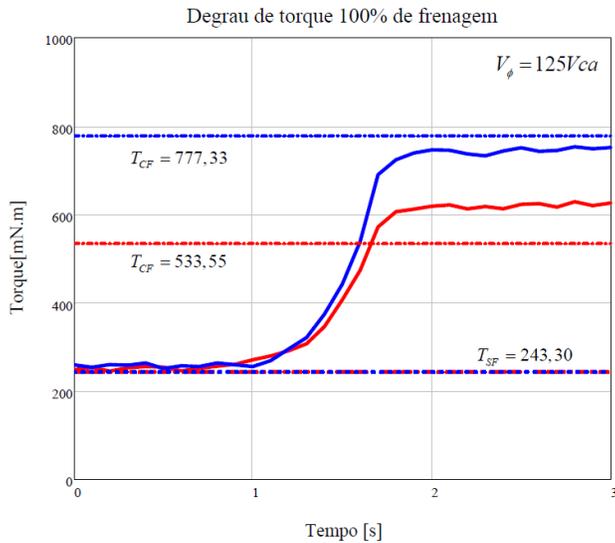


Figura 19 - Gráfico degrau de torque 100% de frenagem comparando valores calculados e extraídos  
 Fonte: o próprio autor

A Figura 20 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando um degrau de 100% de frenagem para a tensão nominal do motor.

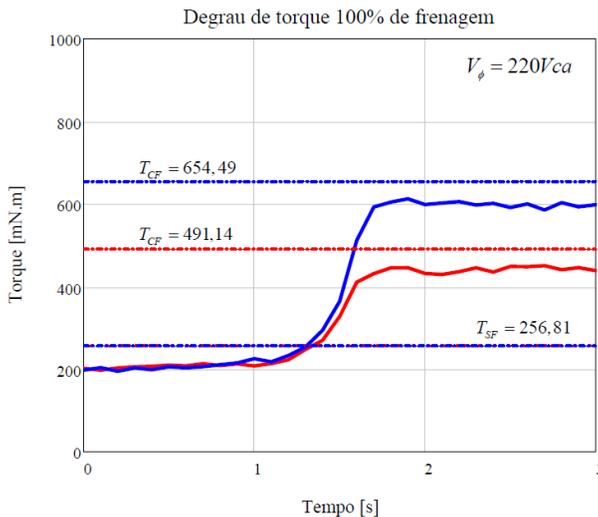


Figura 20 - Gráfico degrau de torque 100% de frenagem para tensão nominal do motor, comparando valores calculados e extraídos  
 Fonte: o próprio autor

A Figura 21 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando uma

rampa de 10s de frenagem para  $V_\phi = 125 V_{CA}$ .

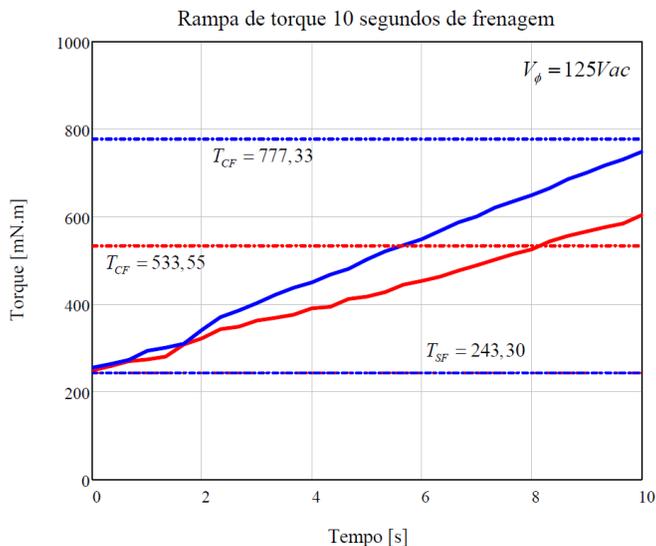


Figura 21 - Gráfico rampa de torque 10s de frenagem valores calculados e extraídos

Fonte: o próprio autor

A Figura 22 apresenta um comparativo entre os valores de torque aplicando uma rampa de 10s de frenagem para tensão nominal do motor.

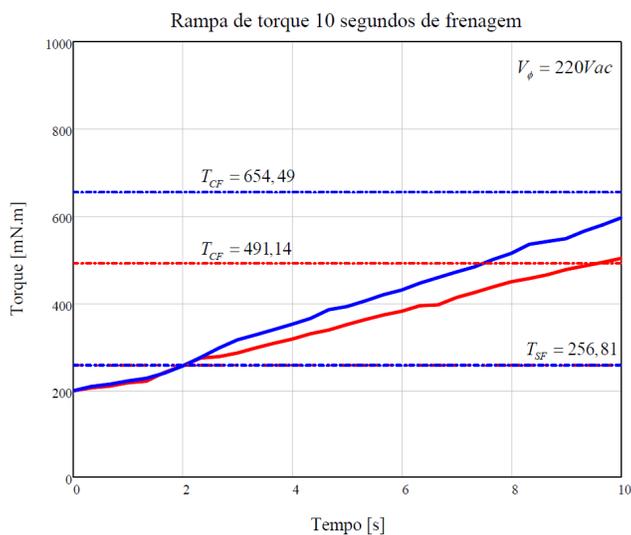


Figura 22 - Gráfico rampa de torque 10s de frenagem para tensão nominal do motor, comparando valores calculados e extraídos

Fonte: o próprio autor

É possível visualizar na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 a relação entre torque e escorregamento quando se aplica uma frenagem, tanto para ET1 como ET2, valores medidos e calculados, em diferentes faixas de tensão de entrada do motor.

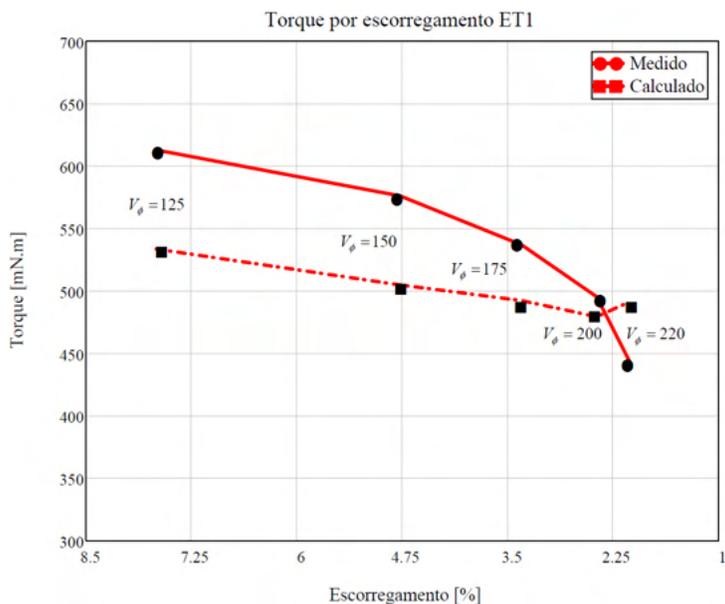


Figura 23 - Gráfico da curva de torque medido e calculado por escorregamento aplicando frenagem em ET1

Fonte: o próprio autor

A Tabela 10 relaciona os valores finais de torque calculado [mN.m] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 23. O módulo fonte operou em estágio de teste 1 (ET1).

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	7,666	533,64
150	4,777	504,94
175	3,333	492,39
200	2,444	479,39
220	2,055	491,27

Tabela 10 - Cálculo do torque por escorregamento (ET1)

Fonte: o próprio autor

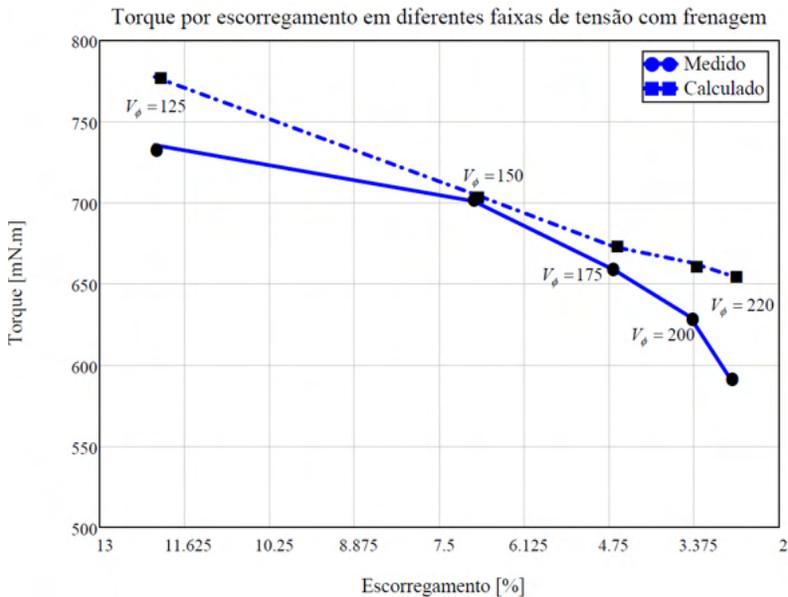


Figura 24 - Gráfico da curva de torque medido e calculado por escorregamento aplicando frenagem em ET2

Fonte: o próprio autor

A Tabela 11 relaciona os valores finais de torque calculado [ $mN.m$ ] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 24. O módulo fonte operou em estágio de teste 2 (ET2).

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	12,111	777,41
150	6,944	705,32
175	4,666	672,66
200	3,444	663,12
220	2,777	655,12

Tabela 11 - Cálculo do torque por escorregamento (ET2)

Fonte: o próprio autor

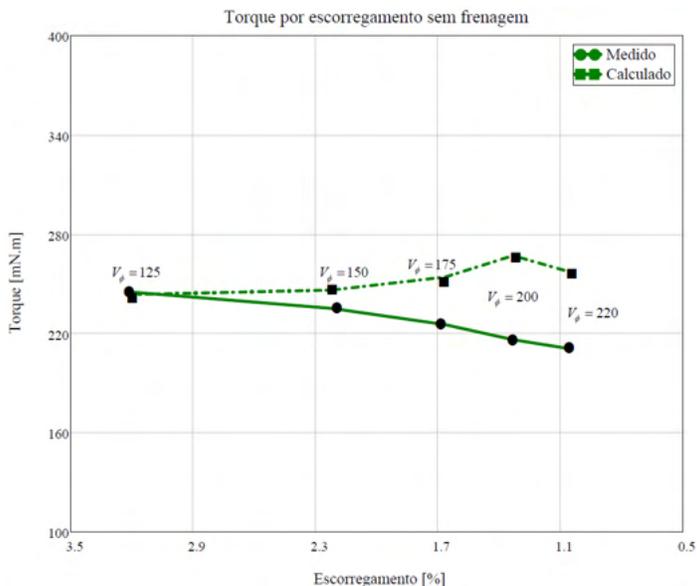


Figura 25 - Gráfico curva de torque medido e calculado sem frenagem

Fonte: o próprio autor

A Tabela 12 relaciona os valores finais de torque calculado [ $mN.m$ ] e escorregamento [%] para cada faixa de tensão de fase, demonstrados no gráfico da Figura 25. Para este ensaio, não houve efeito de frenagem.

$V_\phi$	$s$	$T_{CALC}$
125	3,222	243,32
150	2,222	246,15
175	1,666	253,85
200	1,333	266,88
220	1,055	256,95

Tabela 12 - Cálculo do torque por escorregamento sem frenagem

Fonte: o próprio autor

A Figura 26 evidencia o sistema de medição do transdutor de torque rotativo MKDC-20 e seus elementos, bem como uma placa eletrônica para leitura dos dados e um indicador digital MMK5030 com certificado de calibração do inmetro.



Figura 26 - Sistema para medição do torque

Fonte: o próprio autor

#### 4.4 Parâmetros Eletroímã

O comportamento da tensão e corrente total dos eletroímãs conforme os ensaios para degrau de 100% de frenagem podem ser visualizados na Figura 27 e Figura 28. Visando uma solução atenuada para o funcionamento das bobinas a frequência do PWM foi configurada para 1kHz. O modulo fonte operou em ET2.

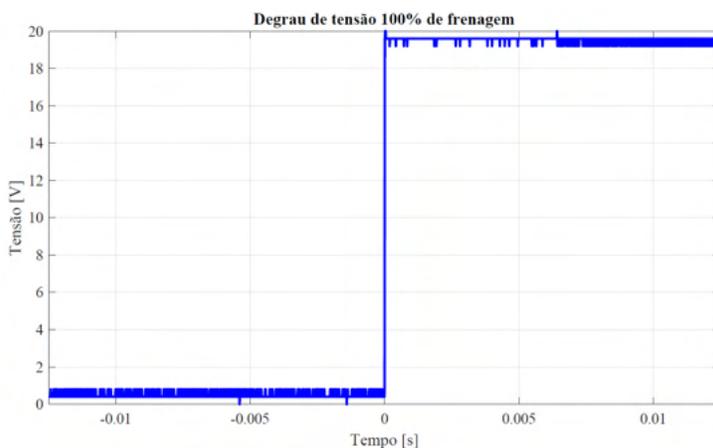


Figura 27 - Gráfico tensão em função do tempo degrau 100% de frenagem

Fonte: o próprio autor

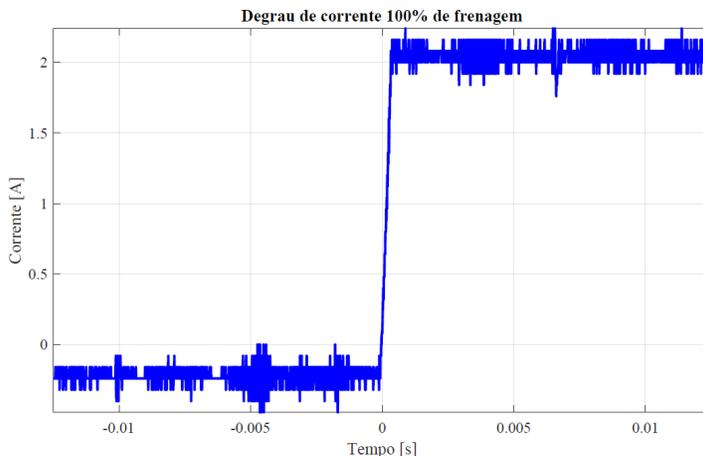


Figura 28 - Gráfico corrente em função do tempo degrau 100% de frenagem

Fonte: o próprio autor

Na Figura 29 é possível observar o funcionamento da razão cíclica do PWM em um degrau de frenagem de 90% e a corrente quase atingindo seu pico.

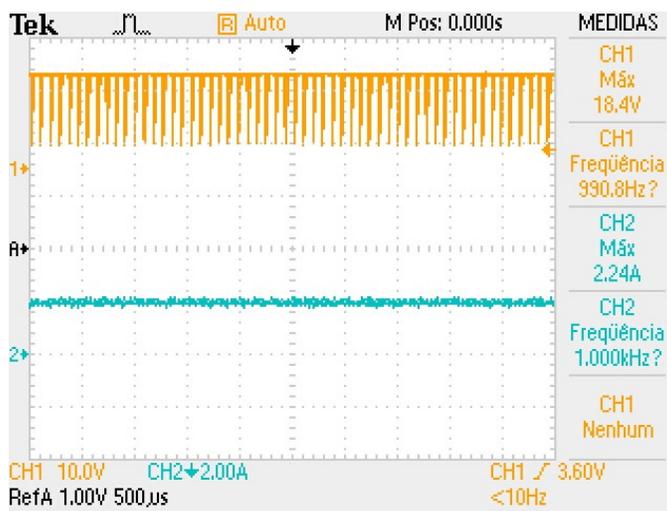


Figura 29 - Degrau de frenagem 90%

Fonte: o próprio autor

No arquivo de anexo, é possível visualizar vídeos do comportamento da tensão e corrente total dos eletroímãs conforme os ensaios para rampa 10 segundos e degrau de frenagem. Também estão contidos nesse arquivo, fotos da bancada com maior resolução, diagramas e ensaios de laboratório.

*Weblink* dos anexos do projeto, incluindo documentos da bancada, arquivos do software, instruções de uso e vídeos de ensaios de comportamentos de frenagem: <https://mega.nz/file/49BHRKxZ#kZD9gRZBITillm9ixFkwAZpkXcQQy98-sOWhuLFO25s>.

## 5 | CONCLUSÃO

A proposta apresentada neste projeto proporciona o ensaio didático de motores de indução diretamente acoplado a cargas variáveis, onde o freio eletromagnético tem o objetivo de representar níveis de frenagem pré-definidos.

Uma carga mecânica convencional pode ser substituída por um freio induzido por correntes parasitas, sem que isso altere o comportamento motriz, o que significa uma grande vantagem para a realização de ensaios em laboratório.

Os resultados extraídos foram satisfatórios, visto que foi possível alcançar uma eficiência de frenagem em diversas faixas de tensão de entrada no motor, sem ultrapassar sua limitação de corrente. Os valores de torque coletados através do transdutor de torque foram bem aproximados com os valores calculados, resultando em um estudo mais aprofundado da máquina elétrica e da análise completa do sistema da bancada do freio eletromagnético.

Melhorias no desempenho de frenagem podem ser alcançadas com o acréscimo de eletroímãs ou com a substituição das unidades atuais por outros de potência mais elevada.

O material condutor na composição do disco também poderá ser substituído por outro de condutividade elétrica superior, ou ter um acréscimo em sua espessura (conforme equação 2), o que implicaria num maior valor de correntes induzidas (de Foucault).

Para trabalhos futuros utilizando a bancada, sugere-se ensaios de partida do motor e o estudo da implementação de unidades de eletroímãs alimentados por tensão em corrente alternada comparando a efetividade de frenagem com as unidades atuais.

A construção do projeto demandou estudo multidisciplinar e as medidas obtidas serão utilizadas para análise didática da eficiência da conversão eletromecânica no laboratório de máquinas elétricas do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Chapecó.

## AGRADECIMENTOS

O autor do documento agradece primeiramente sua família, em particular sua mãe, pela confiança imposta. Agradece ao orientador Prof. Dr. Alexandre Dalla’Rosa pela orientação precisa e eficaz, mesmo em tempos de pandemia. Agradece ao Prof. Me. Fernando Michelin por todo o auxílio prestado na construção mecânica da bancada e também ao Prof. Dr. Maro Jinbo pelo empréstimo do sistema de transdutor de torque rotativo e seus demais elementos. Agradece aos servidores e colegas do IFSC Campus Chapecó que ajudaram, de alguma maneira, na idealização e confecção deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- BARAN, W. **Influence of diferente magnetic field on eddy current braking**. Essen/DE: IEEE Transactions, 1970.
- BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo. Grupo A - Bookman, 2000.
- FITZGERALD, A. E.; KINSLEY JUNIOR, C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2014.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2011.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência**. 4. ed. Porto Alegre. Grupo A - Bookman, 2011.
- HEALD, M. A. **Magnetic Braking: Improved Theory**. American Journal of Physiscs. Swarthmore College/PA, Setembro. 1988.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.
- OLIVEIRA, L. F. C. **A influência dos tirantes de fixação do estator nas perdas das máquinas de indução trifásicas**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- PACHECO, R. L. **Conversão Eletromecânica de Energia B**. Florianópolis: UFSC, 1990.
- PAGI FERREIRA, D. **Medidas e materiais elétricos**. Londrina. Educacional S.A, 2017.
- PEREIRA, A. H. **Freio eletromagnético para ensaios de motores de indução**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- PINHEIRO FILHO, R. F. **Estudo de um sistema de frenagem eletromagnética empregando correntes parasitas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- RIVAL, M. **Os grandes Experimentos Científicos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1997.
- ROONEY, A. **A história da física**. São Paulo: M. Books, 2013.
- SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Grupo A – Bookman, 2012.
- SALZMAN, P. J.; BURKE, J. R.; LEA, M. S. The effect of electric field in classic introductory physics treatment of eddy current forces. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 5, p. 586-590, maio 2001.
- SARKIS, C. D. **Blindagem Eletromagnética**. 2000. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab5.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

STELLMAN, A.; GREENE J. **Head First C#**. Beijing: O'Reilly, 2021.

WOUTERSE, J. H. **Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles**. Eindhoven/NL: IEE Proceedings, 1991.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. S.; ZEMANSKY. **Física III: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2009.

## PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO

*Data de aceite: 10/01/2022*

*Data de submissão: 08/10/2021*

### **Lucas Lapolli Brighenti**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Instituto de Eletrônica de Potência – INEP  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/0848735096682176>

### **Walbermark Marques Dos Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento – LEPAC  
Vitória – ES  
<http://lattes.cnpq.br/5558697161842579>

### **Denizar Cruz Martins**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Instituto de Eletrônica de Potência – INEP  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/6156546664055944>

**RESUMO:** Neste trabalho são propostas geometrias para núcleos utilizados em barramentos magnéticos de alta frequência. O barramento magnético faz o acoplamento de sistemas de energia através do fluxo magnético, similar ao barramento capacitivo em microrredes CC. Em sistemas conectados à rede de distribuição, a isolação galvânica

é indispensável e o acoplamento magnético traz além desta vantagem, a possibilidade de interligar fontes de energia com diferentes níveis de tensão. Microrredes e transformadores de estado sólido suas principais aplicações, tendo os conversores multiportas, derivados do Dual Active Bridge, como as principais topologias para o gerenciamento do fluxo de potência. Quatro geometrias baseadas em núcleos magnéticos tipo pote são propostas e os resultados obtidos, por método de elementos finitos, mostram que elas apresentam vantagens em comparação às geometrias existentes (shell, core e matrix). Estas vantagens são: menor indutância de dispersão, maior fator de acoplamento, maior indutância magnetizante e menores perdas magnéticas no núcleo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barramento magnético, conversor MAB, transformador de estado sólido, núcleos magnéticos.

### PROPOSAL OF CORE GEOMETRIES USED IN SYSTEM COUPLINGS THROUGH MAGNETIC FLUX

**ABSTRACT:** This work presents the proposal of structures to be used as magnetic bus in high frequency operation. The magnetic bus is used to couple energy systems through the magnetic flux, similar to the capacitive bus widely used in DC microgrids. In systems connected to the distribution grid, galvanic isolation is indispensable and the magnetic coupling brings in addition to this advantage the possibility of interconnecting energy sources with different voltage levels. Its applications range from microgrids to solid-state transformers, with multi-port converters, derived

from Dual Active Bridge, as the primary choices for powering systems with high-frequency magnetic coupling. Four pot-core based geometries were proposed and the results obtained by finite element method, showed that they have as advantages compared to core geometries commonly used (shell type, core type and matrix type). These advantages are a lower leakage inductance, higher coupling factor, higher magnetizing inductance and lower core losses.

**KEYWORDS:** Magnetic bus; MAB converters; solid state transformer; magnetic cores.

## 1 | INTRODUÇÃO

Por ter a capacidade de isolar eletricamente dois sistemas e elevar ou abaixar a tensão, o transformador é um elemento essencial nos sistemas de transmissão e distribuição. Com ele é possível transmitir energia por longas distâncias com perdas reduzidas e fornecê-la aos usuários em níveis seguros de tensão. Estas características foram cruciais para a “vitória” da transmissão em corrente alternada na guerra das correntes disputada por Westinghouse e Thomas Edison no final do século XIX. Ainda hoje, o transformador é um elemento indispensável nos mais diversos dispositivos eletrônicos, assim como no sistema elétrico de potência. Na geração distribuída, o ele é o elo de interconexão de fontes de energias renováveis com o sistema elétrico de potência, tanto para adequar os níveis de tensão, quanto para a segurança e proteção destes sistemas (JESZENSZKY, 1996; HURLEY; WÖLFLE, 2013).

O isolamento galvânico é indispensável na conexão de sistemas à rede de distribuição devido à segurança para os usuários e para os equipamentos conectados a ele. Nesse contexto, surge o conceito de barramento magnético, fazendo o acoplamento de sistemas elétricos que trocam energia entre si através do fluxo magnético, conforme ilustrado na Figura 1.

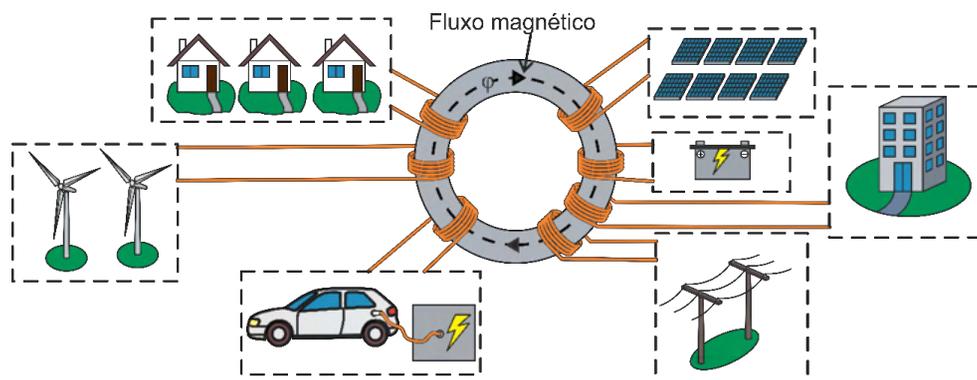


Figura 1. Conceito de um barramento magnético acoplando diferentes tipos de cargas e fontes de alimentação.

Fonte: produção do próprio autor.

As vantagens de se utilizar um acoplamento magnético em alta frequência em relação ao acoplamento capacitivo, presente nas microrredes CC, são:

- Isolação galvânica: potenciais da carga eletricamente desacoplados do barramento da rede de distribuição;
- Adequação dos níveis de tensão de diferentes sistemas;
- Possibilidade de conexões CC e CA tanto em baixa tensão como em alta tensão, dependendo dos conversores utilizados;
- Redução de estresses nos conversores.

As desvantagens do acoplamento através de um barramento magnético são:

- Número limitado de conexões: aumento da complexidade no controle do fluxo de energia com aumento de enrolamentos;
- Aumento de perdas devido ao fluxo magnetizante no núcleo e ao efeito joule nos enrolamentos.

Este artigo apresenta o estudo dos efeitos das geometrias dos núcleos usados em barramentos magnéticos de alta frequência. A geometria do núcleo afeta diretamente a distribuição das linhas de fluxo magnético dentro do volume do núcleo. Assim, será avaliado em cada geometria o fator de acoplamento, distribuição das linhas de fluxo magnético e perdas devido ao fluxo magnetizante circulando em seu interior. Além disso, são propostas quatro diferentes geometrias baseadas nos núcleos do tipo XS (Figura 2-a) e pote (Figura 2-b).

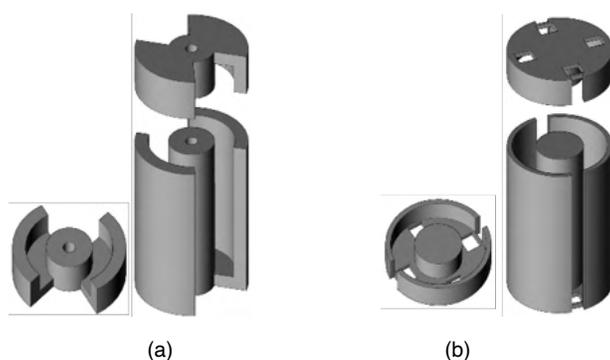


Figura 2. Geometrias de núcleos propostos para barramento magnético com múltiplas portas para acoplamento em alta frequência: (a) núcleo XS estendido, (b) núcleo pote estendido.

Fonte: produção do próprio autor.

Tais geometrias são muito utilizadas em acoplamentos de sinais, mas não são exploradas em aplicações de potência. Espera-se que esta nova topologia apresente vantagens como uma melhor distribuição de linhas de fluxo, aumentando o fator de

acoplamento e reduzindo a indutância de dispersão. Além destas vantagens, a proposta prevê uma melhor versatilidade no sentido de incluir e retirar elementos do barramento, devido a altura estendida.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 será apresentada uma introdução aos conversores multiportas, com ênfase ao conversor DAB (*Dual Active Bridge*), na seção 3 será feita uma revisão bibliográfica do barramento magnético com as principais geometrias encontradas na literatura, na seção 4, os resultados de simulação e na seção 5, as conclusões.

## 2 | CONVERSORES MULTIPORTAS

A generalização do conceito de conversores multiportas para acoplamento magnético de sistemas foi introduzido na literatura por (TAO et al., 2006). A possibilidade de transferir energia entre todas as portas, utilizando diversos tipos de fontes e cargas, com diferentes níveis de tensão, tornam estes conversores as principais escolhas para o processamento da energia em sistemas com acoplamento magnético (FALCONES; MAO; AYYANAR, 2010). Desta forma, um único transformador com múltiplos enrolamentos único permite a multidirecionalidade e um aumento na densidade de potência do conversor (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013).

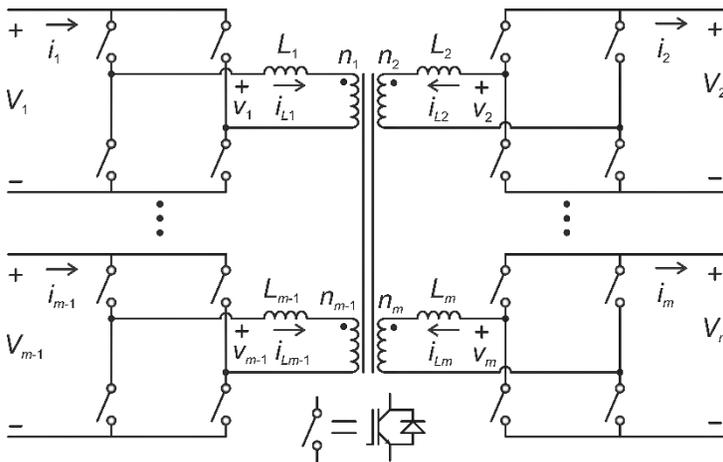


Figura 3. Generalização do conversor multiportas MAB (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013).

Fonte: produção do próprio autor.

O conversor MAB é tido como uma generalização do conversor DAB proposto por (DONCKER; DIVAN; KHERALUWALA, 1991). O conversor TAB (*Triple Active Bridge*), com três portas foi apresentado por (MICHON et al., 2004) para interligar células de combustível, carga e uma bateria para armazenamento de energia. Em 2006, (QIANG; WEI-

YANG; ZHEN-LIN, 2009) introduz o conversor de quatro portas (QAB) e em (FALCONES; AYYANAR; MAO, 2013) é formalizado o conceito dos conversores multiportas, lançando o conversor MAB com foco em aplicações nos transformadores de estado sólido (SSTs).

### 3 | BARRAMENTO MAGNÉTICO

Nesta seção, serão apresentadas as principais geometrias utilizadas em núcleos de barramentos magnéticos encontradas na literatura. O aproveitamento da indutância de permitida pelos conversores MAB ocasiona divergências nas linhas de pensamento para o projeto do barramento. Alguns trabalhos defendem o conceito de projetar o barramento magnético com a indutância de dispersão necessária para a transmissão de potência, dispensando a utilização de indutores extras. Por outro lado, há autores que afirmam que o barramento magnético deve ser projetado com indutância de dispersão mínima, acrescentando indutores em série quando necessário.

A principal justificativa utilizada para se projetar um barramento magnético com a indutância de dispersão necessária é o aumento da densidade de potência. Algumas técnicas utilizadas para controlar a indutância de dispersão são: deslocamento vertical dos enrolamentos concêntricos (DE LEON; PURUSHOTHAMAN; QASEER, 2014; STEIGER; MARIETHOZ, 2011), deslocamento horizontal dos enrolamentos (HERNANDEZ; DE LEON; GOMEZ, 2011; SHUAI; BIELA, 2013) e inserção de um núcleo magnético entre os enrolamentos (BAEK; BHATTACHARYA, 2011; HERNANDEZ; DE LEON; GOMEZ, 2011).

Projetar o barramento magnético com indutância de dispersão mínima apresenta melhor aceitação (RAULS; NOVOTNY; DIVAN, 1993; BOGUSLAW et al., 2006; CHEN; DIVAN, 2017). A indutância de dispersão é dependente de diversos fatores onde não há um controle preciso, sendo extremamente dependente do processo de fabricação. Elevados valores de indutância de dispersão remetem a um baixo fator de acoplamento, diminuindo a eficiência na transferência de energia, podendo não resultar em um aumento na densidade de potência. Em transformadores de alta tensão, é muito difícil manter valores baixos de indutância de dispersão e isso acaba dificultando consideravelmente o projeto e fabricação de um barramento magnético com valor de indutância desejado. Apesar dos conversores da família MAB, que necessitam de uma indutância de transmissão, serem as principais topologias usadas, há outros conversores, principalmente aplicados em SSTs, onde a indutância de dispersão é extremamente prejudicial, como o caso dos SSTs baseados em *flyback* (MANJREKAR; KIEFERNDORF; VENKATARAMANAN, 2002), conversores matriciais isolados (BASU et al., 2015) e topologia *Dyna-C* (CHEN; PRASAI; DIVAN, 2017). Aliado a estes argumentos, um barramento magnético com indutância de dispersão mínima torna-se mais atrativo e versátil para a manufatura e aplicações com variabilidade de funcionamento.

### 3.1 Geometrias de barramentos magnéticos

Existem dois tipos de estruturas do barramento magnético: solenoidais e coaxiais (SHE; HUANG; BURGOS, 2013). As estruturas solenoidais são as mais comuns entre os transformadores em geral. Nela, o campo magnético flui em paralelo ao eixo cilíndrico e a corrente circula ao redor deste eixo. As estruturas solenoidais são subdivididas em tipo *shell* (ORTIZ et al., 2013), *core* (PEREZ et al., 2002) e *matrix* (ROTHMUND et al., 2015), sendo o núcleo EE o modelo mais comum das desta categoria. A Figura 4 ilustra os diferentes tipos de estruturas solenoidais.

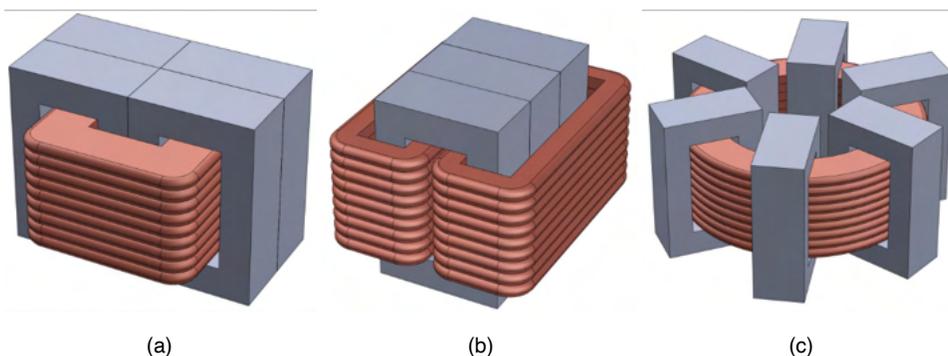


Figura 4. Estruturas solenoidais (a) shell, (b) core, (c) matrix (SHE; HUANG; BURGOS, 2013) e (d) multielementos (FILCHEV et al., 2009).

Fonte: produção do próprio autor.

As estruturas coaxiais são largamente utilizadas em telecomunicações e foram introduzidas na eletrônica de potência por (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002). Alguns trabalhos sobre transformadores coaxiais são encontrados em (BAEK; BHATTACHARYA, 2011; BOGUSLAW et al., 2006; WALTRICH; DUARTE; HENDRIX, 2010).

A principal vantagem desta estrutura é o alto fator de acoplamento e baixa indutância de dispersão, porém, esta característica é válida apenas com relação de transformação 1:1, (WALTRICH; DUARTE; HENDRIX, 2010). O transformador apresentado em (BOGUSLAW et al., 2006) apresenta relação 1:1, porém as descontinuidades nas curvas causam uma pequena degradação nestas características. Os transformadores propostos por (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (KADAVELUGU et al., 2011), ilustrados na Figura 5, apresentam relações de transformação diferente de 1:1, com isso, a acomodação das múltiplas espiras nos enrolamentos faz com que estas estruturas se aproximem das solenoidais, com a desvantagem do núcleo magnético volumoso.

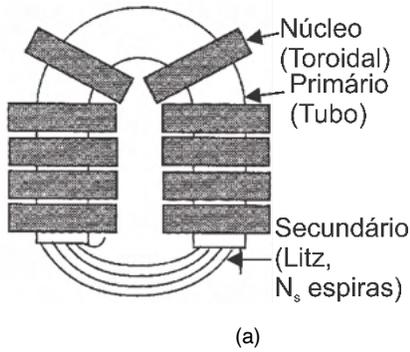


Figura 5. Transformador coaxial proposto por (a) (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (b) (KADAVELUGU et al., 2011).

Fonte: (KHERALUWALA; NOVOTNY; DIVAN, 2002) e (KADAVELUGU et al., 2011).

Os transformadores coaxiais são utilizados principalmente em aplicações de frequências mais elevadas, entre 100 kHz até mega-hertz. Nestas condições, o volume do barramento magnético é reduzido, contrabalanceando a desvantagem da necessidade de um núcleo volumoso a fim de obter um valor de indutância magnetizante adequada, devido ao baixo número de espiras.

### 3.2 Projetos dos barramentos magnéticos

Com base no que foi abordado, são propostas geometrias de núcleos para barramentos magnéticos baseadas nos núcleos pote e XS. Este estudo tem como objetivo avaliar as perdas no núcleo, distribuição das linhas de fluxo, indutância magnetizante e indutância de dispersão perante variações na geometria do núcleo, sendo desconsiderados os efeitos dos enrolamentos. Uma análise com dois enrolamentos (conversor DAB) é suficiente para avaliar estes efeitos, sendo que interações entre enrolamentos afetarão de forma praticamente igual todas as geometrias.

A Figura 6 ilustra os critérios de projetos adotados para os núcleos dos barramentos magnéticos.

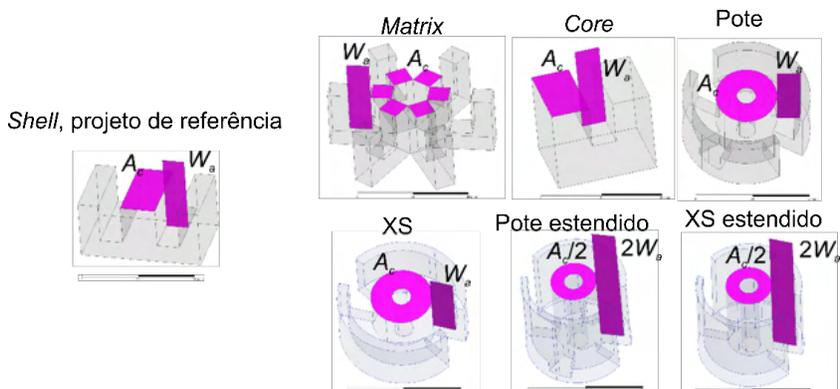


Figura 6. Critérios de projeto adotados para o dimensionamento dos núcleos.

Fonte: produção do próprio autor.

Para uma comparação justa, foi projetado um barramento magnético do tipo *shell* pelos métodos usados na literatura (KAZIMIERCZUK, 2013) e as dimensões dos demais núcleos foram obtidas de forma a manter as mesmas áreas da perna central e da janela. Para os núcleos estendidos, o critério foi usar metade da área da perna central e o dobro da área da janela do núcleo de referência, mantendo o produto das áreas e tornando os núcleos estendidos competitivos com os demais. Desta forma, a avaliam-se todas as geometrias de núcleos com o mesmo projeto.

### 3.3 Dimensionamento do núcleo tipo Shell

O dimensionamento do núcleo EE do tipo *shell* foi baseado em (KAZIMIERCZUK, 2013), pelo método do produto das áreas:

$$A_p = \sum_{x=1}^y \frac{V_x I_x}{k_f k_u J_{rms} B_m f} \quad (1)$$

Onde:

- $A_p$  produto das áreas da janela e da perna central;
- $V_x$  valor eficaz da tensão no enrolamento  $x$ ;
- $I_x$  valor eficaz da corrente no enrolamento  $x$ ;
- $y$  número total de enrolamentos;
- $k_f$  fator de forma, depende da forma de onda de tensão:  $k_f = 4,4$  para tensão senoidal e  $k_f = 4,0$  para tensão retangular;
- $J_{rms}$  densidade de corrente;
- $k_u$  fator de utilização;
- $B_m$  valor de pico da densidade de fluxo magnético;

$f$  frequência de operação.

Os valores de densidade de corrente e densidade de fluxo magnético máximo foram obtidos por meio de um processo iterativo de forma a igualar as perdas no núcleo e no cobre. Este processo consiste em calcular as perdas no núcleo e no cobre, caso sejam divergentes, aumenta-se ou reduz o valor da densidade de fluxo magnético ou da densidade de corrente até encontrar um valor ideal. O objetivo foi encontrar um valor ótimo para o tamanho do núcleo onde as perdas totais teóricas do barramento magnético fossem menores que 1%. As especificações do transformador simulado são apresentadas na Tabela 1.

Grandeza	Símbolo	Valor
Tensão no primário	$V_{priRMS}$	400 V
Tensão no secundário	$V_{secRMS}$	800 V
Corrente no primário	$I_{priRMS}$	3,04 A
Corrente no secundário	$I_{secRMS}$	1,52 A
Frequência de operação	$f$	50 kHz
Fator de utilização	$k_u$	0,7
Densidade de fluxo magnético	$B_m$	0,054 T
Fator de forma	$k_f$	4
Densidade de corrente	$J_{RMS}$	384 A/cm <sup>2</sup>
Produto das áreas	$A_p$	4,6 cm <sup>4</sup>

Tabela 1. Especificações do transformador

Fonte: produção do próprio autor.

Com base nas especificações, foi escolhido o núcleo EE do fabricante Thornton modelo NEE 63-33-26 com material IP12 (THORNTON, 2020). Os demais núcleos foram projetados de acordo com os critérios ilustrados na Figura 6 e a Tabela 2 apresenta seus principais valores dimensionais.

Geometria	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$W_a$ (mm <sup>2</sup> )	$A_p$ (cm <sup>4</sup> )	$V_c$ (cm <sup>3</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	MLT (mm)	MPL (mm)
EE	770,1	547,8	42,2	127,2	29,1	168,2	157,5
Core	770,1	547,8	42,2	150,9	26,0	168,2	194,6
Matrix	779,8	547,8	42,7	123,6	46,5	172,9	158,5
Pote	771,6	547,8	42,3	140,4	42,2	142,7	153,5
XS	771,6	547,8	42,3	132,4	39,64	142,7	148,8
Pote Es.	385,2	1100	42,4	101,2	47,4	115,6	227,4
XS Es.	385,2	1100	42,4	98,6	46,2	115,6	224,2

Tabela 2. Dados geométricos dos núcleos.

Onde  $V_c$  é o volume do núcleo,  $A_s$  é a área da superfície, MLT é o comprimento médio da espira e MPL é o comprimento do caminho magnético.

#### 4 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por simulação utilizando o método de elementos finitos. A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a indutância magnetizante, perdas no núcleo, fator de acoplamento e indutância de dispersão.

Geometria	Indutância mag. (mH)	Perdas no núcleo (W)	Fator de acoplamento	Indutância de dispersão ( $\mu$ H)
EE	71,1	1,29	0,999528	50,69
Core	58,9	1,63	0,997203	248,23
Matrix	66,7	1,42	0,999510	49,06
Pote	75,2	1,19	0,999764	26,94
XS	77,3	1,16	0,999771	26,71
Pote Est.	97,8	0,91	0,999489	76,90
XS Est.	99,3	0,90	0,999493	77,31

Tabela 3. Resultados de simulações no modo *eddy-currents* e transiente no ansys

Fonte: produção do próprio autor.

Na Figura 7 são apresentadas as distribuições das linhas de fluxo magnético nos núcleos *shell*, *core* e *matrix* e na Figura 8 são apresentadas as mesmas distribuições para os núcleos pote, XS, pote estendido e XS estendido propostos pelos autores.

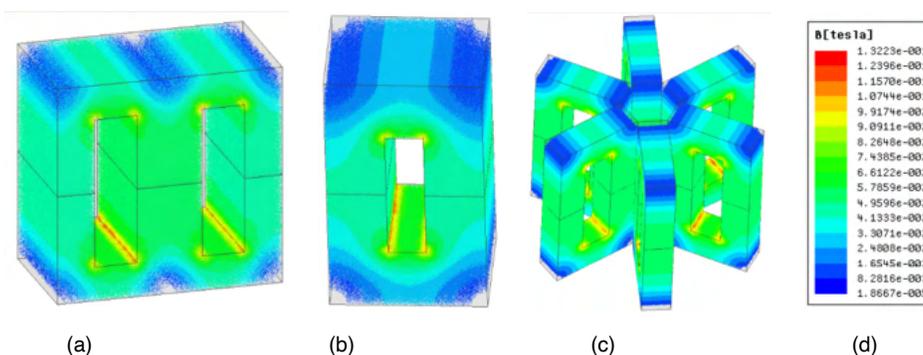


Figura 7. Densidade de fluxo magnético distribuído nos núcleos com geometrias do tipo (a) *Shell*, (b) *Core*, (c) *Matrix* e (d) escala gráfica do módulo da densidade de fluxo magnético.

Fonte: produção do próprio autor.

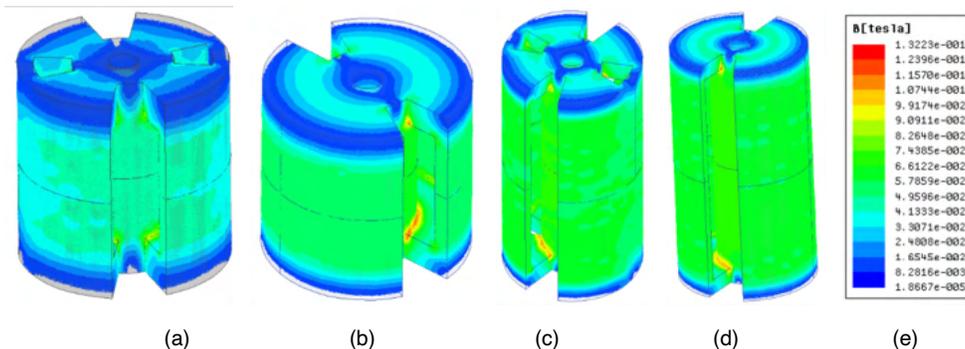


Figura 8. Densidade de fluxo magnético distribuído nos núcleos (a) pote, (b) XS, (c) pote estendido, (d) XS estendido e (e) escala gráfica do módulo da densidade de fluxo magnético.

Fonte: produção do próprio autor.

A Tabela 4 mostra os valores de perdas no núcleo, obtidos pelo modo de simulação transiente do *Ansys*, as perdas por volume de ferrite em cada núcleo, as perdas teóricas no cobre e eficiência de cada geometria. Pela Tabela 3 e Tabela 4, percebe-se que os núcleos do tipo pote e XS apresentam um melhor aproveitamento volumétrico, pois mesmo apresentando um volume levemente maior que os demais (Tabela 2), suas perdas são menores, mostrando que os resultados condizem com o esperado. Além disso, devido à melhor distribuição das linhas de fluxo magnético, seus valores de indutância de dispersão são menores que os demais, apresentando um melhor acoplamento entre os enrolamentos. A maior área superficial dos núcleos pote e XS facilitam seu arrefecimento, contabilizando como vantagens destas estruturas.

Geometria	Núcleo (W)	Por volume (kW/L)	Cobre (W)	Totais (W)	Eficiência (%)
EE	1,29	10,14	2,22	3,51	99,649
Core	1,63	10,78	2,22	3,85	99,615
Matrix	1,40	11,51	2,29	3,71	99,629
Pote	1,19	8,50	1,89	3,08	99,692
XS	1,16	8,75	1,89	3,05	99,695
Pote Est.	0,91	9,03	3,16	4,07	99,593
XS Est.	0,90	9,13	3,16	4,06	99,594

Tabela 4. Comparação das perdas totais entre as geometrias

Fonte: produção do próprio autor.

O núcleo do tipo *core* apresentou um pior desempenho entre todos os comparados. Os núcleos estendidos apresentaram um desempenho inferior aos demais, porém, seu volume de ferrite é menor. Além disso, devido à altura estendida, há vantagens quanto à versatilidade, permitindo acrescentar enrolamentos no seu interior, sendo atrativo para

múltiplos enrolamentos.

## 5 | CONCLUSÕES

O estudo mostrou que os resultados obtidos para os núcleos pote e XS são promissores, pois todas as características avaliadas: indutância de dispersão, fator de acoplamento, indutância magnetizante e perdas no núcleo são melhores que os demais. Os núcleos estendidos necessitam de melhores avaliações, porém suas características também se mostraram promissoras, pois apesar do alongamento do seu caminho magnético, suas características foram similares aos demais, apresentando potencial para aplicações com múltiplos enrolamentos em barramentos magnéticos.

## AGRADECIMENTOS

A equipe agrade a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, o Instituto de Eletrônica de Potência, a CAPES, o CNPq e ao FINEP.

## REFERÊNCIAS

BAEK, S.; BHATTACHARYA, S. Analytical modeling of a medium-voltage and high-frequency resonant coaxial-type power transformer for a solid state transformer application. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Anais...: 2011.Phoenix: IEEE, 2011

BASU, K. et al. A single-stage solid-state transformer for pwm ac drive with source-based commutation of leakage energy. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 3, p. 1734–1746, mar. 2015.

BOGUSLAW, G. et al. The experimental coaxial transformer - technology and characteristics. European Conference on Power Electronics and Applications. Anais...: 2005.Dresden: IEEE, 2006

CHEN, H.; DIVAN, D. High-frequency transformer design for the soft-switching solid state transformer (S4T). Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...: 2017.Tampa: IEEE, mar. 2017

CHEN, H.; PRASAI, A.; DIVAN, D. Dyna-C: A Minimal topology for bidirectional solid-state transformers. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 2, p. 995–1005, fev. 2017.

DE LEON, F.; PURUSHOTHAMAN, S.; QASEER, L. Leakage inductance design of toroidal transformers by sector winding. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 1, p. 473–480, jan. 2014.

DONCKER, R. W. A. A. D.; DIVAN, D. M.; KHERALUWALA, M. H. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 27, n. 1, p. 63–73, 1991.

FALCONES, S.; AYYANAR, R.; MAO, X. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 5, p. 2192–2203, 2013.

FALCONES, S.; MAO, X.; AYYANAR, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Anais...* jul. 2010

FILCHEV, T. et al. Design of high voltage high frequency transformer for pulsed power applications. *Pulsed Power Conference. Anais...*: 2009.Geneva: IET, set. 2009

HERNANDEZ, I.; DE LEON, F.; GOMEZ, P. Design formulas for the leakage inductance of toroidal distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2197–2204, out. 2011.

HURLEY, W. G.; WÖLFLE, W. H. *Transformers and inductors for power electronics*. Noida: Noida, 2013.

JESZENSZKY, S. History of transformers. *IEEE Power Engineering Review*, v. 16, n. 12, p. 9, 1996.

KADAVELUGU, A. et al. High-frequency design considerations of dual active bridge 1200 V SiC MOSFET DC-DC converter. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...*: 2011.Fort Worth: IEEE, mar. 2011

KAZIMIERCZUK, M. K. *High-frequency magnetic components*. 2. ed. Ohio: Ohio, 2013.

KHERALUWALA, M. H.; NOVOTNY, D. W.; DIVAN, D. M. Design considerations for high power high frequency transformers. *Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists. Anais...*: 1990.San Antonio: IEEE, 2002

MANJREKAR, M. D.; KIEFERNDORF, R.; VENKATARAMANAN, G. Power electronic transformers for utility applications. *Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Anais...*: 2000.Rome: IEEE, 2002

MICHON, M. et al. A three-port bi-directional converter for hybrid fuel cell systems. *Annual Power Electronics Specialists Conference. Anais...*: 2004.Aachen: IEEE, 2004

ORTIZ, G. et al. Medium frequency transformers for solid-state-transformer applications: Design and experimental verification. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). Anais...*: 2013.Kitakyushu: IEEE, abr. 2013

PEREZ, M. A. et al. A new topology for high voltage, high frequency transformers. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...*: 1995.Dallas: IEEE, 2002

QIANG, M.; WEI-YANG, W.; ZHEN-LIN, X. A multi-directional power converter for a hybrid renewable energy distributed generation system with battery storage. *International Power Electronics and Motion Control Conference. Anais...*: 2006.Shangai: IEEE, 2009

RAULS, M. S.; NOVOTNY, D. W.; DIVAN, D. M. Design considerations for high-frequency coaxial winding power transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 2, p. 375–381, mar. 1993.

ROTHMUND, D. et al. 10kV SiC-based isolated DC-DC converter for medium voltage-connected solid-state transformers. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Anais...: 2015. Charlotte: IEEE, mar. 2015

SHE, X.; HUANG, A. Q.; BURGOS, R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, v. 1, n. 3, p. 186–198, set. 2013.

SHUAI, P.; BIELA, J. Design and optimization of medium frequency, medium voltage transformers. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Anais...: 2013.Lille: IEEE, set. 2013

STEIGER, U.; MARIETHOZ, S. Method to design the leakage inductances of a multiwinding transformer for a multisource energy management system. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Anais...: 2010.Lille: IEEE, 2011

TAO, H. et al. Family of multiport bidirectional DC-DC converters. IEE Proceedings - Electric Power Applications, v. 153, n. 3, p. 451–458, maio 2006.

THORNTON. Materiais. Disponível em: <http://www.thornton.com.br/materiais.htm>. Acesso em: 10 out. 2017.

WALTRICH, G.; DUARTE, J. L.; HENDRIX, M. A. M. Multiport converters for fast chargers of electrical vehicles - Focus on high-frequency coaxial transformers. International Power Electronics Conference (ECCE ASIA). Anais...: 2010.Sapporo: IEEE, jun. 2010

# CAPÍTULO 15

## DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS EM BORRACHA DE ESTIRENO- BUTADIENO (SBR) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO

*Data de aceite:* 10/01/2022

*Data de submissão:* 15/11/2021

### **Harison Franca do Santos**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4413434710945852>

### **Arthur Pimentel de Carvalho**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1871599705324285>

### **Carlos Toshiyuki Hiranobe**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6394135976740037>

### **Eduardo Roque Budenberg**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5528617902631667>

### **Gabriel Deltrejo Ribeiro**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Ciência e Tecnologia,  
Departamento de Física, Campus de  
Presidente Prudente  
Presidente Prudente, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/3536726680653435>

### **Giovanni Barrera Torres**

Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM),  
Departamento de Ingeniería de Diseño  
Industrial  
Medellín, Colombia  
<http://lattes.cnpq.br/9777703901172514>

### **Jose Francisco Resende**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/3023885342426808>

### **Leonardo Lataro Paim**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/4328309612941987>

### **Leandra Oliveira Salmazo**

Universidade de Valladolid (Uva),  
Departamento de Física da Matéria  
Condensada, Campus de Valladolid  
Valladolid, Espanha  
<http://lattes.cnpq.br/83444481361054517>

### **Miguel Ángel Rodríguez Pérez**

Universidade de Valladolid (Uva),  
Departamento de Física da Matéria  
Condensada, Campus de Valladolid  
Valladolid, Espanha  
<https://orcid.org/0000-0002-3607-690X>

### **Renivaldo José dos Santos**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Engenharia de Energia, Campus de Rosana  
Rosana, SP, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/0254580245173848>

**RESUMO:** Este trabalho baseou-se na avaliação da densidade de ligações cruzadas em compostos de borracha de estireno butadieno (SBR) vulcanizada em três diferentes sistemas de cura: convencional (CV), semi-eficiente (SEV) e eficiente (EV) a partir dos seguintes métodos de caracterização: inchamento em solvente orgânico utilizando a Equação de Flory-Rehner; resistência à tração por meio da Equação de Mooney-Rivlin; análise dinâmico-mecânica (DMA). Os resultados dos ensaios mostraram que o sistema EV, embora tenha apresentado menores índices de reticulação e baixa resistência à abrasão, formou compostos de borracha com propriedades superiores quanto à resistência à tração na ruptura e menor tempo de vulcanização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Borracha sintética; densidade de ligações cruzadas; Flory-Rehner; Mooney-Rivlin; SBR.

## DETERMINATION OF CROSSLINK DENSITY FOR STYRENE-BUTADIENE RUBBER (SBR) IN DIFFERENTS VULCANIZATION SYSTEMS

**ABSTRACT:** This work was based on the evaluation of crosslink density in styrene butadiene rubber (SBR) compounds vulcanized in three different curing systems: conventional (CV), semi-efficient (SEV) and efficient (EV) based on the following characterization methods: swelling in organic solvent using the Flory-Rehner equation; tensile strength through the Mooney-Rivlin Equation; dynamic-mechanical analysis (DMA). The tests showed that the EV system, even with lower crosslinking indices, showed a better in the results of tensile strength and maximum torque combined with a shorter curing time, compared to the other systems - despite the lower values of hardness and abrasion resistance.

**KEYWORDS:** Synthetic rubber; Crosslink density; synthetic rubber; Flory-Rehner; Mooney Rivlin; SBR.

## 1 | INTRODUÇÃO

A borracha de estireno-butadieno, SBR, é um tipo sintético de elastômero formado a partir dos monômeros de estireno e butadieno, sendo obtida a partir da emulsão na forma quente ou fria. Este tipo de elastômero representa grande parcela da borracha utilizada na indústria, principalmente na indústria automobilística, diversificando-se entre aplicações simples como correias e mangueiras a aplicações sofisticadas de pneus (CHU *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2015). A grande vantagem da borracha SBR sobre as demais borrachas sintéticas se deve principalmente ao baixo custo, boas propriedades físicas e sua estabilidade ao envelhecimento térmico - enquanto vulcanizada. O desempenho do SBR está associado as reticulações formadas a partir do processo de vulcanização, que se resume na criação de “links” entre as cadeias elastoméricas, melhorando o desempenho térmico e mecânico do composto (COSTA *et al.*, 2003).

O processo de vulcanização é bastante complexo, sendo bastante abordado na literatura, por promover, a partir de um agente de cura e por ação do calor, alterações físicas na molécula da borracha formando uma rede tridimensional conectada (COSTA *et al.*, 2003). Atualmente o agente vulcanizante mais utilizado é o enxofre devido ao baixo

custo e sua eficiência. Além disso, outros reagentes químicos podem ser adicionados durante a formulação da borracha. Eles têm a função de aprimorar o processo de acordo com aplicação, flexibilizando a manipulação das propriedades finais desejadas no composto (LI *et al.*, 2020). Este é o caso dos aceleradores e ativadores. O primeiro, como o próprio nome diz, serve principalmente para reduzir o tempo de cura do processo, e a razão entre acelerador e enxofre,  $r = \text{acelerador/enxofre}$ , permite a distinção do sistema de vulcanização da borracha, denominados de convencional (CV), com  $r$  entre 0,1 e 0,6; semi-eficiente (SEV), com  $r$  entre 0,7 e 2,5; eficiente (EV), com  $r$  entre 2,5 e 12 (CUI *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019). Cada sistema promove diferentes proporções de ligações, que são classificadas entre monossulfídicas, dissulfídicas e polissulfídicas. Além disso a predominância de algum tipo dessas ligações promove diferentes propriedades no material. Outro parâmetro bastante importante na análise do comportamento da borracha é a densidade de ligações cruzadas - responsável pela melhora do desempenho físico do composto reticulado (CHOI e KIM, 2012).

Nos últimos anos, vários estudos avaliando o comportamento do SBR com a incorporação de cargas foram produzidos, o que contribuiu no desenvolvimento de novos materiais para diversas aplicações, como exemplo de cargas podemos citar: negro de carbono, sílica, carbonato de cálcio, argilas, fibras vegetais e entre outros (ESMAEELI e FARHAD, 2020).polymers have attracted the attention of various industrial engineering systems. Accurate examination and measurement of physical properties of polymers is a key step required for their full-scale adoption and integration in industrial settings. Simulation studies, provide a relatively inexpensive and valuable analytical framework for analyzing the physical properties of such systems. Generalized Maxwell Model (GMM. Neste contexto, o presente trabalho estudou a densidade de ligações cruzadas e as propriedades mecânicas dos compostos reticulados nos sistemas de vulcanização convencional, semi-eficiente e eficiente, sem a necessidade de incorporação de cargas.

## 2 | METODOLOGIA

Os compostos foram confeccionados a partir de três sistemas de vulcanização, convencional (CV), semi-eficiente (SEV) e eficiente (EV). A Tabela 1 apresenta as formulações utilizadas na preparação dos compostos em PHR (*per hundred rubber*) de acordo com o sistema de vulcanização.

Formulação dos compostos			
Materiais	Sistemas de vulcanização (phr)		
	Convencional	Semi-eficiente	Eficiente
SBR 1502	100,00	100,00	100,00
Ácido esteárico	2,0	2,0	2,0
Óxido de zinco	4,0	4,0	4,0
Enxofre	2,0	1,0	0,5
MBTS*	0,8	1,0	1,5
TMTD**	0,4	0,5	0,5

\* dissulfeto de dibenzotiazol \*\*dissulfeto de Tetrametiluram

Tabela 1: Formulação dos compostos e sistemas de vulcanização.

## 2.1 Reometria

Os dados foram obtidos a uma temperatura de 160 °C e arco de 1°, conforme a norma **ASTM D5289**. Por meio das curvas de reometria foram determinados os parâmetros reométricos como: torque mínimo ( $M_L$ ), torque máximo ( $M_H$ ), tempo de pré-cura ( $t_{S1}$ ) e tempo ótimo de vulcanização ( $t_{90}$ ).

## 2.2 Dureza e resistência à abrasão

A dureza foi determinada em um durômetro na escala Shore A, de acordo com a norma **ASTM D2240**. A equação 1 foi utilizada para calcular o índice de resistência à abrasão.

$$IR = \frac{m_1 d_t}{m_t d_1} * 100 \quad (1)$$

Onde: IR é o índice de resistência à abrasão,  $m_1$  é a massa da borracha padrão,  $\rho_1$  é a densidade da borracha teste,  $m_t$  a massa da borracha teste e  $d_1$  a densidade da borracha padrão.

## 2.3 Densidade de Ligações Cruzadas por inchamento (Flory-Rehner)

A densidade de ligações cruzadas dos compostos foi determinada pela técnica de inchamento com amostras 0,25 0,05 g imersas em tolueno por 5 dias. Posteriormente, as amostras foram retiradas, secadas para eliminar o excesso do solvente e pesadas. Em seguida, foram levadas a uma estufa, sob temperatura de 60 °C por 24 horas e pesadas novamente. Assim, com os dados da massa da amostra seca, massa da amostra após inchamento e massa do solvente preso na amostra a densidade de ligação cruzada foi calculada utilizando a Equação 2 desenvolvida por Flory-Rehner:

$$\eta = \frac{-(\ln(1 - V_B) + V_B + x(V_B)^2)}{(\rho_B)(V_0)(V_B^{\frac{1}{3}} - \frac{V_B}{2})} \quad (2)$$

Onde,  $\eta$  é a densidade de ligações cruzadas ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ),  $X$  o parâmetro de interação polímero-solvente ou parâmetro de *Flory-Huggins* (0,39),  $\rho_B$  a densidade da borracha, o volume molar do solvente ( $106,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) e  $V_B$  a fração de volume de borracha da forma inchada, determinada a partir do aumento de peso pelo inchamento.

## 2.4 Densidade de Ligações Cruzadas pelo Método de Mooney-Rivlin

Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma **ASTM D412**, Método A, em um equipamento da marca EMIC modelo DL 200, a velocidade de  $500 \text{ mm min}^{-1}$  com célula de carga de 500 N. A equação de Mooney-Rivlin foi usada para a determinação da densidade de ligações cruzadas baseado no ensaio de tensão-deformação. Para o presente material foram usadas as Equações 3 e 4 (NÖCHEL *et al.*, 2015).

$$F = 2A_0(\lambda - \lambda^{-2})(C_1 + C_2\lambda^{-1}) \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{(\lambda - \lambda^{-2})} = 2C_1 + \frac{2C_2}{\lambda} \quad (4)$$

Onde  $F$  é a força requerida no material vulcanizado,  $A_0$  é a área transversal não esticada do material,  $V_f$  é a fração do volume do material inchado obtido na Equação de Flory-Rehner,  $\sigma$  é identificado como  $F/A_0$ ,  $\lambda$  é a relação de extensão ( $1 + \varepsilon$ ) sendo  $\varepsilon$  a deformação e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes que caracterizam o material (HOWSE *et al.*, 2018; EISELE, 1990). Estas constantes, por sua vez, podem ser determinadas graficamente, ao plotar  $\frac{\sigma}{(\lambda - \lambda^{-2})}$  por  $1/\lambda$  é possível determinar as constantes  $C_1$  e  $C_2$ , uma vez que  $C_1$  é interpretado como o ponto da curva que corta o eixo ordenado, assim obtendo o seu valor. E  $C_2$  é interpretado como a inclinação da curva (HAGEN; SALMÉN; STENBERG, 1996). De mesmo modo,  $C_1$  é utilizado para determinar a densidade de ligações cruzadas manifestadas fisicamente ( $n_f$ ) a partir da seguinte Equação 5 (SOMBATSOMPOP, 1998).

$$n_f = \frac{C_1}{RT} \quad (5)$$

Em que  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  é a temperatura absoluta.

## 2.5 Densidade de Ligações Cruzadas por DMA

Neste ensaio, a densidade de ligações cruzadas foi determinada utilizando o equipamento da marca Mettler e modelo DMA-861e, sendo que o range de temperatura adotado foi de  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  com uma taxa de aquecimento de  $5 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ , em corpos de prova com dimensões de  $1 \times 2 \times 10 \text{ cm}$  aproximadamente. Os corpos de prova foram submetidos a frequência de 3 Hz para avaliar a sua resposta e seu tempo de relaxação. A determinação da densidade de ligações cruzadas por DMA foi realizada a partir da Equação 6:

$$n = \frac{E'}{6RT} \quad (6)$$

Onde  $n$  é o grau de reticulação do material,  $E'$  o módulo de armazenamento,  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  a temperatura absoluta.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Reometria

A Figura 1, item a, apresenta os valores dos torques mínimo e máximo obtidos nos ensaios reométricos dos compostos, no item b, é apresentado o tempo ótimo de vulcanização,  $t_{90}$ . Todos estes dados foram obtidos por meio dos ensaios reométricos. Os valores de torque mínimo,  $M_L$ , estão associados a viscosidade do composto não reticulado, enquanto os de torque máximo,  $M_H$ , estão associados ao efeito das reticulações, pois elas atuam de forma a restringir a mobilidade das cadeias, tornando mais difícil o movimento realizado pelo platô do reômetro. Sendo assim, é possível obter o parâmetro associado a elasticidade do material promovido pelas reticulações formadas durante a vulcanização,  $\Delta M = M_H - M_L$ . O  $t_{90}$  indica o tempo necessário para realizar a formação de 90 % das ligações cruzadas e foi usado para determinar os tempos de moldagem das amostras para os demais ensaios.

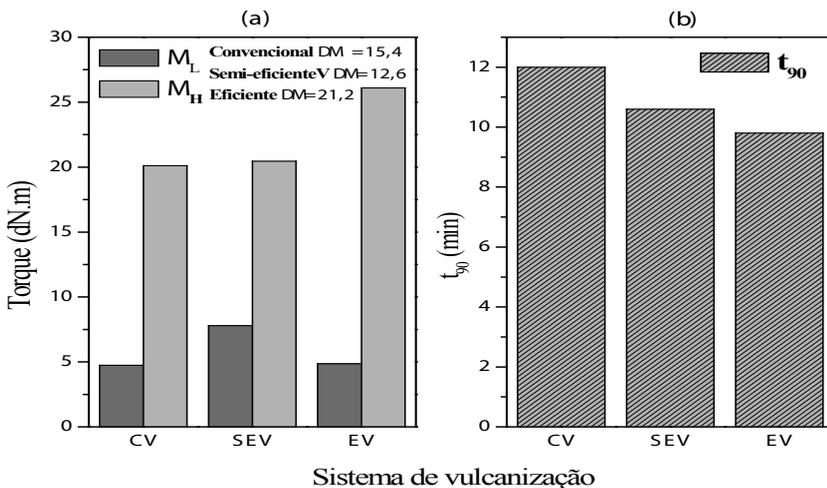


Figura 1:(a) Dados de torque máximo e mínimo; (b) tempo ótimo de vulcanização.

Observa-se valores próximos para os torques mínimos dos sistemas CV e EV, exceto para o sistema SEV que apresentou valor relativamente maior devido à maior viscosidade do composto. Após a vulcanização nota-se grande aumento nos valores de torque, sendo  $\Delta M$  maior para EV, conferidos pela formação das pontes de enxofre. Por fim observa-se que o valor do tempo ótimo de vulcanização foi menor para o sistema EV, SEV

e CV respectivamente – indicando correlação inversamente proporcional entre o tempo de vulcanização e o maior teor de aceleradores.

### 3.2 Dureza

A Figura 2 apresenta os resultados de dureza e índice de resistência à abrasão da borracha vulcanizada. A dureza está diretamente relacionada a densidade de reticulação e fornece um rápido indicativo da variação de propriedades mecânicas afetadas por mudanças nas condições químicas ou de processamento (MOSTAFA *et al.*, 2009). Já o índice de resistência à abrasão, como o próprio nome sugere, é um indicativo da resistência do material sob efeito abrasivo, baseado na perda de massa durante o ensaio. Os resultados de dureza são maiores para CV, SEV e EV (ESCÓCIO *et al.*, 2004). Nesse contexto, o maior índice de dureza para o sistema convencional sugere também uma maior quantidade de ligações cruzadas.

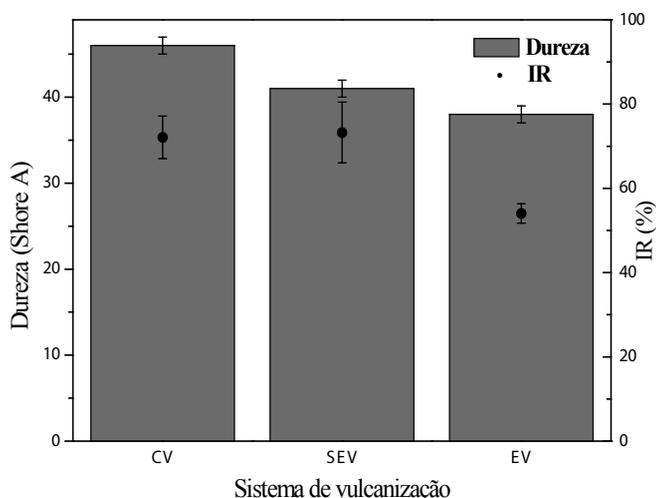


Figura 2: Ensaio de dureza e índice de resistência à abrasão para os três sistemas de vulcanização.

Para o índice de resistência à abrasão observa-se que SEV, juntamente com CV, possuem maiores valores de IR, ou seja, menores perdas de massas em relação ao desgaste abrasivo, isto pode ser interpretado como a melhor resposta ao ensaio. Este índice também está associado a densidade de ligações cruzadas.

### 3.3 Densidade de ligações cruzadas

A Figura 3 apresenta os resultados de densidade de ligações cruzadas obtidas a partir das técnicas inchamento (equação de Flory-Rehner), Mooney-Rivlin e o DMA. A densidade de reticulação é um importante parâmetro que ajuda a entender o comportamento dos vulcanizados (ABD-EL-MESSIEH e ABD-EL-NOUR, 2003). Seus valores estão

associados a parâmetros como quantidade de enxofre na formulação, temperatura e tempo de vulcanização, além da quantidade de acelerador. O ensaio de inchamento avalia a quantidade de regente que permeia a borracha, inchando-a, assim, quanto maior a quantidade de ligações cruzadas menor será seu volume inchado do composto, e a partir da equação de Flory-Rehner é possível obter a densidade de ligação cruzada (GEORGE, KNÖRGEN e THOMAS, 1999). A análise de tração, a partir da equação de Mooney-Rivlin, permite obter valores de densidade de reticulação manifestadas fisicamente (SOMBATSOMPOP, 1998) was observed under a constrained swelling condition of 100% elongation (by length,(HAGEN, SALMÉN e STENBERG, 1996). Já os valores obtidos por DMA permitem calcular a densidade de ligações cruzadas avaliando a energia elástica armazenada, pois no estado borrachoso as cadeias laterais e ramificações se movimentam sob influência do aumento da temperatura, contudo a presença das pontes de enxofre limita o movimento rotacional dos segmentos (HAGEN, SALMÉN e STENBERG, 1996; SHENG, LEE e KESSLER, 2009). Na Figura 3 observa-se maiores valores de densidade de ligações para CV, SEV e EV, respectivamente, conforme os ensaios de inchamento e Mooney-Rivlin. Para o ensaio de DMA nota-se que SEV difere dos demais, contudo, a diferença pode estar relacionada ao erro padrão dos valores, bem como o tempo de resposta do material – que está associado com à frequência do ensaio.

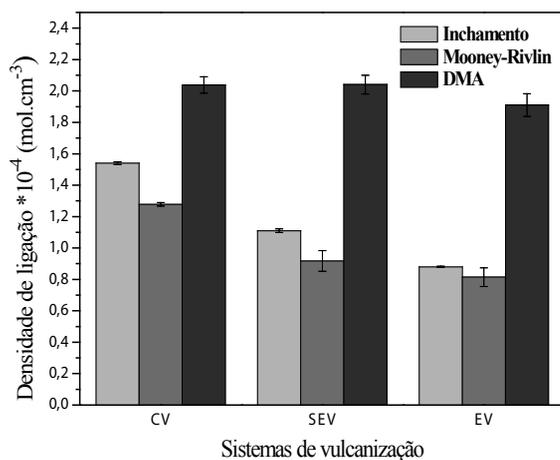


Figura 3: Densidade de ligações cruzadas a partir de diferentes ensaios.

Além disso, esperava-se que os resultados obtidos por Mooney-Rivlin fossem maiores ao inchamento, já que este possui contribuições de emaranhamento que afetam a mobilidade das cadeias. Contudo, essa discrepância pode estar associada a contribuição de diferentes emaranhados que variam de acordo com o estresse desenvolvido no sistema. Por fim, os resultados sugerem que a contribuição dos emaranhados de cadeias

são maiores em densidades de reticulação mais baixas (DIEZ *et al.*, 2010; OGURA e TAKAHASHI, 2003) 2-mercaptobenzothiazole disulphide (MBTS). Os valores de densidade de ligações cruzadas obtidos através de DMA possui patamares superiores aos ensaios anteriores em função da dependência do tempo de resposta do material aos efeitos de desemaranhamento das cadeias da borracha (HAGEN, SALMÉN e STENBERG, 1996).

### 3.4 Resistência à tração

A Figura 4 apresenta as curvas obtidas pelo ensaio de tração, bem como os valores de tensão de ruptura. Em geral, o valor desta tensão está associado a densidade de ligações cruzadas, mobilidade das cadeias, tipo de ligação e cristalização do material sob alongamento, entretanto, o SBR é um polímero de comportamento amorfo, o que faz com que os resultados obtidos sejam referentes as características supracitadas, exceto pela cristalização induzida por deformação, além disso, quanto maior a quantidade de ligações cruzadas menor é a deformação do material, já que as cadeias poliméricas ficam mais restritas na presença das pontes de enxofre (SOUZA OLIVEIRA, De *et al.*, 2016).

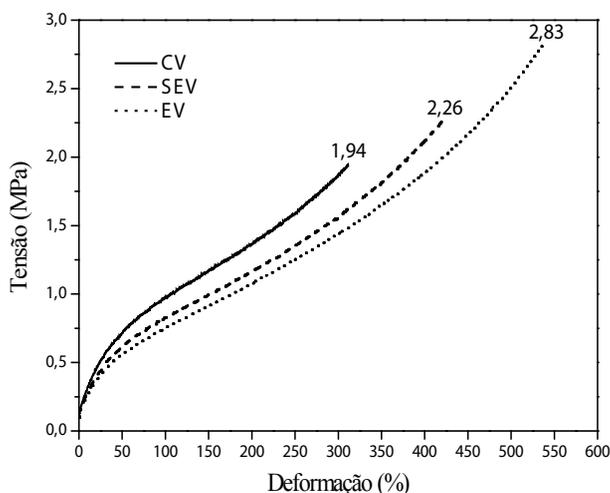


Figura 4: Curva de tensão versus deformação e tensão de ruptura.

Como esperado, CV teve a menor deformação até a ruptura, seguido por SEV e EV, respectivamente, dado a maior densidade de ligações restringindo o movimento das cadeias. Além disso, esperava-se também maiores resultados de tensão de ruptura seguindo a mesma ordem, todavia nota-se que EV apresentou valores maiores. Esta incongruência pode ser explicada a partir da premissa de tensão de ruptura não é função linear do aumento da densidade de reticulação – apesar de sua dependência, ela atinge um pico e a partir daí o aumento no número de ligações causa a diminuição no valor de tensão

de ruptura (DUDEK e BUECHE, 1964; KOK e YEE, 1986).

## 4 | CONCLUSÃO

Sob a perspectiva dos sistemas de vulcanização convencional, semi-eficiente e eficiente, utilizando SBR vulcanizada e cura isotérmica, o sistema de vulcanização EV, mesmo com menores índices de reticulação, apresentou maiores valores de tensão de ruptura e torque máximo, apesar de seus valores de dureza e resistência à abrasão serem inferiores em comparação com os demais. Sendo assim, espera-se que a obtenção da SBR vulcanizada utilizando o sistema EV com níveis de reticulação semelhantes aos obtidos para SEV e CV deste estudo, mas aumentando a proporção de acelerador e enxofre, possa promover ao vulcanizado propriedades de dureza e resistência à abrasão superiores àquelas encontradas para SEV e CV. Com relação as ligações cruzadas notou-se a esperada correlação entre a densidade de *crosslinks* e quantidade de enxofre presente nas amostras, principalmente para os ensaios de inchamento e Mooney-Rivlin, ou seja, a proporção de enxofre influenciou diretamente o número de ligações na SBR. Por fim, conclui-se que nas amostras estudadas neste trabalho, juntamente com os níveis de reticulação encontrados – e, utilizando a SBR, maiores índices de reticulação não contribuem efetivamente para promoção maiores índices de propriedades de tensão de ruptura, tampouco torque máximo  $M_H$ .

## REFERÊNCIAS

ABD-EL-MESSIEH, S. L.; ABD-EL-NOUR, K. N. **Effect of curing time and sulfur content on the dielectric relaxation of styrene butadiene rubber.** Journal of Applied Polymer Science, v. 88, n. 7, p. 1613–1621, 2003.

CHOI, S. S.; KIM, J. C. **Lifetime prediction and thermal aging behaviors of SBR and NBR composites using crosslink density changes.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 18, n. 3, p. 1166–1170, 2012.

CHU, H. Z.; LIU, D.; CUI, Z. W.; WANG, K.; QIU, G. X.; LIU, G. Y. **Effect of crosslink density on solubility parameters of styrene butadiene rubber and the application in pre-screening of new potential additives.** Polymer Testing, v. 81, p. 106253, 2020.

COSTA, H. M. DA; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R.; FURTADO, C. R. G. **Aspectos históricos da vulcanização.** Polímeros, v. 13, n. 2, p. 125–129, 2003.

CUI, J.; ZHANG, L.; WU, W.; CHENG, Z.; SUN, Y.; JIANG, H.; LI, C. **Zinc oxide with dominant (1 0 0) facets boosts vulcanization activity.** European Polymer Journal, v. 113, p. 148–154, 2019.

DIEZ, J.; BELLAS, R.; LÓPEZ, J.; SANTORO, G.; MARCO, C.; ELLIS, G. **Study of the crosslink density, dynamo-mechanical behaviour and microstructure of hot and cold SBR vulcanizates.** Journal of Polymer Research, v. 17, n. 1, p. 99–107, 2010.

DUDEK, T. J.; BUECHE, F. **Tensile strength of gum and reinforced EPR and SBR vulcanizates.** Journal of Applied Polymer Science, v. 8, n. 2, p. 555–564, 1964.

ESCÓCIO, V. A.; MARTINS, A. F.; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R. **Efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas e dinâmico-mecânicas de composições de borracha natural com mica.** Polímeros, v. 14, n. 1, p. 13–16, 2004.

ESMAEELI, R.; FARHAD, S. **Parameters estimation of generalized Maxwell model for SBR and carbon-filled SBR using a direct high-frequency DMA measurement system.** Mechanics of Materials, v. 146, n. November, p. 1–8, 2020.

GEORGE, S. C.; KNÖRGEN, M.; THOMAS, S. **Effect of nature and extent of crosslinking on swelling and mechanical behavior of styrene-butadiene rubber membranes.** Journal of Membrane Science, v. 163, p. 1–17, 1999.

HAGEN, R.; SALMÉN, L.; STENBERG, B. **Effects of the type of crosslink on viscoelastic properties of natural rubber.** Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, v. 34, n. 12, p. 1997–2006, 1996.

KOK, C. M.; YEE, V. H. **The effects of crosslink density and crosslink type on the tensile and tear strengths of NR, SBR and EPDM gum vulcanizates.** European Polymer Journal, v. 22, p. 341–345, 1986.

LI, K.; YOU, J.; LIU, Y.; ZHU, K.; XUE, C.; GUO, X.; WANG, Z.; ZHANG, Y. **Functionalized starch as a novel eco-friendly vulcanization accelerator enhancing mechanical properties of natural rubber.** Carbohydrate Polymers, v. 231, p. 1–29, 2020.

LI, Y.; WU, Y.; LUO, Y.; CHAN, T. W.; ZHANG, L.; WU, S. **A combined experimental and molecular dynamics simulation study on the structures and properties of three types of styrene butadiene rubber.** Materials Today Communications, v. 4, p. 35–41, 2015.

MOSTAFA, A.; ABOUEL-KASEM, A.; BAYOUMI, M. R.; EL-SEBAIE, M. G. **Insight into the effect of CB loading on tension, compression, hardness and abrasion properties of SBR and NBR filled compounds.** Materials and Design, v. 30, p. 1785–1791, 2009.

NÖCHEL, U.; REDDY, C. S.; WANG, K.; CUI, J.; ZIZAK, I.; BEHL, M.; KRATZ, K.; LENDLEIN, A. **Nanostructural changes in crystallizable controlling units determine the temperature-memory of polymers.** Journal of Materials Chemistry A, v. 3, n. 16, p. 8284–8293, 2015.

OGURA, K.; TAKAHASHI, M. **Uniaxial and biaxial extension behavior of a lightly cross-linked PMMA melt at constant strain rates.** Nihon Reorji Gakkaishi, v. 31, n. 2, p. 79–83, 2003.

SHENG, X.; LEE, J. K.; KESSLER, M. R. **Influence of cross-link density on the properties of ROMP thermosets.** Polymer, v. 50, n. 5, p. 1264–1269, 2009.

SOMBATSOMPOP, N. **Investigation of swelling behavior of NR vulcanizates.** Polymer - Plastics Technology and Engineering, v. 37, n. 1, p. 19–39, 1998.

SOUZA OLIVEIRA, M. A. DE; CASSU, S. N.; MELLO, S. A. C. DE; DUTRA, J. C. N. **Influência do método de vulcanização nas propriedades mecânicas e na densidade de ligações cruzadas da borracha natural.** Polímeros, v. 26, p. 43–48, 2016.

WANG, M.; ZHU, J.; ZHANG, S.; YOU, G.; WU, S. **Influencing factors for vulcanization induction period of accelerator / natural rubber composites: Molecular simulation and experimental study.** Polymer Testing, v. 80, n. July, p. 106145, 2019.

HOWSE, Samantha et al. **Experimental determination of the quantity and distribution of chemical crosslinks in unaged and aged natural rubber, part 1: Peroxide vulcanization.** Polymer Testing, v. 70, p. 263-274, 2018.

NORMA, ASTM D 2240. **Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.** ASTM American Society for Testing and Materials, 2010.

NORMA, ASTM D 412 - **Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension.** ASTM American Society for Testing and Materials; 2013.

SALEESUNG, Thanisararat et al. **Correlation of crosslink densities using solid state NMR and conventional techniques in peroxide-crosslinked EPDM rubber.** Polymer, v. 56, p. 309-317, 2015.

SOMBATSOMPOP, N. **Practical Use of the Mooney–Rivlin Equation for Determination of Degree of Crosslinking of Swollen NR Vulcanisates.** J. Sci. Soc. Thailand, v. 24, n. 3, p. 199-204, 1998.

U. Eisele (Ed.), **An introduction to polymer physics**, Springer-Verlag, Berlim (1990).

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**JOÃO DALLAMUTA** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

ADMI 106, 108

Alimentadores 90, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105

Angulação 140, 141, 142, 143, 144, 147, 150, 151

Aprendizagem baseada em projetos 115, 118

Atenuação de riscos 114, 115

### B

Balanco energético 20, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Barramento magnético 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Bomba centrífuga 33, 35, 41, 46

Borracha sintética 199

### C

Circuitos digitais 21

Cliente 106, 108, 110, 112, 113

Controle adaptativo 50

Conversor CA/CC 153, 158

Conversor MAB 184, 187, 188

Correntes de Foucault 153, 155, 162

### D

Densidade de ligações cruzadas 198, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 209

Descargas atmosféricas 119, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 137, 138, 139

Direcionamento 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151

### E

Economic feasibility 15

Eficiência energética 33, 35, 40, 41, 140, 151

Electronic spreadsheet 15

Energia solar 20, 113, 140, 141, 143, 145, 150, 151, 152

Engenharia elétrica 49, 61, 62, 114, 115, 138, 152, 182, 184, 210

Engine knock 1, 2, 3, 13, 14

### F

Filtros probabilísticos 61, 62, 63, 72

Flory-Rehner 199, 201, 202, 204, 205

Freio eletromagnético 153, 154, 156, 158, 159, 161, 165, 166, 181, 182

Fuzzy cognitive maps 50, 51, 58, 59, 60

## I

Inversor de frequência 33, 34, 35, 39, 40, 43

## L

Localização 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 132, 143, 144

Logistic regression 1, 2, 3, 4, 14

## M

Machine learning 1, 4

Medição de alimentadores 90

Misturador industrial 50

Model based design 1

Mooney-Rivlin 199, 202, 204, 205, 207

## N

Núcleos magnéticos 184

## O

Operações modulares 21

Ouvidoria 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113

## P

Perda de energia 90

Photovoltaic energy 15, 16, 20

Prazos serviços comerciais 106

Processamento digital de sinais 21

## Q

Qualidade de energia 90, 91, 92, 167

## R

Red de distribución eléctrica 74

Responsabilidade social 115, 116, 118

Robótica 61, 62, 63, 64, 67, 68, 72, 73, 162

## **S**

Satisfação 106, 108, 109, 111, 112, 113

SBR 198, 199, 200, 201, 206, 207, 208

Sistema de distribuição de água 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 46

Sistemas de proteções contra descargas atmosféricas 128

Smart grid 74, 75, 86, 88

## **T**

Transformador de estado sólido 184

## **V**

Vehículo eléctrico 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88

Videoaulas 61, 62, 72

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

  
Ano 2022