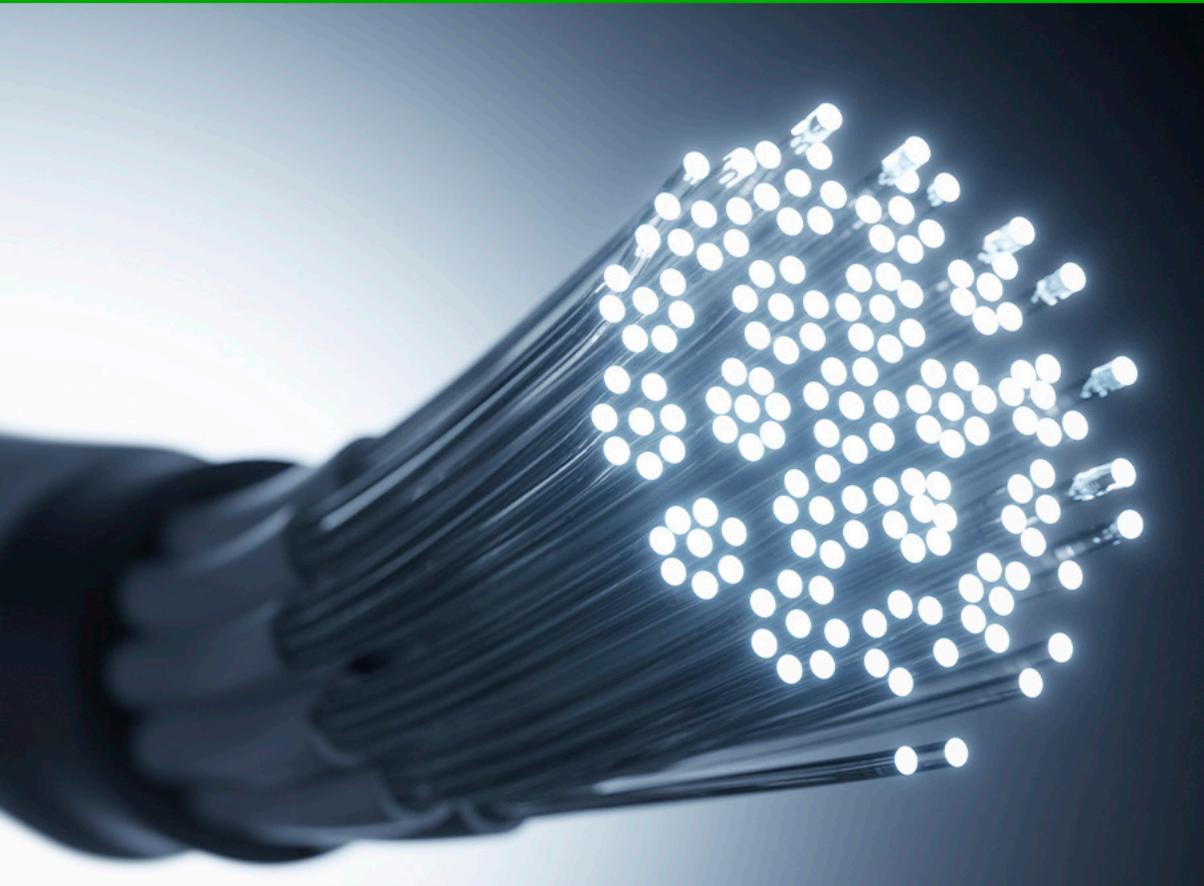


COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

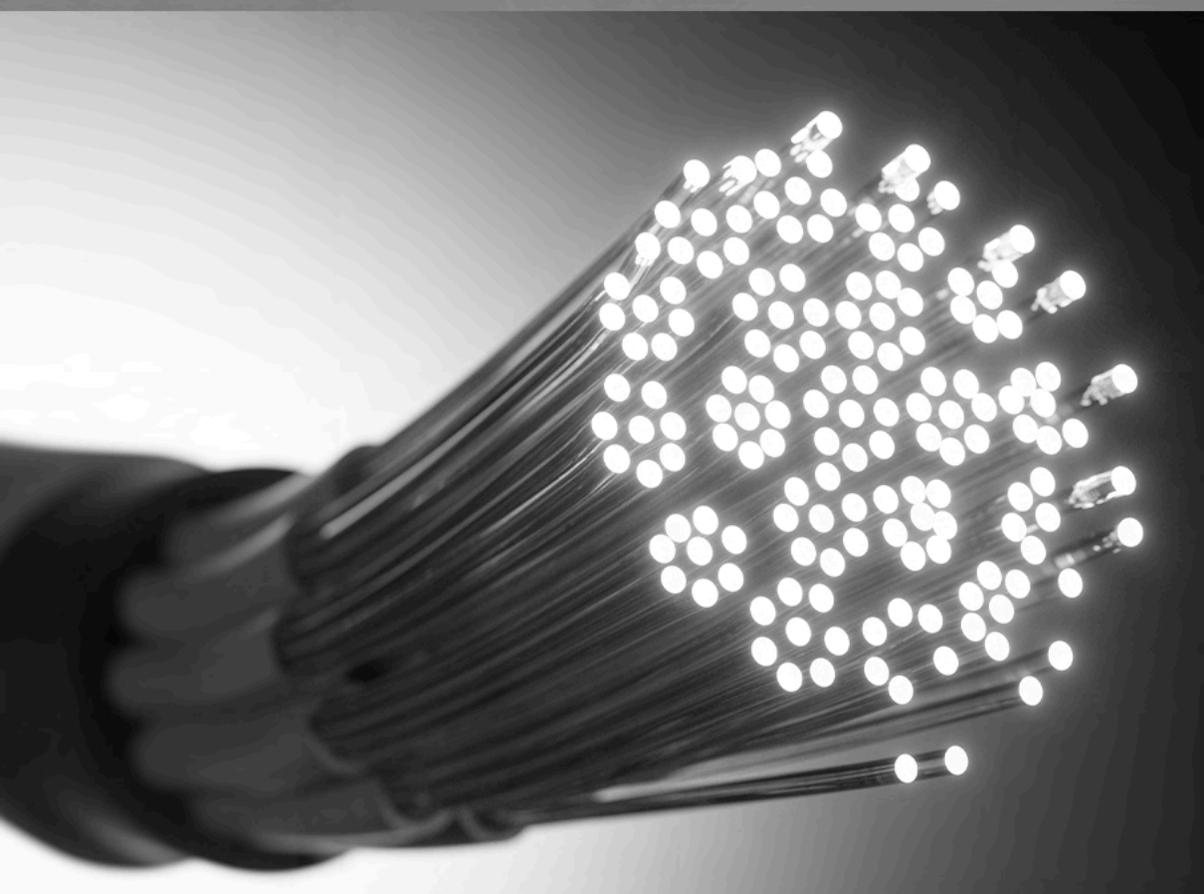


JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)


Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2



JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

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

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 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-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

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

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 Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

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 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
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: Daphynny Pamplona
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica 2 /
Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz
Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-556-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.560211910>

1. Engenharia elétrica. 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

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

PHOTODETECTOR OPTIC POWER OPTIMIZATION TO INCREASE THE GAIN ON SUB-OCTAVE MICROWAVE PHOTONIC LINK

Naiara Tieme Mippo
Paulo Henrique Kiohara Acyoli Bastos
Felipe Streitenberger Ivo
Olympio Lucchini Coutinho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119101>

CAPÍTULO 2..... 14

OPTOELECTRONIC SENSOR APPLIED TO FLOW RATE MEASUREMENTS ON OIL AND GAS INDUSTRY

Alexandre Silva Allil
Fabio da Silva Dutra
Cesar Cosenza de Carvalho
Regina Célia da Silva Barros Allil
Marcelo Martins Werneck

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119102>

CAPÍTULO 3..... 25

ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, PRECISÃO E EXATIDÃO EM SENSORES ÓTICOS FBG E RFBG QUE MEDEM TEMPERATURAS ENTRE 5 °C E 60 °C POR 16 SEMANAS

Karoline Akemi Sato
Camila Carvalho de Moura
Antonio Carlos Ribeiro Filho
Luis Camilo Jussiani Moreira
Valmir de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119103>

CAPÍTULO 4..... 38

EVALUACIÓN PARA INVERSIÓN CON OPTIMIZACIÓN DE SECCIÓN CONDUCTOR Y TENSIÓN DE DISTRIBUCIÓN. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DEL LEY DE KELVIN

Christian Arturo Ramirez Osorio
Enrique Buzarquis
Rodney Damián Fariña Martínez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119104>

CAPÍTULO 5..... 55

STRATEGIES OF VOLTAGE CONTROL BASED IN FUZZY LOGIC ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE, CLEAN AND RENEWABLE GENERATION OPERATING WITH ANOTHER CONVENTIONAL ELECTRIC GENERATION IN WITH RADIAL LOADS IN POWER SYSTEMS STABILITY

Rodney Damián Fariña Martínez
Antonio Carlos Zambroni de Souza
Eliane Valença Nascimento de Lorenci

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119105>

CAPÍTULO 6..... 72

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E ELETROMECAÑICOS” DA ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYOLAS-VILLA HAYES SEM REATOR DESDE A CENTRAL HIDRELÉTRICA ITAIPÚ

Elisandro Rodriguez Buzarquis
Rodney Damián Fariña Martínez
Antônio Carlos Zambroni de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119106>

CAPÍTULO 7..... 86

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE COM METAMATERIAIS CONVENCIONAIS E SUPERCONDUTORES

Arthur Henrique de Lima Ferreira
Lucas Douglas Ribeiro
Rose Mary de Souza Batalha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119107>

CAPÍTULO 8..... 96

DEGRADAÇÃO POR POTENCIAL INDUZIDO (PID): REVISÃO

Hellen Ferreira Barreto Miranda
Luan Peixoto da Costa
Stefhany Oliveira Soares
Jonathan Velasco da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119108>

CAPÍTULO 9..... 108

CAPACITOR BANK ALLOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE DISCRETE PSO ALGORITHM

Luís Henrique Chouay Dall’ Agnese
Carlos Roberto Mendonça da Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5602119109>

CAPÍTULO 10..... 119

DESIGN OF A TRANSMISSION-LINE METAMATERIAL WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION AT S-BAND

Lucas Douglas Ribeiro
Juscelino Júnior de Oliveira
Arthur Henrique de Lima Ferreira
Rose Mary de Souza Batalha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191010>

CAPÍTULO 11..... 129

RADIO PROPAGAÇÃO E MODELAGEM PARA UMA PONTE SOBRE O RIO TOCANTINS

PARA LTE

Alaim de Jesus Leão Costa
Thiago Eleuterio da Silva
Diego Kasuo Nakata da Silva
Leslye Estefania Castro Eras

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191011>

CAPÍTULO 12..... 141

TESTES DE IMUNIDADE CONTRA SURTOS ELÉTRICOS EM ELETRODOMÉSTICOS

Gustavo Oliveira Cavalcanti
Marcílio André Félix Feitosa
Kayro Félyx Henrique Pereira
Manoel Henrique da Nóbrega Marinho
Antonio Samuel Neto
Lucas de Carvalho Sobral
Pollyana Maria Ramos Gonçalves
Douglas Thiago Moreira Lara
Thiago Francisco Gomes
Renato Jardim Teixeira
Wagner Almeida Barbosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191012>

CAPÍTULO 13..... 152

AUTOMAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - O SISTEMA DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO DALI: UM ESTUDO DE CASO

Marcos Noboru Kurata
Ênio Carlos Segatto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191013>

CAPÍTULO 14..... 163

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E CONSTRUTIVAS NO EIXO DO ROTOR EÓLICO

Leonardo Pavan
Evandro André Konopatzki
Cristiane Lionço de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191014>

CAPÍTULO 15..... 172

VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA REGIÃO DO RECÔNCAVO DA BAHIA

Gabriel Garcia Bastos de Almeida
Luanna Valéria Sousa Fonseca
Andréa Jaqueira da Silva Borges

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.56021191015>

SOBRE OS ORGANIZADORES 183

ÍNDICE REMISSIVO..... 184

PHOTODETECTOR OPTIC POWER OPTIMIZATION TO INCREASE THE GAIN ON SUB-OCTAVE MICROWAVE PHOTONIC LINK

Data de aceite: 01/10/2021

Data de Submissão: 06/07/2021

Naiara Tieme Mippo

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
São José dos Campos – SP
<http://lattes.cnpq.br/3471863952786744>

Paulo Henrique Kiohara Acyoli Bastos

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
São José dos Campos – SP
<http://lattes.cnpq.br/4315870934146368>

Felipe Streitenberger Ivo

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
São José dos Campos – SP
<http://lattes.cnpq.br/0013935085701273>

Olympio Lucchini Coutinho

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
São José dos Campos – SP
<http://lattes.cnpq.br/4324540631101004>

ABSTRACT: An investigation of the optic spectral components beating at the photodetector to recover the RF signal at the output of a sub-octave microwave photonic link is presented, by a theoretical and experimental approach. It is demonstrated the best efficiency is achieved when the carrier to sideband ratio (CSR) is 0 dB at a low bias voltage condition on Mach-Zehnder (MZM) intensity modulator. A RF power link gain improvement of 9.7 dB is demonstrated for a same photodetector incident optic power, compared with a link operating at quadrature bias

voltage condition on the MZM.

KEYWORDS: Fiber optic links; low bias photonic links, microwave photonics.

OPTIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA ÓPTICA NO FOTODETECTOR PARA AUMENTO DO GANHO NO ENLACE ANALÓGICO A FIBRA ÓPTICA DE SUB-OITAVA

RESUMO: A análise do batimento entre componentes ópticas espectrais no fotodetector para recuperação do sinal RF na saída de um enlace analógico a fibra óptica de sub-oitava é apresentada através de abordagens teóricas e experimentais. Demonstra-se que a melhor eficiência é atingida quando a diferença entre amplitudes das componentes da portadora óptica e das bandas laterais é 0 dB, condição de baixa tensão de polarização no modulador de intensidade Mach-Zehnder. Uma melhora de 9,7 dB no ganho do enlace é demonstrada neste ponto de operação em comparação com o modulador Mach-Zehnder polarizado em quadratura, com mesma potência óptica incidente no fotodetector.

PALAVRAS-CHAVE: Enlace analógico a fibra óptica; enlace fotônico sob baixa polarização; RF em fotônica.

1 | INTRODUCTION

Microwave photonics (MWP) has been considered a promising technology to implement RF functionalities at high frequency and high bandwidth (BW) long distance transmission lines

and signal processing systems, where conventional electronics circuits based on coaxial cables, waveguides and printed circuits boards (PCB) face limitations, due to high propagation losses and circuitry complexities [2]. The electronic circuit behavior is strongly dependent to the wavelength, and it brings severe design limitations for high bandwidth systems, where the start frequency is far from the stop frequency. In contrast, microwave photonics principle basically consists in modulating an optical carrier with the RF signal, to transmits and processes it at the optic spectrum and finally recover it at the system output by photodetection. The RF signal modulates an optic carrier at frequencies about 200 THz, producing a very low change on the wavelength among all the system bandwidth. Besides, fiber optic also offers other advantages like electromagnetic interference immunity (EMI), low weight and size. Those characteristics have been attracted attention to modern microwave systems implementation on civilian and military application, such as 5G, radio over fiber, electronic warfare systems, radar and remote antennas [7-9]. The most spread architecture of MWP systems uses Mach-Zehnder interferometric modulator (MZM) to intensity modulate (IM) the optic carrier and direct detection (DD) to recover the electric signal, commonly referred as MZM IM-DD analog optical link [2].

Just like any other RF system, the main figures of merit to evaluate an MWP system are the power gain (G), the noise figure (NF) and the spurious free dynamic range (SFDR). On MZM IM-DD systems, the gain and the NF are strongly dependent of the incident photodetector optic power (POP). The higher the POP, the higher the gain. But, unfortunately, the photodetector output noise power increases as the POP grows up. Also, in order to avoid harmonic distortion, the MZM is commonly biased at the quadrature point of its electrooptic transfer function, where the second-order harmonics are completely suppressed [2].

The MZM IM-DD link gain depends on the squared optic power and there is no theoretical superior limit to it. However, in practice, it is limited by the photodetector optic saturation power, limited on few milliwatts for high speed commercial devices. On quadrature biased MZM photonic links, the optic carrier to sideband ratio (CSR) is high [8], approximately 20 dB for low signal condition. So, most of the power relies on the optical carrier, which brings the photodetector to the saturation region with no significant contribution to recover the RF signal, since it results from the beating between the carrier and the optic sidebands [5].

To improve the RF recovering efficiency at the photodetector, the CSR reduction is mandatory. Some approaches use nonlinear optic effects to transfer power from the carrier to the sideband, such as four-wave-mixing [7] and parametric amplification of the sidebands [9]. Other approaches move the MZM bias away from the quadrature point to get the carrier power down, known as low biasing technique [5][6][10]. Those approaches have shown good improvement on the system gain, NF and SFDR, comparing to quadrature biased MZM links. As consequence, the system is limited to a sub-octave bandwidth because of the increase on the harmonic distortion. Previous works mentioned above explore those techniques focused on the system performance, not considering the photodetector optic power as a reference

variable. This work investigates the low biasing technique to obtain gain improvement, considering the POP as a constant parameter, compared with the quadrature condition.

Section 2 shows the analytical analysis of the system. Section 3 shows simulations using the expressions deduced in the previous section, with some approximations and considerations. In section 4, experimental results are presented as a proof of concept. Conclusions are presented in section 5.

2 | THEORETICAL FOUNDATION

The schematic diagram of an MZM IM-DD photonic link is shown on Fig. 1. It is composed basically by a laser as the optical source feeding a Mach-Zehnder intensity modulator, followed by a photodetector connected to the MZM by a single-mode optical fiber. To get a general formulation, it is considered a dual drive configuration (DD-MZM), where two independent RF signal are injected into the modulator together with a DC bias voltage to stablish the operation point at the modulator electrooptic transfer function.

It is assumed the lightwave electric field can be expressed by:

$$\vec{e}(t) = Re[E_o e^{j[\omega_o t + \phi_o]} \vec{e}], \quad (1)$$

where E_o is the electrical field amplitude, ω_o is the optic angular frequency, ϕ_o is the initial phase and \vec{e} is the electric field polarization vector. For a sake of clarity, it will be assumed the field polarization does not change through the optic system and can be neglect on the formulation, which will consider only phasor representation from now on and will be referred as optic signal.

The intensity modulation process at the DD-MZM will produce at the output an optic spectrum composed by an optic carrier surrounded by a series of sidebands spaced by multiples of the RF modulating frequency. Neglecting all the losses in the modulator and in the fiber optic path, it can be expressed by [3]:

$$E_m(t) = \frac{E_o}{2} e^{j[\phi_o + \phi_b + \phi_{ps}]} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} J_n(m) \cos(\phi_{pd} + n\phi_{md}) e^{i[(\omega_o + n\omega_m)t + n\phi_{ms}]} \quad (2)$$

where ϕ_b is the absolute phase shift accumulated through the system, $\phi_{ps} = \pi(V_{dc1} + V_{dc2})/2V_\pi$ is the common phase produce by the bias voltages V_{dc1} and V_{dc2} applied to the MZM arms 1 and 2, respectively, V_π is the half wave voltage of the MZM, $J_n(m)$ represents the coefficients of the Bessel functions of first kind of order n , $m = \pi V_m/V_\pi$ is the RF modulation index, V_m is the modulating signal amplitude, $\phi_{pd} = \pi(V_{dc1} - V_{dc2})/2V_\pi$ is phase difference between the MZM arms produced bias voltages, $\phi_{md} = (\phi_{m1} - \phi_{m2})/2$ and $\phi_{ms} = (\phi_{m1} + \phi_{m2})/2$ are optic phases produced by the two RF modulating signals, where ϕ_{m1} and ϕ_{m2} are its initial phases respectively and ω_m is its angular frequency.

The total power of the spectrum represented by (2) is the sum of the individual powers of each optic component [1]. The optic power at the photodetector, P_d , can be expressed by:

$$P_d = P_L K_{po} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} [J_n(m) \cdot \cos(\phi_{pd} + n\phi_{md})]^2, \quad (3)$$

where P_L is the laser optic power and K_{po} is the link coefficient loss, including the insertion loss of the DD-MZM.

The instantaneous envelope power of the modulated signal is proportional to the product of (2) by its complex conjugated and it is related to its optic intensity [3]. It can be understood as the average power within one period of the carrier lightwave. The RF signal at the photodetector output is proportional to this envelope power [2]. From (2), the photodetector envelope power, P_d , can be expressed by:

$$\begin{aligned} P_d(t) = P_L K_{po} & \left\{ \frac{1}{2} \sum_{p=-\infty}^{p=+\infty} J_p^2(m) [\cos(2\phi_{pd} + 2p\phi_{md}) + 1] \right. \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=+\infty} \sum_{p=-\infty}^{p=+\infty} J_p(m) J_{p-k}(m) [\cos(2\phi_{pd} + 2p\phi_{md} \\ & - k\phi_{md}) e^{i(k\omega_m t + k\phi_{ms})} \\ & + (-1)^k \cos(2\phi_{pd} - 2p\phi_{md} + k\phi_{md}) e^{-i(k\omega_m t + k\phi_{ms})}] \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{k=+\infty} \sum_{p=-\infty}^{p=+\infty} J_p(m) J_{p-k}(m) \cos(k\phi_{md}) [e^{i(k\omega_m t + k\phi_{ms})} \\ & \left. + (-1)^k e^{-i(k\omega_m t + k\phi_{ms})}] \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

where p represents the orders of the optical spectrum components, and k the orders of the RF spectrum components, in other words, the electric harmonics frequencies.

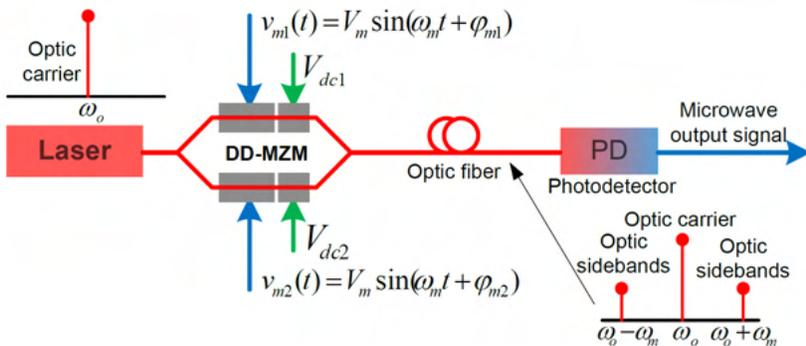


Fig. 1 - Microwave photonic link with a DD-MZM configuration and direct detection.

The small signal RF power gain can be calculated taking the fundamental harmonic frequency for $m \ll 1$. Considering the input and output impedances matched, it can be expressed by [4]:

$$G = \frac{1}{4} K_{po}^2 \eta_d^2 \left[\frac{\pi P_L}{V_\pi} \cos \left(\frac{\pi \Delta V_{dc}}{V_\pi} \right) \right]^2 Z_m Z_L \quad (5)$$

where η_d is the photodetector responsivity, ΔV_{dc} is the DD-MZM voltage bias drift far from the quadrature bias point, expressed by $\Delta V_{dc} = [(V_{dc1} - V_{dc2}) - V_\pi/2]$, Z_m is the DD-MZM input impedance and Z_L is the load output impedance.

3 I SIMULATIONS

It was considered the DD-MZM in a push-pull operation, where $V_{dc1} = -V_{dc2}$ and the phase difference between ϕ_{m1} and ϕ_{m2} is π . The DD-MZM V_π adopted for the simulations is 3.5 V. For simulation, the phases ϕ_o and ϕ_b were considered equal to 0 to simplify (2) and (4).

It was considered $V_m = 0.25$ V to keep the modulation index on small signal condition, resulting in $m = 0.224$.

a. Bias voltage at the quadrature point

Based on the previous considerations, the electric field amplitude spectrum from (2) is expressed by:

$$E_m(n) = \frac{E_o}{2} \left[J_n(m) \cos \left(\frac{\pi}{4} + n \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (6)$$

which has the shape shown in Fig. 2, per unit of electric field.

Using (4) to plot Fig. 3, it is possible to realize that the second harmonic does not appear on the expected RF amplitude spectrum.

Applying the quadrature condition in (3) results in:

$$P_d = P_L \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[J_n(m) \cos \left(\frac{\pi}{4} + n \frac{\pi}{2} \right) \right]^2 \quad (7)$$

which reveals that, together (6), it is possible to decrease the carrier, $n=0$, and increase the sidebands, $n= \pm 1$, by growing up the cosine bias argument ϕ_{pd} toward to $\pi/2$. Fig. 4 shows that condition. Equation (2) and the red lines in Fig.4 reveal that there is a high CSR penalty to eliminate the second-order harmonics,

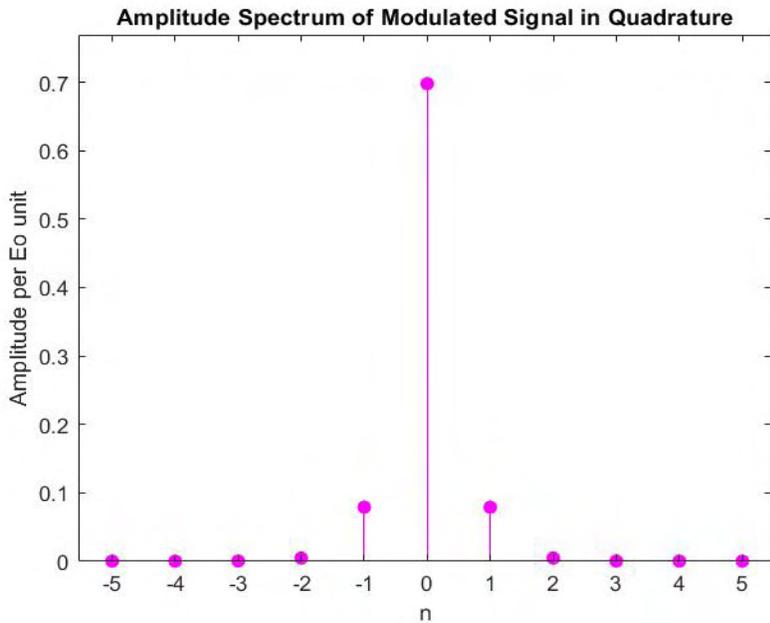


Fig.2 - Optic amplitude spectrum of the modulated signal, at quadrature bias condition and $m=0.244$.

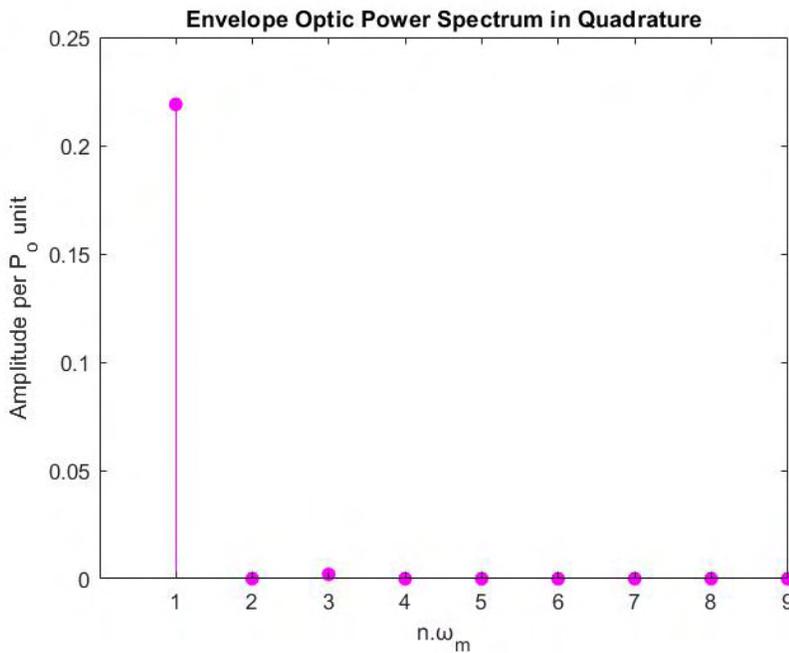


Fig.3 - Optic power envelope spectrum per unit of P_L , at quadrature bias condition and K_{po} unitary.

i.e, the cosine amplitude factor in (6) and (7) is the same for the carrier and sidebands components. For low modulation indexes, the carrier power is much bigger than the

sidebands and does not contribute to recover the RF output signal efficiently. This effect goes down with the modulation index increasing, but it keeps still high for practical condition. Consequently, increasing the laser power will bring the photodetector to saturation without produce link RF power gain efficiently.

b. Shifting bias voltage far from the quadrature point

By inspection of (2) and starting from the quadrature condition, the best bias voltage to optimize the beating between the carrier and the sidebands can be calculated for a given modulation index. The best beating efficiency will occur when the amplitude of the two components are equals. From (2) this bias condition can be determined, resulting in:

$$\phi_{pd_opt} = \tan^{-1} \left(\frac{J_0(m)}{J_1(m)} \right). \quad (8)$$

For the same modulation condition adopted for the quadrature case, $m = 0.224$, ϕ_{pd_opt} is 1.46 and the amplitude spectrum of (2) becomes:

$$E_m(n) = \frac{E_o}{2} \left[J_n(m) \cos \left(1.46 + n \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (9)$$

which are shown in Fig. 5.

The blue dotted lines in Fig. 4 also shows, together (9), that the Bessel functions coefficients continues with a great difference between then, but the cosine amplitude factor attenuates the carrier and increases the sidebands, bringing the optics components to the same amplitude to achieve the highest beating efficiency.

The total power incident at the photodetector is calculated from (3), expressed by:

$$P_d = P_L \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[J_n(m) \cdot \cos \left(1.46 + n \frac{\pi}{2} \right) \right]^2 \quad (10)$$

The photodetector output RF signal spectrum is shown in Fig. 6, where it can be seeing the presence of the second harmonic.

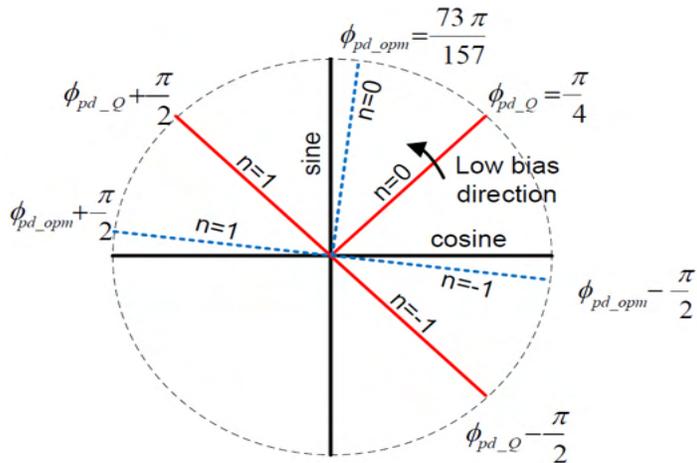


Fig.4 - Trigonometric circumference plotting of the cosine argument $(\phi_{pd} + n\pi/2)$. Red lines represent the quadrature condition. Dotted blue lines represent the low bias condition.

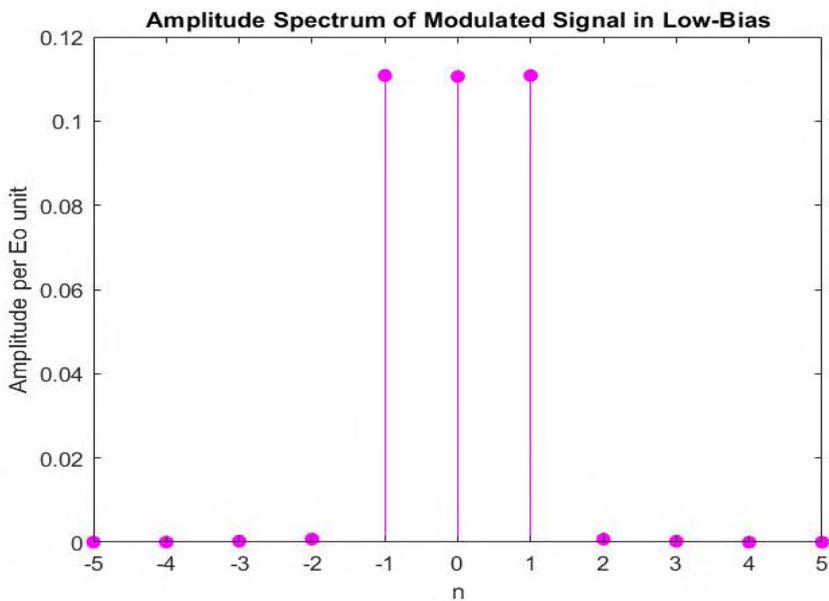


Fig.5 - Optic spectrum amplitude of the modulated signal, at optimum MZM bias condition.

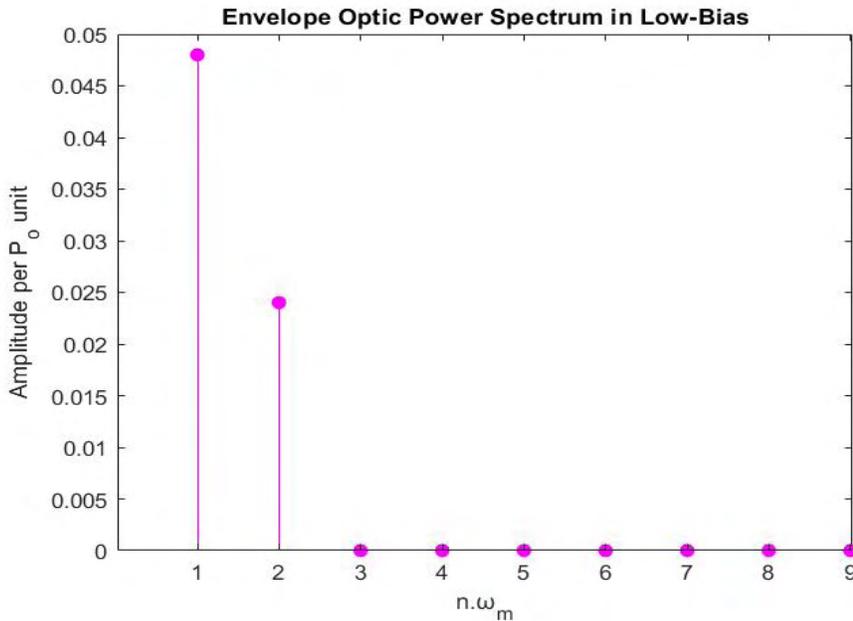


Fig. 6 - Optic power envelope spectrum per unit of P_L and K_{po} unitary, at optimum MZM bias condition.

c. Link RF power gain

Fig. 7 shows a comparative plot of the RF power gain of the link, considering the two conditions assumed above and equation 5. It was considered $Z_m = Z_L = 50\Omega$, and k_{po} and η_d unitary. As can be seen in Fig. 7, the gain for optimal bias condition is 9.7 dB above the gain in quadrature, for the same incident optic power at the photodetector.

4 | EXPERIMENT

Fig. 8 shows the schematic diagram of the experiment setup. Similarly to simulations, the experiment was carried out with the MZM operating upon a push-pull configuration. The optic carrier is from a DFB laser, tuned at the wavelength of 1552.54 nm, with a maximal power of 100 mW when driven by a current of 454.72 mA.

A laser drive controls the temperature and the current in the DFB laser. The optical carrier is coupled into a Mach-Zehnder intensity modulator with 10.

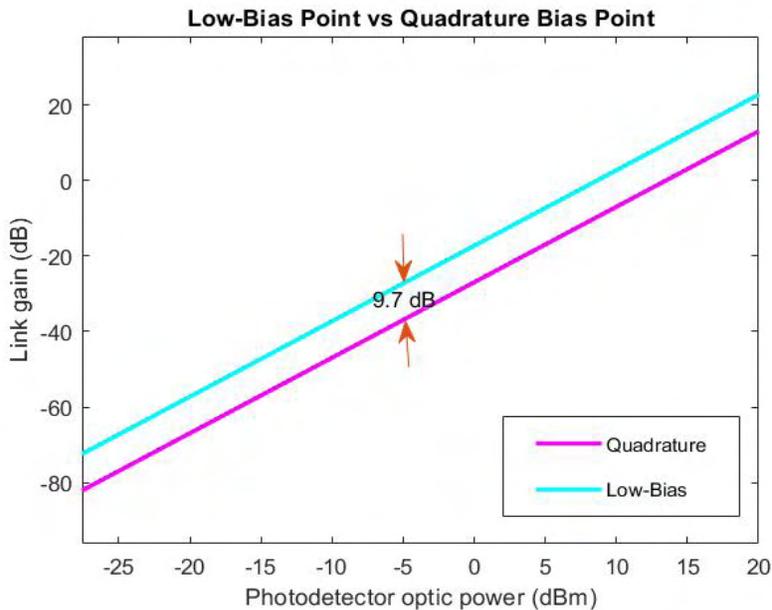


Fig.7 - Comparative plot of the RF link power gain. Quadrature condition in purple line and low bias condition in blue line.

GHz of bandwidth, from EOspace Inc, with a measured insertion loss of 5 dB, a RF V_{π} of 6.54 V, a bias V_{π} of 6.3 V and input impedance of 50 Ω . A symmetric DC power supply of +/-10 V feeding a potentiometer was used to regulate the bias voltage into the MZM, measured by a digital voltmeter. An RF signal generator feeds the MZM with the modulating signal.

To measure the optical spectrum, it was inserted before the photodetector a 90/10 fiber coupler, taking 10% of the modulated optical signal to an optical spectrum analyzer (OSA) and injecting 90% into a high speed photodiode, from New Focus Inc, with responsivity of 0.6 A/W, saturation power of 8 mW, output impedance of 50 Ω and bandwidth of 25 GHz. A multimeter was used to measure the incident power on photodiode, using a low frequency transimpedance amplifier available in the photodetector module, with 1 k Ω of gain. The RF photodetector output signal is injected into an RF amplifier, from Miteq Inc, to feed an electric spectrum analyzer (ESA). The RF power gain of the amplifier is 40 dB at 7 GHz, with an input and output impedances of 50 Ω , powered by a DC power supply of 15 V. The fiber path is a single mode fiber and the total losses are 3.3 dB.

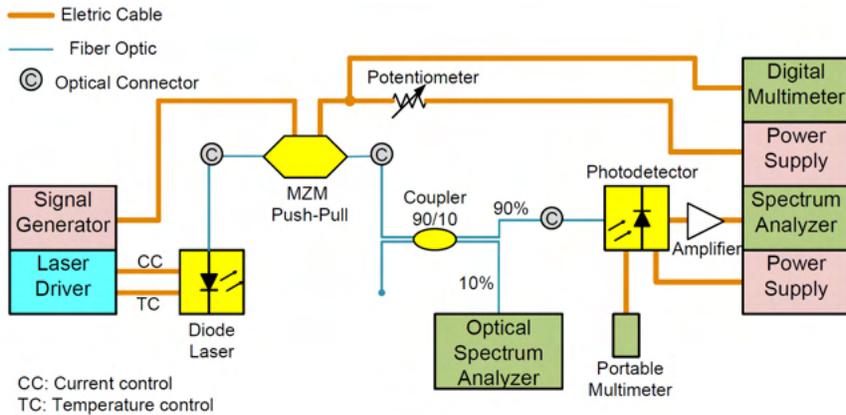


Fig.8 - Schematic diagram of the experiment setup.

To achieve an RF signal amplitude of 0.25 V, the same value used for the simulations, the signal generator power was adjusted to 3.44 dBm at a frequency of 7 GHz. The first gain measurement was taken for the low bias condition. Measuring the optic signal on the OSA, the MZM bias voltage was adjusted to get a CSR of 0 dB as shown in Fig. 9 (left).

So, the laser power was set to its maximum, $P_L = 100$ mW. The transimpedance amplifier output marked 48 mV at this point. The fundamental RF frequency output signal measure was -12.98 dBm, as shown in Fig. 9 (right). Taking out the RF amplifier gain, the intrinsic link gain was -52.98 dB.

Then, the MZM bias voltage was adjusted to the quadrature point, where the second harmonic is canceled. The laser power was decreased to obtain the same value at the photodetector for the low bias condition, that is, 48 mV at the transimpedance output. On that condition, the laser power was 2.57 mW. The optic spectrum was measured, and it is shown in Fig. 10 (left), with a measured CSR of 16.12 dB.

The fundamental RF output signal is -20.61 dBm, and its spectrum is shown in Fig. 10 (right), with no second harmonic observed. The intrinsic link gain is -60.61 dB, that is, 7.63 dB below the low bias condition gain. Due to the MZM electrooptic transfer function instability and the absence of an automatic bias control circuit, there was an uncertainty on the measurements and was considered as about 2 dB, after several sequential observations.

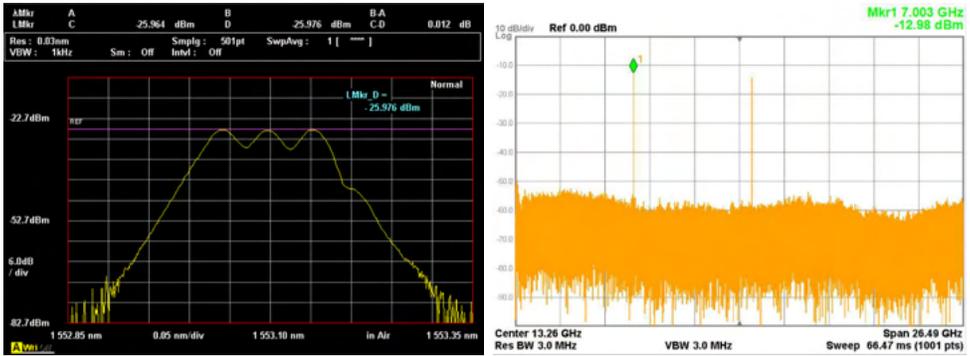


Fig.9 – Left: optic modulated signal spectrum at low bias condition. Right: RF output signal spectrum at low bias condition.

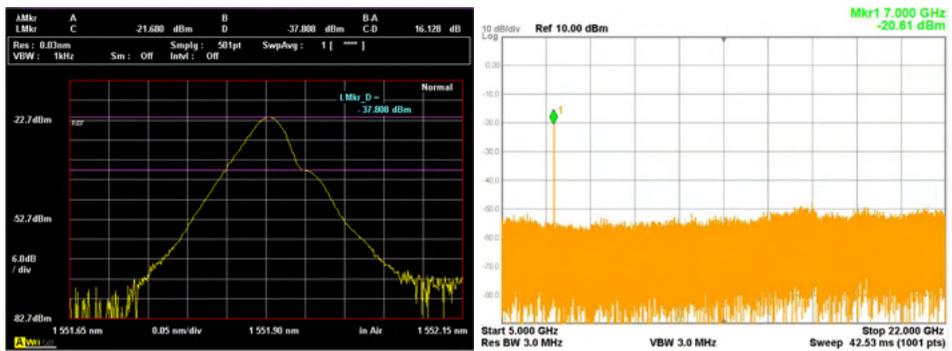


Fig. 10 – Left: Optic modulated signal spectrum at quadrature bias condition. Right: RF signal output spectrum at quadrature bias condition.

5 | CONCLUSION

The beating of the optic spectral components at the photodetector was investigated to optimize the power efficiency to recover the RF signal at the sub-octave link output, considering the photodetector saturation power as the bottleneck of the system. It was demonstrated the best condition is when the CSR is 0 dB, and there is a RF link power gain improvement of 9.7 dB for the same photodetector optic power.

AKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Brazilian Air Force at the Electronic Warfare Laboratory of ITA, by the Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) - France, and by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

CARVALHO, R. M. **Princípios de comunicações**. Vitória: [s.n.], 2000.

CHANG, W. S. C. **RF photonic technology in optical fiber links**. New York: Cambridge University Press, 2002.

CORRAL, J. L.; MARTI, J.; FUSTER, J. M. General expressions for IM/DD dispersive link analog optical links with external modulation or optical up-conversion in a Mach-Zehnder electrooptical modulator. **IEEE Trans Microw Theory Tech**, New York, v. 49, n. 10, Oct. 2001.

COUTINHO, O. L.; ALMEIDA, V. R.; OLIVEIRA, J. E. B. Uso de redes de comunicações ópticas para transmissão e distribuição de emissores radar. *In*: Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 8., São José dos Campos, Set. 2011. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, [2011?].

DEVENPORT, J.; KARIM, A. Optimization of an externally modulated RF photonic link. **Fiber and Integrated Optics**, Carlsbad, v. 27, p. 7-14, Dec. 2007.

FARWELL, M. L.; CHANG, W. S. C.; HUBER, D. R. Increased linear dynamic range by low biasing the Mach-Zehnder modulator. **IEEE Photonics Technol Lett**, New York, v. 5, n. 7, July 1993.

FILGUEIRAS, H. R. D.; BRANDÃO, T. H.; BORGES, R. M.; CERQUEIRA Jr., A. S. New topology and digital performance analysis of a photonics-based RF amplifier. *In*: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 18., Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 13., 2018, Santa Rita do Sapucaí. **Anais [...]**. São Caetano do Sul: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, p. 644-648, 2018.

GAO, Y.; WEN, A.; PENG, Z.; TU, Z. Analog photonic link with tunable optical carrier to sideband ratio and balanced detection. **IEEE Photonics J**, Piscataway, v. 9, n. 2, Apr. 2017.

MARQUES, R. B.; CASTRO, J. J. B.; OLIVEIRA, J. E. B. Modelagem e demonstração da amplificação paramétrica de sinais de RF em enlace analógico a fibra óptica. *In*: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 18., Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 13., 2018, Santa Rita do Sapucaí. **Anais [...]**. São Caetano do Sul: Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, p. 644-648, 2018.

URICK, V. J.; GODINEZ, M. E.; DEVGAN, P. S.; MCKINNEY, J. D.; BUCHOLTZ, F. Analysis of an analog fiber-optic link employing a low-biased Mach-Zehnder modulator followed by an erbium-doped fiber amplifier. **J Lightwave Technol**, New York, v. 27, n. 12, June 15, 2009.

OPTOELECTRONIC SENSOR APPLIED TO FLOW RATE MEASUREMENTS ON OIL AND GAS INDUSTRY

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 06/07/2021

Alexandre Silva Allil

Electrical Engineering Program (PEE), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – RJ
<https://orcid.org/0000-0002-2753-7014>

Fabio da Silva Dutra

Research Center Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES - Petrobras)
Rio de Janeiro – RJ
<https://orcid.org/0000-0003-3612-8148>

Cesar Cosenza de Carvalho

Electrical Engineering Program (PEE), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – RJ
<https://orcid.org/0000-0002-5221-708X>

Regina Célia da Silva Barros Allil

Electrical Engineering Program (PEE), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – RJ
<https://orcid.org/0000-0001-5823-5927>

Marcelo Martins Werneck

Electrical Engineering Program (PEE), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – RJ
<https://orcid.org/0000-0002-8804-0503>

ABSTRACT: A flare system in oil platform is a combustion stack used to burn off excess gases that cannot be processed and gases that have

to be eliminated in emergency shutdown to avoid the risk of explosion. Gas flow measurement in flares is still considered challenging because the measurement has to attend many specific demands, quite different from any other flow measurement applications. For these types of measurements many sensor technologies are available, however they are all very expensive, and only a few ones can attend all demands. The objective of this letter is to present a flow rate sensor based on Fiber Bragg Grating (FBG), cross-correlation and heatwave travel time techniques. The system was developed with inexpensive components and is little-intrusive, capable of attaining the rangeability of the flare demand and independent of gas composition, pressure and temperature.

KEYWORDS: Cross-correlation, Fiber Bragg grating (FBG), Flare systems, Flow rate, Optical fiber sensor.

SENSOR OPTOELETRÔNICO APLICADO A MEDIDAS DE VAZÃO NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

RESUMO: Um sistema de alívio (*Flare*) na plataforma de petróleo é uma chaminé de combustão usada para queimar gases em excesso que não podem ser processados e gases que devem ser eliminados em desligamentos de emergência para evitar o risco de explosão. A medição do fluxo de gás em *flares* ainda é considerada um desafio porque a medição deve atender a muitas demandas específicas, totalmente diferente de qualquer outra aplicação de medição de fluxo. Para esses tipos de medição, muitas tecnologias de sensores estão

disponíveis, porém todas são muito caras e apenas algumas podem atender a todas as demandas. O objetivo deste trabalho é apresentar um sensor de vazão baseado em Redes de Bragg (FBG), técnicas de correlação-cruzada e tempo de viagem por ondas de calor. O sistema foi desenvolvido com componentes de baixo custo e pouco intrusivo, capaz de atingir a rangeabilidade da demanda do *flare* e independe da composição do gás, pressão e temperatura.

PALAVRAS-CHAVE: Correlação-cruzada, Rede de fibra de Bragg (FBG), Sistemas de alívio, Vazão, Sensor à Fibra Óptica.

1 | INTRODUCTION

The oil and gas industry is responsible for a significant share of the greenhouse gas emissions. In the exploration and production of natural gas and oil, the gas which is burned in torches, known as flare or relief system, is a huge source of CO₂ emissions.

A typical flare system is a combustion stack used to burn off excess gases that cannot be processed. It is also used as a safety measure in emergency shutdown when gases in the process plant have to be eliminated to avoid the risk of explosion.

In addition to contributing to global warming and climate change, the burning of natural gas is considered a waste of valuable, nonrenewable energy resource.

In this context, the need to quantify the waste of gas volumes correctly and accurately is evident. Due to the importance of this fact, frequent publications of regulatory directives are issued, aiming at improving the measurements of gas flow in flare systems.

Nowadays, the gas flow measurement in flares is performed with very expensive equipment and it is still considered challenging because the measurement is quite different from other flow measurement applications.

The following challenges are still to be overcome when measuring flow in flares (Shannon, 2017):

- Unpredictable nature of gas flaring, since the petroleum gas is a varied mixture of gaseous hydrocarbons whose main component is always methane CH₄.
- Velocity range and accuracy. During 98% of total operating time the range may vary from a meager 0.03 m/s up to 5 m/s, which is the normal plant operation (known as pilot or purge). Accuracy demands are around 10%;
- Gas temperature may vary from -70°C to above 150°C;
- Size of flare systems. The burner line diameter may vary from 8" to 40";
- Being the flare an important safety equipment, flowmeters should not impinge any impedance in the flow so that conventional flowmeters based on turbine, orifice plate, Coriolis and Vortex cannot be applied on flares.

Several technologies are available for flow velocity measurement. The most used technologies are:

- Ultrasonic Flow Meter. It measures the difference in transit time of pulses that travel from a downstream transducer to the upstream transducer and vice versa. It is highly accurate but presents a high cost per installation, ranging from \$50,000 - \$100,000 (Sage Metering, 2020);
- Pitot Tube. This is the oldest way to measure flow velocity, it is based in a differential pressure to determine the flow velocity. It presents low flow sensitivity and its response depends on the gas composition;
- Thermal mass flow meter. Their working principle is based on the measurement of the heat convection from a heated surface to the flowing fluid as the sensor temperature is proportional to the mass flow rate. This the most commonly method to measure the mass flow of clean and unmixed gases or gases mixtures when the gas composition is consistent and known. Since this technique is based on the thermal properties of the fluid it is dependent upon fluid composition (Steinberg, 2013);
- Optical flow meters. They are divided into two classes, Laser Doppler velocimeters (LDV) and Doppler-Laser-Two-Focus Velocimetry (L2F). LDV is based in the Doppler shift of a laser beam to measure the velocity where two beams of laser cross the flow being measured generating fringes. L2F method, also known as Laser Transit Anemometry, measures the time of flight (ToF) of particles crossing the two laser beams (Ruck, 1994). These two optical methods are independent of pressure, temperature and gas composition but are based on the presence of sub-micrometer size particles in the gas that shall be inserted by the system (Parker, 2007).

In conclusion from the challenges and technologies listed above, all flowmeters present good performance in some aspects but bad performance in others. Normally, the choice goes to the most expensive one, the ultrasonic flowmeter.

Another important feature that is preferable in equipment applied to the oil and gas industry is the capability of working without embarked electricity. This is because electrically passive equipment does not depend on the expensive security technology for protection against fire and explosions. In this sense, fiber optic sensors tend to be cheaper and less complex to install and maintain.

The objective of this paper is to present a flow rate sensor based on Fiber Bragg Grating (FBG), cross-correlation and heatwave travel time techniques. The system is inexpensive and minimum intrusive, capable of attaining the rangeability of the flare demand and independent of gas composition, pressure and temperature.

2 | CROSS-CORRELATION TECHNIQUE

The cross-correlation (CC) is frequently applied when one needs to recognize a short-duration signal inserted in a longer signal. CC presents many applications, such as in pattern recognition, for instance in biometric recognition of retina or fingerprint, or tracking a

person through a camcorder through face recognition (Wu, 2010). Other application of CC is presented in the work of (Wenbiao, 2009), who studied cross-correlation for application in velocimetry using electrostatic sensors. The result of the CC algorithm is a measurement of similarity between two signals against the displacement of one of them along the time. CC is used in signal processing and is defined as the correlation of a series against another series, shifted by a particular number of samples.

The CC algorithm is easily understood when we exam the algorithm applied to produce it.

Suppose two time series (x_x, y_x) having M samples each by Equations (1) and (2).

$$[x_k] = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{M-1}] \quad (1)$$

$$[y_k] = [y_0, y_1, y_2, \dots, y_{M-1}] \quad (2)$$

Then, the cross-correlation function, $\phi_{yx}(\tau)$, is defined as Equation (3).

$$\phi_{yx}(\tau) = \sum_{t=0}^{M-1} x_t y_{t+\tau} \quad (3)$$

Where τ is the time delay.

3 | FIBER BRAGG GRATING

Fiber Bragg grating is a modulation of the refractive index of the core of an optical fibers, forming a grating. This grating reflects a narrow band of the light guided in the fiber, centred at the Bragg wavelength, according to the Bragg law (Werneck, 2017) of Equation (4).

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (4)$$

Where λ_B is the Bragg wavelength, η_{eff} is the effective refractive index of the core and Λ is the periodicity of the grating. Essentially, any external agent capable of changing Λ or η_{eff} will displace the reflected spectrum centered at λ_B , either a longitudinal deformation or a temperature variation. The sensitivity of the Bragg wavelength with temperature is given by Equation (5).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_{FBG} + \eta)\Delta T \quad (5)$$

Where $\Delta\lambda_B$ is the Bragg wavelength shift, ΔT is the temperature variation, α_{FBG} is the silica thermal expansion coefficient $\alpha_{FBG} = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ and η is thermo-optic coefficient

for a Ge-doped silica optical fiber $\eta = 8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Thus, the sensitivity of the grating to temperature at the wavelength range of 1550 nm is $\Delta\lambda_g/\Delta T = 14.18 \text{ pm} / ^\circ\text{C}$.

4 | MATERIALS AND METHODOLOGIES

The general idea of the proposed system is to apply a current signal on a heat source upstream inside the duct. The heat source is initially comprised by a small resistor, which will be changed in the future by a laser source injecting light into an optical fiber with its tip coated with an absorbing material to generate heat. In this work we tested only the resistor as a heat source; the methods to produce the heat with laser are under study. As a result of the heat pulse, a sub-degree temperature variation will flow inside the duct at the same speed as the gas. When this temperature pulse reaches the sensors, they will respond accordingly with a time delay. But due to the fact that the heat produced will be vanishing along the tube, the two sensors will detect different signal intensities. In order to detect the time delay, a CC algorithm is employed and the flow velocity is calculated by the ratio between the sensors distance and the time delay.

This technique was mentioned by the first time by (Xu, 1996) that used thermistors to measure flow velocity. They tested at flow speeds up to 30 mm/s, clearly far below from what is needed for flare flow measurement.

It is good to notice that (Ashauer, 1993) demonstrated a ToF technique using thermocouples, but the measured velocities were in the range of millimeters per second, not obtaining a linear relationship for flow velocities above 16 mm/s.

Additionally, (Fernandes, 2010) applied the ToF and CC techniques to measure newborn air breathing velocity using two lasers beams perpendicular to the respiratory flow and two position sensor detectors (PSDs) as sensors. They demonstrated a good linearity in the flow velocity measurement up to 1 m/s.

The schematic diagram of the proposed system in this paper is shown in Figure 1, where d is the distance between the two temperature sensors, FBG₁ and FBG₂.

The CC detects the few-milliseconds delay between the two pulses and the flow velocity can be calculated by the ratio between the sensors distance d and the time delay τ .

The airflow is obtained by a turbine that controls the airflow velocity in a wind tunnel (see Figure 1), by the motor speed and a Pitot tube is used for calibration.

The FBG interrogator is a Micron Optics model si155 with 5 kHz interrogation frequency and ± 2 pm resolution.

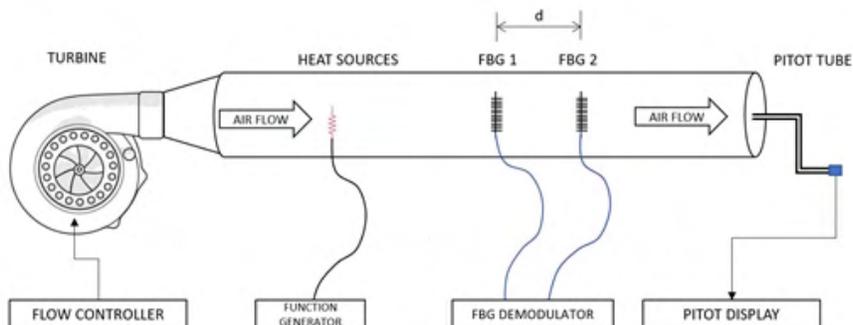


Figure 1 - Schematic diagram of the system inside the wind tunnel.

The Figure 2 shows a picture of the experimental setup, the wind tunnel and the sensors.

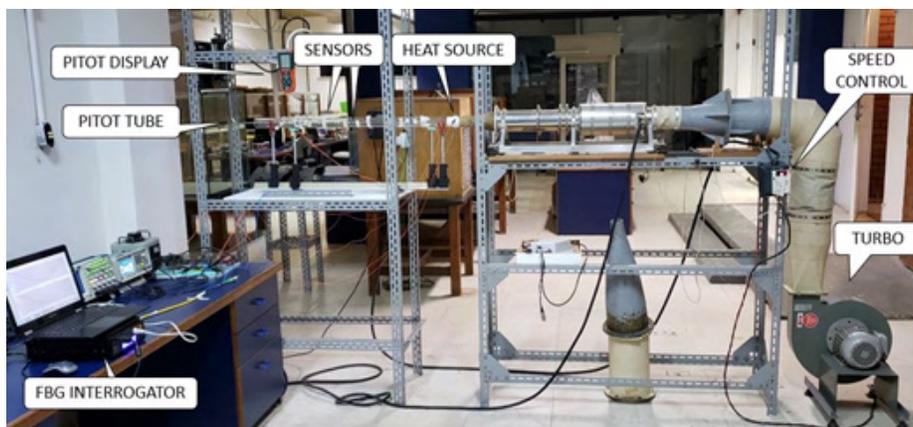


Figure 2 - Picture of the wind tunnel and the sensors location.

5 | RESULTS AND DISCUSSION

The Figure 3 shows the signals collected from the FBGs for a flow rate of 5 m/s. The blue line represents the output from the proximal FBG, while the orange line represents the output from the distal FBG. The signal-to-noise ratio is low because the temperature pulses collected by the FBGs are too close to the accuracy of the interrogation equipment, ± 2 pm, recalling that 1°C in an FBG represents about 14 pm displacement of its central wavelength.

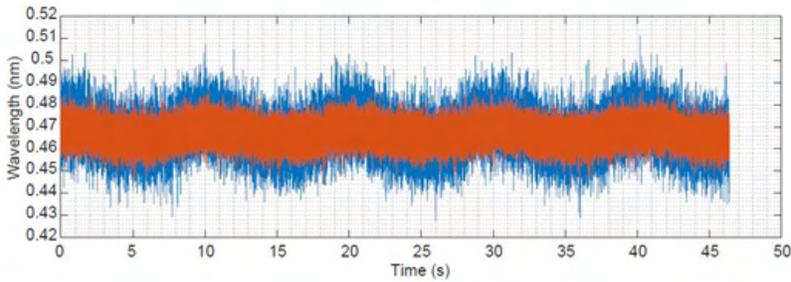


Figure 3 - The output signals produced by the two FBGs at a flow rate of 5 m/s. The signal-to-noise ratio is too small to allow any temperature variation distinction. Blue line: FBG_1 ; Orange line: FBG_2 .

As expected, no direct cross-correlation is possible with this low signal-to-noise ratio, as the noise produced by the interrogation equipment modifies differently each signal, making them absolutely uncorrelated. In order to clear the signals from the noise, a low-pass, first-order Butterworth filter was applied using Matlab software. The command used is $[b,a] = butter(n, W_n)$ which returns the transfer function coefficients of an n^{th} order lowpass digital Butterworth filter with normalized cutoff frequency W_n .

The command returns b and a which are row vectors of length $n+1$, representing the coefficients of the filter's transfer function. We decided by a second-order filter ($n = 2$) and the cut-off frequency to be $W_n = 850$ mHz because the heat pulse frequency was 500 mHz. Since $n = 2$, vectors a and b will contain 3 numbers each, that are used on the transfer function of the digital filter, at Equation (6).

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + b(3)z^{-2}}{a(1) + a(2)z^{-1} + a(3)z^{-2}} \quad (6)$$

However, since filters change signal phase and since the signals shown in Figure 3 are different from each other, even using the same filter one can change differently the phase in each signal, disturbing the cross-correlation results. In order to circumvent this effect, the MatLab function *filtfilt* was used. The syntax is $y = filtfilt(b,a,x)$ that performs a zero-phase digital filtering by processing the input data, x , which contains 125,000 points, in both forward and reverse directions.

The result of this operation is a zero-phase distortion with a transfer function equals to the squared magnitude of the original filter and an order that is double the order specified by b and a .

The Figure 4 shows the result of these two operations applied in real time to the signals shown in Figure 3.

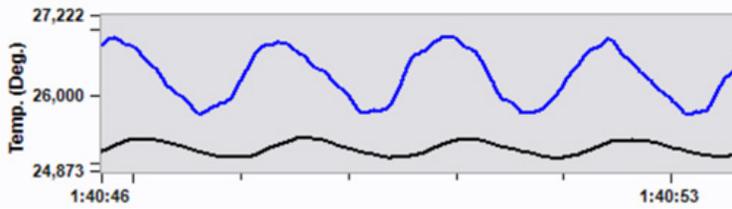


Figure 4 - Temperature signals captured by the two FBGs as a result of the signal processing techniques applied to the signals shown in Figure 3. The upper line (blue) represents the temperature sensed by FBG1 and the bottom line (black) the temperature sensed by FBG2. Horizontal axis shows time (h:m:s).

Notice that the delay between the signals is now visible and that, while the proximal sensor measured a pulse of about 1°C , the distal sensor measured only about 0.2°C . This temperature, according to the FBG sensitivity to temperature shown above, represents a Bragg wavelength shift of only 5 pm, too close to ± 2 pm, the FBG interrogator accuracy.

Before applying the CC procedure, it is necessary to perform another signal processing, because the two signals shown in Figure 3, although with a noticeable phase delay, are completely different from each other, both in shape and in amplitude. Any attempt to cross-correlate these signals would result in a triangular-shape output with zero delay, meaning no correlation at all. To circumvent this, we have to normalize both signals by the average and the standard deviation using the Matlab command: $T = (a - \text{mean}(a)) / \text{std}(a)$ where a stands for each series.

Finally, Figure 5 shows the result of the CC algorithm performed in Matlab on the signals shown in Figure 4 after normalization. The maximum probability occurred at a delay of 135 ms.

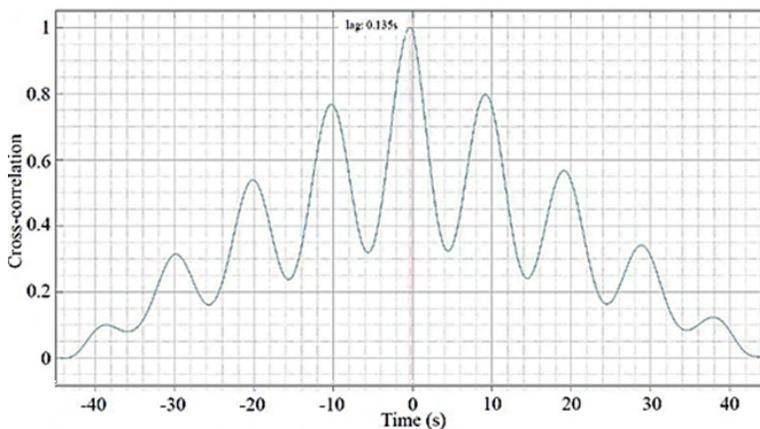


Figure 5 - The cross-correlation results. Y-axis plots the probability of similarity whereas X-axis plots the time delay.

From this calculated delay, corresponding to the lag time that the heat pulse takes to travel 77 cm from the upstream sensor to the downstream sensor, it is possible to calculate an airflow velocity of approximately 5.70 m/s.

This process was repeated twenty times each, for different velocities resulting in the plot shown in Figure 6.

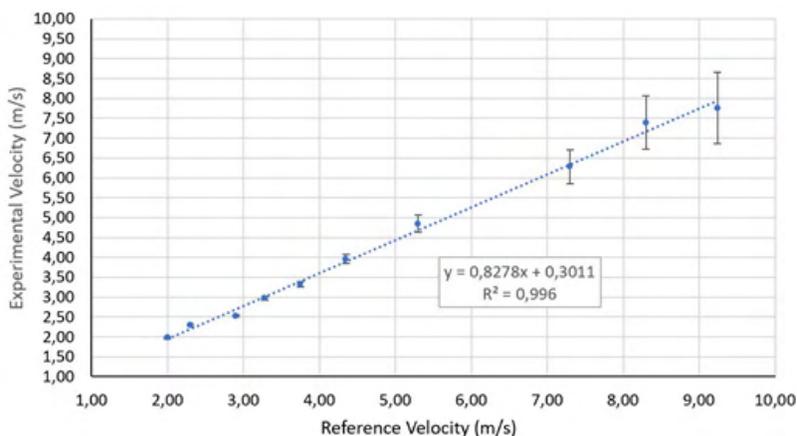


Figura 6 - Plot of the measured velocity by the FBG system versus calibrated velocity measured by the Pitot tube.

Notice that, while for flow velocities up to 6 m/s the standard deviations are smaller than 5%, for higher velocities, the error bars increase substantially reaching up to 10% for speeds higher than 9 m/s. The reason for this is attributed to two limitations: The first one is the sampling rate provided by the commercial interrogator. It produces output values at regular frequency, rather from being continuous, which causes phase errors in the CC calculations. The second reason is its ± 2 pm Bragg wavelength uncertainty, leading to limitations in detecting sub-degree-centigrade temperatures.

High-precision ToF measurement is the main request to flow rate measurement of ultrasonic gas flowmeters and also for the system presented in this work. However, the measurement accuracy of CC depends on high-speed of an analogical-to-digital converter (ADC), which is not the case of commercial interrogators.

In order to improve the accuracy and resolution of ToF measurements, (Sun, 2019) proposed the cross-correlation calculation performed after digital filtering and interpolation. Such technique worked well in our case but only up to 10 m/s. For higher speeds the conclusion is that, either the sampling rate needs to be implemented or an interrogation system with continuous output signal be applied.

To circumvent these limitations, we propose the use of a bench-top interrogation technique such as those employed in (Dante, 2019) consisting of wavelength-division

multiplexing (DWDM) or Fabry-Perot edge filters, respectively, which provide a higher output sensitivity to FBG center wavelength displacement, together with a continuous, real-time output.

6 | CONCLUSIONS

A new methodology to measure volumetric flow rate inside flare ducts based in heatwave travel time, FBG and cross-correlation techniques was presented. Results demonstrate that the system attend the main demands for a flare flowmeter showing independence of gas composition, good linearity and accuracy and low cost as compared to conventional flowmeters. On the top of that, the system can be built so as to not require electricity for its operation, promising to be a good candidate for an all-fiber explosion-proof system.

The system presented a linear behavior for flow velocities measurement up to a velocity of 10 m/s. Flow velocities above that present an up to 10% precision, due to limitations of the commercial interrogation system used.

It is suggested an edge filter interrogation technique to be applied in future tests to interrogate the FBGs in order to improve signal-noise-ratio, allowing the measurement of higher velocities.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the valuable support from Petrobras whose guidance and assistance are gratefully acknowledged.

REFERENCES

Dante, A.; Lopez, J.; Allil, R.; Carvalho, C.; Werneck, M.; **A Compact FBG-based Magnetostrictive Optical Current Sensor with Reduced Mass of Terfenol-D**, IEEE Photonics Technology Letters, page(s): 1-4 DOI: 10.1109/LPT.2019.2932112. July, 2019.

Fernandes, C.W.; M.D. Bellar and M.M. Werneck, **Cross-Correlation Based Optical Flowmeter**. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, Volume 59 Issue 4, pp 840 - 846, DOI 10.1109/TIM.2009.2025990, March, 2010.

J. Wu, H. Yue, Y. Cao and Z. Cui, **Video Object Tracking Method Based on Normalized Cross-correlation Matching**, Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, Hong Kong, 2010, pp. 523-527. doi: 10.1109/DCABES.2010.112.

M. Ashauer, H. Glosch, F. Hedrich, N. Hey, H. Sandmaier, W. Lang, **Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles**. Sensors and Actuators 73 1999. 713.

Parker, J.; Stobie, G.; Melnyk, I., Letton, C.; **Flare Metering with Optics from Blue-Sky Technology to the Real World**. 25th International North Sea Flow Measurement Workshop, Oslo, Norway, October 16-19, 2007.

Ruck, B., Pavlovski, B., Semidetnov, N., **Phase-two-focus anemometer for simultaneous measurement of particle velocity and particle size**. Flow Measurement and Instrumentation, Volume 5, Issue 3, July 1994, Pages 195-202.

S. Sun, S. Li, L. Lin, Y. Yuan and M. Li, **A Novel Signal Processing Method Based on Cross-correlation and Interpolation for ToF Measurement**, 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Wuxi, China, 2019, pp. 664-668. doi: 10.1109/SIPROCESS.2019.8868700.

Sage Metering, Inc. [Online]. **3 Flare Gas Flow Meter Technologies**. Available at: <https://sagemetering.com/flare-gas-meter/flare-gas-flow-meter-technologies/>. Accessed on: July, 28, 2019.

Shannon, W., **The Challenges and Solutions of Flare Gas Metering. A Sage Metering**, [Online]. Available at: <https://sagemetering.com/wp-content/uploads/2017/08/Challenges-Solutions-Flare-Gas-Measurement.compressed.pdf>. Accessed on: July, 28th, 2019.

Steinberg, B, **Flare Gas Measurement Using Thermal Mass Flow Meters**, A Sage Metering White Paper, 2013. Available: <https://sagemetering.com/pdf-doc/articles-whitepapers/Flare-Gas-Measurement-UsingThermal-Mass-Flow-Meters-0713.pdf>.

Wenbiao Zhang, Chao Wang, Liang Li, Tao Zhang, Yong Yan, Jiaqing Shao, Wuliang Yin, **Parameters Selection in the Cross-Correlation Based Velocimetry Using Electrostatic Sensors**. I2MTC 2009 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Singapore, 5-7 May 2009.

Werneck, M.M.; Regina C. Allil and Fbio V. de Nazar, **Fiber Bragg Gratings: Theory, Fabrication, and Applications** - Tutorial Texts in Optical Engineering, Volume TT114, 256 pages, SPIE PRESS, Bellingham, Washington USA, ISBN 9781510613850q (softcover), Date Published: 5 September 2017.

Xu, Y; G. de Graaf and R. F. Wolffenbuttel, **DSP Cross-Correlator for Use in a Thermal Flow Meter**. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, pp. 519-522, June 4-6, 1996.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO, PRECISÃO E EXATIDÃO EM SENSORES ÓTICOS FBG E RFBG QUE MEDEM TEMPERATURAS ENTRE 5 °C E 60 °C POR 16 SEMANAS

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 05/08/2021

Karoline Akemi Sato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-8328-3426>

Camila Carvalho de Moura

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-0073-0073>

Antonio Carlos Ribeiro Filho

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-2205-5745>

Luis Camilo Jussiani Moreira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-9497-7821>

Valmir de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba, Paraná, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-5731-6127>

RESUMO: Foram produzidos, caracterizados e mantidos em operação dois sensores óticos, consistindo de um sensor FBG (rede de Bragg em fibra ótica) e de um sensor RFBG (rede de Bragg regenerada em fibra ótica). Ambos os sensores foram produzidos em fibra ótica monomodo padrão G-652, dos quais o sensor RFBG foi produzido em fibra hidrogenada e submetido a

tratamento térmico para regeneração. Os dois sensores foram encapsulados com tubo capilar em aço inoxidável (AISI 304), calibrados em temperatura na faixa entre 5 °C e 60 °C. Os respectivos sensores foram fixados em chapa metálica (parede), para medir temperaturas nessa faixa de operação, com o intuito de comparar durabilidade (envelhecimento), bem como precisão e exatidão em relação a um termopar tipo K. Ao final de 16 semanas, não foram observadas degradações significativas no sinal de cada sensor e o erro de medição foi ≤ 2 °C.

PALAVRAS-CHAVE: FBG; RFBG; Durabilidade de rede de Bragg; Encapsulamento.

ANALYSIS OF AGING, PRECISION AND ACCURACY IN FBG AND RFBG OPTICAL SENSORS THAT MEASURE TEMPERATURES BETWEEN 5 °C AND 60 °C FOR 16 WEEKS

ABSTRACT: Two optical sensors were produced, characterized and maintained in operation, consisting of an FBG sensor (Fiber Bragg Grating) and an RFBG sensor (Regenerated Fiber Bragg Grating). Both sensors were produced in Standard Single-Mode Fiber G-652, of which the RFBG sensor was produced in hydrogenated fiber and subjected to heat treatment for regeneration. The two sensors were encapsulated with a stainless steel capillary tube (AISI 304), temperature calibrated in the range between 5 °C and 60 °C. The respective sensors were fixed in a metal sheet (wall), to measure temperatures in this range of operation, in order to compare durability

(aging), as well as precision and accuracy in relation to a K-type thermocouple. At the end of 16 weeks, no significant degradations were observed in the signal of each sensor and the measurement error was ≤ 2 °C.

KEYWORDS: FBG; RFBG; Bragg grating durability; Encapsulation.

1 | INTRODUÇÃO

As redes de Bragg em fibra ótica (FBG) foram descobertas em 1978 por K. O. Hill (HILL et al., 1978). Desde sua descoberta muitos trabalhos foram desenvolvidos em torno desses sensores óticos (OLIVEIRA, 2012; COSTA et al., 2015; MOURA et al., 2017; LU et al., 2018; PENG et al., 2019; FENG et al., 2020), devido as suas propriedades intrínsecas de medição de temperatura e deformação, ao mesmo tempo que são imunes a interferência eletromagnética (FRAZÃO, et al., 1999). Algumas aplicações desse tipo de sensor para medição de temperatura podem ser vistas na indústria petroquímica, pois tais sensores são aptos a operar em áreas classificadas já que não utilizam corrente elétrica (TERADA, 2010). Na biomecânica, os sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica utilizam-se da deformação para mensurar, por exemplo, força de mordida, aquisição de dados na aplicação de aparelhos ortodônticos e monitoração de problemas no maxilar (FIORIN et al., 2019). Também há estudos sobre o envelhecimento de sensores baseados em FBG, para avaliação de durabilidade e desempenho, por exemplo, no monitoramento de umidade em um ambiente na presença de gases residuais (ALWIS et al., 2017) e no monitoramento de vibração quando tais sensores foram encapsulados em metal (GUO; XIONG; LIU, 2019).

O método de inscrição sob máscara de fase por uma fonte *laser* ultravioleta é amplamente utilizado para gravação de redes de Bragg em fibra ótica (HILL et al., 1993), porque o método apresenta maiores estabilidade e repetibilidade da gravação quando comparado a outros métodos interferométricos (FOKINE, 2002; PAL et al., 2003; MIHAILOV et al., 2004). Para a gravação de redes sementes saturadas, para posterior processo de regeneração (OLIVEIRA, 2012), é necessária a etapa de hidrogenação da fibra ótica seguida da gravação da FBG. A hidrogenação aumenta a fotossensibilidade na fibra (PATRICK et al., 1995; EGAN et al., 1996) e uma maior fluência *laser* na banda do ultravioleta produz redes sementes saturadas, as quais são caracterizadas por espectro alargado. A regeneração pode ser obtida através de tratamento térmico adequado da fibra ótica, ao final do qual é produzida a rede de Bragg regenerada em fibra ótica (RFBG). A RFBG é caracterizada por elevada durabilidade em altas temperaturas (CANNING et al., 2009).

Os objetivos do presente trabalho são comparar a durabilidade entre dois sensores por rede de Bragg, um do tipo RFBG e um outro do tipo FBG padrão, durante um período de 16 semanas em temperatura ambiente e também avaliar a precisão e a exatidão dos referidos sensores em relação a um padrão fornecido por termopar tipo K. Ao longo do período, foram realizadas medições semanais da temperatura obtida no termopar e em ambos os sensores através da aquisição de espectros em reflexão.

2 | METODOLOGIA

Os sensores térmicos foram produzidos em segmentos de fibra ótica, monomodo padrão (SSMF G-652 Draka®), com ~33 cm de comprimento. O sensor 1 foi gravado em fibra ótica não hidrogenada, seguido de encapsulamento, calibração em temperatura e aplicação em campo. O sensor 2 teve sua rede semente gravada em fibra ótica hidrogenada, com posterior tratamento térmico para regeneração, também seguido de encapsulamento, calibração em temperatura e aplicação em campo.

2.1 HIDROGENAÇÃO

A câmara de hidrogenação é formada por tubo inoxidável, de 5 mm de diâmetro interno e 1 m de comprimento, comportando várias dezenas de fibras. Assim, um trecho de fibra ótica monomodo padrão (G-652), com 1 m de comprimento, foi inserido na câmara de hidrogenação sob pressão de 80 bar, temperatura ambiente. A fibra ótica permaneceu na câmara por um período de sete dias e, então, foi retirada para se obter um segmento de fibra necessário para a posterior gravação da rede semente do sensor 2.

2.2 GRAVAÇÃO

Ambos os sensores foram gravados com 3 mm de comprimento, utilizando o método de gravação sob máscara de fase. O *laser* utilizado nas gravações foi o Coherent® Xantos XS, com comprimento de onda de emissão em 193 nm.

O sensor 1 (FBG), possui os seguintes parâmetros de gravação: energia de 1,80 mJ/pulso, frequência de 250 Hz e tempo de exposição de 20 minutos. A máscara de fase utilizada foi a lbsen® com *pitch* de 1055,2 nm.

O sensor 2 (RFBG), possui os seguintes parâmetros de gravação: energia de 1,00 mJ/pulso, frequência de 250 Hz e tempo de exposição de 10 minutos. A máscara de fase utilizada foi a lbsen® com *pitch* de 1058,9 nm. Como a fibra ótica utilizada para a gravação do sensor 2 estava hidrogenada, foi possível utilizar menor fluência *laser* neste caso. A rede produzida resultou em eficiente regeneração após o tratamento térmico específico.

Os diferentes *pitchs* das máscaras de fase resultam em distintos comprimentos de onda de Bragg em cada sensor, porém não produzem efeitos apreciáveis na durabilidade e na precisão dos mesmos.

Na Figura 1, pode ser visto um esquemático do sistema de gravação utilizado no Laboratório Multiusuário de Fotônica, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Curitiba. Para a monitoração das gravações foi utilizado o interrogador ótico (Micron Optics® SM 125) com resolução de 0,001 nm.

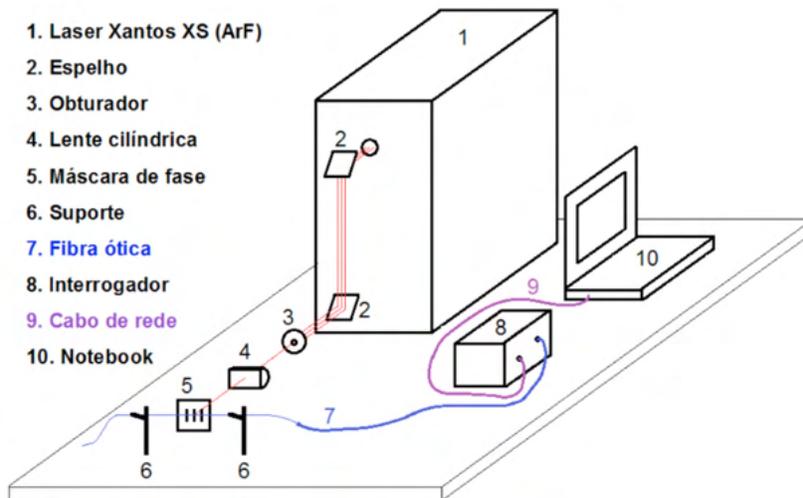


Figura 1 – Esquemático do sistema de gravação de FBG.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO PARA REGENERAÇÃO

A rede semente, que produzira o sensor 2, foi submetida a um tratamento térmico para obtenção da rede de Bragg regenerada. O referido sensor foi inserido em um forno elétrico tubular, que possui controle de temperatura até 1000 °C e foi desenvolvido no próprio grupo de pesquisa. O forno foi programado, para seguir uma rampa de aquecimento, iniciando em 22 °C e atingindo 900 °C em 30 minutos. O forno permaneceu em 900 °C por mais 80 minutos, até concluir a regeneração térmica da RFBG, resultando no sensor 2, seguido de resfriamento natural pela troca de calor com o ambiente.

O *setup* de monitoração durante o tratamento térmico do sensor 2 constituiu-se de interrogador ótico, forno elétrico tubular e controlador de temperatura, conforme a Figura 2.

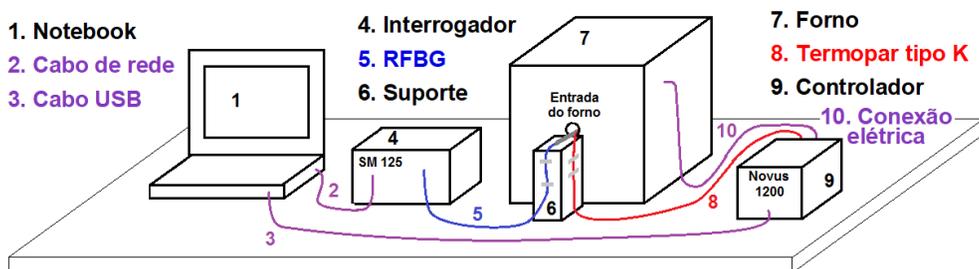


Figura 2 – *Setup* para monitoração do tratamento térmico do sensor 2.

O forno elétrico tubular é formado por uma resistência de níquel-cromo, posicionada a 15 cm da entrada, envolvendo um tubo em alumina com 12 mm de

diâmetro. A potência é fornecida por um relé eletrônico comandado pelo controlador Novus 1200, conforme mostra a Figura 3. A rede de Bragg foi posicionada no centro da área de aquecimento, que possui comprimento de ~3 cm. Para o monitoramento da temperatura interna do forno utilizou-se termopar tipo K ligado ao controlador, obtendo a temperatura na região próxima à FBG.

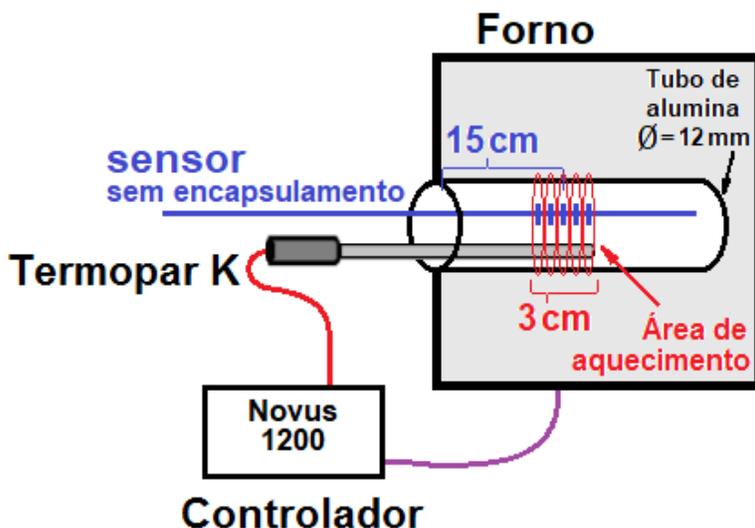


Figura 3 – Detalhes da parte interna do forno.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.4 ENCAPSULAMENTO

Os sensores 1 e 2 foram encapsulados utilizando um tubo capilar em aço inoxidável (AISI 304), com diâmetro interno de 0,3 mm e espessura de parede de 0,6 mm. Esta proteção é necessária para aplicações em campo, pois as fibras óticas são razoavelmente sensíveis a impacto e curvatura.

A fibra ótica possui uma proteção primária em acrilato, e outras camadas de materiais plásticos, que foram removidas para fabricação desses sensores e substituídas pelo encapsulamento em aço inox, conforme a Figura 4. A fixação entre o tubo capilar e a capa plástica externa do cordão ótico foi obtida utilizando tubo termorretrátil do mesmo tipo utilizado em isolamento de cabo elétrico.

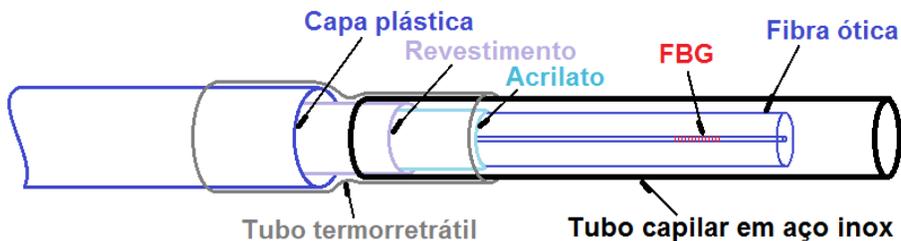


Figura 4 – Esquemático do encapsulamento da FBG para medição em reflexão.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

2.5 CALIBRAÇÃO

Os sensores 1 e 2 foram calibrados para obtenção da curva de sensibilidade térmica. Para isso, utilizou-se uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC) e controlador específico, com as temperaturas ajustadas para 5 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C, pois os referidos sensores serão operados em temperatura ambiente. Para cada temperatura selecionada foi aguardado um tempo de 5 minutos para adequada estabilização e adquiridas as medidas, de 1 em 1 minuto, totalizando 11 aquisições para cada temperatura. Para cada nível de temperatura foram realizadas as médias para os comprimentos de onda de Bragg, resultando na obtenção da curva de sensibilidade térmica.

2.6 APLICAÇÃO EM CAMPO

Os sensores foram fixados em chapa metálica (parede), próxima a uma janela do laboratório, com o auxílio de grampos metálicos parafusados. O laboratório é condicionado em 22 °C ± 2 °C, porém, como a chapa metálica tem contato direto com o exterior, as variações de temperatura são apreciáveis. O propósito para os sensores foi medir a temperatura na chapa metálica, correlacionar com as medições de um termopar tipo K e também observar possíveis degradações na amplitude espectral (envelhecimento).

O esquema que representa as ligações entre os equipamentos, os componentes elétricos e os sensores pode ser visto na Figura 5. Para evitar a fadiga ou deficiência de acoplamento nos conectores óticos, optou-se por seleção via chave ótica do sensor a ser medido em cada operação. A chave ótica (JDS Uniphase® 1:2 *channel*) é ativada por tensão contínua de 5 V, que altera o caminho ótico entre C e porta 2 (leitura do sensor 2), para C e porta 1 (leitura do sensor 1). Como referência de temperatura, utilizou-se multímetro (ICEL® MD-6111, com resolução de 1 °C) em conjunto com termopar tipo K. Os dois sensores e o termopar foram acoplados termicamente à chapa metálica com o auxílio de pasta térmica.

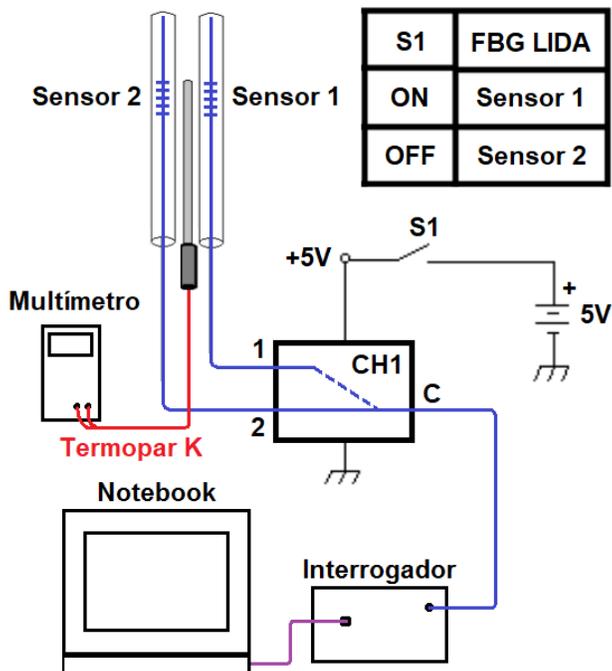


Figura 5 – Equipamentos, componentes elétricos e sensores para medição da temperatura ambiente.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

3 | RESULTADOS

Conforme a Figura 6, para o sensor 2 foram obtidos o espectro inicial (rede semente), em linha contínua, e os espectros finais após a regeneração, em linha tracejada representando o espectro da RFBG sem encapsulamento e em linha traço-ponto representando o espectro da mesma RFBG com encapsulamento. Os espectros foram obtidos em temperatura de 22 °C. É possível verificar a perda da saturação da rede de Bragg após a regeneração e seu deslocamento para um comprimento de onda menor. O encapsulamento não provocou alteração espectral significativa, indicando que a rede foi mantida sem deformação.

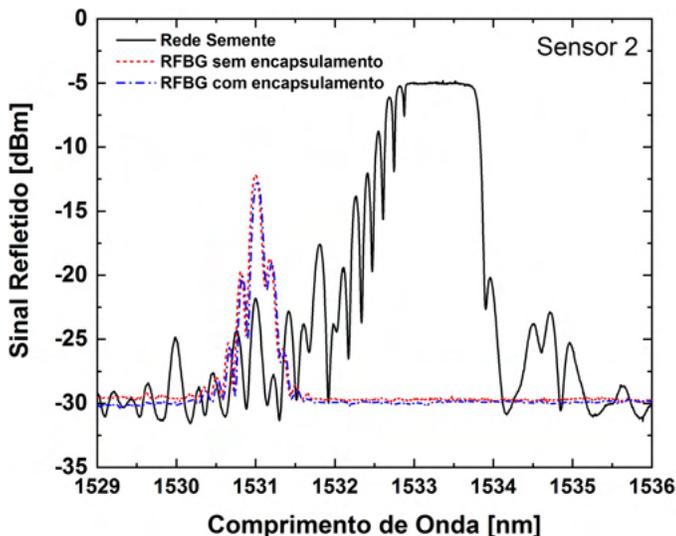


Figura 6 – Espectros em reflexão da FBG inicial (rede semente) comparada aos espectros regenerados após o tratamento térmico (RFBG com e sem encapsulamento).

Durante o tratamento térmico para obter o sensor 2, foram adquiridos os espectros, com posterior leitura de suas amplitudes, utilizando *software* comercial, resultando no gráfico mostrado na Figura 7. A temperatura (triângulos) foi elevada de 22 °C a 900 °C em 30 minutos e foi mantida em 900 °C por mais 80 minutos, totalizando aproximadamente 110 minutos. A amplitude do sinal refletido (círculos) permaneceu próxima de 26,4 dB até a temperatura atingir ~850 °C, porém a rede perdeu a saturação nessa fase. O processo foi seguido de redução gradativa na amplitude do sinal, atingindo um mínimo próximo de 8,5 dB aos 47 minutos. Por último, ocorreu a fase da regeneração (aumento gradativo do sinal) estabilizando a amplitude em aproximadamente 20 dB.

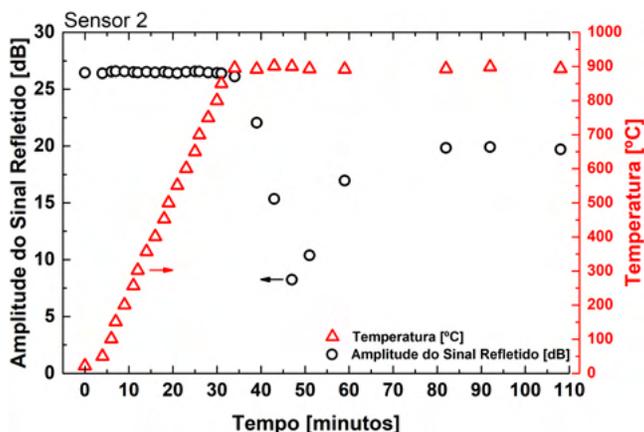


Figura 7 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor 2.

Para a calibração dos sensores 1 e 2, foi utilizado uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC). O sensor 1 apresentou sensibilidade térmica de 12,23 nm/°C e o sensor 2 apresentou sensibilidade térmica de 11,80 nm/°C, obtidas através de ajuste linear (Figura 8).

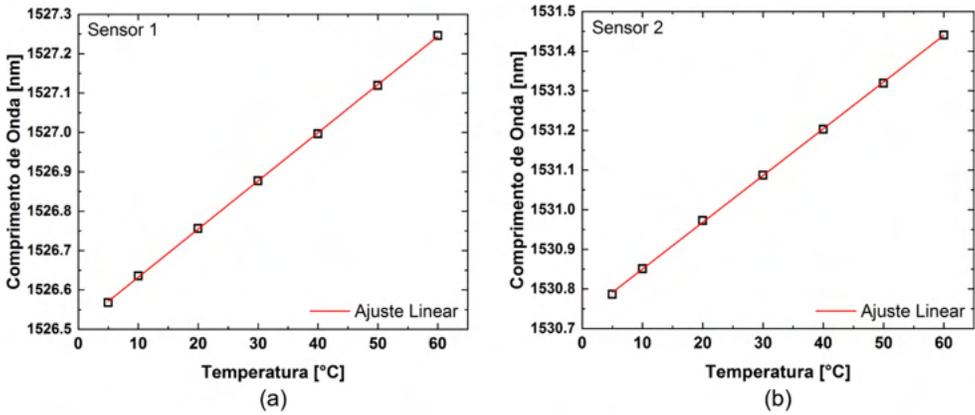


Figura 8 – Curva de sensibilidade térmica (a) do sensor 1 e (b) do sensor 2.

Durante 16 semanas, ambos os sensores monitoraram a temperatura ambiente (Figura 9). Na Figura 9.a pode-se observar, nos espectros do sensor 1, insignificantes variações nas intensidades dos sinais refletidos e os pequenos desvios no comprimento de onda são devido às diferentes temperaturas durante tais aquisições. Na semana 7, foi observado um deslocamento na linha de base, o que sugere ocorrência de flutuação na fonte ótica do interrogador. Da mesma forma, isso ocorre com o sensor 2, conforme mostra na Figura 9.b. Ainda na Figura 9.b, observa-se razoável correlação com os espectros mostrados na Figura 9.a, semana a semana, sugerindo alguma flutuação no sistema de interrogação/leitura e de temperatura entre as medições.

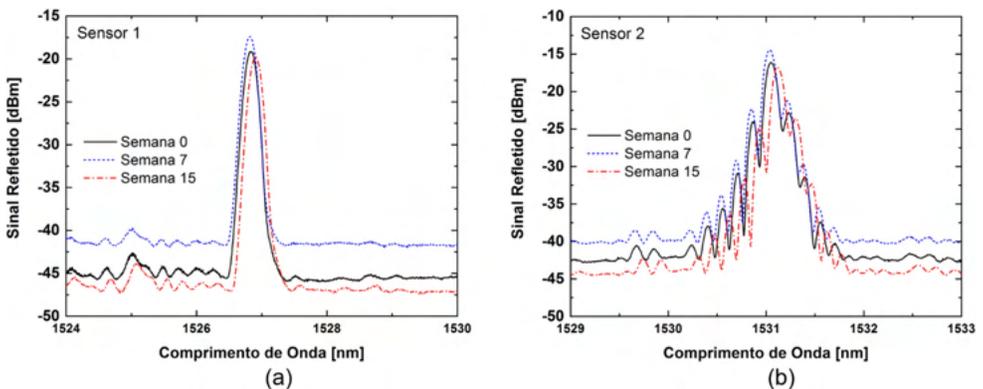


Figura 9 – Espectros em reflexão nas semanas 0, 7 e 15 (a) para o sensor 1 e (b) para o sensor 2.

A Figura 10 mostra as amplitudes dos sinais refletidos por ambos os sensores, ao longo das 16 semanas. Observa-se um padrão nas flutuações das amplitudes dos sinais refletidos pelos sensores, corroborando com uma provável flutuação na potência da fonte ótica do interrogador, como também pode ser observado nos espectros correspondentes às semanas 0, 7 e 15, mostrados na Figura 9. Aparentemente não ocorreu degradação apreciável em ambos os sensores durante o período observado.

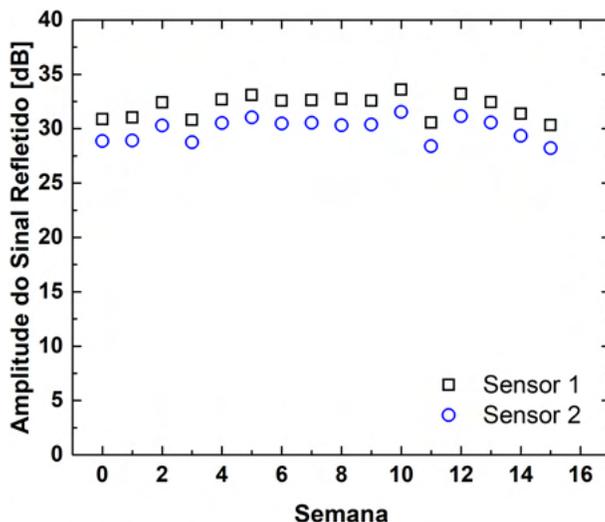


Figura 10 – Variações nas amplitudes dos sinais refletidos, correspondentes ao sensor 1 e ao sensor 2, ao longo das 16 semanas.

A Tabela 1 correlaciona as temperaturas obtidas pelos sensores 1 e 2 com a temperatura de referência, indicada no multímetro (termopar tipo K), ao longo do experimento. Para obter a temperatura através dos sensores 1 e 2, comparou-se o comprimento de onda de Bragg nos espectros adquiridos a cada semana com as respectivas curvas de calibração. Não foi observada divergência superior a 2 °C em nenhuma das medições.

Semana	Temperatura no multímetro [°C]	Temperatura no sensor 1 [°C]	Erro absoluto do sensor 1 [°C]	Temperatura no sensor 2 [°C]	Erro absoluto do sensor 2 [°C]
0	27	27	0	27	0
1	19	21	-2	21	-2
2	27	27	0	27	0
3	21	22	-1	23	-2
4	26	26	0	26	0
5	27	27	0	27	0
6	20	21	-1	21	-1
7	25	25	0	26	-1
8	24	24	0	25	-1
9	24	25	-1	26	-2
10	23	23	0	24	-1
11	23	23	0	24	-1
12	22	22	0	23	-1
13	23	23	0	24	-1
14	28	27	1	29	-1
15	33	32	1	33	0

Tabela 1 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores ao longo das 16 semanas.

4 | CONCLUSÃO

As leituras obtidas pelos sensores 1 e 2 referenciadas ao multímetro, apresentaram diferenças máximas de 2 °C, eventualmente estando dentro da faixa de erro dos instrumentos. O experimento relatou 16 semanas e nesse tempo não foi possível mensurar perda de intensidade do sinal refletido pelos sensores óticos, até pelo fato de ter ocorrido alguma flutuação no próprio sistema interrogador, havendo uma variação de ~2 dB entre os dois sensores, o que não influencia a análise dos resultados para os objetivos propostos.

Devido a razoavelmente baixa temperatura de operação, que foi inferior a 40 °C, a durabilidade e exatidão observada nos dois sensores óticos são razoavelmente próximas, o que eventualmente poderá mudar com o transcorrer do experimento, devido ao sensor 2 ter sido produzido através de regeneração em FBG, normalmente mais estável. Ambos os sensores se mostraram adequados para aplicação em campo e apresentaram razoável precisão e exatidão em relação ao medidor de temperatura de referência. O encapsulamento proposto revelou-se eficiente, tanto pela robustez, quanto pela baixa influência sobre as características de uma FBG sem cápsula.

Os dois sensores apresentados neste trabalho continuam sob análise na mesma instalação, possibilitando novas conclusões em médio/longo prazo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, além de ter apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Multiusuário de Fotônica, UTFPR – Curitiba.

REFERÊNCIAS

ALWIS, L. S. M.; BUSTAMANTE, H.; ROTH, B.; BREMER, K.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V. Evaluation of the durability and performance of FBG-based sensors for monitoring moisture in an aggressive gaseous waste sewer environment, **Journal of Lightwave Technology**, v. 35, n. 16, p. 3380-3386, 2017.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ÅSLUND, M. Regenerated gratings. **Journal of European Optical Society-Rapid Publications** 4, n. 09052, 2009.

COSTA, L. N. da; MOURA, C. C. de; OLIVEIRA, V. de; CHIAMENTI, I.; KALINOWSKI, H. J. Bragg gratings written with ultrafast *laser* pulses, **Journal of Microwaves**, v. 14, p. 15-24, 2015.

EGAN, R. J.; INGLIS, H. G.; HILL, P.; KRUG, P. A.; OUELLETTE, F. Effects of hydrogen loading and grating strength on the thermal stability of fiber Bragg gratings. **Optical Fiber Communication Conference**, OFC-1996, p. 83-84. San Jose, California, USA, 1996.

FENG, D.; LIU, Y.; LUO, X.; ZHANG, X. Experimental study on high temperature regeneration of fiber Bragg grating, **Proceedings of the SPIE** (2019), Beijing, China, v. 11455, p. 1-6, 2020.

FIORIN, R.; FRANCO, A. P. G. O.; SOUZA, M. A. de; FONTENELE, D. M.; JONES, I. L. G.; KALINOWSKI, H. J.; ABE, I. Case study for monitoring the rhythmic masticatory muscle activity during sleep bruxism episodes by using fiber Bragg gratings, **Journal of Lightwave Technology**, vol 37, n. 18, p. 4823-4829, 2019.

FOKINE, M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 19, n. 8, p. 1759-1765, 2002.

FRAZÃO, O.; ARAÚJO, F. M.; DIAS, I.; FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L. Sensores de Bragg em Fibra Óptica, **Jornadas de Engenharia de Telecomunicações e Computadores – JETC99**, Lisboa, Portugal, 1999.

GUO, Y.; XIONG, L.; LIU, H. Research on the durability of metal-packaged fiber Bragg grating sensors, **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 31, n. 7, p. 525-528, 2019.

HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication, **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, 1978.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure thorough phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, p. 1035-1037, 1993.

LU, K.; YANG, H.; LIM, K.; AHMAD, H.; ZHANG, P.; TIAN, Q.; DING, X.; QIAO, X. Effect of two annealing processes on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in hydrogenated standard optical fibers, **Applied Optics**, v. 57, n. 24, p. 6971-6975, 2018.

MIHAILOV, S. J.; SMELSER, C. W.; GROBNIC, D.; WALKER, R. B.; LU, P.; DING, H.; HUNRUH, J. Bragg gratings written in Al-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800 nm femtosecond radiation and phase mask, **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 1, p. 94-100, 2004.

MOURA, C. C. de; INACIO, P. L.; CHIAMENTI, I.; OLIVEIRA, V. de; KALINOWSKI, H. J. Regeneration characteristics of FBG written for the visible spectral range, **Proceedings of the SPIE (2017)**, Jeju, Republic of Korea, v. 10323, p. 1-4, 2017.

OLIVEIRA, V. de. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**, Tese (Doutorado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 137 p., 2012.

PAL, S.; JANDAL, J.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V.; FOKINE, M.; CARLSSON, F.; FONJALLAS, P. Y.; WADE, S. A.; COLLINS, S. F. Characteristics of potential fibre Bragg grating sensor-based devices at elevated temperatures. **Measurement Science and Technology**, v. 14, n. 7, p. 1131-1136, 2003.

PATRICK, H.; GILBERT, S. L.; LIDGARD, A.; GALLAGHER, M. D. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber, **Journal Applied Physics**, v. 78, n. 5, p. 2940-2945, 1995.

PENG, J.; ZHOU, X.; JIA, S.; JIN, Y.; XU, S.; CHEN, J. High precision strain monitoring for lithium ion batteries based on fiber Bragg grating sensors, **Journal of Power Sources**, v. 433, p. 1-7, 2019.

TERADA, G. G. **Caracterização e aplicação de sensores à fibra ótica no setor petroquímico**, Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 120 p., 2010.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN PARA INVERSIÓN CON OPTIMIZACIÓN DE SECCIÓN CONDUCTOR Y TENSIÓN DE DISTRIBUCIÓN. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DEL LEY DE KELVIN

Data de aceite: 01/10/2021

Christian Arturo Ramirez Osorio

Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo - Paraguay

Enrique Buzarquis

Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo - Paraguay

Rodney Damián Fariña Martínez

Universidade Federal de Itajubá
Minas Gerais - Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1699708890823093>

RESUMEN: A inicios de la expansión de los Sistemas Eléctricos de Potencia se publicaron varias teorías respecto a las condiciones óptimas para transmitir la energía eléctrica. Una de ellas es la enunciada por Lord Kelvin, en Inglaterra en el año 1881, teoría conocida como la Ley de Kelvin. En la actualidad los niveles de tensiones de transmisión y distribución están definidas por normas internacionales y regionales, en este estudio se analizan los paradigmas relacionados a que valor de estas tensiones normalizadas sería el óptimo para el caso de estudio y para ello se aplica el fundamento de la Ley de Kelvin, con el fin de evaluar inversiones para la expansión del sistema eléctrico de distribución. Se debe mencionar que en la práctica este concepto tiene limitaciones, por lo que en este trabajo se diseña una metodología utilizando algoritmos en donde se integran los valores anuales de las variables

que intervienen en el fundamento teórico, también se definen las restricciones de tal forma a que los resultados obtenidos sean aplicables. Así, gracias a la metodología desarrollada, se hallan las curvas de costos anuales de construcción, depreciación, intereses para el financiamiento de las líneas y pérdidas de energía eléctrica, donde la función objetivo será minimizar la suma de los mismos. Para ello se utilizan funciones de comandos de Matlab, obteniendo de esta forma la sección óptima del conductor como así también la tensión de distribución óptima asociado a este para una proyección de 10 años.

PALABRAS CLAVE: Ley de Kelvin. Cálculo de Pérdidas de Energía, Costos Anuales de construcción de líneas de distribución. Optimización estática.

AVALIAÇÃO DE INVESTIMENTO COM OTIMIZAÇÃO DE SEÇÃO DO CONDUTOR E TENSÃO DE DISTRIBUIÇÃO. APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DA LEI DE KELVIN

RESUMO: No início da expansão dos Sistemas Elétricos de Potência, várias teorias foram publicadas sobre as condições ótimas de transmissão de energia elétrica. Uma delas é a enunciada por William Thomson, na Inglaterra em 1881, teoria conhecida como Lei de Kelvin. Atualmente os níveis de tensões de transmissão e distribuição são definidos por normas internacionais e regionais, neste estudo são analisados os paradigmas relacionados a qual valor dessas tensões normalizadas seria o ótimo para o estudo de caso e para isso são analisados

os fundamentos da Lei de Kelvin, em a fim de avaliar investimentos para a expansão do sistema de distribuição de energia elétrica. De referir que na prática este conceito apresenta limitações, pelo que neste trabalho é desenhada uma metodologia utilizando algoritmos onde se integram os valores anuais das variáveis que intervêm na fundamentação teórica, sendo as restrições também definidas de forma a que os resultados obtidos são aplicáveis. Assim, graças à metodologia desenvolvida, encontram-se as curvas de custos anuais de construção, depreciação, juros de financiamento das linhas e perdas de energia elétrica, onde a função objetivo será minimizar a soma delas utilizando funções de comando do MATLAB®; obtendo assim a seção ótima do condutor, bem como a tensão de distribuição ótima associada a ele para uma projeção de 10 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Lei de Kelvin. Cálculo de perdas de energia. Custos anuais de construção de linhas de distribuição. Otimização estática.

EVALUATION FOR INVESTMENT WITH OPTIMIZATION OF CONDUCTOR SECTION AND DISTRIBUTION VOLTAGE. APPLICATION OF KELVIN'S LAW ALGORITHMS

ABSTRACT: At the beginning of the expansion of Electric Power Systems, several theories were published about the optimal conditions for electric energy transmission. One of them is enunciated by William Thomson, in England in 1881, a theory known as Kelvin's Law. Currently, the transmission and distribution voltage levels are defined by international and regional standards, in this study the paradigms related to which value of these normalized voltages would be the optimal for the case study are analyzed, and for this, the fundamentals of Kelvin's Law are analyzed, in order to evaluate investments for the expansion of the electric energy distribution system. It should be noted that in practice this concept has limitations, so in this work a methodology is designed using algorithms where the annual values of the variables that intervene in the theoretical foundation are integrated, and the restrictions are also defined so that the results obtained are applicable. Thus, thanks to the developed methodology, the annual construction cost curves, depreciation, interest on financing lines and electricity losses are found, where the objective function will be to minimize their sum using MATLAB® command functions; thus obtaining the optimum conductor section as well as the optimum distribution voltage associated with it for a 10-year projection.

KEYWORDS: Kelvin's Law. Calculation of energy losses. Annual costs, construction of distribution lines. Static optimization.

1 | INTRODUCCIÓN

En Paraguay existen varias restricciones para la expansión del sistema de distribución de energía eléctrica, principalmente en áreas urbanas densamente pobladas. Una de ellas representa a los problemas estructurales para la edificación de nuevas obras con el fin atender la demanda de suministro de energía eléctrica mediante la construcción de nuevas Estaciones de Transformación, como así también ampliaciones de la red de media tensión de distribución.

Para el caso de la expansión del sistema de distribución, el medio físico donde se

deben hacer las ampliaciones de los locales de transformación, generalmente están muy limitados en cuanto al espacio para la construcción e instalación de ductos y salidas de nuevos alimentadores, esto hace que inevitablemente se tenga aglomeración de los conductores en las canaletas o ductos, lo que hace que la capacidad de conducción de corriente real de los mismos sea considerablemente menor, esto conlleva pérdidas considerables de energía por efecto Joule y en el peor de los casos, la ocurrencia de fallas en los conductores con la consecuencia de un corte de energía eléctrica, valorado a partir del Costo de Energía no Suministrada (CENS).

Otra problemática desde el punto de vista estructural se observa en el sistema de transmisión, en donde se tiene la dificultad de emprender la construcción de nuevas Estaciones de Transformación en áreas urbanas densamente pobladas, debido a la escasez de terrenos de las dimensiones adecuadas para instalación de las mismas.

Estas limitaciones, son en la actualidad algunas de las principales condicionantes para la expansión del Sistema Eléctrico de Distribución en Paraguay.

En base al análisis de la problemática enunciada, a fin de optimizar las inversiones y de obtener mayor capacidad de transporte de energía eléctrica en el sistema de distribución, en este estudio se aplica la Ley de Kelvin. De esta forma se encuentra el momento y la sección de conductor económicamente conveniente de manera a incrementar la línea troncal del alimentador estudiado y seleccionado como muestra.

Con este mismo fundamento, se realiza un análisis similar con otros valores de tensión n veces superior a la tensión de distribución actual, considerando que la relación de capacidad de transporte en Vatios a una tensión superior es n^2 , ya que con ello se tendría la posibilidad de transportar n^2 veces más potencia en las mismas condiciones de infraestructura en cuanto a espacio físico disponible.

Para ello, en este trabajo se investigan los criterios actuales para definición de niveles de tensión de distribución y se desarrolla una metodología para hallar la tensión óptima para centros de carga con las características del alimentador seleccionado como muestra.

Todas las variables que intervienen en la aplicación de Ley de Kelvin son integradas al algoritmo desarrollado en este estudio.

Se debe hacer mención que, en la práctica, el fundamento de la Ley de Kelvin tiene ciertas limitaciones para su aplicación, la cuales se citan a continuación:

- I. No es fácil estimar la pérdida de energía en la línea sin curvas de carga reales, que no están disponibles en el tiempo de estimación.
- II. El costo anual a cuenta de intereses y la depreciación en el desembolso de capital no tienen una forma lineal.
- III. Esta ley no tiene en cuenta varios factores como la densidad de corriente segura, resistencia mecánica, pérdida de corona, etc.
- IV. El tamaño del conductor determinado por esta ley puede no siempre puede ser practicable, puede ser demasiado pequeño para el transporte seguro de

la corriente necesaria.

- V. El interés y la depreciación en el desembolso de capital no pueden ser determinados con precisión. [1].

Con la metodología a implementar se logrará gracias a la programación y manipulación de datos masivos, estimar las curvas de cargas reales determinando posteriormente las pérdidas por efecto Joule, utilizando el Software CYMDIST ¹ y teniendo en cuenta diferentes valores de proyección de la demanda de energía eléctrica. También se obtienen las curvas referentes a los costos de los materiales y la variación de estos en función a la sección y tensiones de servicio de los mismos.

Para que el conductor a definir, utilizando el concepto de la Ley de Kelvin, sea seguro (referida a la densidad de corriente), se utilizará en el algoritmo el Costo de la Energía Eléctrica no Suministrada (CENS), de tal forma a que este valor sea la restricción a las soluciones posibles.

De esta manera, una vez obtenidas las matrices de estas variables la función objetivo será minimizar la suma de la relación entre el costo anual de interés y depreciación referente a los costos de construcción y el área de la sección del conductor, como así también la relación entre el costo anual de energía desperdiciada y el área de sección del conductor, así se obtendrá la sección óptima económica para la proyección de la demanda especificada.

La misma metodología será aplicada a otros niveles de tensión normalizados a fin de verificar la variación de los costos y la conveniencia respecto a la construcción de nuevas Estaciones de Transformación.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Tomando como base lo expuesto en el apartado anterior, en el presente trabajo se propone como objetivo general “Hallar el valor óptimo de tensión de distribución, como así también la sección de conductor óptima para el alimentador seleccionado como muestra, desarrollando una metodología basada en la Ley de Kelvin, con la cual se pueda evaluar opciones de inversión para un plazo de 10 años”.

Considerando la necesidad de que el sistema de distribución se adapte a la expansión del sistema eléctrico, además se instauran los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los criterios y normas a ser tenidos en cuenta para adoptar un determinado nivel de tensión en distribución.
- Desarrollar algoritmos a fin de observar el comportamiento de las variables y realizar los cálculos necesarios para la aplicación de la Ley de Kelvin para distintos escenarios.
- Estimar los costos del financiamiento para la construcción y depreciación de

¹ Paquete base para el análisis del sistema de distribución del software CYME, utilizada en la Administración Nacional de Electricidad (ANDE)

nuevas líneas de distribución.

- Hallar los costos anuales de las pérdidas de energía eléctrica por efecto Joule en conductores a tensiones normalizadas para el alimentador seleccionado como muestra.

Las preguntas guía para el presente trabajo son: i) Ya que en el segmento de generación y en muchos casos en transmisión, se encuentran cantidades de excedentes de potencia. ¿Qué alternativa sería la óptima para distribuir dicha cantidad de excedente teniendo en cuenta las restricciones estructurales existentes? ¿Cómo se pueden integrar las distintas variables que componen la determinación de un valor de tensión y sección de conductor óptimo en distribución? En relación con las preguntas se plantean las siguientes hipótesis: i) El valor óptimo de tensión y sección óptima del sistema de distribución en estudio es el que presenta menores costos anuales totales para el tiempo analizado. ii) El desarrollo de un algoritmo basado en la Ley de Kelvin permitirá evaluar los costos anuales totales para diferentes niveles de tensión y secciones de conductores.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Las Tensiones de Distribución Normalizadas en Paraguay se definen en el Pliego de Tarifas N°21 [2].

Tensiones trifásicas (entre fases)

Muy alta tensión: 220.000 Voltios

Alta tensión: 66.000 Voltios

Media tensión: 23.000 Voltios

Baja tensión: 380/220 Voltios

Tensiones monofásicas (entre fase y neutro)

Media tensión: 23.000 / $\sqrt{3}$ Voltios

Este pliego a su vez está basado en el Reglamento Para Instalaciones Eléctricas de Media Tensión, que data del año 1975, así como también del Reglamento para instalaciones de Baja Tensión que data del año 1971 [2].

En los últimos años se construyeron las líneas de transmisión ITAIPU-VILLA HAYES y AYOLAS-VILLA HAYES, en 500kV, por lo que este nivel de tensión pasa a formar parte de los niveles de tensiones utilizados en el Sistema Eléctrico Paraguayo.

Los conductores normalizados y utilizados en el sistema de distribución eléctrica en Paraguay y a los que está enfocado el presente estudio son: [5].

Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio

- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 35 mm²
- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 50 mm²

- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 70 mm²
- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 95 mm²
- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 150 mm²
- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 240 mm²
- Conductor Desnudo de Aleación de Aluminio, de 300 mm²

Normas internacionales

Definición de los niveles de tensión según la Norma IEC 60038

Serie I			Serie II	
Tensión máxima para el equipo (kV)	Tensión nominal del sistema (kV)		Tensión máxima para el equipo (kV)	Tensión nominal del sistema (kV)
3,6	3,3	3	4,40	4,16
7,2	6,6	6	-	-
12	11	10	-	-
-	-	-	13,2	12,47
-	-	-	13,97	13,2
-	-	-	14,52	13,8
(17,5)	-	(15)	-	-
24	22	20	-	-
-	-	-	26,4	24,94
36	33	25	-	-
-	-	-	36,5	34,5
40,5	-	35	-	-

Tabla 1- Tensiones nominales entre 1 kV y que no excedan de 36 kV. [6].

Ley de Kelvin

El área de conductor más económica es aquella para la cual el costo total anual de la línea de transmisión es mínimo. Esto se conoce como Ley de Kelvin. Fue Lord Kelvin quien lo declaró por primera vez en 1881. “El costo anual total de la línea de transmisión se puede dividir ampliamente en dos partes: Tasa anual de desembolso de capital y costo anual de energía desperdiciada en el conductor” [7]. Si bien la definición de la Ley de Kelvin se refiere a sistemas de transmisión, para este estudio, este concepto será aplicado a sistemas de distribución ².

Este costo anual se puede ilustrar gráficamente trazando el costo anual contra el área ‘a’ del conductor como se muestra en la Ilustración 1. En el diagrama, la línea recta (1) muestra la relación entre los costos anuales (es decir, P1 + P2a) y el área de la sección ‘a’

² Elaborado por el autor

del conductor. De manera similar, la hipérbola rectangular (2) proporciona la relación entre el costo anual de energía desperdiciada y el área de sección 'a'. Al sumar las ordenadas de las curvas (1) y (2), se obtiene la curva (3). Esta última curva muestra la relación entre el costo anual total ($P_1 + P_2a + P_3 / a$) de la línea y el área de la sección 'a'. El punto más bajo de la curva (es decir, el punto P) representa el área más económica de la sección. [1].

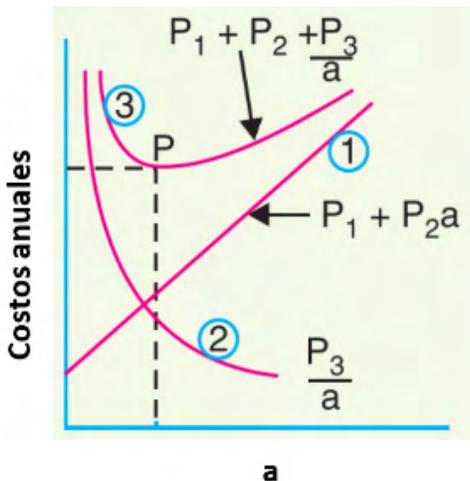


Ilustración 1 - Representación gráfica de la Ley de Kelvin [1].

a: Sección del conductor.

P_1 : Costo de la línea de transmisión o distribución que no depende de la sección del conductor.

P_2 : Costo de la línea de transmisión o distribución que depende de la sección del conductor (Interés para el financiamiento de la construcción de la línea y depreciación del material).

P_3 : Costo de las pérdidas por efecto Joule.

Para la elección del voltaje óptimo, se obtiene una curva para el costo total de transmisión contra el voltaje, como se muestra en la Ilustración 2. El punto más bajo (P) en la curva proporciona la tensión de transmisión económica. Por lo tanto, en el presente caso, OA es la tensión de transmisión óptima [1].

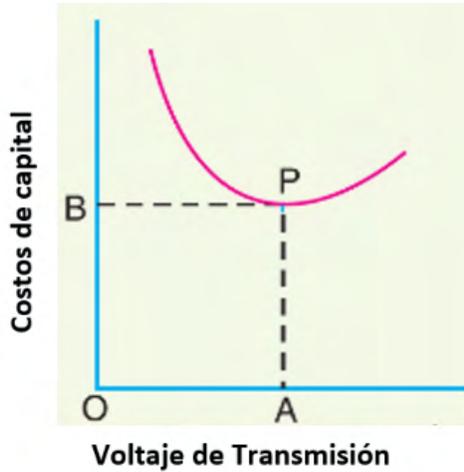


Ilustración 2 - Voltaje de transmisión óptimo [1].

Por otro lado, la tendencia actual es seguir ciertas fórmulas empíricas para encontrar la tensión de transmisión económica. Así, de acuerdo con la práctica estadounidense, el voltaje económico entre las líneas de un sistema trifásico AC es: [7].

$$V = 5,5 \sqrt{0,62l + \frac{3P}{150}} \quad (1)$$

l: longitud de la línea de transmisión o distribución.

P: Potencia a transmitir.

V: Tensión económica

Proyección de la Demanda

En la Tabla 2, se presenta una comparación de las tasas de crecimiento de la demanda máxima consideradas por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) en su plan de expansión y de las resultantes del análisis de demanda llevada a cabo en el marco del estudio de tarifas eléctricas.

Proyección	Caso Bajo	Caso Medio	Caso Alto II	Caso Alto I y Esc. ANDE
ANDE	4,1%	5,8%	7,1%	9,3%
EEC 3 ³	3,8%	5,0%	5,3%	6,1%

Tabla 2 - Comparación de Demanda máxima - tasas anuales acumulativas proyectadas 2012-2022 [8].

³ Estudios Energéticos Consultores

Costo Marginal de Generación

En función a estudios referenciados, se definió como Costo Marginal de Largo Plazo de la Energía (CMLPE) de 35,66 USD/MWh. Que es el costo a utilizar para hallar los costos por perdidas de energía [8].

Determinación del Costo de la Falla

Los resultados de estudios referenciados oscilan en el rango [2,94 USD/kWh a 4,09 USD/kWh] los cuales resultan consistentes con las experiencias internacionales [8].

MARCO METODOLÓGICO

Universo de estudio

Los análisis se basaron en la Estación Transformadora de 220/66/23 kV llamada Estación San Lorenzo, en adelante ES-SLO, y como muestra se ha seleccionado el alimentador de 23 KV SLO-18.

Técnicas de recolección de datos

La selección de nivel de tensión de distribución para zonas urbanas será hecha con la técnica del análisis documental. Así, las tensiones normalizadas serán las expuestas en la Tabla 1 del presente estudio.

Con respecto a la definición de los Costos de construcción de líneas de distribución para diferentes secciones de conductores normalizados, será hecha con la técnica del análisis documental. De esta manera se tienen los costos modulares para la construcción de los alimentadores aéreos de Aleación de Aluminio Desnudo de Media Tensión (MT). En la Tabla 3 son representados estos valores en USD/km.

Item	Construcción de Línea de MT	Materiales		Mano de obra	Total
		Conductor	Estructuras/postes		
1	Línea Trifásica de 3x35mm ²	484	9.199	3.565	13.248
2	Línea Trifásica de 3x50mm ²	533	10.119	3.921	14.573
3	Línea Trifásica de 3x70mm ²	620	11.784	4.901	17.304
4	Línea Trifásica de 3x95mm ²	806	15.319	6.371	22.496
5	Línea Trifásica de 3x150mm ²	841	15.981	6.906	23.728
6	Línea Trifásica de 3x240mm ²	1.093	20.775	7.485	29.354
7	Línea Trifásica de 3x300mm ²	1.421	27.008	8.113	36.542

Tabla 3 - Costos modulares de materiales y mano de obra (USD/km), para construcción de alimentadores MT [5].

Interés y depreciación de líneas de distribución

Los valores hallados correspondientes a la Depreciación Anual para los diferentes tipos de líneas adoptadas en este estudio fueron:

ce23=	[68073	74880	87198	113357	118259	153736	199857]
cc23=	[3583	3941	4589	5966	6224	8091	10519]
p23=	ce23 + cc23						

$$d23 = \frac{p23 - vd}{vu} \quad (2)$$

ce23 = costos de postación (estructuras, aisladores, postes), tensión 23kV

cc23 = costo de conductores, tensión 23kV

$$cil = (cons23 - \sum_1^{n-1} a) * il \quad (3)$$

a = amortización

vu = Vida Útil

vd = Valor de desecho (se considera 0)

Los intereses para el financiamiento de las obras para los conductores se hallaron de la siguiente forma:

$$cons\ 23 = cc\ 23 + ce\ 23 + cm\ 23 = \text{costo de la obra (USD)} \quad (4)$$

$$ci\ 23 = cis + cil = \text{costo anual de interés del financiamiento (USD)} \quad (5)$$

$$a = cons\ 23/n \quad (6)$$

$$cis = (cons\ 23 - \sum_1^{n-1} a) * is \quad (7)$$

n = número de periodos de pagos

is = Interés fijo

il = Interés variable (tasa Libor [10])

ce23 = costos de postación (estructuras, aisladores, postes), tensión 23kV

cc23 = costo de conductores, tensión 23kV

cm23 = costo de mano de obra, tensión 23kV

Una vez obtenidos los valores anualizados de los intereses y depreciación se definen los mismos, a fin de tener la curva 1 (Ilustración 1) a ser analizados con el fundamento de la ley de Kelvin. La matriz de resultados se muestra en la Tabla 4 con su correspondiente representación en la Ilustración 3.

Año	Sección (mm ²)						
	35	50	70	95	150	240	300
1	6.851	7.536	8.897	10.558	12.160	15.267	19.261
2	6.371	7.008	8.270	9.806	11.300	14.203	17.936
3	5.890	6.479	7.642	9.054	10.440	13.139	16.611
4	5.410	5.951	7.015	8.302	9.579	12.074	15.286
5	4.930	5.422	6.387	7.550	8.719	11.010	13.961
6	4.449	4.894	5.760	6.798	7.858	9.945	12.636
7	3.969	4.366	5.132	6.046	6.998	8.881	11.311
8	3.488	3.837	4.505	5.294	6.138	7.817	9.986
9	3.008	3.309	3.877	4.542	5.277	6.752	8.661
10	2.528	2.780	3.250	3.790	4.417	5.688	7.336

Tabla 4 - Costos anuales (USD) de interés y depreciación - tensión 23kV.

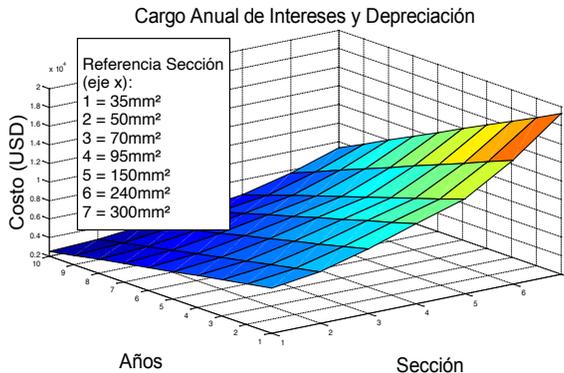


Ilustración 3 - Costos Anuales de Interés y Depreciación, tensión 23kV.

Los resultados obtenidos indicados en la Tabla 4 son mostrados en función del tiempo y para cada sección de conductor estudiado. Se puede observar que para una sección menor se tiene menores costos anuales referentes a la depreciación y gastos en intereses en relación a los conductores de secciones superiores que requieren mayor inversión inicial.

Pérdidas de energía eléctrica, para líneas MT de 23kV

El Costo de la Energía no Suministrada (CENS), fue hecha con la técnica del análisis documental, se ha utilizado el valor de 4.09 USD/kWh, que es el resultado obtenido por [8].

Las pérdidas y costos por efecto Joule en las líneas se hallaron mediante simulaciones hechas en el software CYMDIST ⁴.

En la Tabla 5 son representados los valores de las pérdidas en los conductores para distintos factores de carga, calculadas en el software.

⁴ CYMDIST: paquete base para el análisis del sistema de distribución del software CYME, utilizada en ANDE.

Sección del conductor		35mm ²	50mm ²	70mm ²	95mm ²	150mm ²	240mm ²	300mm ²
Carga		Pérdidas (KW)						
(kW)	(A)							
1.000	27,92	10,80	7,60	5,60	4,20	2,50	1,60	1,40
2.000	55,85	43,70	30,60	22,60	16,70	10,00	6,60	5,50
3.000	83,77	99,10	69,30	50,80	37,50	22,60	14,90	12,40
4.000	111,70	177,30	123,80	90,40	66,80	40,20	26,60	22,10
5.000	139,62	278,90	194,50	141,40	104,40	63,00	41,70	34,50
6.000	167,55	404,00	281,50	203,70	150,50	91,00	60,10	49,70
7.000	195,47	552,80	384,90	277,40	204,90	124,10	82,00	67,60
8.000	223,40	725,30	505,00	362,50	267,80	162,50	107,30	88,30
9.000	251,32	921,30	641,70	459,10	339,00	206,10	136,00	111,80
10.000	279,24	1.140,3	795,10	567,00	418,80	255,00	168,20	138,10
11.000	307,17	1.381,5	965,10	682,60	506,90	309,30	203,90	167,20
12.000	335,09	1.643,5	1.151,70	814,80	603,40	368,90	243,10	199,00
13.000	363,02	1.924,4	1.354,50	958,80	708,40	433,80	285,70	233,60
14.000	390,94	2.221,3	1.573,10	1.112,1	821,80	504,20	332,00	271,10
15.000	418,87	2.530,3	1.807,00	1.276,7	943,50	579,90	381,00	311,20

Tabla 5 - Pérdidas en los conductores por efecto Joule, tensión 23kV (Simulación efectuada en el software CYMDIST).

A fin de tener cuantificadas y anualizadas las pérdidas se elabora una curva de pérdidas característica (ilustración 4) a partir de la Tabla 5 para cada sección de conductor y para diferentes valores cargas horarias (CAH), que fueron datos suministrados por el Centro de Operaciones de ANDE.

Ecuaciones obtenidas a partir de la matriz de pérdidas

$$p_{35}(i) = 0,00129 \cdot CAH(i) \quad 2, 0208 \quad (8)$$

$$p_{50}(i) = 0,009 \cdot CAH(i) \quad 2, 0229 \quad (9)$$

$$p_{70}(i) = 0,0071 \cdot CAH(i) \quad 2, 0035 \quad (10)$$

$$p_{95}(i) = 0,0053 \cdot CAH(i) \quad 2, 0008 \quad (11)$$

$$p_{150}(i) = 0,0031 \cdot CAH(i) \quad 2, 0122 \quad (12)$$

$$p_{240}(i) = 0,002 \cdot CAH(i) \quad 2, 0177 \quad (13)$$

$$p_{300}(i) = 0,0018 \cdot CAH(i) \quad 1,9982 \quad (14)$$

$p_{(i)}$ = Energía pérdida (kWh), para cada tipo de conductor.

CAH = Carga máxima horaria del alimentador (A) SLO – 18.

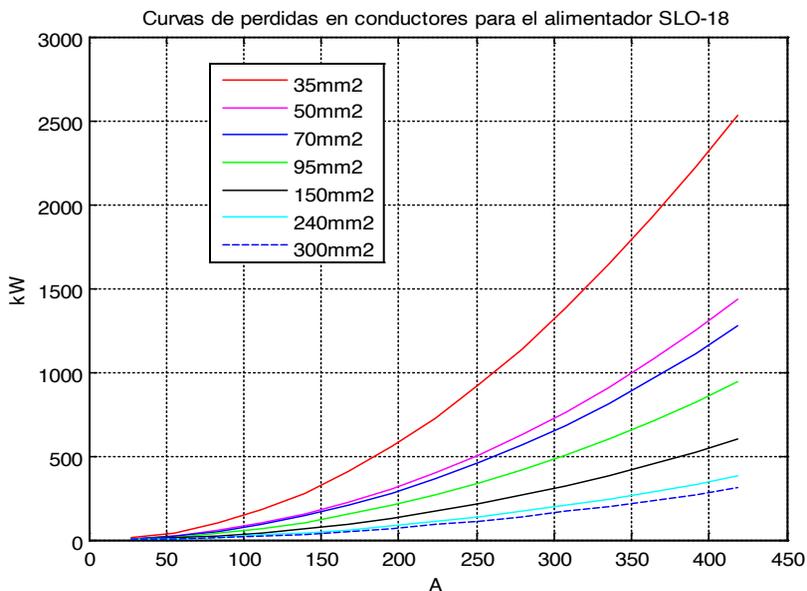


Ilustración 4 - Curva de pérdidas por sección de conductor.
Principal del alimentador SLO-18.

Cálculo del costo de pérdidas anuales en USD, por cada tipo de conductor

Desarrollado el algoritmo, se aplica una tasa de crecimiento de la demanda de 9,3%, se obtiene la matriz $C_{8760 \times 10}$, que contendrá la demanda horaria proyectada para el tiempo de estudio. Si bien es poco probable que la configuración del alimentador se mantenga invariable en el tiempo, para este estudio se considera constante.

El algoritmo compara cada uno de estos valores con la capacidad de conducción de cada uno de los tipos de conductores principales estudiados, definiendo como restricción el límite de conducción de estos, para así aplicar el criterio del CENS.

Queda así definida la matriz $cp(i,j)$, que es la matriz del costo anualizado de las pérdidas para cada tipo de conductor para un periodo de 10 años, a ser analizadas con el fundamento de la ley de Kelvin y representados en la Ilustración 5 y en la Tabla 6 en forma matricial.

Año	Sección (mm²)						
	35	50	70	95	150	240	300
	(USD)						
1	10.172.649	3.752.970	636.745	79.223	27.928	18.538	15.083
2	13.770.329	5.995.614	1.618.793	201.971	35.412	22.181	18.016
3	17.842.561	9.167.516	3.189.729	538.055	52.977	26.541	21.519

2 | CONCLUSIONES

Se identificaron las tensiones normalizadas según norma IEC 60038, esto es muy importante ya que la mayoría de los fabricantes de equipos que son utilizados en sistemas de distribución, los fabrican para estos valores. Por lo que los cálculos y estimaciones también fueron hechos para estos.

Se definieron los costos de construcción de líneas de media tensión utilizando como fuente la base de datos de ANDE para líneas con conductores de hasta 150mm², para los conductores de secciones superiores, se estimaron con factores proporcionales. Para los costos de construcción de líneas de media tensión a tensiones superiores se utilizaron ecuaciones y normas para la determinación de las distancias horizontales y verticales respectivamente, estimando la diferencia de costos de los materiales con respecto a las líneas de 23kV para la construcción de líneas de hasta 44kV. Para este estudio se consideró que la línea no tiene otra de menor tensión en el mismo recorrido, ya que si fuese así, las distancias eléctricas verticales serían mayores y necesariamente de deberían aumentar la altura de los postes. Para esta hipótesis, según norma, no fue necesario aumentar las alturas de los postes.

Se logró, a través de entrevistas y revisión documental, conocer y tener en cuenta las condiciones contractuales para el financiamiento de las obras de expansión del sistema de distribución, así también, se estudió la metodología y los valores para el cálculo de la depreciación de los bienes, necesarios para la aplicación de la ley Kelvin.

Mediante el programa CYMDIST, se logró calcular las pérdidas para diferentes secciones de conductores para línea de media tensión de 23kV y obtener las ecuaciones de pérdidas en función de la carga, como así también para tensiones superiores (34,5kV), según norma IEC 60038, también se ha simulado para una tensión de 44kV, a pesar de no corresponder a la referida norma, debido a que es también una tensión de distribución utilizada en la región. Una vez obtenidas las pérdidas anuales para una proyección de la demanda de 10 años, se obtuvieron las matrices de pérdidas para cada sección de conductor y tensión de distribución.

Halladas las pérdidas por efecto Joule en las líneas de distribución, aplicando el algoritmo desarrollado, se obtuvieron las matrices de costos de pérdidas anuales, para cada sección de conductor y tensiones de distribución.

Se halló el conductor óptimo con el fundamento de la Ley de Kelvin, se obtuvieron los resultados para el escenario propuesto. Los cálculos se efectuaron en el escenario donde se adoptaron los valores más altos correspondientes a tasas de intereses y tasa de crecimiento de la demanda. Se obtuvieron las matrices de costos anuales para cada sección de conductor

y tensión de distribución, llegando a la conclusión de que no es conveniente aumentar el nivel de tensión de distribución aplicado a la muestra en estudio, debido a que, para estos casos, los costos globales a tensiones superiores son mayores a los costos para la tensión de distribución a 23KV.

Con todos los objetivos específicos logrados, y superadas las limitaciones de la Ley de Kelvin, se concluye que se logró el objetivo general de este estudio, el cual es definir el valor óptimo de tensión de distribución para la muestra en estudio, siendo así la tensión de 23kV, el valor óptimo para este caso. También se determinó la sección de conductor óptima, comprobando que con el algoritmo y la metodología utilizada se puede definir el momento más conveniente de ampliación de la red de distribución estudiada, o aumento de sección del mismo teniendo en cuenta todas las variables que intervienen en la Ley de Kelvin.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **EL-SAADAWI, D. M.** (2010). Electric Supply Systems. Recuperado el 8 de Mayo de 2020, de http://www.saadawi1.net/upLoadedFiles/extra_files/6il7b60h9e.pdf.
- [2] **ADMINISTRACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD ANDE** (1975). Reglamento de Media Tensión. ANDE. (2017).
- [3] **ADMINISTRACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD ANDE.** Piego de Tarifas N°21. ANDE. (2018).
- [4] **ADMINISTRACION NACIONAL DE ELECTRICIDAD ANDE.** Compilación Estadística 1997-2017. ANDE. (2019).
- [5] **BASE DE DATOS.** ANDE. (2020). Compilación Estadística 1997-2019. Cier. (17 de abril de 2017). ANDE tiene las tarifas más bajas para industrias. Asunción. Paraguay.
- [6] **SCHNEIDER, E.** (2010). Guía de Diseño de Instalaciones Eléctricas Según Normas Internacionales IEC. Obtenido de https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Application+solutions&p_File_Name=020511_E10-guia-diseno-instalac-electricas.pdf&p_Doc_Ref=020511E10. Schneider, Electric . (2010). Guía de Diseño de Instalaciones Eléctricas 2010. Barcelona: Schneider.
- [7] **STILL, A.** (1919). Electric Power Transmission. New York: Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
- [8] **ESTUDIOS ENERGÉTICOS CONSULTORES.** (2005). Asistencia Técnica para la Elaboración de los Estudios de Costos y Tarifas, Caracterización;
- [9] **DIAZ, T.** (2010). Definición de Libor. Recuperado el 4 de Diciembre de 2019, de <https://www.economiasimple.net/glosario/libor>.
- [10] **ENCICLOPEDIA, E.** (2018). Enciclopedia Económica. Recuperado el 6 de Abril de 2019, de <https://enciclopediaeconomica.com/depreciacion/>
- [11] **MoneyCafe.com.** (2019). 6 Month LIBOR (Reported Monthly) Definition. Recuperado el 4 de Agosto de 2020, de <https://www.moneycafe.com/6-month-libor/>

STRATEGIES OF VOLTAGE CONTROL BASED IN FUZZY LOGIC ALGORITHMS WITH ALTERNATIVE, CLEAN AND RENEWABLE GENERATION OPERATING WITH ANOTHER CONVENTIONAL ELECTRIC GENERATION IN WITH RADIAL LOADS IN POWER SYSTEMS STABILITY

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: xx/08/2021

Rodney Damián Fariña Martínez

PhD student. Federal University of Itajubá. MG. Brazil.

<http://lattes.cnpq.br/1699708890823093>

Antonio Carlos Zambroni de Souza

Professor Advisor. Federal University of Itajubá. MG. Brazil

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

Eliane Valença Nascimento de Lorenci

Co-advisor Professor. Federal University of Itajubá. MG. Brazil.

<http://lattes.cnpq.br/6445725475979187>

ABSTRACT: The energy extracted from petroleum-derived fuels is becoming more expensive and of difficult availability. When these materials are transformed into electrical energy, they radiate heat energy and as a consequence of this combustion, pollutes the environment. On the other hand, having water resources is not easy when they are not available and cannot be processed in their natural form. It should be noted that the Electricity Generation from the Nuclear reaction of radioactive elements is very expensive. It is true that with a small percentage of atomic fuel, heat energy can be generated more than 1000 times than the usual fuels. Consequently, the use of this kind of energy requires greater care in handling it. The radioactive waste generated by this atomic reaction cannot be destroyed, it can

only be stored away from natural life. There are many methods of creating Clean Electric Energy, from Renewable Resources such as water, wind, biomass, Solar Light, static energy stores, etc. These methods make the production of clean electrical energy moderately expensive. Unless there is a specific and mandatory regulation of a Central Government for the use of this type of Generation and interconnected to the National Electricity Network. This Electrical Interconnection should be done in an interesting way in terms of economics and the Stability of the Electrical Power System. In this research, a portion of an Electric Power Transmission Subsystem is used for the study; electrically located towards the North-West of the main “Electric Center” of the National Electricity Network. A photovoltaic plant of 50MWp of capacity in alternating current, and a Battery Energy Storage System of 15MW in direct current were introduced, where there are very long Transmission Lines, Electrical Substations with very radial loads. In this part of the electrical network, the Diesel Generation is usually a necessity, both to supply feeder loads as well as to control Voltage at times of maximum demand. This power system is normally connected to the National Electricity Network.

KEYWORDS: Fuzzy logic, voltage control, artificial intelligence.

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE TENSÃO BASEADAS EM ALGORITMOS DE LÓGICA FUZZY COM GERAÇÃO ALTERNATIVA, LIMPA E RENOVÁVEL OPERANDO COM OUTRA GERAÇÃO ELÉTRICA CONVENCIONAL COM CARGAS RADIAIS NA ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA

RESUMO: A energia extraída dos combustíveis derivados do petróleo estão-se tornando mais cara e de difícil disponibilidade. Quando esses materiais são transformados em energia elétrica, eles irradiam energia térmica e, como consequência dessa combustão, poluem o meio ambiente. Por outro lado, ter recursos hídricos não é fácil quando eles não estão disponíveis e não possam ser processados em sua forma natural. Deve-se notar que a Geração da Eletricidade a partir da reação nuclear de elementos radioativos é muito custosa. É verdade que com uma pequena porcentagem de combustível atômico, a energia térmica pode ser gerada mais de 1000 vezes do que os combustíveis usuais. Consequentemente, o uso desse tipo de energia requer maior cuidado em sua manobra. O lixo radioativo gerado por esta reação atômica não pode ser destruído, só pode ser armazenado longe da vida natural. Existem muitos métodos de geração de energia elétrica limpa, a partir de recursos renováveis, como água, vento, biomassa, luz solar, armazenamento de energia estática, etc. Esses métodos tornam a produção da energia elétrica limpa moderadamente custosa. Exceto regulamentação específica e obrigatória de Governo Central para a utilização desta modalidade de Geração e interligada à Rede Elétrica Nacional. Esta Interligação Elétrica deve ser feita de forma interessante em termos de Economia e Estabilidade do Sistema Elétrico de Potência. Nesta pesquisa, uma parte do Subsistema de Transmissão de Energia Elétrica é usada para o estudo; localizado eletricamente a Noroeste do principal “Centro Elétrico” da Rede Elétrica Nacional. Foi introduzida uma central fotovoltaica de 50MWp de capacidade em corrente alternada e um Sistema de Armazenamento de Energia a Baterias de 15MW em corrente contínua, onde existem Linhas de Transmissão muito longas, Subestações Elétricas com cargas muito radiais. Nesta parte da rede elétrica, a Geração Diesel costuma ser uma necessidade, tanto para suprir cargas dos alimentadores quanto para controlar a Tensão nos momentos de máxima demanda. Este sistema de energia é normalmente conectado à Rede Nacional de Eletricidade.

PALAVRAS-CHAVE: Fuzzy Logic, controle da Tensão, Inteligência Artificial.

1 | GENERAL INTRODUCTION

In this part of the research, based on the previous studies, we will include the Bidirectionality of the equipment, the flywheels of inertia and we will analyze the results to advance towards the investigations of renewable energy (specifically Solar Light) with PVP. The main objective of this study is to determine the best management of the reactive power for optimal voltage control at strategic points where the stresses are being felt. The secondary objective is to use the resources available in the power system under study. All the signals that will go to the control sensors (primary and secondary voltage controls, generation prices) through a powerful and versatile artificial intelligence (AI) tool; such as complex fuzzy logic (FL) decision algorithms.

Electromechanical Characteristics

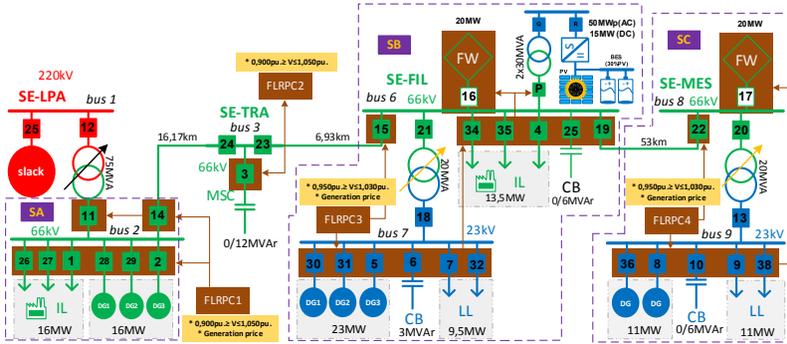


Figure 1. PES in studies with injection NES, DG, PVP and BESS.

ELECTRICAL SUBSTATION

It remains practically the same, except for the 50MWp (AC) and 15MW (DC) PVP and BES [23] System respectively, connected directly to the SE-FIL 66kV bus load center.

TRANSMISSION LINES

In general terms, the Transmission Lines did not suffer great variations.

GENERATION

As for the Generation, it was fully adapted with GD. Electric Substation has its own DG, requesting to operate without interconnection with the NEN, to operate in Islands or to operate in fully autonomous and independent Sub-Islands. The Electric Generators (Diesel) and (Gas) are distributed in 66kV and 23kV, very close to the Load. One PVP and BES [23] System will be connected directly to the bus of SE-FIL 66kV.

POWER TRANSFORMERS

In general terms, the Power Transformers of system in study did not suffer great variations. In the SE-FIL, the PT that will serve as the source for PVP and BESS [23] [24] will be two (2) of 66 / 23kV of 30MVA each.

COMPENSATION

A flywheel is added to the SE-FIL and SE-MES to accelerate or brake under-frequency or over-frequency respectively and of an electrodynamic nature.

LOADS

In general terms, the Loads of system in study did not suffer great variations [22]. *The loads and DG were divided into parts equal or proportional to the loads of each SE in order to facilitate the practicality, performance and academic analysis of the systems under study.*

COMMERCIAL FEATURES

In this part it was not investigated in depth contractual, but obviously the regulation of buying and / or selling the energy of the NEN, Diesel, Gas or Solar must be studied. This research focuses directly on the Voltage Stability of the SEP under study.

CURRENT CONTROL ACTIONS FOR THE OPERATION OF THE ELECTRICITY NETWORK

Currently the control actions are carried out by varying the voltages of the neighboring SE. Load shedding according to need or making a connection in parallel with a Generator Distributed (DG) and PVP/BES system during convenience operative or temporarily during times of high demand or bad weather. All this information would be processed thanks to the programming and intervention of the MATLAB® FUZZY DESIGN [21] to carry out similar decisions.

The actions of control of Voltage and Operation of the electromechanical equipment would be left to the decision of the FLPRC strategically located throughout the study PES.

PHOTOVOLTAIC POWER PLANT AND BATTERY [24] ENERGY STORAGE SYSTEM (PREVISION)

To the SEP studied, a PVP and BES [23] systems are added in the Electric Power Transmission Levels format, directly connected to the 66kV bus of the SE-FIL, as shown in figure 29.

THE FOLLOWING DATA WERE EXTRACTED FROM SOLARGIS®

Dates in [15]

Global tilted irradiation Yearly average: 5,418 kwh/m² per day.

Air temperature Yearly average: 25°C.

Specific photovoltaic power output Yearly average: 4,284 kwh/m² per day.

Performance ratio Yearly average: 79,1%.

Address: Filadelfia, Boquerón, Paraguay.

Geographical coordinates: -22,380451°, -060,03574°

Time zone: UTC-04, America/Asuncion [PYT].

Elevation: 139m.

Land cover: Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation.

Population density: 1inh./km².

Terrain azimuth: flat.

Terrain slope: 0°.

Below are pictures of project horizon and sun path. Also, they are detailed in the image of day length and solar zenith angle.

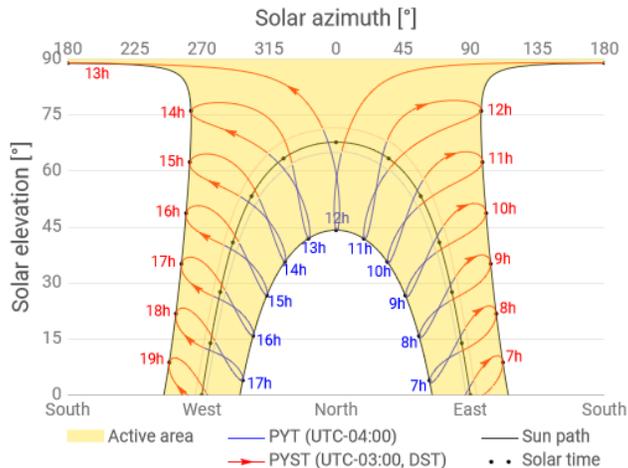


Figure 2. Project horizon and sun path. Adapted from [15].

In the same way, were obtained, the data of the Solar Energy Potential and Meteorology.

Global horizontal irradiation (GHI): 5,139 kWh/m² per day.

Direct normal irradiation (DNI): 4,707 kWh/m² per day.

Diffuse horizontal irradiation (DIF): 2,010 kWh/m² per day.

Ratio of diffuse to global irradiation (D2G): 0,391.

Air temperature: 24,7°C.

Cooling degree days (CDD): 2.527 degree days.

Heating degree days (HDD): 70 degree days.

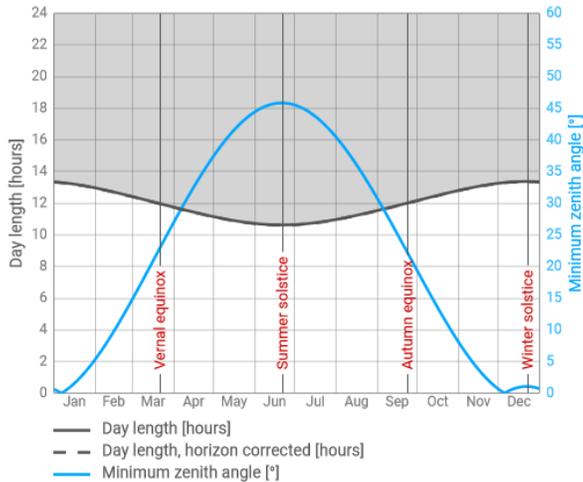


Figure 3. Day length and solar zenith angle. Adapted from [15].

On the other hand are shown, but from the same information source [15], the Photovoltaic Electricity data and its performance.

Specific photovoltaic power output (PVOU specific): 4,284 kWh/kWp per day.

Total photovoltaic power output (PVOU total): 78.189.816,6 kWh

Global tilted irradiation (GTI theoretical): 5,418 kWh/m² per day.

Long-Term PV Power Potential Data (25-Year Average) from the same information source [15].

Specific photovoltaic power output: 4,005 kWh/kWp per day.

Total photovoltaic power output: 73.084.033,5 kWh.

Performance ratio: 73,9 %

Capacity factor: 16,7 %

GLOSSARY

- **Cooling degree days:** Quantifies energy demand needed to cool a building. “Cooling degree days” are a measure of how much (in degrees), and for how long (in days), outside air temperature was higher than a specific base daily average temperature (18°C). Yearly and monthly values are aggregated from daily values
- **Capacity factor:** The ratio of an actual electrical energy output over a year to the maximum possible electrical energy output over a year expressed in %. The maximum possible power production is the AC installed capacity times the number of hours in a year, while the actual production is the amount of electricity delivered annually from the project.
- **Ratio of diffuse to global irradiation:** Ratio of diffuse horizontal irradiation and

global horizontal irradiation (DIF/GHI).

- **Diffuse horizontal irradiation:** Average yearly, monthly or daily sum of diffuse horizontal irradiation.
- **Direct normal irradiation:** Average yearly, monthly or daily sum of direct normal irradiation.
- **Global horizontal irradiation:** Average annual, monthly or daily sum of global horizontal irradiation.
- **Global tilted irradiation:** Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation.
- **Global tilted irradiation (theoretical):** Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation without consideration of terrain shading.
- **Heating degree days:** Quantifies energy demand needed to heat a building. “Heating degree days” are a measure of how much (in degrees), and for how long (in days), outside air temperature was lower than a specific base daily average temperature (18°C). Yearly and monthly values are aggregated from daily values.
- **Performance ratio:** Ratio between specific AC electricity output of a PV system and global tilted irradiation received by the surface of a PV array (PVOU_{specific}/GTI).
- **Specific photovoltaic power output:** Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by a PV system and normalized to 1 kWp of installed capacity.
- **Total photovoltaic power output:** Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by the total installed capacity of a PV system.
- **Air temperature:** Average yearly, monthly and daily air temperature at 2 m above ground.

THEORETICAL DATA OF PHOTOVOLTAIC PANELS DISCLOSED BY THE SAME SOURCE OF INFORMATION [15]

System size: Installed capacity: 50MWp

PV module type: c-Si - crystalline silicon (mono or polycrystalline).

Geometry of PV modules: Azimuth: 0° • **Tilt:** 21°.

Relative row spacing: 2,5

Inverter type: Centralized high-efficiency inverter [97.8% Euro efficiency].

Transformer type: High efficiency transformer [0.9% loss].

Snow and soiling losses at PV modules: Monthly soiling losses up to 3.5 % • Monthly snow losses up to 0.0 %.

Cabling losses: DC cabling 2 % • DC mismatch 0.3 % • AC cabling 0.5 %.

System availability: 99.5 %.BES System.

BESS [24] equivalent to 30% of the total installed capacity of the PVP, or 15MW. (tentative and theoretical values). [23] Local ESS is a local provider of storage capacity for storing and delivering energy. This equipment is very necessary when sunlight is not present. This storage equipment must be capable of delivering a certain amount of energy to the Electric Grid (EG).

[23] The parameters of the Li-ion battery are defined via look-up tables based on experimental data.

[24] The lifetime of each type of PV array is 20 years. It is assumed that the replacement time of the BESS is four years. The minimum and maximum rated power values of each PV array are 200kW and 20MW, respectively. For the BESS, the minimum and maximum rated capacity values of each battery are 20kWh and 1MWh, and the minimum and maximum rated power values of each battery are 20kW and 1MW.

Parameters of Batteries (Bullich-Massagué et al; 2020; Mariaud et al., 2017).

	Battery 1	Battery 2	Battery 3
Description	Lead-acid	Li-ion	NaS
Charging/discharging efficiency (%)	91,0	94,0	88,0
Cycle number (cycle)	600,0	5000,0	2500,0
SOC ^{min}	0,4	0,1	0,2
SOC ^{max}	0,9	1,0	0,8
Unit power capacity cost (\$·kW ⁻¹)	400,0	700,0	500,0
Unit energy capacity cost (\$·kWh ⁻¹)	600,0	900,0	1200,0
O &M coefficient (%)	1,0	1,0	1,0

Table 1. Parameter of Batteries [adapted from 24].

PHOTOVOLTAIC POWER PLANT AND BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (IN OPERATION)

Data of Operation [16].

Address: Del Salto Department, Uruguay.

Geographical coordinates: -31.262800°, -57.863060°

Name: PVP “EL NARANJAL”.

Start-up by “INGENER GROUP” and managed by “COLIDIM S.A”.

Installed Capacity (MW): 50MWp

Solar panels and respective trackers: 200.000 panels.

Area destined for PV Generation: 145Ha. Or 1.449.000m².

Photovoltaic Power Plant and Battery Energy Storage System For a proposed case study.

[23] [24] For this case, a PVP/BESS Complex is of **50MWp (AC)** and **15MW (DC)** are proposed, **with double solar panels (200.000)**, with solar flow followers or **trackers** [17], connected directly to the 66kV Buss of SE-FIL, as shown in the figure for an area of 150Ha.

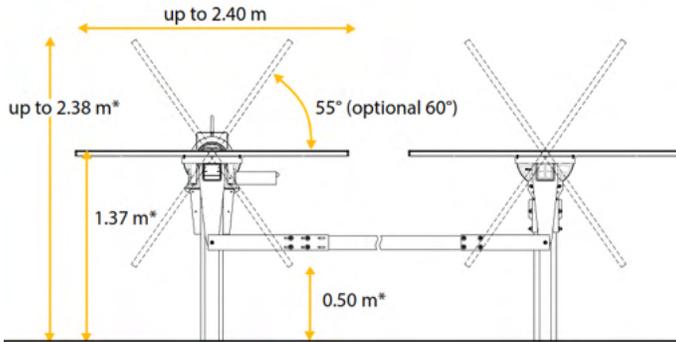


Figure 4. Tracker-Duetto: all in one. Adapted from [17].

Appearance of the PVP and BES System to be used in the SE under study.

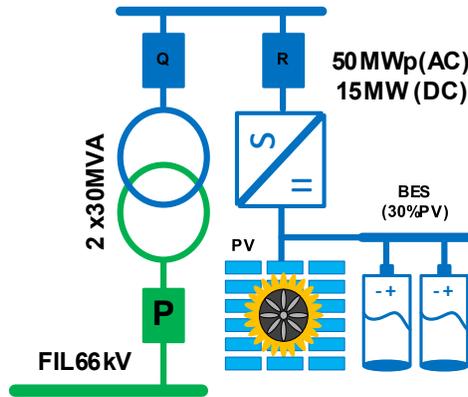


Figure 5. PVP and BES System (own creation).

Historical maximum demand (MW) in the SEP under study hour by hour. The different voltages of the buses involved are also displayed: 220, 66 and 23kV respectively. Simulation results are compared in RP (Power flows) vs. Values registered on February 23, 2021, the day that the historical maximum demand of 3,777MW was registered. The **Load registered** correspond to **SE-LPA**

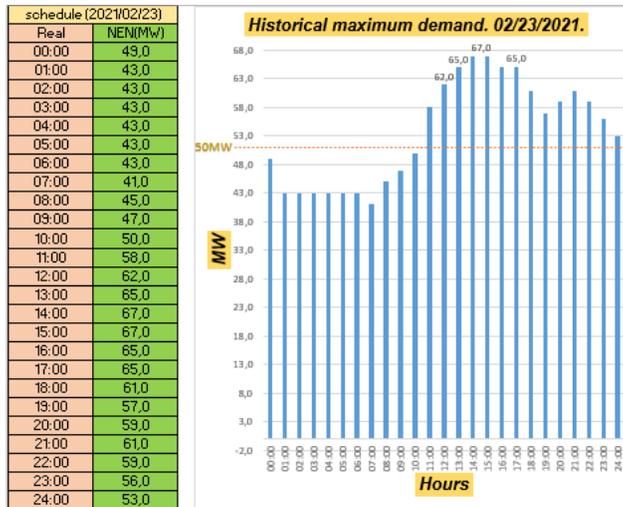


Table 2 and Figure 6. Historical Maximum demand (MW), 02/03/2021. (own creation).

RESULTS AND DISCUSSIONS. GENERAL EQUATION OF TRANSMISSION LOSSES

$$\text{Loss} = 100\% - \left(\frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{G_t} \right) \quad 6$$

(6) Where L_n are the Loads and G_t are the total Generation.

$$\text{Loss} = 100\% - \left(\frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{DG_1 + DG_2 + \dots + DG_n + NEN} \right) \quad 7$$

(7) Where L_n are the Loads, DG_n are Distributed Generation and **NEN** is the National Electricity Network.

$$\text{Loss} = 100\% - \left(\frac{L_1 + L_2 + \dots + L_n}{DG_1 + DG_2 + \dots + DG_n + NEN + PVP + BESS} \right) \quad 8$$

(1) Where L_n are the Loads, DG_n are Distributed Generation, **NEN** is the National Electricity Network, **PVP** is Photovoltaic Power Plant and **BESS** is Battery Energy Storage System.

The losses are calculated below for each notable case presented.

Chapter	Load	Generation	Loss
2	59,6	69,4	14,1 %
3	59,3	59,7	0,7 %
4	56,3	56,3	0,0 %

Table 3. Calculation of Transmission Losses for each case.

RECORD OF HISTORICAL VALUES VS PROPOSALS OF PVP AND BESS

The following shows the registered values of Voltage Values, after the Intervention of PVP [15] [16], GD [12], NEN and BESS [23] [24] for generation in the record of maximum demand, Values in MW.

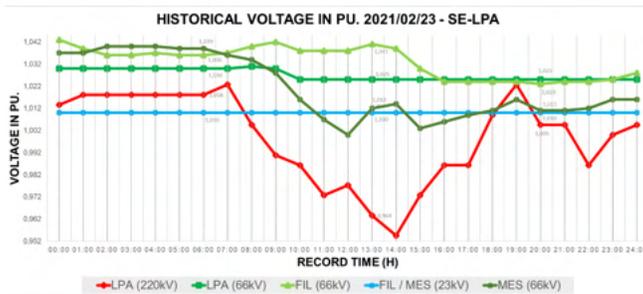


Figure 7. Voltage in different Buses of SEP in studied.

It is observed that the Voltage values in 66 as 23kV respectively remain constant, thus maintaining a fine control of them. TAP positions are gained and Transmission losses decrease drastically.

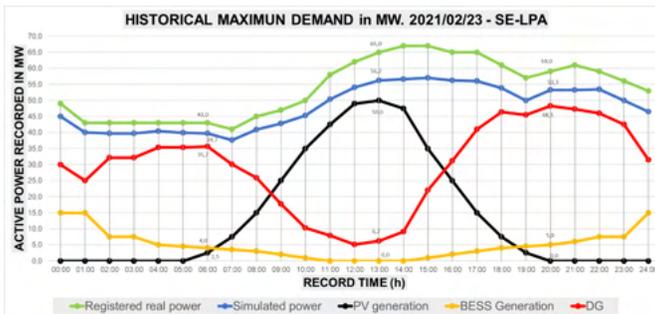


Figure 8. Generation NEN, DG, PV and BESS as a result of joint operation.

The historical Demand versus the generations NEN, DG [12] , PV [16] , BES [23] in terms of Active Power (MW) are plotted below. The great intervention of the additional generations is observed, maintaining the system with a lot of reliability, performance, sturdiness and with a wide Voltage control. Losses for Transaction decrease dramatically. The partial or total feeding of the feeders becomes very easier.

The **green curve** corresponds to the Active Power registered in 220kV buses of the SE-LPA. The **blue curve** corresponds to the (simulated) Active Power in 220kV buses of the SE-LPA after the intervention of the other Electric Generations. The **black curve** corresponds to the generation (simulated) of the PV in 66kV buses of the SE-FIL. The **yellow curve** corresponds to the Generation (simulated) of the BESS in 66kV buses also of the SE-FIL.

And the **red curve** corresponds to (simulated) the entire DG in each Electrical Substation in the vicinity of the load (LPA, FIL and MES).

PROGRAMMING IN MATLAB® [21] THE NEW PROPOSAL OF PV AND BESS

Programming for the new proposal of PV Injection and BES [23] system related to other generation sources to control Voltage and supply feeder service using MATLAB® Fuzzy Logic Design [21] Tool.

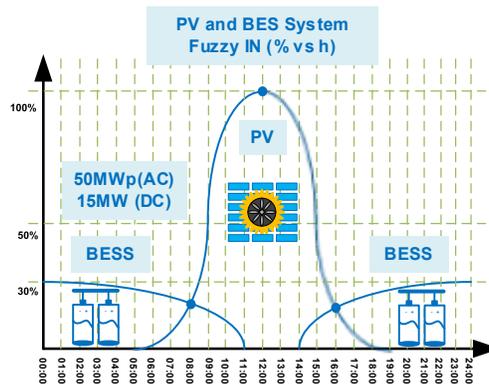


Figure 9. Behavior during the day regarding the injection of Active Power from

PVP/BESS COMPLEX TO SEP AND THE SAME FOR THE NIGHT (THEORETICAL FORM AND OWN CREATION)

Behavior during the day regarding the injection of Active Power from PVP to SEP and the same for the night (Theoretical form). These signals would be an input value for the Fuzzy Brain Together with another Voltage Signal, since this Power Electronics equipment does not have physical inertia, so it is impossible for it to control transients of an electrodynamic nature and it must have other equipment capable of facing such situations. For protection in this case was considered a Normal Voltage of Operation between 0,950 and 1,030 pu.

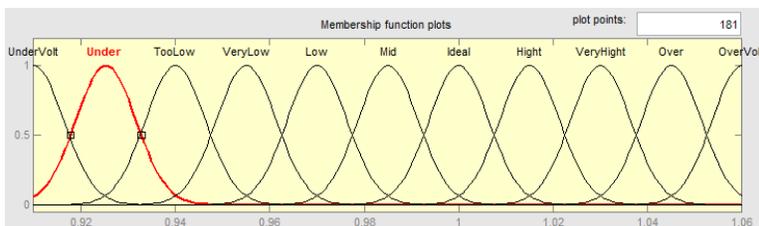


Figure 10. Voltage input in 66kV Buses for PVP/BESS Complex.

Figure 38 shows another of the FB input signals to associate with the triangular

decision output.

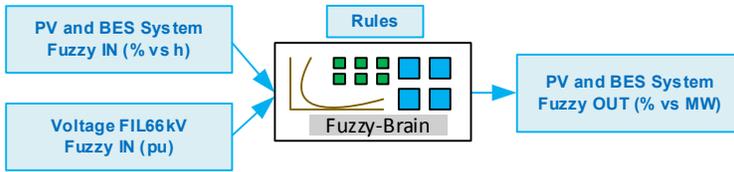


Figure 11. Inputs, processing and decision making.

Process by which the inputs are processed by the fuzzy brain based on established rules to associate them with the triangular decision output.

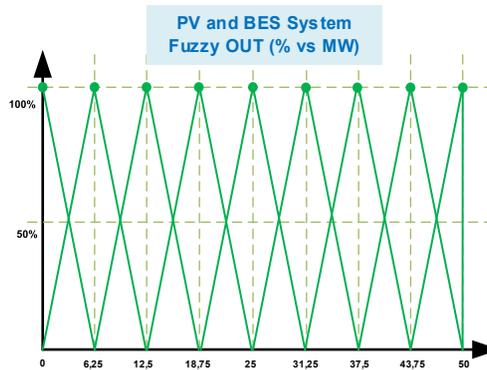


Figure 12. Output with triangular decision after going through Fuzzy processing

The next step would be to carry out the programming including the PVP and the BESS [24], for later conclusions.

FIRST PROGRAMMING PROPOSALS IN MATLAB®

First programming proposals in MATLAB, taking into account the operational limits of Voltage and availability in the PV / BESS generation as input, and the Generation relation in MW for the establishment of the rules.

After carrying out some programming in MATLAB®, satisfactory results were obtained regarding the Participation of the PV Generation and BESS from 00:00 to 24:00 on a hot summer day and in full sun. The PVP / BESS Complex operating range has also been related in terms of Voltage limits from 0,950 to 1,030 pu; that is, from 62,7kV to 68kV.

Topology of the construction and relationship of input, processor and output data, through the CF to the different FLRPC installed throughout the PES.

PRELIMINARY RESULTS AFTER PROGRAMMING IN MATLAB®

MATLAB® graphics defines a surface by the z-coordinates of points above a rectangular

grid in the x-y plane. The plot is formed by joining adjacent points with straight lines. Surface plots are useful for visualizing matrices that are too large to display in numerical form and for graphing functions of two variables [21].

The following graph (Surface Graphics) shows the axes in three dimensions:

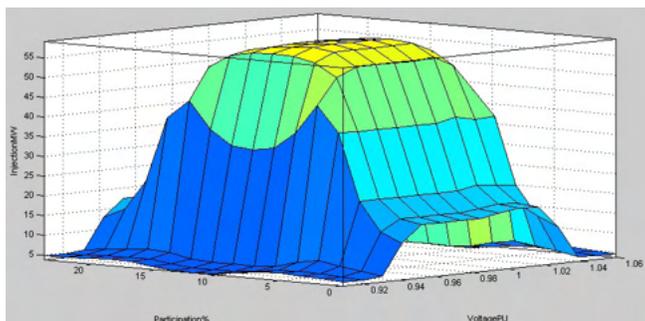


Figure 13. Surface Graphics. Results of the programming of the PVP / BESS complex.

In figure 13, **Axis “X”**, which indicates the Active Power Injection from the PVP / BESS complex (5 to 50MW) and that its operation is subject to the value of the 66kV bus voltage where the Installation is interconnected, participation of Solar Generation and storage (00:00 to 23:00 of the day).

As indicated above, the **“Y” axis** corresponds to the participation of Solar Generation and storage in percentage terms (see figure 37), reported hour by hour (00:00 to 24:00 a day). This corresponds directly to one of the inputs to the FB and it is strongly related to the FLRPC3 on the 66kV bus.

As for the **“Z” axis**, it is also a voltage information in pu. input to the FB directly linked to the FLRPC3 of the 66kV bus where the equipment is connected. To limit the operability of the PVP / BESS complex, values of $0,950 < V < 1,030$ pu were established. These voltage values are established between approximately 62,7 / 68kV, since this equipment lacks physical inertia, so for electrodynamic events, it is convenient to disconnect it below or above these values. FL Programming is found in **Appendix 2**.

CONCLUSION OF THIS CHARTER

With the DG installing directly on the load bus, a significant reduction in transmission losses has been achieved. Voltage control has become more efficient and practical. The possibility of autonomy in the form of islands is clearly observed when the loads are not fed from the NEN.

The PVP with the BESS fully integrated to the 66kV bus of the SE-FIL makes the performance of the operation optimal, since it increases the reliability of the very radial power system in the area.

The autonomy of the loads becomes a practicality, given the ease of operation between their own networks when the sources of the National Electricity Network are interacting, Distributed Generation (Diesel and Gas with lower Carbon emissions), Photovoltaic Generation (Generation clean and renewable) and the storage of Electric Energy through Battery Banks (BESS).

For futures works, it would be interesting to investigate the dynamic behavior of all these sources interacting all at the same time, always looking for the operational and economic convenience of the Company.

THE SATISFACTORY RESULTS, IN SUMMARY, ARE AS FOLLOWS:

The programming in the Fuzzy Logic interface is **very flexible** in terms of the information to be processed, since different units of measurement can be handled and they are finally independent of the result to be obtained.

The use of the AIFL is **very powerful** in terms of the complex decisions that the FB must make when the information conditions are minimal.

A **clear performance** of the AI method used was demonstrated thanks to its practicality and flexibility, as long as the input and desired output information are correctly processed.

Finally, the use of this AIFL demonstrates a **strong versatility** for any type of programming and complex decisions.

BIBLIOGRAPHY

[12] ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS COM A AJUDA DE FERRAMENTAS DE ESTABILIDADES DE TENSÃO. PROPOSTAS DE AÇÕES CORRETIVAS EMPREGANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Fariña, R; Zambroni de Souza, A. 2017.

[15] SOLARGIS®, 2115 South Service Road W, Oakville, ON L6L 5W2, Canada. Last access for studies and references of Solar Energy Potential of the area under study near 66kV Buses of the SE-FIL. Accessed on Tuesday, July 27, 2021, at 10:00 a.m. <https://apps.solargis.com/prospect/detail/QHtmxXyjm780Jrug/overview>.

[16] INGENER GROUP. PVP “EL NARANJAL” of 54MWp. Last time entered on the site on July 27, 2021. <http://www.ingener.com/casos/el-naranjal/>.

[17] Tracker-Duetto: all in one. SOLTIGUA™. Solar tracking since 2.007. Via Roma, 54 - 47035 Gambettola (FC) - Italy. www.soltigua.com. 2021.

[21] FUZZY LOGIC DESIGN MANUAL of MATLAB®. MathWorks, INC. 1 Apple Hill Drive Natick, Massachusetts 01760, USA. 2021.

[22] COMISIÓN MIXTA DE OPERACIÓN ITAIPÚ - ANDE - ELETROBRÁS. GRUPO DE ESTUDIO N° 2 - ESTUDIOS ELÉCTRICOS DE LA OPERACIÓN. ESTUDIO EN RÉGIMEN DINÁMICO RELATIVO A LA INTERCONEXIÓN DEL S50HZ CON EL SISTEMA ARGENTINO / URUGUAYO - DEFINICIÓN DE LA FILOSOFÍA DE LOS ESQUEMAS ESPECIALES DE CONTROL. INFORME N° CMO/GE-02/227. APROBADO POR EL GE-02 EN 12/07/2019.

[23] INTEGRATING RENEWABLE ENERGY IN SMART GRID SYSTEM: ARCHITECTURE, VIRTUALIZATION AND ANALYSIS. Imane Worigi; Abdelilah Maach; Abdelhakim Hafid; Omar Hegazy and Joeri Van Mierlo. Elsevier Ltd. All rights reserved. 2019.

[24] THE COORDINATED OPTIMAL DESIGN OF A PV-BATTERY SYSTEM WITH MULTIPLE TYPES OF PV ARRAYS AND BATTERIES: A case study of power smoothing. Yinghua Jiang; Lixia Kang and Yongzhong Liu. Elsevier Ltd. All rights reserved. 2021.

[25] ANALYSIS OF ZIP LOAD MODELING IN POWER TRANSMISSION SYSTEM. Seshapalli Sai Ram; Suresh Babu Daram; P. S. Venkataramu and M. S. Nagaraj. International Journal of Control and

CAPÍTULO 6

ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E ELETROMECAÂNICOS” DA ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYOLAS-VILLA HAYES SEM REATOR DESDE A CENTRAL HIDRELÉTRICA ITAIPÚ

Data de aceite: 01/10/2021

Elisandro Rodriguez Buzarquis

ANDE

Rodney Damián Fariña Martínez

UNIFEI

Antônio Carlos Zambroni de Souza

UNIFEI

RESUMO: Este trabalho técnico apresenta um resumo dos estudos de energização no “Regime Transitório e Dinâmico” considerando o comissionamento da Linha de Transmissão de 500kV entre as Subestações AYOLAS e VILLA HAYES com 350km de extensão (sem ter reatores no final do extremo de VHA). Com o comissionamento desta linha de transmissão de 500kV, pretende-se interligar blocos de carga previamente energizados em níveis de 220kV, alimentados a partir da Usina Hidrelétrica ITAIPÚ (compartilhada entre o Paraguai e a Brasil).

PALAVRAS-CHAVE: Estudos de transitórios eletromagnéticos (ETEmg), Estudos de transitórios eletromecânicos (ETEmc), efeito Ferranti, Sobretensões temporárias (TOV), LT 500kV AYO-VHA, Central hidrelétrica Itaipu (CH-IPU), regime permanente (RP).

“STUDIES OF ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL TRANSIENTS” OF THE TL 500KV AYOLAS-VILLA HAYES; ENERGIZATION WITHOUT REACTOR SINCE THE ITAIPÚ HYDROELECTRIC

POWER PLANT

ABSTRACT: This technical work presents a summary of the energization studies in the “Transitional and Dynamic Regime” considering the commissioning of the 500kV Transmission Line between AYOLAS and VILLA HAYES Substations with 350km in length (without having reactors at the end of the VHA end). With the commissioning of this 500kV transmission line, the intention is to interconnect load blocks previously energized at 220kV levels, fed from the ITAIPÚ Hydroelectric Power Plant (shared between Paraguay and Brazil).

KEYWORDS: Electromagnetic transient studies (ETSmg), Electromechanical transient studies (ETSmc), Ferranti effect, Temporary overvoltages (TOV), LT 500kV AYO-VHA, Itaipu hydroelectric plant (CH-IPU), permanent regime (RP).

1 | INTRODUÇÃO

Quando uma linha de transmissão (LT) é projetada, o comissionamento desta, em termos de energização, operação, proteção e aspectos energéticos ou económicos, devem justificar o alcance da mesma. Os estudos (inerentes à energização e operação) de RP, transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, devem prever o comportamento e o desempenho da operatividade da LT. Em alguns casos devido a assuntos políticos, económicos, carência de tempo ou situações fora do contexto técnico, não permitem completar todas as obras associadas ao comissionamento final da obra principal. A

LT 500kV AYO-VHA e seus elementos associados surgiu como um nexo para a integração dos sistemas elétricos de Argentina, Brasil e Paraguai. Estudos de interligação regional se encontram em desenvolvimento, além disso, a LT pode ser operada em sua condição transitória, para obter o maior proveito da mesma no sistema de potência de Paraguai. Este estudo aporta informação importante e relevante para a operação da LT dentro do sistema elétrico da ANDE.

Finalmente, neste trabalho técnico se apresentam os resultados dos estudos da energização e operação (desde a CH-IPU), da LT de 500kV de AYO-VHA, com um comprimento aproximado de 350km, injetando em seu extremo terminal uma potência reativa de aproximadamente 350MVar, devido principalmente ao efeito Ferranti.

21 ABORDAGEM TEÓRICA. EFEITO FERRANTI E TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

2.1 LT DE GRANDES COMPRIMENTOS E EFEITO FERRANTI

Em situações donde uma LT está operando em condição radial ou em períodos de carga leve, a tensão no terminal receptor poderia ser muito mais elevada que do emissor. Este fenômeno é denominado efeito Ferranti e converte a uma LT em uma “geradora de potência reativa” não lineal em função da tensão [1].

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \quad (1)$$

A equação (1) descreve que a potência reativa capacitiva (MVar) é diretamente proporcional ao quadrado da tensão (Volts) e inversamente proporcional à reatância capacitiva (ohm) da LT.

O efeito “Ferranti” descreve o estranho fenômeno que baixo certas condições de frequência e comprimento de linha um aumento na tensão pode ser observado na mesma, quando o extremo se encontra aberto, em relação a uma tensão de entrada senoidal. O efeito foi descoberto no final do século XIX durante a instalação de um sistema de distribuição baseado em CA na Grã-Bretanha. Na verdade, foi durante a guerra técnica e comercial que atingiu os Estados Unidos entre a Westinghouse e Nikola Tesla como principais propulsores e Thomas Edison. Os primeiros propuseram um sistema CA em quanto Edison propunha comercialmente um sistema de CD. No Reino Unido, foi “Sebastian Ziani de Ferranti” quem, como fervoroso defensor dos sistemas CA, instalou um sistema de distribuição de corrente alternada com níveis de média tensão e reduzindo os transformadores. Em um sistema de transmissão CA, Ferranti observou que, adicionando seções de distribuição adicionais, isto é, aumentando o comprimento total da linha de transmissão, a tensão na linha aumentava localmente (Figura 1). De fato, o fenômeno foi observado pela primeira vez na Linha de transmissão Deptford - London, que em algumas lâmpadas de fibra de carbono aumentou

a luminosidade quando seções foram adicionadas na distribuição. Deve notar-se que o sistema tinha uma carga de apenas um par de lâmpadas de baixo consumo, enquanto a potência do gerador excedia ligeiramente 935 kW. Assim, Ferranti determinou que o efeito foi acentuado com o LT aberto na sua extremidade [2].

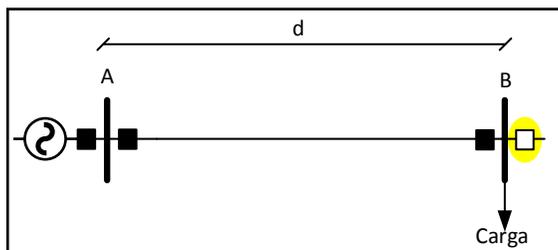


Figura 1. LT entre os nós 'A' e 'B', separadas por uma distancia elétrica 'd'.

2.2 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

A análise de transitórios (o simplesmente transitórios) dos circuitos elétricos é tão importante como os análise de estado estável. Quando ocorrem estes transitórios, as correntes e tensões em algumas partes do circuito podem superar varias vezes os valores de comportamento normal e em consequência pode deteriorar o equipamento. O estado transitório pode ser distinguido de seu estado estável, mesmo que durante os transitórios, magnitudes como correntes, tensões, potência e energia, se modificam no tempo, enquanto que em estado estacionário permanecem invariáveis, é dizer, constante (em operação de CD) ou periódica (em operação de CA) que possui ângulos de fase e amplitudes constantes. A causa dos transitórios pode ser qualquer tipo de mudança nos parâmetros do circuito e/ou na configuração, que geralmente ocorre devido à comutação, curto circuito e/ou circuito aberto, mudanças de operação das fontes, etc. As mudanças das correntes e tensões durante os transitórios não são instantâneas e têm um tempo de retardo, além de isso que são extremadamente rápidos com uma duração de milissegundos ou mesmo microssegundos. Porém, estas mudanças rápidas nem são instantâneas (ou abruptos) porque os processos transitórios são logrados a través do intercambio de energia, que geralmente são armazenadas nos campo magnéticos das indutâncias e/ou nos campos elétricos das capacitâncias. Qualquer variação na energia não pode ser abrupta (porque a potencia é uma derivada da energia, $p = dw / dt$), e que está em contraste com a realidade física. Todas as variações transitórias, que também são chamadas respostas transitórios (o simplesmente respostas), se desvanecem e, logo de sua desaparición, se estabelece uma nova operação em estado estável. Então é possível dizer que o transitório descreve o comportamento do circuito entro dois estados estáveis: um que anterior às mudanças, e outro novo que surge depois das mudanças [3].

3 | ETEMG DA LT 500KV AYO-VHA DESDE LA CH-IPU

Nestes tipos de estudos são também abordados os estudos de reconexão e rejeição de carga e devem se desenvolver dentro das atividades do desenho básico dos seguintes objetivos principais [4]:

- Avaliar as sobretensões transitórias máximas que vai impor nas subestações e os terminais das linhas de transmissão.
- Avaliar a dissipação de energia dos descarregadores de linha, considerando o dimensionamento dessa equipe desde o ponto de vista da capacidade de absorção de energia (kJ/kV).
- Verificar a adequação da coordenação de isolamento das estruturas de transmissão de surtos de manobras, com a integração do projeto básico.

3.1 CONSIDERAÇÕES PRINCIPAIS

As manobras de energização da LT 500kV AYO-VHA, foram analisadas nas barras das subestações AYO e VHA para a verificação de possíveis sobretensões temporárias e/ou permanentes das equipes involucrados da LT, sempre com fonte da CH-IPU, como se observa na figura 2. É abordado que os fenômenos analisados cumpram com os requisitos básicos em termos de energização transitória de linhas de transmissão elétrica. Os casos de energização da LT foram feitas a través de um programa computacional de transitórios eletromagnéticos (EMTP - Electromagnetic Transient Program).

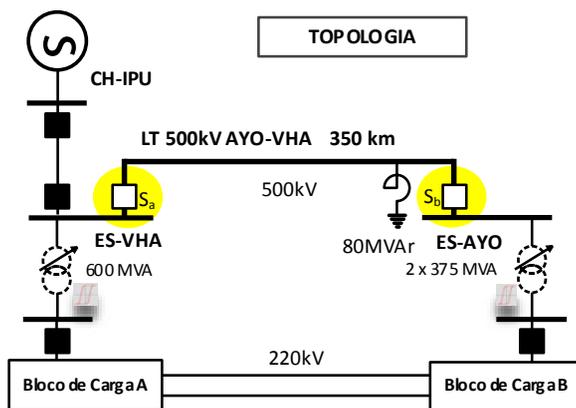


Figura 2. Circuito equivalente utilizado para os ETEmg da LT 500kV AYO-VHA.

Na figura 2 se observa o circuito equivalente a ser utilizados nos ETEmg. Serão mostrados os resultados obtidos da energização da LT desde cada extremo terminal a través dos interruptores 'Sa' e 'Sb'.

3.2 CRITÉRIOS DE TENSÃO ADOTADOS

- Em barras de 500kV, para sobretensões transitórias de manobra (SIL), se admite um nível de isolamento de 1.175kV com um margem do 15%, é dizer, os valores máximos de surtos de tensão obtidos nas simulações de manobras não devem superar os 999kV.
- Em barras de 220kV, se admite um SIL de 1.050 kV com um margem do 15%, é dizer, os valores máximos de surtos de tensão não devem superar os 892kV.
- As tensões máximas de RP devem ser inferiores a 1,100 p.u. em barras próximas à geração.
- Nos casos de estudo de energização da LT foram abordadas energizadas sistemáticas, estadísticas e finalmente determinísticas para obter as maiores solicitações de tensão nas barras envolvidas.
- Desempenho dos descarregadores de 500kV de $E \leq 3276\text{kJ}$.

3.3 SEQUENCIA DE ENERGIZAÇÃO DOS ETEmg DOS DIFERENTES CENÁRIOS

- As energizações foram realizadas de forma sequencial e separadas.
- Os casos de estado estacionário são análogos a os de regime transitório.
- O sistema é alimentado desde a CH-IPU (Figura 2).
- A LT 500kV AYO-VHA é energizada desde o interruptor 'S_a'.
- A LT 500kV AYO-VHA é energizada desde o interruptor 'S_b'.
- Os blocos de carga 'A' e 'B' são interligados a través dos interruptores S_a e S_b.

3.4 CONDIÇÕES INICIAIS DOS CASOS DE FLUXO DE POTENCIA

- A CH-IPU alimenta ao HDVC de FURNAS e ao Sistema Interligado Nacional de Paraguai antes da energização da LT 500kV AYO-VHA.
- A tensão de pre-energização em barras da ES-VHA está na ordem dos 0,900 p.u. (450kV).
- Os blocos de carga 'A e B' estão previamente energizados com fonte da CH-IPU.
- O extremo terminal da LT de 500kV a ser energizada conta como reator de neutro de 80MVAR e está conectada à barra de 500kV dessa subestação.
- Todos os elementos de controle de tensão estão operando em condições normais e com o sistema de potência preparado para a energização com fonte da CH-IPU.

3.5 RESULTADOS OBTIDOS DOS ETEmg.

A continuação, são apresentados os resultados obtidos dos ETEmg das energizações da LT desde o terminal de AYO e desde o terminal de VHA. OS resultados são apresentados em termos de tensão nas barras de 500kV das EESS VHA e AYO, e a energia dissipada pelos descarregadores de sobretensão das barras análogas a VHA e AYO.

3.5.1 ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYO-VHA DESDE A ES-VHA (interruptor “S_a”)

ES-VHA - 500kV (kV / pu) - Lado da CH-IPU					
Antes de energizar a LT		Maior surto de tensão		Post-energização da LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
475	0,950	650	1,300	516	1,032

ES-AYO - 500kV (kV / pu) - Terminal da LT					
Antes de energizar a LT		Maior surto de tensão		Post-energização da LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
0	0,000	892	1,785	538	1,076

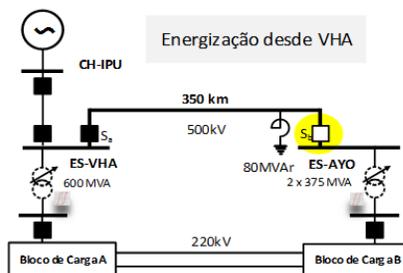


Figura 3. Energização da LT desde VHA e aberto no terminal de AYO.

A figura 3 mostra as tensões das barras de VHA e AYO, quando a LT é energizada desde o interruptor “S_a”. Não são observadas sobretensões temporais que fiquem fora dos critérios normais adotados. Não se registram tensões de post-energização que superem os limites estabelecidos dos 1,100 p.u. em RP.

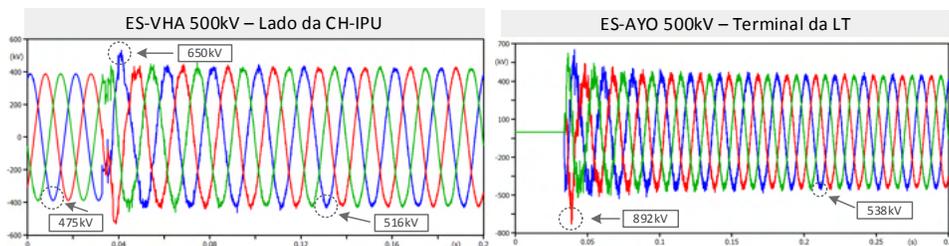


Figura 4. Tensões em barras de VHA e AYO 500kV.

Da “figura 4” se extraem as seguintes informações:

- Máxima sobretensão transitória na “ES-AYO”, $892\text{kV (f-f)}_{\text{RMS}} \cong 728\text{kV (f-n)}_{\text{PEAK}} \ll 999\text{kV (f-n)}_{\text{PEAK}}$
- Tensão de estabelecimento a 1 s na “ES-AYO”, $310\text{kV (f-n)}_{\text{RMS}} \ll 318\text{kV (f-n)}_{\text{RMS}}$, é dizer, $1,076 \text{ p.u.} < 1,100 \text{ p.u.}$

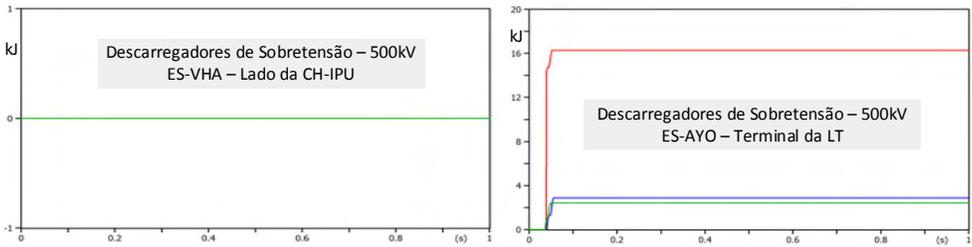


Figura 5. Energia dissipada pelos descarregadores de sobretensão de VHA e AYO 500kV.

Com respeito ao rendimento dos descarregadores de sobretensão ZNO de 500kV, a “figura 5” mostra a seguinte observação:

- Não se observa excitação dos descarregadores de sobretensão ZNO de 500kV da ES-VHA (barra mais próxima à CH-IPU).
- É registrada a excitação dos descarregadores de ZNO da ES-AYO, com uma dissipação de energia na ordem dos 16kJ, muito inferior aos 3.276kJ estabelecidos como critério.

3.5.2 ENERGIZAÇÃO DA LT 500KV AYO-VHA DESDE A ES-AYO (interruptor “S_p”)

SE-VHA - 500kV (kV / pu) - Terminal da LT					
Antes de energizar a LT		Maior surto de tensão		Post-energización da LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
0	0,000	973	1,946	733	1,467

SE-AYO - 500kV (kV / pu) - Lado da CH-IPU					
Antes de energizar a LT		Maior surto de tensão		Post-energización da LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
485	0,970	848	1,700	685	1,371

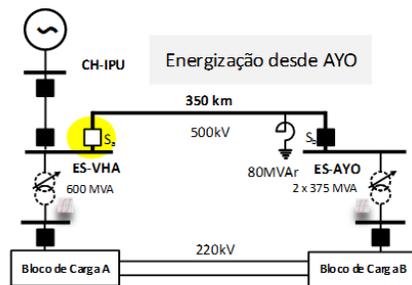


Figura 6. Energização da LT desde VHA e aberto no terminal de VHA.

A figura 6 mostra as tensões das barras de VHA e AYO, quando a LT é energizada desde o interruptor “S_p”. Não são observadas tensões temporárias que ultrapassem os valores abordados nos critérios em quanto a surtos de tensão transitórias, porém, as tensões de post-energização registram valores muito por encima das tensões permitidas de regímen permanente como $V \leq 1,100$ p.u. (efeito Ferranti).

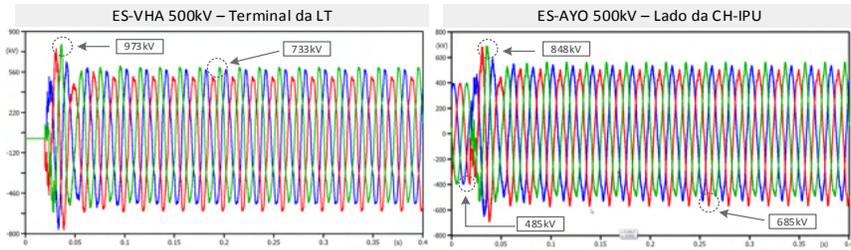


Figura 7. Tensões em barras de VHA e AYO 500kV.

Da figura “figura 7” se extraem as seguintes informações:

- Máxima sobretensão transitória na “ES-VHA”, $973\text{kV (f-f)}_{\text{RMS}} \cong 794\text{kV (f-n)}_{\text{PEAK}} < 999\text{kV (f-n)}_{\text{PEAK}}$
- A tensão de estabelecimento a 1 s na “ES-VHA”, $423\text{kV (f-n)}_{\text{RMS}} \gg 318\text{kV (f-n)}_{\text{RMS}}$ é dizer, $1,467 \text{ p.u.} \gg 1,100 \text{ p.u.}$, 37% mais do estabelecido nos critérios de tensão de RP.

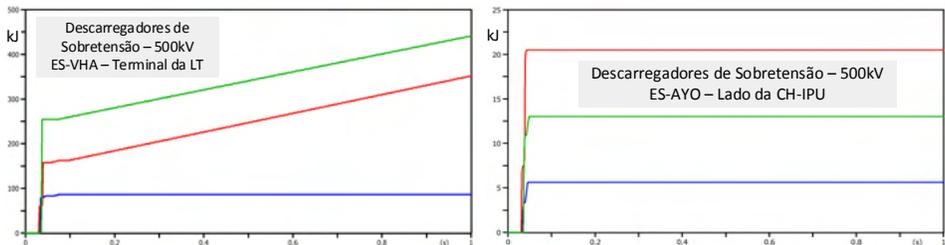


Figura 8. Energia dissipada pelos descarregadores de sobretensão de VHA e AYO 500kV.

Com respeito ao rendimento dos descarregadores de sobretensão ZNO de 500kV, a “figura 5” mostra a seguinte observação:

- São observados uns valores dissipação de energia dos descarregadores da ES-VHA de comportamento crescente que poderia ocasionar a perda de isolamento dos elementos do sistema, principalmente para os casos de tensão de post-energização (RP). Este fenómeno se intensificaria com a perda e esgotamento dos controles de tensão do sistema de potência como Centro Estático de Reativos, Banco de capacitores, TAP e outros.
- É registrada a excitação dos descarregadores de ZNO da ES-AYO, com uma dissipação de energia na ordem dos 20kJ, muito inferior aos 3.276kJ estabelecidos como critério.

4 | ABORDAGEM TEÓRICA. TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS

Nesta parte do trabalho técnico se abordará mis fenômenos eletromecânicos associados à energização da LT de 500kV AYO-VHA, e la explicação dos resultados obtidos em termos dinâmicos do sistema de potência. O objetivo destes estudos é o de complementar e respaldar os resultados obtidos previamente nos análises de régimen permanente e de transitórios eletromagnéticos. Por enquanto, se pretende fazer um barrido de todas as variantes possíveis dos fenômenos que poderiam acarrear como o resultado da energização da LT de 500kV. Os estudos de estabilidade eletromecânica dos sistemas elétricos estão relacionados com o análise do comportamento de ´este´ depois das perturbações. O tipo de perturbação do modelado que se deve utilizar na representação do sistema elétrico. Como resultado destas perturbações, que geralmente se devem a mudanças estruturais repentinos na rede elétrica, o sistema deixa o ponto de funcionamento estável nele que se encontrava e tende a estabelecer em outro ponto de operação. As unidades geradoras estão sujeitas a acelerações e desacelerações de tal intensidade que certas unidades ou grupos de unidades podem perder sincronismo entre elas o com o sistema. Dependendo da natureza e duração da perturbação, o comportamento dos controles eletromecânicos das unidades geradoras pode ser amortecido ou não, terminando em um novo ponto de funcionamento estável o colapso do sistema [6]. Possivelmente, a classificação mais importante do fenômeno dinâmico é o rango do tempo de resposta natural. A classificação típica é mostrada na figura 9. O conceito similar foi apresentado em [7].

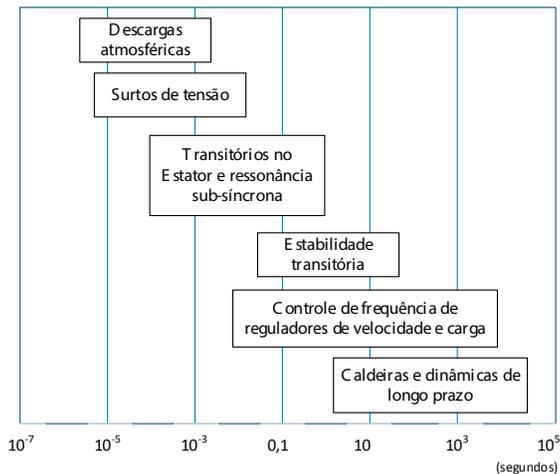


Figura 9. Rango de tempos do fenômeno Dinâmico. Adaptado de [7].

5.1 ETEMC DA LT 500KV AYO-VHA DESDE LA CH-IPU

Na seguinte seção se analisaram as duas condições topológicas quando a LT 500kV AYO-VHA é energizada desde a CH-IPU como o objetivo de determinar o comportamento dinâmico dos sistema de potência. Foram feitos todos os modelos dinâmicos do sistema de potencia estudado como central elétrica de geração, compensadores estáticos de potência reativa e outros parâmetros elétricos (transformadores, LT, cargas, capacitores, etc.).

5.1 CONSIDERAÇÕES PRINCIPAIS

- Os blocos de carga estão previamente energizadas em níveis de 220kV com fonte da CH-IPU.
- A energização da LT é feita a partir dos interruptores “ S_a ” e “ S_b ” e de forma separada.
- A LT é energizada desde o interruptor “ S_a ”. Logo os blocos de carga “**A**” e “**B**” são interligados a través do interruptor “ S_b ” (figura 3).
- A LT é energizada a través do interruptor “ S_b ”. Logo os blocos de carga “**A**” e “**B**” são interligados a través do interruptor “ S_a ” (figura 6).
- Todos os casos dinâmicos são análogos aos casos de RP e de transitórios eletromagnéticos.
- Através do uso de um programa computacional de ETEmc, foram feitas as análises de sobretensões temporais a frequência industrial fundamental (TOV). Assim, os principais resultados obtidos a frequência industrial são apresentados a seguir e respaldados por os estudos de RP e de ETEmg.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS DOS ETEmc.

5.2.1 Energização da LT de 500kV AYO-VHA desde o terminal de VHA

As seguintes análises correspondem à energização a través do interruptor ‘ S_a ’ com fonte da CH-IPU.

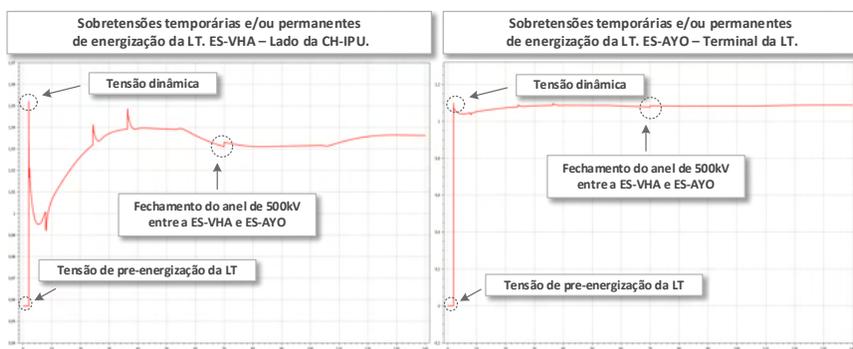


Figura 10. TOV em barras da ES-VHA e ES-AYO com posterior fechamento de anel.

Para as condições de operação estudadas, energizações da LT 500kV AYO-VHA desde o terminal de AYO com fonte de IPU, se observa tensões dinâmicas e de post-energização dentro dos critérios estabelecidos como são mostradas na “figura 10”. Porém, é importante ter em conta que o valor da tensão de RP na barra da ES-AYO (extremo terminal aberto da LT) está próximo aos 1,100 p.u. (Limite de tensão de regime permanente em emergência).

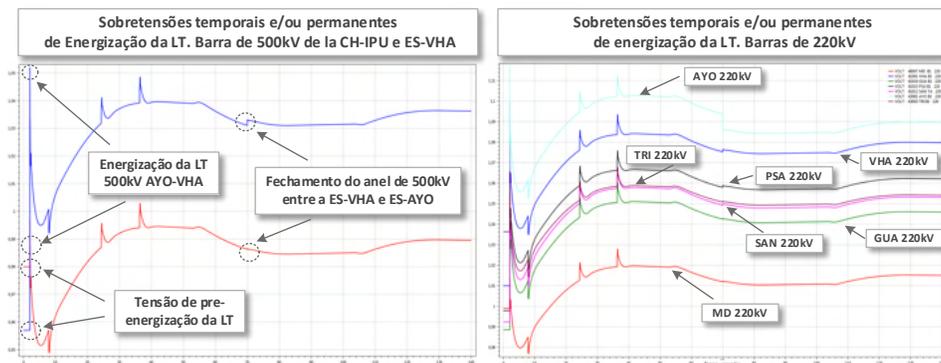


Figura 11. À esquerda TOV nas barras de 500kV da CH-IPU. À direita TOV em barras de 220kV de várias subestações. Energização da LT desde o terminal de VHA.

A “figura 11”, à esquerda, mostra a tensão em barras de 500kV da SE-MD. Se observam tensões na ordem dos 1,42 p.u. (521kV) de curta duração, não representando valores que estimulem anomalias ao controle dos geradores da CH-IPU. Na mesma figura à direita, são mostradas as tensões temporais e/ou permanentes em barras de 220kV de várias estações do sistema analisado. Observe-se que são registradas tensões sustentadas por debaixo dos 1,100 p.u. (242kV), inferior aos valores considerados nos limites. Aos 70 segundos é fechado o anel de 500kV entre as barras de VHA e AYO, não observando tensões que violem os limites exigidos. Em consequência, a energização desde o terminal da ES-VHA faz que seja mais viável.

5.2.2 Energização da LT de 500kV AYO-VHA desde o terminal de AYO

As seguintes análises correspondem à energização a través do interruptor ‘S₆’ com fonte da CH-IPU.

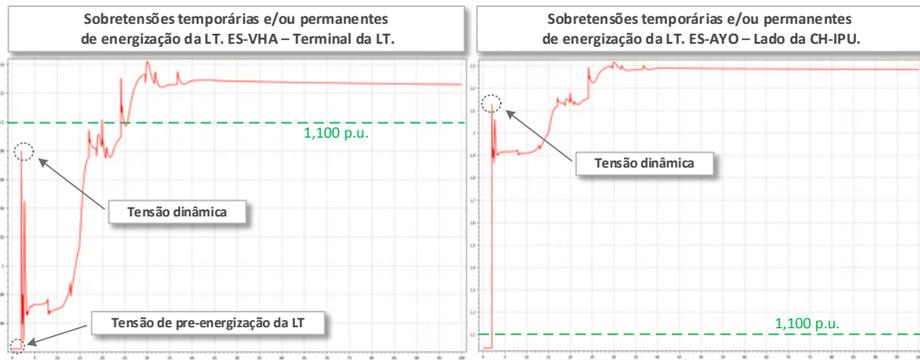


Figura 12. TOV em barras da ES-VHA e ES-AYO.

A “figura 12” mostra que para a condição de energização analisada são observadas tensões por encima dos critérios de operação que foram vistos nos resultados de regime permanente e de ETEmg, em consequência, (desde o ponto de viste deste análise) não é recomendável energizar a LT desde o terminal da ES-AYO (S_b). Também, como consequência de estes elevados níveis de tensão, existe altas possibilidades de que as equipes de controle de tensão fiquem fora de serviço piorando a o fenómeno da sobretensão.

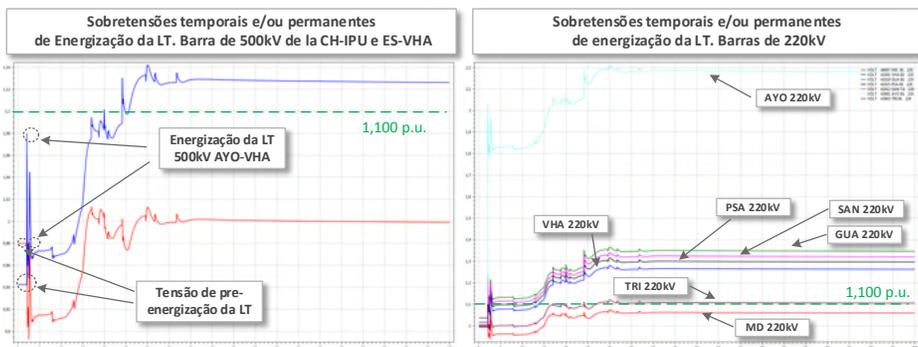


Figura 13. À esquerda TOV nas barras de 500kV da CH-IPU e ES-VHA. À direita TOV em barras de 220kV de varias subestações. Energização da LT desde o terminal de AYO.

A “figura 13”, à esquerda, mostra a Tensão em barras de 500kV da CH-IPU. São observadas tensões na ordem dos 1,020 p.u. (510kV), e não são observadas anomalias no controle de tensão dos geradores da CH-IPU. Na mesma figura à direita, são registradas tensões temporais e/ou nas barras de 220kV. Neste caso aparecem tensões sustentadas não permissíveis acima dos 2,300 p.u. (506kV), donde os controles de tensão se encontram esgotados e apeirando o isolamento dos componentes do sistema elétrico, em consequência, não é recomendável fazer a energização da LT de 500kV desde este terminal.

6 I CONCLUSÕES FINAIS DA ANÁLISE REALIZADOS

6.1 CONCLUSÕES ACERCA DOS RESULTADOS DE ETEmg.

Finalmente, de acordo às resultados obtidos em simulações de análises de transitórios eletromagnéticos da energização da LT 500kV AYO-VHA sem reator, é concluído que quando é abordada a topologia estudada, ***não é recomendável energizar a LT desde o terminal “S_a”***, devido às altas solicitações de tensão provocadas por a ausência de reatores nas extremidades da LT (efeito Ferranti) principalmente por altos valores de tensão de post-energização da LT. Por conseguinte, a ***LT de 500kV solo deve ser energizada e operada desde o interruptor “S_b”***.

Para realizar a energização do terminal de VHA é necessário manobrar previamente bancos de capacitores do sistema para mitigar os impactos produzidos pela energização da LT, principalmente em situações posteriores à energização. Al mesmo tempo, é necessário manter tensões na ordem dos 0,900 p.u (450kV) em barras de 500kV da ES-VHA no momento da energização da LT. Esta medida estaria destinada a mitigar os impactos resultantes da energização da LT.

6.2 CONCLUSÕES ACERCA DOS RESULTADOS DE ETEmc.

Com referência às análises obtidos em simulações de transitórios eletromecânicos da energização da LT 500kV AYO-VHA e posterior fechamento do anel entre a ES-VHA e ES-AYO é concluído que de acordo às condições de operação estudadas, são observadas tensões dinâmicas e de post-energização dentro dos critérios estabelecidos quando a LT é energizada desde o interruptor “S_a” e posterior fechamento desde o interruptor “S_b”. Além disso, é importante ter em conta que os valores de RP em barras de 500kV estão próximas aos 1,100 p.u. (550kV).

Finalmente não é recomendável energizar a LT desde o terminal da ES-AYO devido à altas solicitações de tensão principalmente as do post-energização (resultados já registrados nos ETEmg.), produzidas e intensificadas por a alta injeção de reativos na LT (efeito Ferranti) e com ausência de reatores nas extremidades da LT. Por conseguinte, a LT 500kV AYO-VHA solo pode ser energizada e operadas desde o interruptor “S_a” da ES-VHA quando es alimentada com fonte da CH-IPU.

REFERÊNCIAS

1. GIBSON JONES, P. Evaluation of Voltage Instability Countermeasures in Constrained Subtransmission Power Networkds. Portland State University. 2012, pp. 24.
2. WLLIN, J, H. GIBSON JONES, P. On the Ferranti Effect in Data Grade Cables and Channels. International Wire & Cable Symposium. Proceedings of the 56th IWCS. pp.1. USA. 2007.
3. SHENKMAN, A. Transient Analysis of Electrical Power circuits Hand Book. Holon Academic Institute of Technology, Holon, Israel. 2005, pp. 15.

4. ONS. Operador nacional do sistema elétrico. Diretrizes para a preparação de projetos básicos para empresas de transmissão. RJ, Brasil. 2013
5. SAUER, P; PAI. "Power system dynamics and stability. Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1994.
6. ONS. Operador nacional do sistema elétrico. Sub-módulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos. 2007, pp. 51.
7. E.G. GATE, K. HEMMAPLARDH, J.W. MANKE, AND D.P. GELOPULOS. "Time frame notion and time response of the models in transient, mid-term and long-term stability programs". IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-103, 1, Jan. 1984, 143-150.
8. ONS. Operador nacional do sistema elétrico. Diretrizes para a elaboração de Projetos Básicos para empreendimentos de Transmissão. RJ, Brasil. 2013.

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE COM METAMATERIAIS CONVENCIONAIS E SUPERCONDUTORES

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 30/07/2021

Arthur Henrique de Lima Ferreira

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-8018-6823>

Lucas Douglas Ribeiro

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-0230-8899>

Rose Mary de Souza Batalha

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-6157-1574>

RESUMO: Transmissão de energia sem fio (*Wireless Power Transfer*, WPT) é uma opção de ganho em mobilidade e conveniência enquanto dispositivos elétricos são carregados. Metamateriais são usados para aumentar a eficiência de transmissão da energia por meio de acoplamento magnético ressonante. Um sistema WPT foi implementado em um software capaz de solucionar problemas eletromagnéticos em 3D, onde três configurações foram simuladas: inicialmente sem Metamateriais, com Split Ring Resonators, e com uma linha espiral supercondutora (Metamateriais supercondutores) que foi desenvolvida neste trabalho. Uma

investigação da potência e da eficiência destes sistemas foi realizada por meio de simulações. A distância entre as bobinas foi aumentada desde 4 cm até 10 cm, e com desalinhamento horizontal que variou até 3 cm. Os Metamateriais mostraram-se eficientes conforme se pode ver nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Transmissão de Energia Sem Fio; Acoplamento Magnético Ressonante Forte; Metamateriais; Supercondutividade.

WIRELESS POWER TRANSFER THROUGH COUPLED MAGNETIC RESONANCE WITH CONVENTIONAL AND SUPERCONDUCTING METAMATERIALS

ABSTRACT: Wireless Power Transfer (WPT) is an option to gain mobility and convenience while charging electrical devices. Metamaterials are used to increase the energy transmission efficiency by coupled magnetic resonance. A WPT system was implemented in a 3D electromagnetic solver, where three configurations were simulated: initially without Metamaterials, with Split Ring Resonators, and with a superconductor spiral line (superconducting Metamaterials) that was designed in this work. An investigation of the power and efficiency of these systems was carried out through simulations. The distance between the coils was increased from 4 until 10 cm, and the horizontal misalignment varied up to 3 cm. The metamaterials showed themselves efficient as can be seen in the results.

KEYWORDS: Wireless Power Transfer; Strongly Coupled Magnetic Resonance; Metamaterials; Superconductivity.

1 | INTRODUCTION

MMs are artificial structures effectively homogeneous, that is, their average cell size is much smaller than the wavelength. Because of it, the refractive phenomenon overlaps to the scattering and diffraction in the propagation of the wave [4].

MMs are also called Left-handed materials (LHM) because they do not obey the “right-hand rule”. Furthermore, these elements can present a negative refractive index (NRI), and for that, they can change the behavior of the wave according to the reversal of Snell’s law. In order to obtain an NRI, a metamaterial must have at least the electric permittivity or the magnetic permeability negative in the same frequency range.

The Wireless Power Transfer (WPT) is a technology able to transmit electromagnetic energy from a source to an electrical charge between a gap in the air. It can offer energy to small devices [1], biomedical implants, portable devices, networks sensors, Internet of Things (IoT), robots and electrical vehicles [2].

This technology is an option to replace the traditional methods of transmission by cables. It features advantages over security in low frequency, mobility, and convenience. Furthermore, it increases flexibility on devices whose battery replacement is expensive or dangerous [3].

There are many techniques for WPT, among them the strongly coupled magnetic resonance (SCMR) that was used in this work. This technique works over the magnetic field oscillation between two coupled coils that operate in resonance.

However, the WPT has some problems regarding the cost of implementation and the power decay with distance. The efficiency decay comes from the increase of the distance between the source and load, misalignment between the transmitter and receiver, and inherent problems like radial propagation and reflection.

In order to mitigate losses in WPT, and consequently increase the transmission distance and efficiency, the application of metamaterials (MMs) has been studied. MMs are made by natural elements and can present unnatural properties. When properly arranged and submitted to electromagnetic fields, they work like perfect absorbers.

There are two types of MMs. The “conventional metamaterials”, such as the Split Ring Resonators (SRRs) and the thin wires (TWs), and currently “superconducting metamaterials” have been developed. In these two forms, the MMs have been employed to increase the electromagnetic waves absorptivity capturing the magnetic flux dispersed in the air.

In this work, an investigation of the applicability of metamaterials is made. The behavior of conventional and superconducting MMs in wireless power transfer by strongly coupled magnetic resonance SCMR is evaluated when there are load variation and misalignment. A spiral line of superconducting MM was projected. The system is simulated without MM and with conventional MM. An investigation of the power and efficiency behavior according to the increase in the distance between the transmitter and receiver coils and to the horizontal

misalignment between them, for all system configurations, is also made.

Section II presents the theory of conventional and the called superconducting MMs. Section III presents the simulated systems and the design of the superconducting MM unit cell. Section IV presents the results and the Conclusion is in Section V.

2 | METAMATERIALS

MMs are artificial structures effectively homogeneous, that is, their average cell size is much smaller than the wavelength. Because of it, the refractive phenomenon overlaps to the scattering and diffraction in the propagation of the wave [4].

MMs are also called Left-handed materials (LHM) because they do not obey the “right-hand rule”. Furthermore, these elements can present a negative refractive index (NRI), and for that, they can change the behavior of the wave according to the reversal of Snell’s law. In order to obtain an NRI, a metamaterial must have at least the electric permittivity or the magnetic permeability negative in the same frequency range.

A. Conventional metamaterials

Among the so-called conventional metamaterials, there are two very used models: Thin Wires and Split Ring Resonators. The TWs models have a negative electric permittivity, and the SRRs have a negative magnetic permeability. In this work, it is used SRR in simulations because of the SCMR technique, where the magnetic part of the evanescent fields prevails.

The ring resonators have a cut to operate at a resonance frequency in which the wavelength is significantly greater than its diameter.

B. Superconducting metamaterials

The superconducting MMs are different in their constructive characteristics comparing to the conventional ones. To exhibit superconducting behavior, the material must be below the critical temperature (T_c), when the MM can present the Meissner effect and have its resistivity considerably reduced and no magnetic flow inside the conductor.

Low losses are achieved in superconducting MMs, higher quality factor, and smaller wavelength when compared with the conventional MMs [5]. Furthermore, superconducting MMs can be miniaturized, and then they can be applied in small and medium-sized devices.

In this paper, the two types of metamaterials and their respective behaviors in the simulated system of WPT are investigated.

3 | SIMULATED SYSTEMS

This section are presented the general data for the three system configurations simulated. In this work, a superconducting metamaterial unit cell was also projected.

A. General data

The system was simulated on CST® Studio software using the Finite Integration Technique (FIT) in time domain. The transmitter and receiver copper coils are flat and have 7 loops, width of 2.49 mm, spacing of 1.0 mm, inner radius of 22 mm, outer radius of 47 mm. Furthermore, this system has an inductance of $4.73 \mu\text{H}$, relative electrical permittivity (ϵ_r) of 4.3, tangent loss (δ) of 0.015, as shown in Fig. 1. These data and geometry were obtained in [6]. These coils are in an Flame Retardant 4 (FR4) substrate with dimensions of 100 mm x 100 mm x 1.5 mm.

In the transmitter coil was used a discrete port of voltage, defined by a starting point and an endpoint. These two points were connected by a perfectly conducting wire (visualized by a thick blue line) and the respective port source (indicated by a red cone) in the center of this wire, as shown in Figures 1 and 2. This port type realizes an ideal voltage source, exciting with constant voltage amplitude. This discrete port is used in all simulations, c.a., with a peak voltage of . In the receiver coil, a resistor of 100Ω is used (in the without misalignment simulations between the coils).

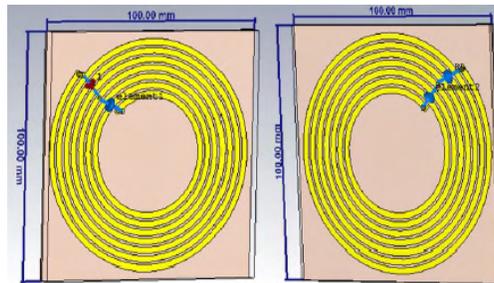


Fig. 1. (a) Transmitter coil (b) Receiver coil.

The operating frequency in which the system was projected is 1 MHz. In this frequency, there are many applications in WPT such as self-resonant structures [7] and biomedical implants [8].

The percentage efficiency (η %) can be calculated through the relation between the load power (P_L) and source power (P_S), both in watts:

$$\eta (\%) = \frac{P_L}{P_S} \cdot 100\% \quad (1)$$

B. SCMR without any Metamaterial

Initially, the system was simulated with the transmitter and receiver coils with only air between them, as shown in Fig. 2.

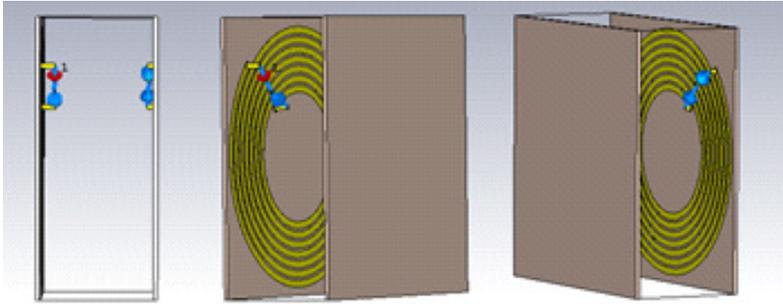
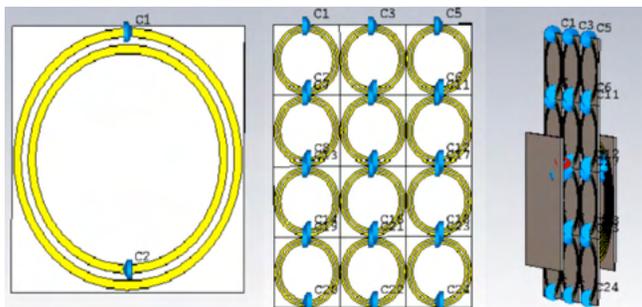


Fig. 2. SCMR system without metamaterial: (a) Complete system. Lateral view showing details of transmitter coil (b) and receiver coil (c).

C. SCMR with conventional metamaterial

The SRR model simulated in this work is based on the prototype of [4]. The metamaterial slab has 12 unit cells arranged in 3 columns and 4 lines, 300 cm² in total and it is placed at halfway between the coils, as shown in Fig. 3.



conventional slab simulated), as shown in Fig. 4.

The superconductor metamaterial has a spiral line geometry of YBCO, a superconductor material that generally is used in a critical temperature of 90 K. After the definition of the unit cell, the dimensions of the spiral line were defined after computer simulations and analysis: an outer radius of 38 mm and an inner radius of 2 mm.

The equivalent circuit of a superconducting MM is an RLC circuit and it is necessary to place capacitors to achieve the resonance. From [9] we have:

$$C(\text{pF}) = 0.035D_o(\text{mm}) + 0.06 \quad (2)$$

where C is the capacitance in pF, with a value of 1.39 pF in this case.

After that, the geometric inductance (\mathcal{L}_g) was defined from:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mathcal{L}_g C}} \quad (3)$$

obtaining $\mathcal{L}_g = 0.0182$ H, where f is the resonance frequency.

The number of loops (\mathcal{N}) of the spiral conductor is determined by:

$$N = \sqrt{\frac{2L_g \left[\left(\frac{2.46}{a} + 0.2a^2 \right) \right]}{D_{avg} \mu_0}} \quad (4)$$

where the factor a is:

$$a = \frac{(D_o - D_i)}{(D_o + D_i)} \quad (5)$$

In (5) \mathcal{D}_o is the outer diameter, \mathcal{D}_i is the inner diameter and the average diameter is calculated as:

$$D_{avg} = \frac{(D_o - D_i)}{2} \quad (6)$$

It was obtained $N = 43.37$, which was considered $N=43$. The designed unit cell is shown in Fig. 4 (a) and the complete system in Fig. 4 (b).

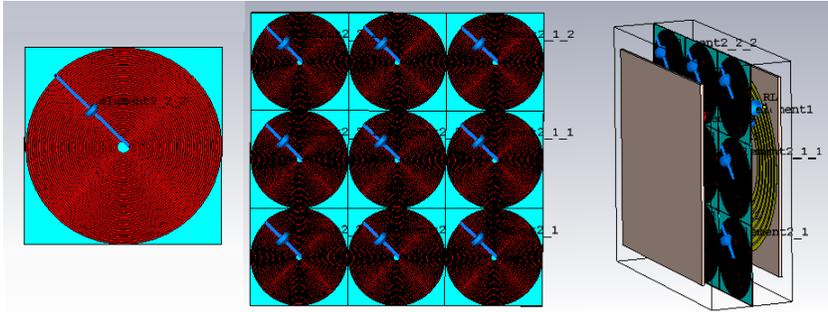


Fig. 4. Unit Superconducting MM: (a) Unit cell (b) Slab of superconducting metamaterial (c) Complete System.

4 | RESULTS

In this work, a transmission-line (TL) network periodically loaded using

The results of the simulations and the comparison between them are presented in this Section. The system was simulated without MM, with Conventional and Superconducting MM.

A. Comparison of the configurations without misalignment

The distance between the coils varied from 4 cm to 10 cm. The system was simulated without MM, and with conventional and superconducting MM. The comparison can be seen in Fig. 5.

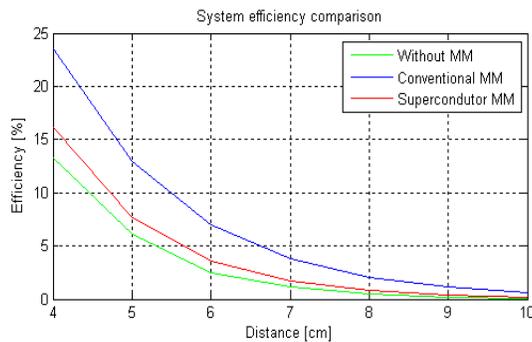


Fig. 5. Efficiency comparison.

The best results were at 4 cm of distance between the transmitter and receiver coil. Without the MM, the power in the load resistor was 45.14 W, and the efficiency of 13.23%.

With the conventional metamaterial, the power in the load was 69.59 W and efficiency of 23.46% in the transmission, as shown in Table I. There was an increase of 77.32% in the efficiency and 54.16% in the power after inserting the conventional MM.

In the presence of the superconducting metamaterial, the efficiency was 16.11% (an increase of 21.76%) and the power was 49.34 W (an increase of 9.30%) when compared to the simulations without metamaterial.

The MMs were responsible to direct the disperse magnetic flux. Both types of MM were able to increase the power flux and transmission efficiency.

1 MHz	Without MM		Conventional MM		Superconduct. MM	
	P (W)	η (%)	P (W)	η (%)	P (W)	η (%)
Distance (cm)						
4	45.14	13.23	69.59	23.46	49.34	16.11
5	21.03	6.12	48.00	18.64	23.10	7.65
6	8.86	2.52	24.15	14.62	10.71	3.63
7	3.99	1.13	13.61	10.75	4.97	1.73
8	1.66	0.47	7.21	7.44	2.32	0.82
9	0.64	0.18	4.07	5.54	1.09	0.39
10	0.26	0.07	2.34	4.17	0.51	0.19

Table 1 - Efficiency and power comparison.

B. Comparison of the configurations with misalignment

An investigation was carried out on the horizontal misalignment between the transmitter and receiver coils. It is important in cases where there is no absolute certainty about the position of the recipient (biomedical implants, for example). The coils were initially with their centers 4 cm apart and then there was a horizontal displacement from 1 to 3 cm, as shown in Fig. 6. The simulations, again, occurred without MM, with the conventional and superconducting MM and there was a comparison between them.

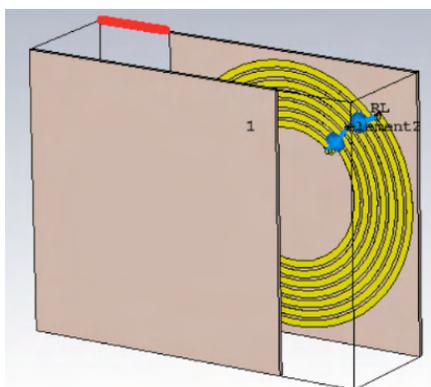


Fig. 6. Displacement of the receiver unit.

The system efficiency shows an increase after the insertion of the metamaterial as can be seen in Fig. 7.

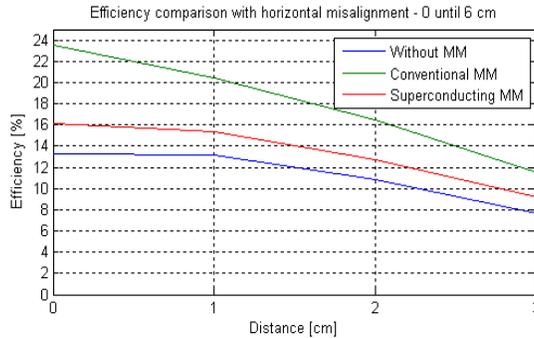


Fig. 7. Efficiency comparison with misalignment between coils.

Even with 3 cm of displacement, the efficiency was increased with metamaterials: 49.41%, from 7.67 to 11.46% with the conventional and 20.33%, from 7.67 to 9.23% with the superconductor, as shown in Table II.

1 MHz	Without MM	Conventional MM	Superconduct. MM
Misalignment (cm)	η (%)	η (%)	η (%)
0	13.23	23.52	16.11
1	13.14	20.45	15.33
2	10.81	16.51	12.69
3	7.67	11.46	9.23

Table 2 - Efficiency and power comparison with misalignment.

Although the system is very sensitive to the misalignment, it still presents a better efficiency compared to no MM setup. Thus, the MM was able to increase efficiency in wireless power transfer even with horizontal misalignment between coils.

5 | CONCLUSION

After inserting the two configurations of MMs and comparing their results with the simulations without MM, it was verified an increase of 77.32% and 21.76% in the efficiency with conventional and superconducting respectively. Even with a horizontal misalignment of 3 cm between the transmitter and receiver coils the efficiency was also increased after inserting the MM.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Brazilian institutions CAPES, CNPq, and FAPEMIG for their financial support.

REFERENCES

1. Z. Zhang, B. Zhang, "Angular-Misalignment Insensitive Omnidirectional Wireless Power Transfer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 67, n. 4, p. 2755-2764, 2020.
2. J. Gao, G. Yan, "Design and Implementation of a Clamper-Based and Motor-Driven Capsule Robot Powered by Wireless Power Transmission", IEEE Access, v.7, p. 138151-138161, 2019.
3. Y. Li, J. Hu, X. Li, R. Mai, Z. Li, M. Liu and Z. He, "Efficiency Analysis and Optimization Control for Input-Parallel Output-Series Wireless Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 35, n. 1, p. 1074-1085, jan. 2020.
4. C. Caloz, T. Itoh, "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications", John Wiley & Sons, 2006.
5. P. Jung, A. V. Ustinov, S. M. Anlage, "Progress in Superconducting Metamaterials", Superconductor Science & Technology, v. 27, n. 7, jul. 2014.
6. D. C. Corrêa, U. C. Resend and F. S. Bicalho, "Experiments With a Compact Wireless Power Transfer System Using Strongly Coupled Magnetic Resonance and Metamaterials", IEEE Transactions on Applied Magnetism, vol. 55, n. 8, pp. 1-4, Aug. 2019, Art n. 8401904
7. A. L. F. Stein, P. A. Kyaw and C. R. Sullivan, "Wireless Power Transfer Utilizing a High-Q Self-Resonant Structure", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 34, n. 7, p. 6722-6735, jul. 2019.
8. I. A. Mashhadi, M. Pahlevani, S. Hor, H. Pahlevani and E. Adib, "A New Wireless Power-Transfer Circuit for Retinal Prosthesis", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 34, n. 7, p. 6425-6439, jul. 2019
9. X. Wang, Y. Wang, Y. Hu, Y. He and Z. Yan, "Analysis of Wireless Power Transfer Using Superconducting Metamaterials", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 29, n. 2, p. 1-2, mar. 2019.

DEGRADAÇÃO POR POTENCIAL INDUZIDO (PID): REVISÃO

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 20/08/2021

Hellen Ferreira Barreto Miranda

Instituto Federal Fluminense – campus Campos
Centro
Campos dos Goytacazes – RJ
<http://lattes.cnpq.br/3244001760009862>

Luan Peixoto da Costa

Instituto Federal Fluminense – campus Campos
Centro
Campos dos Goytacazes – RJ
<http://lattes.cnpq.br/5624490921923509>

Stefhany Oliveira Soares

Instituto Federal Fluminense – campus Campos
Centro
Campos dos Goytacazes – RJ
<http://lattes.cnpq.br/1582723630335668>

Jonathan Velasco da Silva

Instituto Federal Fluminense – campus Campos
Centro
Campos dos Goytacazes – RJ
<http://lattes.cnpq.br/9478738230520097>

RESUMO: A degradação induzida por potencial (PID) é uma problemática que nos últimos anos tem sido foco de pesquisas e estudos sobre o desempenho do módulo fotovoltaico (PV) em condições de campo, tendo em vista as consequências ocasionadas por esta degradação. Mesmo com um extenso material nessa área, a compreensão sobre o fenômeno PID ainda é

incompleta, mas deve-se levar em consideração que a diversidade tecnológica e ambiental são fatores que implicam nas técnicas de reversão. Este artigo visa realizar uma revisão crítica a fim de fornecer uma visão geral e ampla da literatura disponível para promover a compreensão do estado atual da pesquisa PID. O papel consiste em apresentar as definições do mecanismo PID embasadas por estudiosos e pesquisadores bem como a influência da temperatura, umidade e da tensão na progressão do PID e as metodologias de detecção e reversão e as medidas preventivas em módulos PV c-Si.

PALAVRAS-CHAVE: Detecção, revisão literária, PID, fotovoltaico, reversão.

POTENTIAL-INDUCED DEGRADATION (PID): REVIEW

ABSTRACT: Potential induced degradation (PID) is a problem that in recent years has been the focus of research and studies on the performance of the photovoltaic module (PV) under field conditions, in view of the consequences caused by this degradation. Even with extensive material, the understanding of the PID phenomenon is still incomplete, but it must be taken into account that technological and environmental diversity are factors that imply in reversal techniques. This article aims to conduct a critical review in order to provide an overview and broad view of the literature available to promote understanding of the current state of PID research. The role is to present the definitions of the PID mechanism supported by scholars and researchers as well as the influence of temperature, humidity and tension on the progression of the PID and the

detection and reversal methodologies and preventive measures in PV c-Si modules.

KEYWORDS: Detection, literary review, PID, photovoltaic, reversal.

1 | INTRODUCTION

The relevance of photovoltaic generation (PV) worldwide, along with the growing energy demand, has led to greater participation of this source in the energy matrices of the countries. The wide use of photovoltaic systems has led to greater investment in research and innovation of this energy source, seeking to optimise cell efficiency, reduce production costs, the development and discovery of new materials for photovoltaic modules. Another aspect that has been the subject of studies is the degradation of photovoltaic modules by several factors, compromising performance, reliability, as well as service life. The degradation is related to several factors, being able to originate in the manufacturing process of the modules and also the exposure conditions, due to the incidence of the radiation itself, the ultraviolet radiation, temperature and humidity since they are exposed to different environmental and climatic conditions.

The most common problems in modules with crystalline silicon solar cells are interrupted interconnections, broken cells, corrosion, delamination of the encapsulant, discoloration of the encapsulant, broken glass, bypass diode and weld tape failure, as well as degradation induced by electrical potential, hot spots and bubble formation on the backsheet, among others (NDIAYE, 2013).

A degraded photovoltaic module can continue to perform its main function, which is to generate electricity from sunlight, even if its use is not as efficient as initially was. However, the degraded state of the module can be more problematic when the degradation exceeds a critical point (CHARKI, 2013). It is important to note that manufacturers consider a PV module to be degraded when its energy reaches a level below 80% of its initial energy.

Among the many problems affecting the performance of the PV module, potential-induced degradation (PID) has attracted the most interest in recent years, more precisely from 2010, this is due to the fact that PID occurs frequently in photovoltaic systems and solar parks, where the voltage of strings are higher.

The PID is related to the difference in potential of the module in relation to earth combined with high humidity and high temperatures, causing loss in power due to unwanted leakage current to the ground, since this decreases the efficiency of the cells (FIGUEIREDO, 2015).

Although most studies on potential-induced degradation are based on p-type crystalline silicon photovoltaic modules, recent research seeks to include photovoltaic modules composed of other cellular materials, as perovskite, thin film solar cells of Indium Gallium Copper Disselenete (CIGS) or whose technology is PERC. Thus, this article aims to carry out a bibliographic review on potential-induced degradation in c-Si photovoltaic modules.

2 I ELUCIDATION OF PID IN PV MODULES

The low maintenance cost, the non-emission of pollutant gases and the lifetime of more than 25 years are fundamental requirements for the implementation of photovoltaic technology in power plants. However, over this time, some problems begin to arise, whether with the inverters installed, whose average operating time is 10 years, whether by other decomposition mechanisms that decrease the efficiency of solar generation or contribute to the destruction of solar cells. In 2010, potential induced degradation (PID) of crystalline silicon solar cells was considered one of the major degradation mechanisms (PINGEL, 2010), this is due to the fact that PID causes a serious initial energy loss, negatively impacting the performance and reliability of the PV module under field conditions (WANG et al, 2016) . Thus, several global PV research institutes have leaned towards PID-related research in photovoltaic modules, in which the term PID was coined by Pingel et al, basing a large amount of work in order to solve and verify its causes (HYLSKÝ et al, 2018).

To achieve greater solar power generation, in the photovoltaic systems connected to the grid, PV modules are connected in series to generate a high output voltage, while the module frame is grounded for safety reasons (Fig.1) in the meantime solar panels may be exposed to high voltage between the solar cell and the module structure. This potential difference causes leakage currents to travel between the metallic structure of the module to the solar cells, or vice versa, depending on the position of the module in the string, through the front glass and the encapsulation. The effect is stronger the closer the module is to the negative pole of the photovoltaic system.

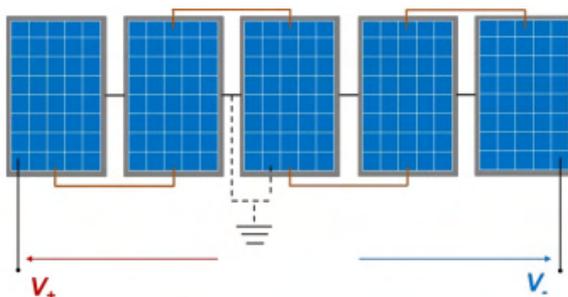


Figure 1. A simplified schematic diagram of a PV system with a floating potential.

Fonte: LUO, 2016.

Studies on the degradation mechanisms caused by high voltages and leakage currents of photovoltaic modules were initiated in 1985 by the Jet Propulsion Laboratory (JPL), more precisely in crystalline silicon (c-Si) and amorphous silicon (a-Si) modules thin film, these were performed outdoors and involved electrochemical and galvanic corrosion, electromigration, and heating by hot spots. Due to the different environmental and climate

conditions and the diversity of solar panel specifications and technologies, there is also emphasis on research to mitigate the effects and causes of PID and to clarify the relative sensitivities of various commercial absorbers today (HYLSKÝ et al, 2018). Since there is no constant pattern for the emergence of the effects of degradation on the module.

The conditions necessary for the occurrence of PID involve (i) environmental factors as well as factors on (ii) system, (iii) module and (iv) cell level (PINGEL et al, 2010). While the environment is set for each individual installation, it is possible to prevent the PID by properly controlling only one of the factors (ii), (iii) or (iv) (SCHÜTZE et al, 2011). In this way, all these factors will be addressed below.

Humidity and temperature negatively affect the performance of the photovoltaic system. In humid climate, the unwanted leakage current decreases the cell performance (SCHWARK et al, 2013), since the high humidity and high temperature facilitate the reaction and diffusion of the metal ions in the encapsulated glass, since this moisture forms a film on the glass, which becomes electrically conductive and therefore the PID effect occurs more easily.

One of the most favorable circumstances for the occurrence of PID is the sunrise of sunny days, period of occurrence of dew, due to the formation of droplets forming a thin layer of water on the glass that causes the increase of humidity. This increase causes the resistivity to decrease and facilitates current leakage through the glass. Throughout the day the humidity decreases due to the temperature rise, thus causing a linearly decreasing leakage and the PID effect does not become relevant during the generation process. It should be noted that the moisture in the encapsulation causes a constant current for a while. At the end of the day this current reaches almost zero, but after this time, the temperature decreases and the PV module becomes moist again (HOFFMANN, 2014).

It is important to note that just as high temperatures cause an increase in the degrading effects caused by PID, high temperatures are used during the regeneration processes of modules against PID. As it is not possible to change the environmental conditions in which the photovoltaic plants are located, the research is based on examining and addressing the PID through the system and the photovoltaic modules.

Regarding the system level, a difference in potential and signal from the module are the aspects that provide the most significant impacts. These in turn depend both on the position of the module in the array, the topology of the grounding, the extent of the photovoltaic arrangement and the type of inverter connected to the system.

The choice of the protective glass and the encapsulating material have been shown to influence the occurrence of PID, since they are in direct contact with the cells. The various types of encapsulation significantly affect PID, modules using EVA (ethylene vinyl acetate) are more prone to PID occurrence, since all different substitutes were able to prevent. Studies point out that acetic acid contained in EVA together with moisture may be responsible for dissolving metal ions at the glass interface (SCHWARK et al, 2013).

Base resistivity, emitter sheet strength and anti-reflective coating (ARC) properties are parameters that influence the sensitivity of the PID effect at the cell level. The anti-reflective coating has the function of increasing light capture, hence the module power conversion is higher. However, the properties used in the anti-reflective coating of the solar cell are factors that significantly affect the effect due to its dependence on the silicon nitride ARC (Si_n) (NAGEL, 2011).

Another factor contributing to the emergence of the PID effect is the accumulation of ions in the ARC, since this leads to the formation of an electric field in this region, causing an antipassivation effect, increasing the recombination near the surface of the photovoltaic cell, in addition to acting as an undesirable path to escape currents (LAUSCH et al, 2014).

3 I DETECTION AND REVERSAL TECHNIQUES

In order to prevent or mitigate PID effects, it is critical that its detection is done in a rapidly and assertively manner, because the degradation mechanisms can result in high yield losses of 20%, or more in cells that aren't PID resistance. To prevent degradation, all the components of the module such as encapsulant and glass should be resistant to PID, the solar cell also must be resistant and to achieve this, a possibility is to optimize the anti-reflective coating (KAPUR, 2015).

The phenomenon occurs most frequently in photovoltaic modules that are closer to the negative pole, when C-Si type p cells are used and in high-voltage array systems (KAPUR, 2015) and various research shows that the type of encapsulant used in the module can directly affect the effect (HOFFMANN, 2014). High yield losses may be an indication of degradation by the PID effect (HACKE et al, 2011).

PID can be detected in a number of ways, with thermographic imaging (CÂMARA, 2019), electroluminescence imaging, open circuit voltage measurement, plotting the I-V curves of the modules (ISLAM, 2018), shunt resistance measurement (SCHWARK et al, 2013), and the use of the mass spectrometer to observe the sodium migration within the module (ISLAM, 2018).

Electroluminescence imaging (Fig. 2) has gained a growing interest due to its quick resolved defect detection possibilities such as, detection of recombination, resistive and optical losses of the modules, low diffusion lengths, high series resistance and shunts. It has been observed from the electroluminescence imaging of the on-site degraded photovoltaic module that a performance degradation happens due to different types of cell defects, such as, localized shunting, cracks and front contact grid interruptions (NAUMANN et al, 2013). To capture the electroluminescence images the module is operated as a light emitting diode, and due to recombination effects the emitted radiation can be detected with a camera that photographs the emitted photons. In the images the damaged areas have less or no brightness, while those without defects have a shine (SCHWARK et al, 2013). Modules affected by PID

develop a lower operating voltage compared to other modules in the array, and these voltage differences can cause hot spots. This way the thermographic imaging assists in the detection of PID as the hot spots indicate the temperature increase of the affected cells (HACKE et al, 2011). As we can see in the the image (Fig. 3), the cells closer to the frame show hotter spots than the rest of the cell (CÂMARA, 2019).

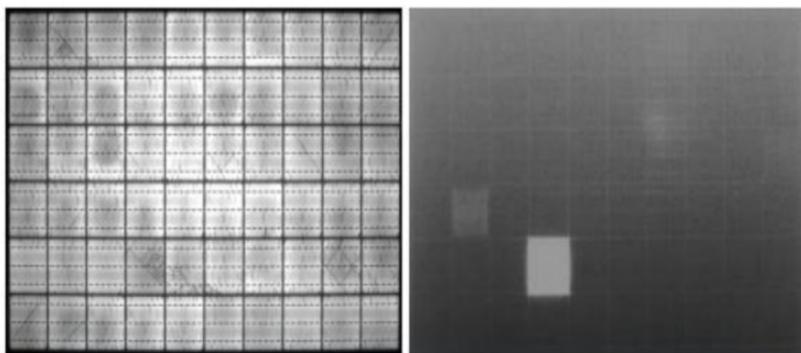


Figure 2. The left image is of the module before degradation and the right image after degradation.

Fonte: (HOFFMANN, 2014).

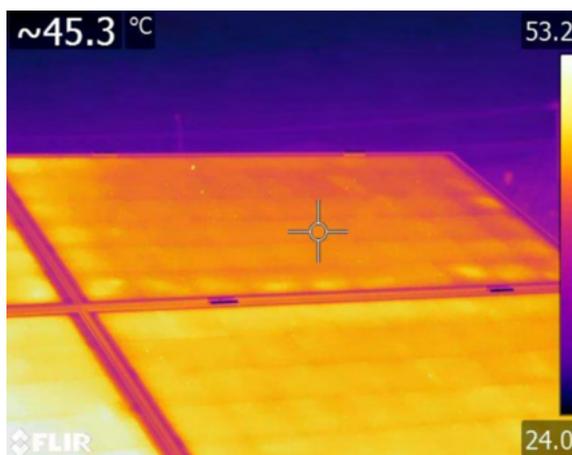


Figure 3. Thermographic image of a module with PID traces.

Fonte: (OH, 2015).

When comparing electroluminescence images and electroluminescence images, there is a slight correlation between the regions with the highest temperature and those with the lowest brightness (PINGEL, 2012).

The shunt resistance (R_{sh}) of the modules who has the PID resistance encapsulant proved to be approximately steady, while the ones that aren't resistant to PID had shown

a decrease in the shunt resistance (ISLAM, 2018). Such resistance is also affected by the different voltages of the degraded modules (PINGEL, 2012).

As the migration of sodium from the anti-reflective coating to the solar cell has been observed after PID tests, the use of the mass spectrometer will observe its accumulation in both the encapsulant and the solar cell (NAUMANN et al, 2013). The module parameters as maximum power point, open circuit voltage, short circuit current, FF (fill factor), and leakage current are drastically reduced as both decrease when the module is affected by PID (HACKE et al, 2011).

The I-V curve (Fig.4) of the affected modules show that the maximum voltage is not the same when compared with the modules that did not suffer from the effect (PINGEL, 2012).

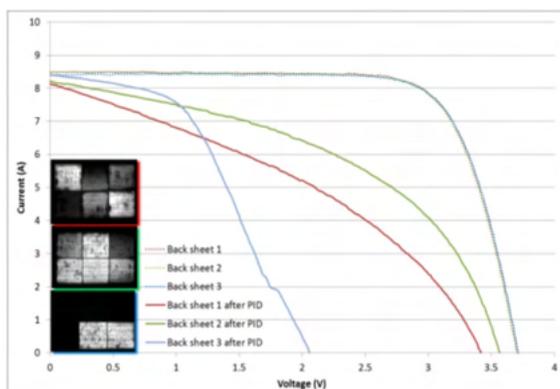


Figure 4. Curves of modules with different back sheets before and after 24h PID test.

Fonte: (KOCH et al, 2012).

Photovoltaic modules shall always be connected in series, taking into account the technical characteristics of the inverters used. The effect that this event brings to large projects is the high voltage created, causing problems detected at both the system level, the panel level and the cell level (HYLSKÝ et al, 2018). These effects are the major causes that can be minimized or even reversible. Climatic factors such as temperature are allies against PID, it has been shown that panels stored at temperature around 100 degrees Celsius for 10 hours lead to a recovery of close to 100% (Fig. 5) (PINGEL, 2012).

In 2010, the most important factor for the appearance of PID was characterized by the large potential difference between cell and soil at the level of the system. For this situation, a reverse potential must be acting in order to reduce this DDP (Potential Difference) (PINGEL, 2010), a system contained in the inverter referring to the string of solar plates called PID doctors can be used for this type of solution. This adaptation will reverse the polarity referring to the polarity of energy generation, causing the reduction of the generated potential, without this electric field, the sodium ions that were previously

deposited in the stacking failures will be removed (HYLSKÝ et al, 2018). Field research for module regeneration shows reversals performed in two distinct strings. In one string a grounding kit was used, in another, was used a SMA PV Offset Box that applies a positive potential in the panels. In both cases, significant recovery was demonstrated over time (Fig. 6) (OH, 2015).

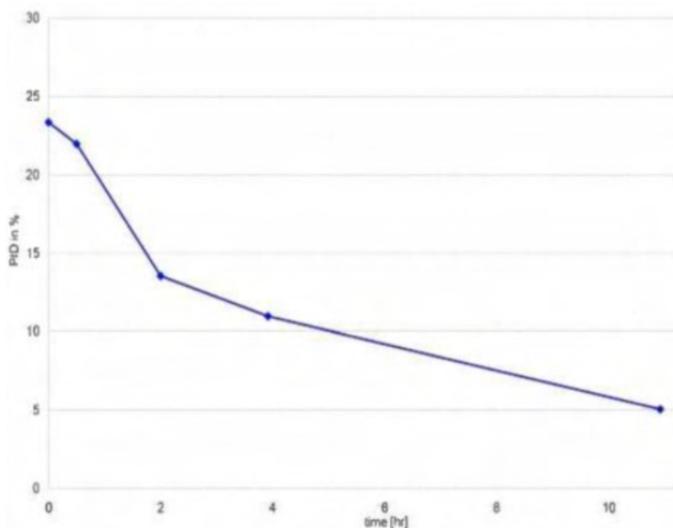


Figure 5. PID recovery using a temperature of ~100°C.

Fonte: (PINGEL, 2010).

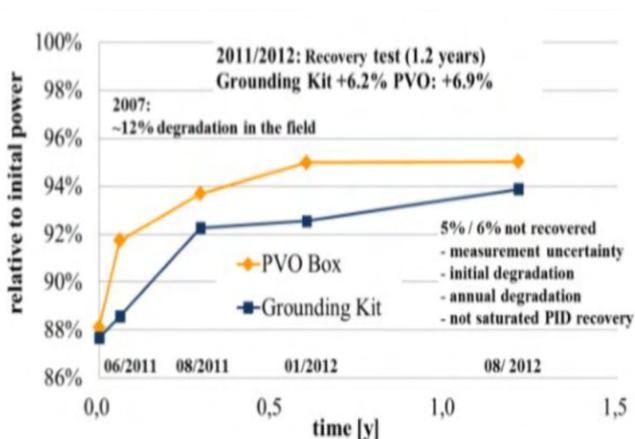


Figure 6. Relative recovery of time degraded panels versus PVO Box and PV-Grounding.

Fonte: (SUGIMURA, 1999).

Reverse voltage system techniques have PV recovery rates (80% - 96%) (CÂMARA, 2019). It should be noted that the junction between reverse voltage, along with application of a

temperature higher than the ambient temperature, can recover the maximum power of a cell by up to 96% considering an irradiance of 1000 W/m² (HACKE et al, 2011). Although temperature is an important catalyst in panel regeneration, it is evident that very high temperatures can affect module materials, impairing their long-term performance (PINGEL, 2010).

Regarding the panel, in the manufacturing some present characteristics of the materials that compose it can be modified in order to minimize the intensity of leakage currents that can in case they lead the cells suffer the PID process. In order to prevent the entry of sodium ions into the cell and encapsulation of the panel, a layer of phosphorus silicate (PSG) was used in the glass. This layer was elaborated in the solar cell emitter diffusion process (HYLSKÝ et al, 2018), and the goal was not to reduce the efficiency of the photovoltaic cell, parameters such as short circuit current and open circuit voltage, maintaining resistive properties against the PID, preventing the penetration of sodium on the surface of the silicon. The technique was achieved by making necessary modifications to the dissemination process (HYLSKÝ et al, 2018). The transport of sodium from the glass to the cell is one of the major factors for the formation of PID, however, it is not yet known for sure how much sodium is needed for the formation of PID (OH, 2015). Using a glass that does not have sodium in its composition effectively protects the cell against PID (KOCH et al, 2012). Two glasses with different sodium levels were tested, borosilicate Glass with 6.5% sodium by weight and soda-Lime Glass with 16% sodium by weight. It was observed in the PID tester that the glass with a lower sodium composition has a higher resistance against PID after 100 hours of testing, while the soda-Lime Glass in 24 hours already presented accumulation of sodium deviation, indicating that the sodium in the glass is critical for PID (HACKE et al, 2011).

Changes in composite materials in the separation of photovoltaic panel materials demonstrate improvements in the PID process. In (HYLSKÝ et al, 2018) it proves that lamination films intended to prevent thermal and electrical isolation of the cell that directly affects PID degradation. Ethylene Vinyl Acetate (EVA), which is widely used today in the manufacture of panels, can be replaced by other materials that have different characteristics from EVA, such as conductivity, decreasing the migration of sodium ions, slowing the emergence of PID. The materials can be partially neutralised by ethylene methacrylic copolymer, EVA copolymer or polyolefin elastomer (HYLSKÝ et al, 2018). Power comparison between modules with ionomer and EVA films was diagnosed. Modules with ionomers retain, after 500 hours of exposure to PID, 99% power, while modules with standard EVA film lose almost all power in 24 hours of testing. A PID tester demonstrates in temperature conditions 85°C and 85% relative humidity and no leaf performed at 96 and 192 hours, stating (Fig. 7) that the standard EVA film has low resistance falling to close to 11.5% of its power compared to the ionomer that maintained 98,5% of its power. Through Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, the accumulation of sodium ions can be obtained after the test. The reading demonstrates a high concentration of sodium in the EVA encapsulation and in the cell compared to the ionomer, reporting also that the deposition of sodium ions in the ionomer layer and cell occurs

slowly when compared to standard EVA (HOFFMANN, 2014).

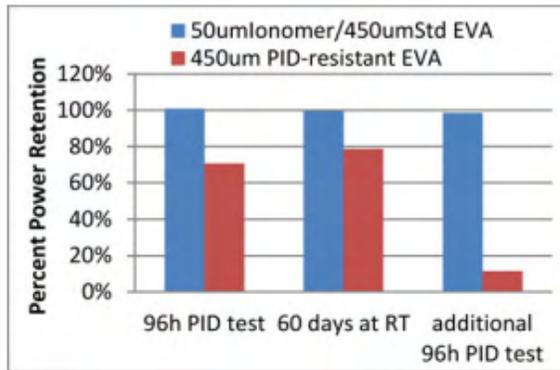


Figure 7. Modules with ionomer and EVA demonstrating the resistance of both films against PID.

Fonte: (KAPUR, 2015).

At the cell level, modifications to the cell structure can decrease PID aggressiveness. In (OH, 2015), it describes the manufacture of two or three anti-reflective coatings to reduce the susceptibility of the PID (KOCH et al, 2012). However, the improvements achieved are too low to be practical PID solutions, and the disadvantages of this modification can considerably affect the efficiency of photovoltaic cells due to the refractive index of these layers. The refractive index of ARC was considered the only parameter capable of preventing the PID effect in PV modules. According to reports by (SCHÜTZE et al, 2011) the PID does not occur if the refractive index of a silicon nitride ARC is 2,2% or more.

4 | CONCLUSION

This article presented a bibliographic review of the Potential Induced Degradation (PID) mechanism that is becoming more relevant with the growth of the photovoltaic system, in which the system tensions are higher. It has been shown that the origin of the PID can be at the cellular, module and system level, as well as the reversal. The solution at the system level is to apply a reverse voltage in order to reduce the DDP between the ground and the system. At the cellular level many parameters influence the stability of the PID, in addition to the resistivity of the base and the resistance of the emitter sheet, the most important parameters were the properties of the anti-reflective coating. Since the changes of this layer can avoid the PID effect. Recently, most of the modules marketed are already manufactured with the PID-free description, showing that the industry has been trying to fix the problem, early in the manufacture of the modules (FIGUEIREDO, 2017). The high temperatures also proved to be an ally to the regeneration of the PV module detected with PID.

It has also been reported on the detection techniques, in which the images obtained

through the thermographic technique and electroluminescence and the plotting of the I-V curve, among other methods, are used in several researches, Thermal images are a viable technique to be performed in the field and with great possibilities to infer the existence of PID, being the rapid possibility of detecting problems in one or more modules.

Given these conclusions, it is expected that from this study, the understanding of the current state of research related to PID, other works could be developed to achieve a significant improvement in the effects of the PID and to provide stability of solar panels.

We intend to continue this work by analyzing the methodologies and techniques presented here in photovoltaic modules installed in photovoltaic plants in the region of Campos dos Goytacazes (RJ) and Cabo Frio (RJ) in order to prove the analysis of field studies by other authors.

REFERÊNCIAS

CÂMARA, Harley Viana Barreto; MIRANDA, Hellen Ferreira Barreto; DA SILVA, Jonathan Velasco. Recovery of modules affected by potential induced degradation (PID) applying a reverse potential in the laboratory without temperature control. In: **2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)**. IEEE, 2019. p. 1-5.

CHARKI, Abderafi; LARONDE, Rémi; BIGAUD, David. The time-variant degradation of a photovoltaic system. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 135, n. 2, 2013.

FIGUEIREDO, Gilberto; ZILLES, Roberto. Degradação induzida pelo potencial em módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 2, p. 128-137, 2015.

HACKE, P. et al. **Characterization of multicrystalline silicon modules with system bias voltage applied in damp heat**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2011.

HACKE, Peter et al. System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test. In: **2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. IEEE, 2011. p. 000814-000820.

HOFFMANN, Stephan; KOEHL, Michael. Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 22, n. 2, p. 173-179, 2014.

HYLSKÝ, Josef et al. Design of P-type photovoltaic cells resistant to potential-induced degradation. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 8, n. 5, p. 1215-1221, 2018.

ISLAM, Mohammad Aminul; HASANUZZAMAN, Md; ABD RAHIM, Nasrudin. A comparative investigation on in-situ and laboratory standard test of the potential induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules. **Renewable Energy**, v. 127, p. 102-113, 2018.

KAPUR, Jane et al. Prevention of potential-induced degradation with thin ionomer film. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 1, p. 219-223, 2014.

KOCH, Simon et al. Potential induced degradation effects on crystalline silicon cells with various antireflective coatings. In: **27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**. 2012. p. 1985-1990.

LAUSCH, Dominik et al. Potential-induced degradation (PID): Introduction of a novel test approach and explanation of increased depletion region recombination. **IEEE journal of photovoltaics**, v. 4, n. 3, p. 834-840, 2014.

LUO, Wei et al. In-situ characterization of potential-induced degradation in crystalline silicon photovoltaic modules through dark I–V measurements. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 7, n. 1, p. 104-109, 2016.

NAGEL, H. et al. Crystalline Si solar cells and modules featuring excellent stability against potential-induced degradation. In: **26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**. 2011. p. 3107-3112.

NAUMANN, Volker et al. Microstructural analysis of crystal defects leading to potential-induced degradation (PID) of Si solar cells. **Energy Procedia**, v. 33, p. 76-83, 2013.

NDIAYE, Ababacar et al. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar Energy**, v. 96, p. 140-151, 2013.

OH, Jaewon; BOWDEN, Stuart; TAMIZHMANI, GovindaSamy. Potential-induced degradation (PID): Incomplete recovery of shunt resistance and quantum efficiency losses. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 6, p. 1540-1548, 2015.

PINGEL, S.; JANKE, S.; FRANK, O. Recovery methods for modules affected by potential induced degradation (PID). In: **27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Frankfurt)**. 2012. p. 3379-3383.

PINGEL, Sebastian et al. Potential induced degradation of solar cells and panels. In: **2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. IEEE, 2010. p. 002817-002822.

SCHÜTZE, Matthias et al. Laboratory study of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules. In: **2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. IEEE, 2011. p. 000821-000826..

SCHWARK, Michael et al. Investigation of potential induced degradation (PID) of solar modules from different manufacturers. In: **IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2013. p. 8090-8097.

SUGIMURA, R. S. et al. Test techniques for voltage/humidity-induced degradation of thin-film photovoltaic modules. **Solar cells**, v. 28, n. 2, p. 103-114, 1990.

WANG, Fumei et al. Effect of potential induced degradation on crystalline silicon solar modules in photovoltaic power plant. In: **2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. IEEE, 2016. p. 1752-1756.

CAPACITOR BANK ALLOCATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE DISCRETE PSO ALGORITHM

Data de aceite: 01/10/2021

Luís Henrique Chouay Dall' Agnese

Faculdade União das Américas - UNIAMÉRICA
Foz do Iguaçu - PR
<http://lattes.cnpq.br/1502220513099067>

Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Foz do Iguaçu - PR
<http://lattes.cnpq.br/4658529903411274>
<https://orcid.org/0000-0002-0711-2668>

ABSTRACT: This chapter presents an article whose subject seeks to define the optimal allocation of capacitors for reactive power flow planning in distribution power system. The problem is based on a mathematical model that minimizes the operation and investment cost, where a sensitivity index and the lowest voltage are used to select the buses for allocation. A Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm adapted to a discrete version is used to find the best quantity and location of the capacitor bank (CB). As a result, there was a reduction in power loss and an improvement in the voltage profile even with the addition of CB. The method is applied in the 10 and 34 bus system. The proposed algorithm presented a good solution compared to other optimization techniques presented in the literature.

KEYWORDS: Power systems, Power distribution, Reactive Power Planning.

ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO USANDO ALGORITMO DE PSO DISCRETO

RESUMO: Este capítulo apresenta um artigo cujo assunto procura por definir a alocação ótima de capacitores para o planejamento do fluxo de potência reativa no sistema de distribuição de energia. O problema é baseado em um modelo matemático que minimiza o custo de operação e investimento, onde um índice de sensibilidade e as barras de menor tensão são utilizados para selecionar as barras a serem alocadas. É utilizado um algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas (PSO) adaptado para uma versão discreta para encontrar a melhor quantidade e localização do banco de capacitores (CB). Como resultado, houve uma redução na perda de potência e uma melhora no perfil de tensão mesmo com a adição do CB. O método é aplicado no sistema de 10 e 34 barras. O algoritmo proposto apresentou boa solução em comparação com outras técnicas de otimização apresentadas na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Potência, Sistemas de Distribuição, Planejamento de Potência Reativa.

1 | INTRODUCTION

The power grid is a set of equipment responsible for transporting electricity from one point to another, to ensure that consumers have access to electricity as pleased, and it is managed by electrical utility distribution. Besides

continuous power supply, quality assurance is in the utility purview, meaning that the voltage levels shall be within limits established in technical standards for operating a distribution system (DS) (WILLIS, 2004).

During the years of operation, it is not possible to accurately predict the growth of the consumed load by the system, which leads to a reduction in the voltage profile of the grid and an increase in the power losses of electrical system (PEREIRA JUNIOR, 2009).

The DS is highly responsible for power losses in electrical power systems, and it has a low-voltage regulation. This issue is within the context of DS operation planning, which seeks to encounter a preferable operating scenario, aiming at minimizing costs. In this regard, several strategies are researched that reduces power loss in the grid, such as the use of distributed generation, the allocation of voltage regulators and the setup of capacitor banks (CB) (PRASAD REDDY P, 2014). The use of CB is a technique inserted within reactive power planning and usually employed to solve these problems (PRASAD REDDY P, 2014).

The allocation of CB is justified by the fact that these devices improve the grid voltage profile, leading to a more horizontal profile and thus improving the quality of the energy delivered to the consumer. Besides that, as they are inserting reactive power into the grid, they reduce the apparent power flow in the system, and this leads to lower electrical losses (TABARES, 2016). However, mistaken the CB insertion location as well as its quantity may worsen the system voltage profile and increase active power losses (DIXIT, 2016).

Thus, CB allocation can be handled as a combinatorial optimization problem, where there is a finite yet very large set of feasible solutions. For such problems, computer optimization algorithms are often employed, such as metaheuristics that do not guarantee a global solution to the problem, however, are efficient in finding high quality solutions without a high computational expense (DOS SANTOS PEREIRA, 2018).

For this problem, the literature shows a variety of algorithms that can be applied, such as Plant Growth Simulation Algorithm (RAO, 2008), Particle Swarm Optimization (DIXIT, 2016), Swarm robotics search & rescue algorithm, Genetic Algorithm (KALANTARI, 2011), Evolutionary Algorithms, Cuckoo Search Algorithm (PRASAD REDDY P, 2014), Gravitational Search Algorithm, Whale Optimization Algorithm (NEAGU, 2017), among others. The metaheuristic technique employed in this paper was the Particle Swarm Optimization (PSO), however, due to the nature of the problem, this algorithm has been adapted to work with discrete variables.

On the basis thereof, this paper presents an algorithm capable of reactive power planning of a power distribution system, through CB allocation. The algorithm is guided through an objective function that seeks to reduce the active power losses of the system, combined with a lower investment cost of CB setup.

The descriptions of mathematical model employed, the metaheuristic technique for objective function minimization, the adaptation of the technique to solve the problem, the results obtained, and the conclusion are described in the next sections.

2 I MATERIALS AND METHODS

This section describes in detail the mathematical model, aspects, formulation, adaptation of the meta- heuristic technique employed and a flowchart of the proposed algorithm. The mathematical formulation will be presented below.

The objective function evaluation that guides the PSO algorithm in search of the best location to insert CB is based on the following mathematical model.

$$\min Z = K_p P_T + \sum_{i=1}^{N_B} K_{C_i} Q_{C_i} \quad (1)$$

$$-dp_i = \sum_{j=1}^N P_{i,j} + P_{j,i} \quad i \in n \quad (2)$$

$$-dq_i + N_{C_k} * Q_B = \sum_{j=1}^N Q_{i,j} + Q_{j,i} \quad i \in N, K \in N_B \quad (3)$$

$$P_{i,j} = V_i^2 g_{i,j} - V_i V_j g_{i,j} * \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i V_j b_{i,j} * \text{sen}(\theta_i - \theta_j) \quad (4)$$

$$Q_{i,j} = -V_i^2 b_{i,j} - V_i V_j g_{i,j} * \cos(\theta_i - \theta_j) + V_i V_j b_{i,j} * \text{sen}(\theta_i - \theta_j) \quad (5)$$

$$S_{i,j} \leq S_{MAX} \quad (6)$$

$$V_{MIN} \leq V_i \leq V_{MAX} \quad (7)$$

The first equation represents the function whose goal is to minimize two cost terms: the first of these is related to the system operation, which seeks to minimize the costs with active power losses, the second refers to investments in equipment where it looks for to minimize the cost of setting-up CB. In the equation, K_p (\$/kW) and K_{C_i} (\$/kvar) represents the cost for active power loss in the system and the cost of setting- up capacitor banks on bus i , P_T (kW) represents the total value of active power losses, Q_{C_i} (kvar) represents the reactive power of CB installed on bus i , and NB represents the set of system buses that has a CB connected to them.

The objective function is subject to a set of equality and inequality constraints. Within the equality constraints, (2) and (3) represents the system active and reactive power balance, where dpi and dqi represents the active and reactive power demands on bus i , respectively, P_{ij} and Q_{ij} represents the active and reactive power flow that flows from bus i to bus j , respectively, N refers to the set of system buses, N_{Ck} represents the number of CB installed on bus k and Q_B indicates the base power each bank can inject into the system.

Expressions (4) and (5) represents the equation of active and reactive power usage in line, respectively, V_i and θ_i represents the magnitude and the angle of bus voltage i and, g_{ij} and b_{ij} represents the conductance and susceptance of line connecting bus i to bus j .

Regarding inequality constraints, (6) represents the apparent power limit on the line, which cannot exceed a maximum value, and (7) indicates the minimum and maximum voltage level limits on buses.

The optimization technique used is based on the particle cooperative movement within a swarm, like bird's flights, seeking the best solution for optimization problems (KENNEDY,

1995). The particles of PSO algorithm moves in three terms: the inertia term, which quantifies the particles tendency not to change direction, that is, keep its own movement, the cognitive term, which quantifies the particle tendency to follow the best path it has ever found, and the social learning term, which quantifies the particle tendency to follow the best path the entire swarm has already found, that is, the best position found.

Each particle carries two pieces of information: the number of CB to be installed and the candidate bus for receiving the devices, thereby defining the solution. Thus, at each iteration, the particles swarm moves within the solution space, seeking the best possible position. The position of each particle and the speed with which it moves are represented through expression (8).

$$V_p^{i+1} = wv_p^i + c1 * (p_p^{best} - p_p^i) + c2 * (g_{best} - p_p^i) \quad (8)$$

In (8), the first part refers to the inertia term, where v_p^i indicates the velocity of particle p in iteration i and w is the particle inertia index. The central expression indicates the cognitive learning term, where $c1$ is the cognitive learning index, p_p^{best} is the best position where the particle p has ever been, p_p^i is the position of particle p in iteration i . And the last part shows the global learning term, where $c2$ is the global learning index and g_{best} is the best position, any particle has ever been. The position of each particle represents the number of CB connected to bus i , where each CB is capable to provide a total of 150 kvar.

The PSO algorithm was designed to solve problems with continuous variables, however, the goal of this problem is to establish the number of CB that will be connected in each bus. Thus, the algorithm required adaptation so that it could work with discrete variables. The authors (KENNEDY, 1997) who initially developed PSO, also presents a way to discretize variables in PSO algorithms, which is based on the formulation presented below.

$$f = \frac{1}{1+e^{-v_p^{i+1}}} \quad (9)$$

$$p_p^{i+1} = \begin{cases} 1, & f \geq rand \\ 0, & f < rand \end{cases} \quad (10)$$

Equation (9) represents the Sigmoid Function which is responsible for establishing the particles velocity between 0 and 1, thus, equation (10) performs a draw to determine the logical level that represents that speed. The relation of this coding to the position vector of each particle is illustrated below.

$$p_p = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Equation (11) shows that each particle position is now represented by a binary vector, to use integer variables in discrete optimization problems. In addition, the position speed of each particle is also represented by a vector, so expressions (9) and (10) are used for each element of position matrix.

The definition of which system buses are candidates for insertion of CB is guided by two indicators presented below.

$$LSF_i = \frac{2Q_{ij}r_{ij}}{V_i^2} \quad (12)$$

$$Norm_i = \frac{V_i}{0.95} \quad (13)$$

Equation (12) indicates the Losses Sensitivity Factor on bus i (LSF_i), where $r_{i,j}$ represents the resistance of the line connecting bus i to bus j , and (13) represents a vector that normalizes voltage values on the buses. Both equations represent the criteria used to select the candidate buses for the CB installation. Firstly, the LSF is calculated and descending ordered, then are selected the buses whose corresponding normalization vector is greater than 1.01. The quantity definition and which are the candidate buses for CB allocation helps reduce the solving problem space (RAO, 2008).

A schematic diagram with the running steps of the algorithm is illustrated in Figure 1, which shows the execution process of the algorithm. The position of each particle is used to evaluate the objective function, so these values are compared to the best positions each particle has ever been, and with the best position the whole swarm has ever been. If these positions lead to a better value of the objective function, its stored. The best positions of each particle are used in equation (8) for updating the velocity of each particle.

3 | RESULTS AND DISCUSSIONS

The proposed algorithm was evaluated in test systems presents in literature, and the results compared with those obtained by other authors. For the algorithm execution, algebraic modeling software GAMS was used, with the CONOPT solver. In both cases, 10 particles, 50 iterations, $K_p = 168$ \$/kW, $w = c1 = c2 = 1$ were used, and the substation bus was chosen as a system voltage reference with value of $1 \angle 0^\circ$ [p.u].

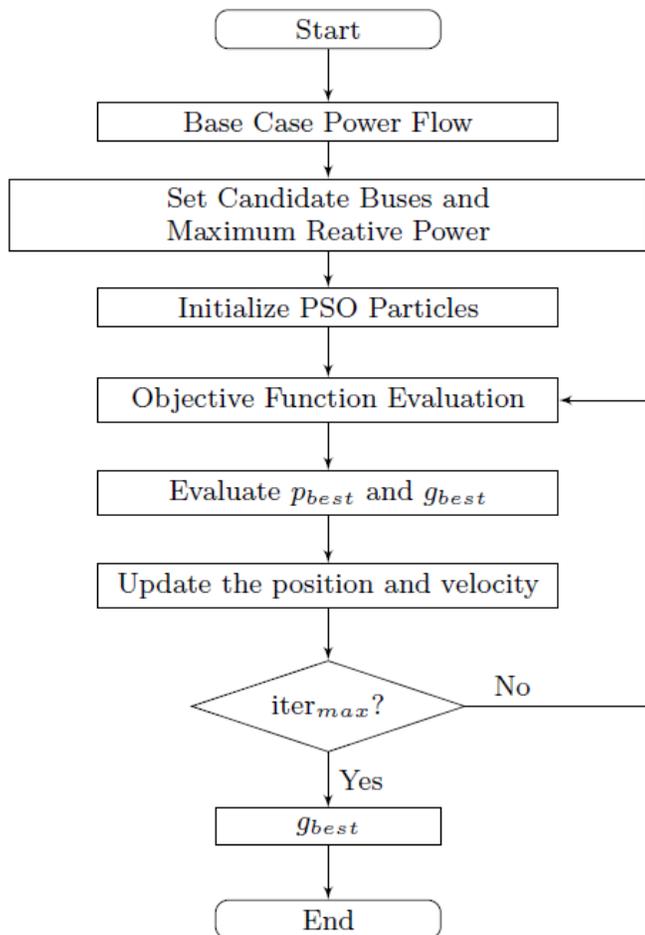


Figure 1 - Algorithm Flowchart.

Table 1 shows the available CBs that were considered in this test. The algorithm was written such manner that CBs with best cost-benefit ratio were used first, that is, the smallest values from the third column of Table 1.

Power (kvar)	Cost (\$)	Ratio (\$/kvar)
1200	2040	1.7
900	1650	1.833
600	1320	2.2
450	1140	2.533
300	975	3.25
150	750	5

Table 1 - Available Capacitor.

The 10-bus system operates at 23 kV and has a total load of 12368 kW and 4186 kvar. System data is available at (HAMADA, 2008). Figure 2 illustrates the system configuration. Table 2 indicates which system buses were considered in the optimization process, as well as the amount of CB to be installed. Table 3 shows a comparison between the base case where there is no CB installed, the results obtained by (DIXIT, 2016) and (HAMADA, 2008) and those found in this test. Figure 3 shows a comparison between system voltage levels before and after CB allocation.

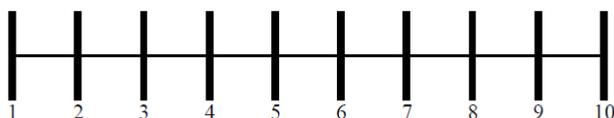


Figure 2 - 10-Bus System Configuration.

Candidate Buses	Results				
	B04	B05	B06	B09	B10
Installed Banks	10	12	8	0	2

Table 2 - Installed Capacitors 10-Bus System.

	Base Case	(DIXIT, 2016)	(HAMADA, 2008)	Discrete PSO
Power Loss (kW)	783.78	703.97	684	681.57
Operation Cost (\$)	131674.9	118226.96	114912	114503.76
Reactive Tot. (kvar)	0	2850	5400	4800
Installation Cost (\$)	0	588	1199.4	939
Total Cost (\$)	131674.9	118854.96	116111.4	115441.98
VMIN	0.838	0.873	0.9	0.878
VMAX	0.993	0.995	-	0.997

Table 3 Comparison of Obtained Results 10-Bus System.

According to Table 3 it is possible to notice that there was a 13% reduction in active power losses decreasing as at 102.21 kW. In addition, the total reactive power shows that a large amount of CB are not required, but this amount must be allied to the smart choice of installation buses.

The 34-bus system operates at 11 kV and has a total load of 4636.5 kW and 2873.5 kvar. System data is available at (HAMADA, 2008). Figure 4 illustrates the system configuration. Table 4 shows the CBs installed on the system buses, as well as the considered options.

Table 5 shows a comparison between the base case, where no CB is installed, the results obtained by (DIXIT, 2016) and (HAMADA, 2008) and those found in this paper. Figure 5 shows a comparison between system voltage levels before and after CB allocation.

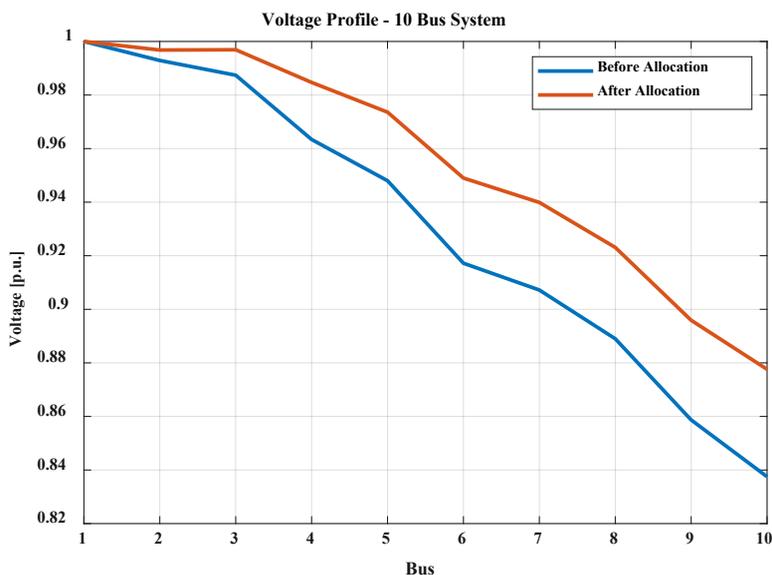


Figure 3 Voltage Profile 10-Bu s System.

Results					
Candidate Buses	B19	B20	B21	B22	B23
Installed Banks	6	0	4	1	0
Candidate Buses	B24	B25	B26	B27	-
Installed Banks	0	1	0	1	-

Table 4 - Installed Capacitors 34-Bus System.

	Base Case	(DIXIT, 2016)	(HAMADA, 2008)	Discrete PSO
Power Loss (kW)	221.71	168.37	158	166.94
Operation Cost (\$)	37249.19	28286.16	26544	28045.36
Reactive Tot. (kvar)	0	1950	3000	2100
Installation Cost (\$)	0	521.7	1365	544.5
Total Cost (\$)	27249.19	28807.86	27909	28589.86
VMIN	0.9417	0.9502	0.951	0.9504
VMAX	0.9941	0.9950	-	0.9950

Table 5 - Comparison of Obtained Results 34-Bus System.

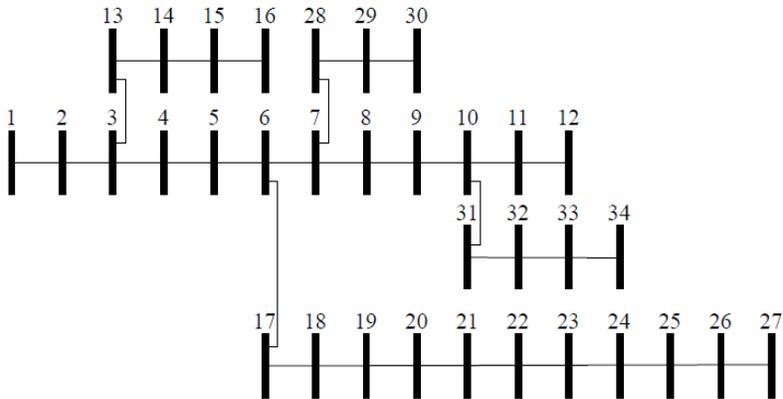


Figure 4 - 34-Bus System Configuration.

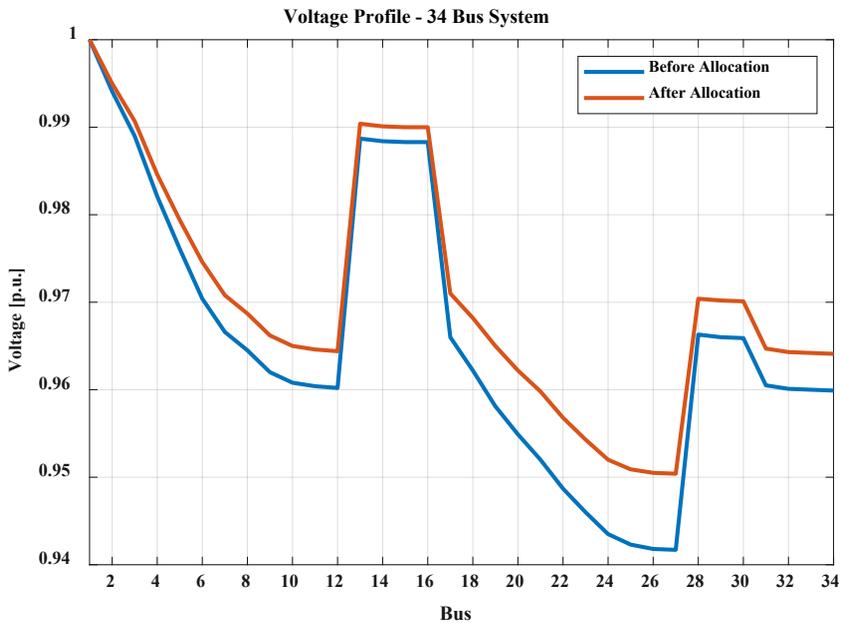


Figure 5 - Voltage Profile 34-Bus System.

Analyzing Table 5 it was observed that there was a reduction of 24.7%, that is, 54.78 kW in active power losses. In addition, the total determined reactive power shows, as well as the 10-bus system, that a large amount of CB is not required, but that amount must be consistent with the smart choice of installation buses.

Figure 5, as well as Figure 3, shows that CB allocation, furthermore, to reducing active power losses, leads to an improvement to grid voltage profile, which means a better operating point for the system.

4 | CONCLUSION

This chapter presents an article that presents the solution of a cost minimization problem of a DS for the optimal allocation of CB using adapted PSO metaheuristic technique for discrete variable problems. The algorithm used was evaluated in tests systems presents in literature and compared with other optimization techniques. In general, the discrete PSO algorithm showed itself robust, presenting excellent performance. Furthermore, it was efficient in determining the quantity and location of installation of the CB on the electrical grid, with low total costs, reducing operation and investment costs and minimizing active power losses.

5 | ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank CAPES for the financial support for the development of this research.

REFERÊNCIAS

DIXIT, M., KUNDU, P., JARIWALA, H. R. **Optimal allocation and sizing of shunt capacitor in distribution system for power loss minimization.** *In: IEEE Student's Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), IEEE, 2006, p. 1-6.*

DOS SANTOS PEREIRA, G. M., FERNANDES, T. S., AOKI, A. R. **Allocation of Capacitors and Voltage Regulators in Three-Phase Distribution Network.** *Journal of Control, Automation and Electrical System, v. 29, n. 2, p.238-249, 2018.*

HAMADA, M. M., WAHAB, M. A., EL-SAYED, A. H. M., RAMADAN, H. A. **A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders.** *In: 12th International Middle-East Power System Conference, IEEE, 2008, p. 146-151.*

KALANTARI, M., KAZEMI, A. **Placement of distributed generation unit and capacitor allocation in distribution systems using genetic algorithm.** *In: 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Conference Proceedings n. 2, IEEE, 2011, p. 1-5.*

KENNEDY, J., EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization.** *In: International Conference on Neural Network (ICNN), Proceedings of ICNN'95, 1995, p. 1942-1848.*

KENNEDY, J., EBERHART, R. **Discrete binary version of the particle swarm algorithm.** *In: IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation, v. 5, 1997, p. 4104-4108.*

NEAGU, B. C., IVANOV, O., GAVRILA, M. **Voltage profile improvement in distribution networks using the whale optimization algorithm.** *In: 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, Conference Proceedings, 2017, p.1-6.*

PEREIRA JUNIOR, Benvindo Rodrigues. **Alocação Otimizada de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica através de Metaheurísticas Multiobjetivo.** 2009. Master's thesis (Master in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

PRASAD REDDY P, D. **Sensitivity Based Capacitor Placement Using Cuckoo Search Algorithm for Maximum Annual Savings**. IOSR Journal of Engineering, v. 4, n 4, p.06-09, 2014.

RAO, R., NARASIMHAM, S., RAMALINGARAJU, M. **Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 33, n. 2, p.133-139, 2008.

TABARES, A., FRANCO, J. F., LAVORATO, M., RIDER, M. J. **Multistage Long-Term Expansion Planning of Multiple Alternatives**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 31, n. 3, p.1900-1914, 2016.

WILLIS, H. L. **Power Distribution Planning Reference Book**. New York: Marcel Dekker Inc., 2004.

DESIGN OF A TRANSMISSION-LINE METAMATERIAL WITH A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION AT S-BAND

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 30/07/2021

Lucas Douglas Ribeiro

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-0230-8899>

Juscelino Júnior de Oliveira

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0003-2364-4741>

Arthur Henrique de Lima Ferreira

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-8018-6823>

Rose Mary de Souza Batalha

Pontifical Catholic University of Minas Gerais,
Graduate Program in Electrical Engineering
Belo Horizonte, Minas Gerais
<https://orcid.org/0000-0002-6157-1574>

ABSTRACT: A metamaterial based on a two-dimensional transmission-line network loaded with inductors and capacitors enabling to achieve negative-refractive-index (NRI) is developed. The dispersion characteristics are calculated by their equivalent circuit model and an operating frequency of 2.95 GHz in which there is impedance matching with free space is chosen in the S-Band. This NRI metamaterial supports transverse electric (TE) waves, thus it can be

used in applications such as lensing.

KEYWORDS: Composite Right/Left-Handed (CRLH); left-handed media (LHM), metamaterials, negative permeability, negative permittivity, negative refractive index, periodic structures.

PROJETO DE UM METAMATERIAL BASEADO EM PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM ÍNDICE DE REFRAÇÃO NEGATIVO NA BANDA S

RESUMO: Foi desenvolvido um metamaterial baseado em parâmetros de linha de transmissão bidimensional carregada com indutores e capacitores que permite obter índice de refração negativo (do inglês, negative refractive index, NRI). As características de dispersão são calculadas por meio do modelo de circuito equivalente e a frequência de operação de 2,95 GHz na qual há casamento impedância com o espaço livre é escolhida na banda S. Este metamaterial NRI suporta ondas transversais elétricas (TE), portanto, pode ser usado em aplicações como lentes.

PALAVRAS-CHAVE: Composto Direito/Esquerdo (CRLH); meio Esquerdo (LHM), metamateriais, permeabilidade negativa, permissividade negativa, índice de refração negativo, estruturas periódicas.

1 | INTRODUCTION

In 1968, Veselago investigated materials with simultaneously negative permittivity and permeability, due to the reversal of the Snell's law, negative phase velocity, and some

other electrodynamic properties, they are known as left-handed materials (LHM). These metamaterials (MMs) are artificial composites characterized by subwavelength features and effective negative value of the refractive index (NRI). LHMs can be applied to optical and microwave applications, including beam steerers, modulators, band-pass filters, microwave couplers, antenna radomes, and superlenses [1], [2]. As Pendry proposed in 2000 [3], the application of MM lensing, which avoids the diffraction limit by utilizing both periodic and evanescent electromagnetic waves, further increased the interest for NRI MMs.

Whereas the split-ring resonators (SRRs) and thin wires were the first realizations of LHMs [4] based on a periodic array of interspaced conducting nonmagnetic split ring resonators and continuous wires, that exhibits a frequency region in the microwave regime with simultaneously negative values of effective permeability μ_{eff} , the first MM lens in planar form using the NRI transmission-line (NRI-TL) approach was achieved by [5]. In that work, a host TL is loaded using lumped shunt inductors and series capacitors that, respectively, create the conditions for an effective NRI.

The TL MMs can be used in many applications, which include electrically small antennas, subwavelength resonators, guided wave applications, phase compensators, LTE antennas, radar applications [6], superconductors [7] and perfect lens, and superlens [8]

Some developments of volumetric arrays of NRI-TL metamaterials that interact efficiently with free space were achieved in [9], [10] and led to the experimental demonstration of free space NRI lens [8]. The free space metamaterial lens development in [11] allows electromagnetic waves to focus into a focal region. The designed lens employs a multilayer geometry of unit cells that are loaded using fully printed capacitors and inductors in a substrate.

A similar development is done in this work. We propose to design a transmission-line (TL) network periodically loaded using discrete (surface-mounted) inductors and capacitors. The TL is modeled by a metamaterial unit cell using circuit theory, and an operating frequency of 2.95 GHz at S-Band, in which there is impedance matching with free space, is chosen. The unit cell size is approximately 11 times smaller than the wavelength, which is sufficient to consider it as an effective medium. The equation for the dispersion relation is compared with the simulation results to analyze the metamaterial behavior.

The behavior of an NRI-TL metamaterial in the GHz frequency is studied in this paper. Section II presents the metamaterials theory based on transmission line parameters. In Section III, the simulation of a unit cell is shown. The Conclusion is in Section VI.

2 | METAMATERIALS BASED ON TRANSMISSION LINE PARAMETERS

Metamaterials can be defined as artificial structures of natural elements that when correctly arranged can exhibit unnatural behavior. When they have an average cell size much smaller than the wavelength, they become effectively homogeneous structures. Thus, the refractive phenomenon can overlap the diffraction and scattering in MMs when there is wave

propagation.

It is possible to separate the MMs into two groups: resonant and non-resonant. The most common resonant is the Split Ring Resonator. In the group of non-resonant, we have the metamaterials modeled by transmission line theory, also called TL metamaterials [12].

The non-resonant metamaterial, also found in the literature as CRLH (Composite Right/Left-Handed), do not rely on resonances to provide negative parameters, thus obtaining lower ohmic losses and larger bandwidth when compared with the resonant metamaterials [5], [13]. The TL MMs can be used in two configurations: shunt and series [9], [14].

Any natural dielectric can be modeled by an electric circuit composed by a series inductance and a shunt capacitance, which are directly related to the material parameters permeability and permittivity. This theory, a circuit of unit cell size d with shunt inductance and a series capacitance, is used to model a TL metamaterial and obtain negative parameters.

A traditional transmission line can be used as the host to implement a material with negative parameters, together with loading elements as inductors and capacitors. An example of this configuration is the microstrip line that can be made in shunt and series configurations [9]. There are two co-planar strip lines on the top of a substrate in the series topology, and there is no ground plane. In the shunt configuration [15], the stripline is on top of the substrate and the ground plane on the bottom. These two configurations are shown in Fig. 1.

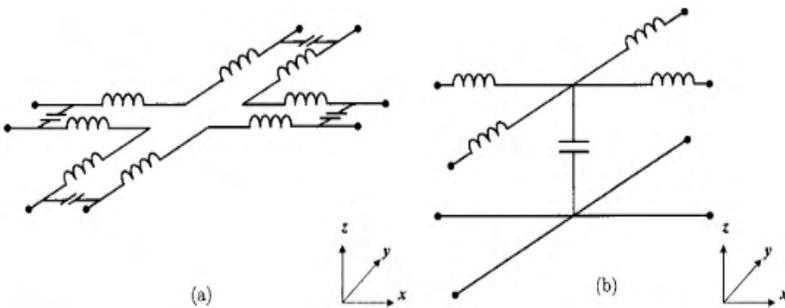


Fig. 1 - Transmission line host topologies. (a) Series. (b) Shunt [9].

The series configuration is shown in Fig. 1 (a). It can be seen as the connection of four transfer-matrices, which relates the input and output terminal voltages and currents of a two-port network. The connected transfer-matrices are shown in Fig. 2.

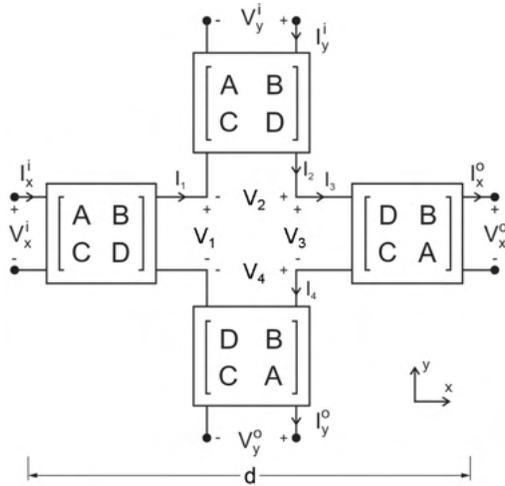


Fig. 2 - Block diagram for the series unit cell.

Every arm of Fig.2 is a block represented by its transmission matrix and presents the following relations:

$$\begin{aligned}
 V_x^o &= V_x^i e^{-j\beta_x d} & I_x^o &= I_x^i e^{-j\beta_x d} \\
 V_y^o &= V_y^i e^{-j\beta_y d} & I_y^o &= I_y^i e^{-j\beta_y d}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Where β is the phase delay over the cell dimension d . Due to the symmetry of the circuit, the transmission matrix is inverted in the output side.

The series impedance $Z = j(\omega L_R - 1/(\omega C_L))$ and the shunt admittance $Y = j(\omega C_R - 1/(\omega L_L))$ can compose the circuit of each loaded block, where L_R and C_R represent the natural characteristic of the strip lines, also called host line elements, and L_L and C_L are the loading elements.

The circuit of the loaded block can be seen in Fig. 3.

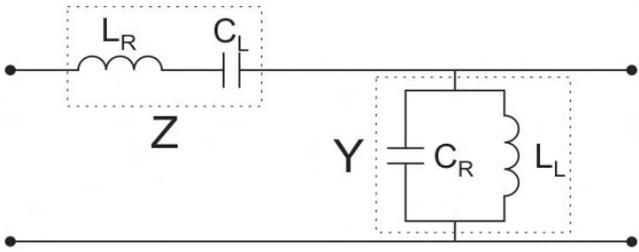


Fig - 3. Circuit model of one block.

Before obtaining the values of the terms L_R e C_R , it is necessary to calculate the effective permittivity ϵ_{eff} of the medium. Considering a stripline with lands of width w separated by a distance s , on a substrate with relative permittivity ϵ_r , a height h , and

surrounded by air with permittivity ϵ_0 . As discussed in [16], it can be considered that the same stripline is surrounded by a single dielectric with an effective permittivity ϵ_{eff} , as shown in Fig. 4.

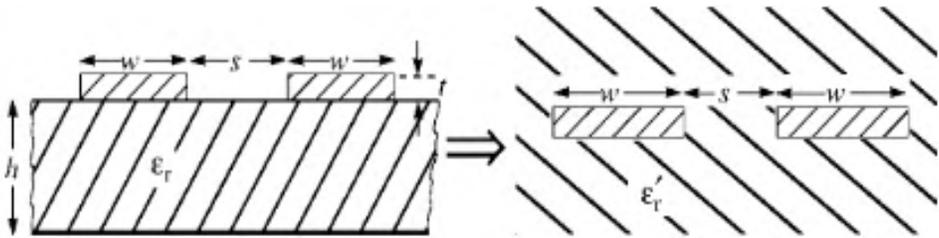


Fig. 4. Effective permittivity [16].

Then, effective permittivity can be calculated by:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left\{ \tanh \left[0,775 \ln \left(\frac{h}{w} \right) + 1,75 \right] + \frac{kw}{h} [0,04 - 0,7k + 0,01(1 - 0,1\epsilon_r)(0,25 + k)] \right\} \quad (2)$$

where $k = s / s + 2w$.

The values of L_R and C_R can be obtained from:

$$L_R = \begin{cases} \frac{120d}{v_0} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right), & \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \\ \frac{377\pi d}{v_0 \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right)}, & 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_R = \begin{cases} \frac{\epsilon_{eff} d}{120v_0 \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right)}, & \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \\ \frac{\epsilon_{eff} d \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right)}{377\pi v_0}, & 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

where $k' = \sqrt{1 - k^2}$ e v_0 is the speed of light in a vacuum.

The transmission matrix coefficients can be defined as:

$$A = ZY + 1 \quad B = Z \quad C = Y \quad D = 1 \quad (4)$$

Through the circuit theory in the diagram of Fig.2, it is possible to get the following equations:

$$\begin{aligned} V_1 &= DV_x^i - BI_x^i & I_1 &= -CV_x^i + AI_x^i \\ V_2 &= DV_y^i - BI_y^i & I_2 &= -CV_y^i + AI_y^i \\ V_3 &= DV_x^o - BI_x^o & I_3 &= CV_x^o + AI_x^o \\ V_4 &= DV_y^o - BI_y^o & I_4 &= CV_y^o + AI_y^o \\ 0 &= V_1 + V_2 - V_3 - V_4 & I_1 &= I_2 = I_3 = I_4 \end{aligned} \quad (5)$$

After solving (1) and (5):

$$[M] \times \begin{bmatrix} V_x^i \\ I_x^i \\ V_y^i \\ I_y^i \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$[M] \times \begin{bmatrix} C + Ce_x & Ae_x - A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C + Ce_y & Ae_y - A \\ Ce_x & Ae_x & C & -A \\ D - De_x & -B - Be_x & D - De_y & -B + Be_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where $e_x = e^{-j\beta x d}$ and $e_y = e^{-j\beta y d}$. The dispersion relation shows the behavior of MM as a function of frequency. This relation can be found by solving:

$$\det(M) = 0 \quad (8)$$

For simplicity, only axial propagation in the x-direction will be considered, so that there is no delay in the y-direction and β_y . After solving (8) and simplifying it, the dispersion relation is:

$$\beta d = \arccos(1 + 4BC) \quad (9)$$

3 | SIMULATION OF A UNIT CELL

The software CST Studio Suite® was used to simulate a unit cell, according to the theory developed in the previous section. A comparison between the dispersion relation generated by theory and simulation is made. The simulation also provides the material parameters that can be used in the development of the complete system.

The values of the host line elements, L_R and C_R , are dependent on the unit cell dimensions and material. The loading elements L_L and C_L can be freely selected. It is important to stick to the matching condition with free space that is achieved when $\epsilon_R = -1$ and $\mu_R = -1$, culminating in a negative refractive index $n = -1$ and a characteristic impedance $Z = 377\Omega$. The cell size must be small when compared to the wavelength used, in this case, approximately 11 times smaller.

The free space matching condition can be achieved by many L and C parameter combinations. These values were defined by iterative calculations. In Fig. 5 (a), the top view of the simulated unit cell can be seen. The substrate material is Rogers RO3003 with $\epsilon_R = 3$ and height $h = 1.54$ mm.

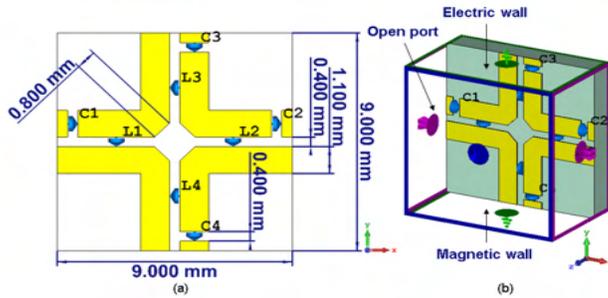


Fig. 5. (a) Top view of the simulated unit cell with main dimensions. (b) Boundaries conditions used in the simulation.

The host line elements were obtained for each block using the main dimensions and referring to [16], [17]. Furthermore, there is no ground below the substrate. Then we have $L_R = 2.73 \text{ nH}$ and $C_R = 0.16 \text{ pF}$, and the loading elements selected are $C_L = 0.6 \text{ pF}$ and L_L . To reduce reflection, the 90-degree bends were mitered.

To simulate the system is necessary to impose boundary conditions, as shown in Fig. 5 (b). These conditions are imposed to simulate the neighboring unit cells by keeping the behavior of the field as if the unit cell were in the full model. Through two waveguide ports, the unit cell of Fig. 5 was simulated with the propagating wave passing along the x-axis.

The dispersion relation was drawn and the S-Parameters were retrieved, as shown in Fig. 6, along with the dispersion relation calculated with (9). Considering the frequency range of the left-handed (LH) region, between 1.85 and 3.39 GHz, the difference between the calculated and simulated curves is 11.9%. The LH region shaded in gray is where backward waves and negative refractive index occur. The matching point with free space at 2.95 GHz is indicated by the intersection point with the light line.

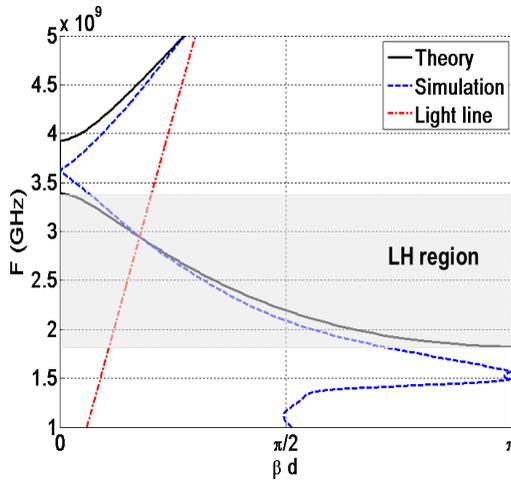


Fig. 6. Dispersion relation found by theory and by simulation.

Through the simulation, the unit cell parameters of permittivity ϵ , permeability μ , refractive index n and the impedance relative to the characteristic impedance of free space z were extracted, as shown in Fig. 7. The intersection point with the light line indicates the matching point frequency with free space at 2.95 GHz given by the dispersion relation of Fig. 6.

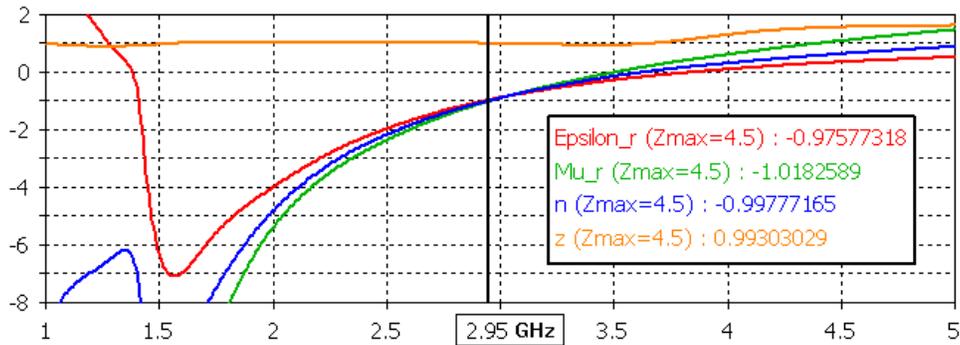


Fig. 7. Unit cell parameters extracted from simulation.

4 | CONCLUSION

In this work, a transmission-line (TL) network periodically loaded using inductors and capacitors was modeled by a metamaterial unit cell using circuit theory. The discrete capacitor and inductors enabled stronger loading than with fully printed ones. A unit cell size smaller than $\lambda_0/11$ allowed the use of effective medium theory in this model. The equation for the disper-

sion relation was validated by simulations and used to analyze the metamaterial behavior. The simulations confirmed the NRI and impedance matching to free space at the operating frequency of 2.95 GHz at the S-Band. A structure using the unit cells in the shape of a lens with fixed curvature that can focus electromagnetic waves is being developed. The lens will have a ladder-shaped surface since it is made with unit cells.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Brazilian institutions CAPES, CNPq, and FAPEMIG for their financial support.

REFERENCES

1. C. Caloz, C.-C. Chang, and T. Itoh, "Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 11, pp. 5483–5486, 2001.
2. Z. Jaksic, N. Dalarsson, and M. Maksimovic, "Negative refractive index metamaterials: Principles and applications," *Microw. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 36–49, 2006.
3. J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, p. 3966, 2000.
4. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000.
5. G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 12, pp. 2702–2712, 2002.
6. B. I. Halim and A. Boutejdar, "Design and Simulation of Microstrip Antenna Using Composite Right/Left Handed Transmission Line (CRLH-TL) Technique for LTE and Radar Applications," in 2019 IEEE International Electromagnetics and Antenna Conference (IEMANTENNA), 2019, pp. 040–045.
7. A. Alizadeh, B. Rejaei, and M. Fardmanesh, "Tunable Stopband HTS Josephson Junction Left-Handed Transmission Line with Independently Biasable Unit Cells," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–8, 2020.
8. A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Free-space imaging beyond the diffraction limit using a Veselago-Pendry transmission-line metamaterial superlens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 6, pp. 1720–1727, 2009.
9. A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Volumetric layered transmission-line metamaterial exhibiting a negative refractive index," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 3, pp. 553–570, 2006.
10. S. M. Rudolph and A. Grbic, "Volumetric negative-refractive-index medium exhibiting broadband negative permeability," *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 1, p. 13904, 2007.

11. S. Das, H.-L. Nguyen, G. N. Babu, and A. K. Iyer, "Free-Space Focusing at C-Band Using a Flat Fully Printed Multilayer Metamaterial Lens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 11, pp. 4702–4714, 2015.
12. C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications. The Engineering Approach*. Wiley, 2006.
13. C. Caloz and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission line," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 5, pp. 1159–1166, 2004.
14. F. Elek and G. V. Eleftheriades, "A two-dimensional uniplanar transmission-line metamaterial with a negative index of refraction," *New J. Phys.*, vol. 7, 2005.
15. J. J. Oliveira and R. M. S. Batalha, "Application of Metamaterials Based on Transmission Line Parameters in Wireless Power Transfer," in *22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields - Compumag 2019, 2019*, vol. 1, no. 22nd, pp. 1–2.
16. C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2008.
17. C. R. Paul, *Inductance: Loop and Partial*. Hoboken: Wiley, 2010.

RADIO PROPAGAÇÃO E MODELAGEM PARA UMA PONTE SOBRE O RIO TOCANTINS PARA LTE

Data de aceite: 01/10/2021

Data de submissão: 06/07/2021

Alaim de Jesus Leão Costa

Faculdade de Computação e Engenharia
Elétrica-UNIFESSPA
Marabá-PA, Brasil
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7004553241837188>

Thiago Eleuterio da Silva

Faculdade de Computação e Engenharia
Elétrica-UNIFESSPA
Marabá-PA, Brasil
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5022204715870652>

Diego Kasuo Nakata da Silva

Faculdade de Computação e Engenharia
Elétrica-UNIFESSPA
Marabá-PA, Brasil
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1479780657551515>

Leslye Estefania Castro Eras

Faculdade de Computação e Engenharia
Elétrica-UNIFESSPA
Marabá-PA, Brasil
Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0910041673709270>

RESUMO: Este artigo descreve um modelo de perda de propagação para o Sistema Long-Term Evolution (LTE), em uma ponte sobre o Rio Tocantins na Cidade de Marabá – PÁ. Os dados sobre a intensidade do sinal recebido foram obtidos em campanhas de medição sobre a Ponte. Um

sistema Neuro-Fuzzy é usado para desenvolver o modelo proposto. O cenário estudado foi em uma região com cidade e rio, ambiente bastante comum no Norte do Brasil e é pouco estudado. Um modelo adequado para a tecnologia LTE é de grande importância para o fornecimento de um serviço eficiente, especialmente em regiões que tem características únicas como no Norte do Brasil. Os resultados confirmam a aplicação do modelo proposto com erro RMS não superior a 2 dB.

PALAVRAS-CHAVE: Perda de propagação; LTE; Neuro-Fuzzy; Rádio Propagação sobre pontes.

RADIO PROPAGATION AND MODELING FOR A BRIDGE OVER THE TOCANTINS RIVER FOR LTE

ABSTRACT: This paper describes a model of propagation loss for the Long-Term Evolution (LTE) system on a bridge over the Tocantins River in the city of Marabá-PA. Data on the received signal strength is obtained in a measurement campaign. A Neuro-Fuzzy system is used to develop the proposed model. The studied scenario is a region with the city and river, a very common environment in northern Brazil and, a few studied. An appropriate propagation model for LTE technology is of great importance to providing an efficient service, especially in a region of unique climate and characteristics. The results confirm the applicability of the proposed model with RMS error no greater than 2 dB.

KEYWORDS: Propagation Loss; Long-Term Evolution (LTE); Neuro-Fuzzy, Radio Propagation Over Bridges, Recovery Effect.

1 | INTRODUÇÃO

Um modelo adequado de predição de propagação é essencial para a cobertura móvel em cidades localizadas no entorno dos rios amazônicos, no qual o deslocamento de pessoas, bens e serviços se dará por meio de pontes trafegáveis sobre regiões hidrográficas. A ponte de Marabá sobre o rio Tocantins tem a função de permitir o cruzamento do transporte ferroviário pela Estrada de Ferro Carajás e o cruzamento da BR-155, sendo responsável pela ligação de cidades do sudeste paraense, como Marabá, até a costa norte brasileira [1]. Logo, a mobilidade nesse trajeto se dará em ambiente misto de cidade e rio. Com isso, um modelo adequado de predição de propagação de dados móveis, nas estações bases, são cruciais no planejamento de rádio propagação para esse cenário [2].

O LTE é um dos sistemas de rádio frequência de celular mais importante baseado nos padrões desenvolvidos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). O sistema foi criado com a função de fornecer taxas de dados mais altas para aplicações de dispositivos móveis através da rede de rádio [3]. O LTE é também conhecido como a tecnologia de Acesso à Rádio Terrestre UMTS Evolved (E-UTRA), tendo como principal objetivo prover maior taxa de dados e escalabilidade na largura de banda [4].

Com o avanço da tecnologia, o aumento do número de usuários e novos serviços, faz-se necessário estudos de predição de propagação em redes sem fio. Tais estudos podem permitir o funcionamento adequado de sistemas de celular, sem a interferência entre as células que venham a utilizar as mesmas frequências em ambiente que envolva terrenos suburbanos e sobre rios. Com isso, as discussões sobre modelos de perda de propagação para várias faixas de frequências, tipos de trajetos, correções para perfis do terreno, alturas das antenas transmissora e receptora entre outros são frequentes para adequação de novas tecnologias de transmissão [5]-[8].

A seleção de um modelo de propagação de rádio adequado para a tecnologia LTE é de grande importância para os serviços de comunicação e de tráfego de dados nas regiões do norte do Brasil. No entanto, quando se trata de perda de propagação em ambientes de terra e rios, poucos modelos têm sido desenvolvidos como em [6] e [9-10]. Adicionalmente, encontram-se poucos estudos de propagação sobre pontes, como o descrito em [11].

Um modelo de propagação descreve o comportamento do sinal enquanto ele é transmitido e proporciona uma relação entre a distância transmitida pelo transmissor em direção ao receptor e a potência recebida. A partir dessa relação, pode-se projetar a perda de potência no trajeto caminho e o máximo intervalo entre as células de transmissão. A perda de propagação depende da condição do ambiente, frequência de operação e condições atmosférica [4]. Poucos trabalhos têm demonstrado que o uso de ANFIS (Redes Neuro Fuzzy) tem sido eficaz na predição da intensidade do sinal, nas faixas de UHF e VHF [12-13]. Nestes trabalhos foram mostraram ambientes outdoor, mas não incluía pontes sobre rio.

Este trabalho propõe um modelo de propagação em ambientes misto de cidade e rio

adequado para o sistema LTE. Os dados são coletados através de uma campanha de medição e organizados através de ferramentas computacionais. São apresentadas simulações de rede feita com o sistema *Neuro-Fuzzy* para predição da perda de percurso.

Este artigo está dividido em cinco seções. Na seção II está descrita a campanha de medição realizada na ponte de Marabá sobre o rio Tocantins. Na seção III é exposto o desenvolvimento do modelo de propagação utilizando rede Neuro-Fuzzy. Na seção IV são apresentados os resultados da campanha de medição e, na seção V, as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2 | CAMPANHA DE MEDIÇÃO

a. Cenário

A Campanha de Medição foi realizada na cidade de Marabá, a qual está situada na região do sudeste paraense, a 554 km da capital do Estado [1], dentro da Região Amazônica. A cidade possui um clima tropical úmido e se encontra as margens do rio Tocantins. As medições se concentram ao longo da ponte que passa sobre o rio Tocantins [14], sendo este um trajeto misto composto por estrada sobre a terra com 600 m de comprimento e a ponte sobre o rio de 1.75 km de comprimento, conforme mostrado na Fig. 1. O cenário de medição, onde vários pontos de recepção foram coletados sobre a ponte é apresentado na Fig. 2. Não foram considerados os pontos de recepção perto do transmissor, localizado na cidade, pois eles não fazem parte da ponte.



Figura 1 - Percurso da campanha de medições.

O cenário de medição, onde vários pontos de recepção foram coletados sobre a ponte é apresentado na Fig. 2, em que: D é a distância do receptor e o transmissor; r é a distância total horizontal e s é a distância sobre a terra.

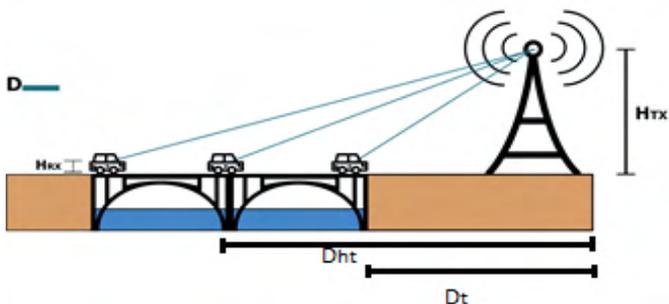


Figura 2 - Cenário de medições.

b. Equipamento e coleta de dados

A antena transmissora está localizada após a ponte sobre o rio Tocantins, com se observa na Fig.2. A altura da antena é de 40 metros, possui um ganho de 15.5 dBi, a potência de transmissão é de 40 dBm e a frequência de transmissão é de 783 MHz. Estes dados foram fornecidos pela operadora, sendo que o modelo da antena faz parte da confidencialidade de dados dela. Não entanto isto não influencia no desenvolvimento do modelo de propagação com redes neuro-fuzzy, devido a que os dados necessários para os cálculos foram os antes mencionados.

Na recepção foi utilizado um celular Huawei PLITE 9, o mesmo que possui uma antena interna omnidirecional, com ganho de 2 dBi, com polarização circular. Para comprovar a polarização foram feitas medidas com o celular na posição horizontal e vertical, e não foram observadas mudanças significativas. A unidade de recepção foi colocada dentro do veículo, sendo assim a altura do receptor é de 1.28 m em relação do nível do solo. A velocidade média do veículo de 40 km/h. O software G-Net Track Pro [15] foi instalado no receptor, para fazer a coleta dos níveis da potência de recepção e das coordenadas de latitude e longitude.

c. Tratamento dos Dados Medidos

Após a campanha de medição, os dados coletados foram organizados para calcular a distância entre o transmissor e o receptor e o cálculo de perda de percurso [16], considerando que foi medida a potência de recepção.

A distância horizontal, entre dois pontos, é calculada usando a fórmula de Haversine [17], na qual usa a latitude e longitude entre dois pontos em uma esfera, com raio R (neste caso o raio da terra em metros), latitudes Lat_{RX} e Lat_{TX} (respectivamente, receptor e transmissor), longitudes $Long_{RX}$ e $Long_{TX}$ (respectivamente, receptor e transmissor). Os ângulos são em radianos e a distância, $DIST_{HAVERSIN}$, entre dois pontos da esfera (neste caso o globo terrestre) é relacionada as suas localizações. A fórmula (1) demonstra a equação utilizada.

$$\begin{aligned}
 \text{Dist. Haversin} &= 6371000 \cdot \text{acos}(\cos(90 - \text{Lat}_{TX}) \\
 &\quad \cdot \cos(90 - \text{Lat}_{RX}) \\
 &\quad + \text{seno}(90 - \text{Lat}_{TX}) \\
 &\quad \cdot \text{seno}(90 - \text{Lat}_{RX}) \\
 &\quad \cdot \cos(\text{Long}_{RX} - \text{Long}_{TX}))
 \end{aligned} \tag{1}$$

Com a distância horizontal ($DIST_{\text{HAVERSIN}}$) entre a torre de transmissão e os pontos de coleta de dados obtidos, foi possível calcular a distância real entre a antena transmissora e a antena receptora através do teorema de Pitágoras, como mostrado na Fig. 3 a seguir.

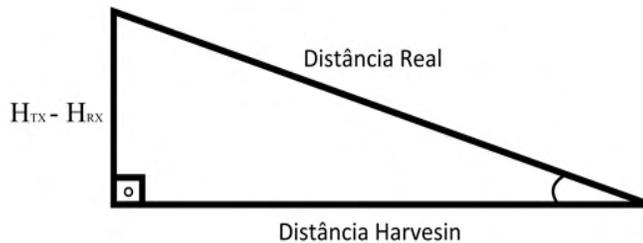


Fig. 3. Cálculo da distância real.

Para o cálculo da distância real ($DIST_{\text{HAVERSIN}}$), adaptou-se o teorema de Pitágoras, através da diferença entre a altura H_{TX} do transmissor, de 40 m, a altura H_{RX} do receptor, de 1.28 m e a distância de Haversive $DIST_{\text{HAVERSIN}}$, deixando o teorema da maneira representada abaixo na equação (2).

$$(H_{TX} - H_{RX})^2 + DIST_{\text{HAVERSIN}}^2 = DIST_{\text{REAL}}^2 \tag{2}$$

Foram coletados dados de 234 pontos. Os valores da distância real e a potência recebida são apresentados na Fig. 4.

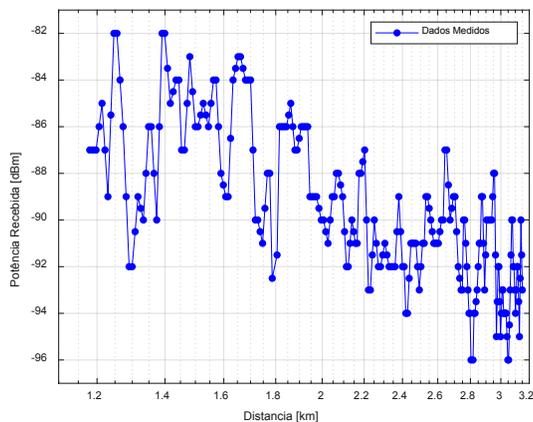


Fig.4. Gráfico da Distância e Potência Recebida, de todos os pontos coletados.

Pode-se observar o *Recovery Effect* [8], verificado em trajetos mistos, a partir da distância de 1.6 km até 1.7 km porque é observado um reforço do sinal, isto é, quando o sinal passa da estrada para a ponte sobre o rio. Em seguida, em 1.8 km, o sinal decresce devido à proximidade de um arco de metal sobre a ponte, mostrado na Fig. 5. A proximidade com o arco claramente causa somatório em contra fase do sinal. Por outro lado, quando o receptor está posicionado de 1.9 km até 2 km, o sinal apresenta um acréscimo, justamente na frente do arco de metal.



Fig. 5. Arco de ferro presente na ponte.

d. Redes Neuro Fuzzy

Um Sistema Neuro-Fuzzy (SNF) é um sistema híbrido e constituído pela junção de duas técnicas de modelagem: as Redes Neurais (RN) e a Lógica Fuzzy (LF). Essas técnicas combinadas tornam-se de grande interesse para aplicações principalmente na área de engenharia [7].

Neste trabalho foi usada a SNF é do tipo Sugeno, o método de treinamento híbrido, que combina *Least Squares* e *Back Propagation* com *Downward Gradient*. Outros dados importantes são o valor do raio de influência da base da função gaussiana que foi 1, o fator multiplicador 1,5, o raio de aceitação no agrupamento 0,75 e raio de rejeição 0,25.

Para o desenvolvimento do modelo de propagação utilizou-se um total de 234 amostras. Estas amostras são a potência recebida coletadas na campanha de medição, que posteriormente foram transformadas a perda de percurso. As amostras foram misturadas aleatoriamente e divididos em 3 grupos: 70 % para treino, 15 % para validação e 15 % para teste. Para a criação do modelo baseado em uma rede Neuro Fuzzy foi utilizado o software *Matlab*.

As entradas para a rede foram três: distância entre transmissor e receptor, perda de espaço livre [16] e a distância somente sobre a água. A saída da rede é a perda de percurso. Estes parâmetros são detalhados a seguir:

Entradas:

- **Distância entre transmissor e receptor:** Esta entrada permite que a rede possa diferenciar que é o cenário é um trajeto misto, devido que considera a distância total e posteriormente somente a distância sobre a água. Para calcular a distância entre transmissor e receptor, foi usada a equação (1).
- **Perda por espaço livre:** A maioria de modelos de propagação tem como base a perda pela distância sem considerar obstáculos. Isto porque as atenuações causadas pelo ambiente são adicionadas posteriormente, seja como fatores de correção ou variáveis de atenuação, que dependem do tipo de modelagem. Neste estudo a rede calculará os parâmetros adicionais de perda baseada nos dados medidos usados para o treinamento. Esta metodologia poderia ser comparada a modelos como Close in [18] ou Floating Intercept [19]. A perda de espaço livre é calculada como a seguinte fórmula.

$$L_p = 32.44 + 20 \log d(\text{km}) + 20 \log f(\text{MHz}) \quad (3)$$

onde:

- L_p : Perda de percurso no espaço livre;
- d : Distância entre transmissor e receptor em km;
- f : Frequência em MHz.

- **Distância somente sobre o rio:** No caso de modelos de propagação de trajetos mistos, estes consideram a distância somente sobre a água, como se verifica nos modelos clássicos como Okumura [20] e ITU-1546-5[21], assim como também na modelagem com técnicas de aprendizagem de máquina [22]. As distâncias usadas na equação (4) podem ser observadas na Fig. 2.

$$D_r = D_{ht} - D_t \quad (4)$$

onde:

- D_r : Distância sobre o rio ou distância somente sobre a água;
- D_{ht} : Distância horizontal total.
- D_t : Distância sobre a terra.

Saída:

- **Perda de percurso:** Usando as entradas antes mencionadas e o treinamento da rede, é possível obter a predição da perda de percurso para um trajeto misto que considera cidade e rio. Para calcular a saída foram feitas várias simulações com diferentes números de iterações. A rede que obteve melhores resultados precisou de 1000 iterações, isto porque o parâmetro de avaliação para selecionar a rede neuro-fuzzy, foi o erro médio quadrático (ERMSE), sendo selecionada a rede que obteve o menor valor de ERMSE.

3 | RESULTADOS

A precisão do modelo proposto é avaliada na comparação dos dados medidos no entorno da ponte e os dados preditos pela rede Neuro Fuzzy. É importante mencionar que os dados de teste são totalmente desconhecidos pela rede. Estes dados estão ilustrados na Fig.6, sendo que os vermelhos são dados da rede e os pontos da cor preta é o modelo proposto para a rede. Pode-se observar que há coerência entre os dados medidos e os dados preditos, mostrando que a técnica de Redes Neuro Fuzzy é satisfatória para a elaboração de modelos de propagação, no entanto, está limitado para o cenário no qual foi criado.

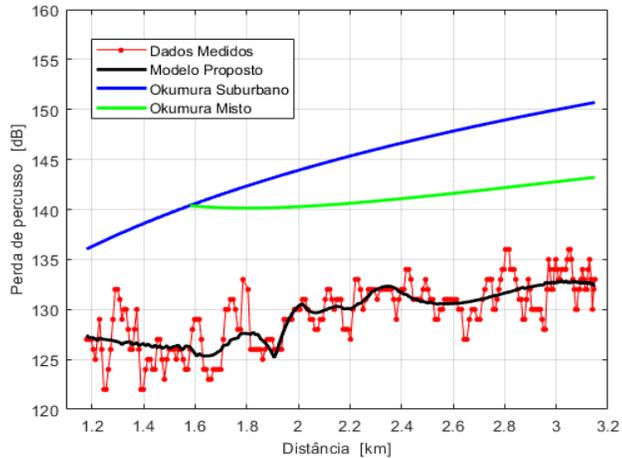


Figura 6 - Gráfico dos dados medidos, modelo proposto, modelo Okumura-Hata Suburbano e modelo Okumura-Hata para trajeto misto.

O modelo Okumura-Hata é originalmente usado em ambientes urbanos, mas pode ser adaptado para cenários suburbanos. As equações (4) e (6) mostram os cálculos de perda de percurso utilizados para o modelo Okumura-Hata para ambientes urbanos e suburbanos, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 L_{urb} = & 69.55 + 26.16 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(H_{TX}) \\
 & - (1.1 \cdot \log(f) - 0.7) \cdot H_{RX} - 1.56 \cdot \log(f) - 0.8 \\
 & + (44.9 - 6.55 \cdot \log(H_{TX})) \cdot \log(d)^b
 \end{aligned} \tag{5}$$

onde:

$$b = 1 \text{ para } d < 20 \text{ km} \tag{6}$$

$$L_{subrb} = L_{urb} - 2 \cdot \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 + 5.4 + PCO \tag{7}$$

onde:

$$PCO: \text{Correção da ERP, porque o modelo é feito para 1 Kw de ERP} \tag{8}$$

O erro RMS obtido é de 2 dB entre os dados medidos e os dados preditos pelo modelo proposto, o que indica que o modelo apresenta um bom desempenho para uma ponte sobre o rio. Outros trabalhos apresentaram erros de 3 a 3.7 dB para trajetos sobre pontes como detalha em [11], embora esta ponte não foi sobre o rio, porém permite reforçar a ideia de que o modelo de propagação proposto é válido e fiável para o cenário no qual foi desenvolvido.

Adicionalmente, na Fig. 6 é mostrado que a partir da distância de 1.5 km até 1.7 km,

os dados medidos mostram o *Recovery Effect*, que se produz ao passar da estrada para a ponte. Tal efeito é acompanhado pelo modelo proposto. Uma segunda característica do sinal que é acompanhada pelo modelo é diminuição da perda em 1.9 km na frente do arco de metal sobre a ponte que se observa na Fig. 4. A partir da distância de 2 km o sinal diminui com a distância.

Na fig. 6 são apresentados os resultados entre o modelo de Okumura misto, suburbano e o modelo proposto em cenário de cidade e rio. O modelo proposto se apresenta como uma importante alternativa para ambientes de cidade e rio, pois tem a menor perda de percurso se comparado aos demais modelos presentes na figura conforme é mostrado na Tabela I.

Modelo	Erro RMS
Okumura-Hata Suburbano	16.95
Okumura-Hata Misto	13.14
Modelo Proposto	1.98

TABELA I – Erro RMS dos Modelos

4 | CONCLUSÃO

Para avaliação dos resultados obtidos no método de predição de perda de propagação sobre a ponte de Marabá no Rio Tocantins, a métrica utilizada para avaliar o modelo de propagação foi o erro médio quadrático. Dessa forma, o modelo proposto conseguiu predefinir a perda de percurso com um erro de RMSE 1.98 dB.

Os resultados da predição de perda de percurso no trajeto misto estrada sobre terra e ponte sobre o rio, foram obtidos através do processamento dos dados no sistema *Neuro-Fuzzy*. Com isso, os resultados foram consistentes para um sistema de comunicação móvel no cenário tipicamente amazônico, pois conseguiram acompanhar os dados medidos com menor perda de percurso e dessa forma, torna-se essencial para atender de forma satisfatório o sistema (LongTerm Evolution) LTE em ambientes não homogêneos.

Adicionalmente, como forma de otimização do sistema de comunicação, faz-se necessário novas propostas de medição para o aprimoramento de estudos de perda de propagação para adequação de novas tecnologias, como a LTE-Advanced e o 5G. Adicionalmente, para trabalhos futuros serão consideradas as características do rio Tocantins, visto que o mesmo tem uma variação de nível do rio de até 10 m.

REFERÊNCIAS

1. F. Schnaider, T. Schnaider, “**Ponte mista de Marabá**”, Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/tsomineiro/5873829601/>>. Acessado em março de 2020.
2. S.Nkordeh, “**LTE Network Planning using the Hata-Okumura and the COST-231 Hata Pathloss Models**” World Congress on Engineering, London, 2014.
3. M. Suneetha, S. Behara, K. Suresh, “**Comparison of standard propagation model (SPM) and Stanford University Interim (SUI) Radio propagation models for long term evolution (LTE)**”, Department of ECE, Chaitanya Engineering College Visakhapatnam, A.P. INDIA. ISSN: 2278-7844, INDIA 2012.
4. N. Shabbir, M. Sadiq, H. Kashif, R. Ullah, “**Comparison of radio propagation models for long term evolution (lte) network**”, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.3, September 2011.
5. P. Muñoz, O. Sallent, P. Romero, “**Self-Dimensioning and Planning of Small Cell Capacity in Multitenant 5G Networks**,” in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 5, pp. 4552-4564, May 2018.
6. Y. Junyi, W. Chen, B. Zhang, J. Zhang, “**4G TD-LTE Radio coverage model optimization design under complex inland river environment**”, The 3rd International Conference on Transportation Information and Safety, 2015, Wuhan, China.
7. R. Jang, “**Anfis: Adaptive-network based fuzzy inference system**”, IEEE Trans.on systems, man, and cybernetics, 23 (03):665-685, may, 1993.
8. L. Carter, T.Maclean, “**Recovery effect in cellular radio systems**”, IEEE, 1990.
9. Eras, L. E. C., da Silva, D. K., Barros, F. B., Correia, L. M., & Cavalcante, G. P. S. (2018). **A Radio Propagation Model for Mixed Paths in Amazon Environments for the UHF Band. Wireless Communications and Mobile Computing**, 2018.
10. da Silva, D. K. N., Eras, L. E. C., Moreira, A. A., Correia, L. M., Barros, F. J. B., & dos Santos Cavalcante, G. P. (2018). **A Propagation Model for Mixed Paths Using Dyadic Green’s Functions: A Case Study Over the River for a City–River–Forest Path**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17(12), 2364-2368.
11. Guan. K, Zhong. Z, Ai. B, Kürner. T, “**Propagation measurements and modeling of crossing bridges on high-speed railway at 930 MHz**”, IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 63, no. 2, February 2014.
12. Faruk, N., Popoola, S. I., Surajudeen-Bakinde, N. T., Oloyede, A. A., Abdulkarim, A., Olawoyin, L. A., ... & Atayero, A. A. (2019). Path Loss Predictions in the VHF and UHF Bands within Urban Environments: Experimental Investigation of Empirical, Heuristics and Geospatial Models. IEEE Access, 7, 77293-77307.
13. Cruz, H. A. O., Nascimento, R. N. A., Araujo, J. P. L., Pelaez, E. G., & Cavalcante, G. P. S. (2017, August). **Methodologies for path loss prediction in LTE-1.8 GHz networks using neuro-fuzzy and ANN**. In 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics

Conference (IMOC) (pp. 1-5). IEEE.

14. Agência Nacional de Água, Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/tocantins/saiba-mais-tocantins>>, Acessado em março de 2020.

15. Gyolov Solutions. G-Net Track Manual <<https://www.gyokovsolutions.com/G-NetTrack%20Android.html>>Acessado em março de 2020.

16. T. William, K. Shanmuan, S. Rappaport, K. Kurt, **Principles of communication systems simulation with wireless applications**, s. 16, Upper Saddle River, 2004.

17. H. Charles, Versines and haversines in nautical astronomy, Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S0373463300029337>>, Acessado em maio de 2020.

18. F. Anderson, S. J. Arismar, "**Caracterização da Perda de Percurso Indoor De Redes 5g Em Ondas Milimétricas**" XXXV Simpósio Brasileiro De Telecomunicações E Processamento De Sinais – Sbrt2017, 3-6 De Setembro De 2017, São Pedro, SP.

19. S. Sun et al., "**Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications**," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 5, pp. 1-18, May 2016.

20. Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, "**Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service**," Rev. Elec. Commun. Lab, 1968, 16(9): 825-73.

21. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. RECOMMENDATION ITU-R P.1546-5.

22. A. D. S. Braga et al.: "**Radio Propagation Models Based on Machine Learning Using Geometric Parameters for a Mixed City-River Path**" IEEE ACESS publication July 29, 2020.

CAPÍTULO 12

TESTES DE IMUNIDADE CONTRA SURTOS ELÉTRICOS EM ELETRODOMÉSTICOS

Data de aceite: 01/10/2021

Gustavo Oliveira Cavalcanti

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Marcílio André Félix Feitosa

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Kayro Félyx Henrique Pereira

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Manoel Henrique da Nóbrega Marinho

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Antonio Samuel Neto

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Lucas de Carvalho Sobral

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Pollyana Maria Ramos Gonçalves

Escola Politécnica
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil

Douglas Thiago Moreira Lara

Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
CLAMPER Indústria e Comércio S.A
Lagoa Santa, Brasil

Thiago Francisco Gomes

Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
CLAMPER Indústria e Comércio S.A
Lagoa Santa, Brasil

Renato Jardim Teixeira

Wagner Almeida Barbosa

Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
CLAMPER Indústria e Comércio S.A
Lagoa Santa, Brasil

RESUMO - O presente trabalho descreve um conjunto de testes de compatibilidade eletromagnética, realizados para avaliar a imunidade a surtos elétricos de alta tensão em dois tipos de eletrodomésticos: televisor e refrigerador. Os testes foram realizados em condições específicas definidas pelo padrão internacional IEC 61000-4-5 de 2015. Os resultados mostraram que o televisor suporta maiores níveis de tensão e número de surtos que o refrigerador, entretanto, considerando que os surtos elétricos induzidos por descargas atmosféricas podem atingir níveis da ordem de 8kV o uso de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) é indicado. Os resultados mostram ainda que a utilização do DPS pode ser imprescindível para manter a vida útil do equipamento em regiões com grande incidência de descargas atmosféricas.

PALAVRAS-CHAVE - Surtos elétricos, proteção contra surtos, refrigerador, televisor e vida útil.

ELECTRICAL SURGE IMMUNITY TESTS IN HOME APPLIANCES

ABSTRACT - This paper describes a set of electromagnetic compatibility tests, carried out to evaluate immunity to high voltage electrical surges, in two types of home appliances: television and refrigerator. Tests were performed under specific conditions defined by the international standard IEC 61000-4-5 of 2015. The results showed that the TVs supports higher voltage levels and more surges than the refrigerator. However, considering that electrical surges induced by lightning discharges can be as high as 8kV, the use of surge protection devices (SPDs) is indicated. Results also shows that the use of SPDs can be essential to maximize useful life of equipment in regions with high incidence of atmospheric discharges.

KEYWORDS - Surges, lightning protection, refrigerators, television and useful life.

1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico propiciou o aumento do número de eletrodomésticos nas residências, sendo os mais comuns o fogão, a geladeira e a televisão que estão em quase todos os lares brasileiros - 98,8%, 97,6% e 97,1%, respectivamente [1]. Segundo a Norma Internacional IEC 62305-2 de 2006 [2], os surtos na rede elétrica ocorrem quando a carga elétrica é elevada em algum ponto da rede. O surto pode aumentar a corrente que flui na instalação e danificar equipamentos elétricos ligados à rede. Diversos eventos podem produzir um surto, sendo a descarga atmosférica um dos principais [3].

A utilização de DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos) nas instalações elétricas propicia vários benefícios aos equipamentos a eles conectados, não só na infraestrutura industrial e comercial, mas também no ambiente residencial, na proteção de eletrodomésticos [4]. A proteção oferecida pelos DPSs pode prevenir não só a inutilização definitiva e instantânea de um equipamento na ocorrência de surtos de alta intensidade, quanto prolongar sua vida útil nos casos de surtos de menor intensidade, porém, com maior frequência de incidência, que degradam os componentes gradativamente, causando perda de eficiência do equipamento até sua completa inutilização.

Segundo a NBR-5410 [5] toda linha externa de sinal deve ser provida de proteção contra sobretensões transitórias, seja a instalação de telefone, de comunicação de dados, de vídeo ou qualquer outro sinal eletrônico. O impacto que a utilização do DPS gera na manutenção da vida útil dos equipamentos é uma informação importante para determinar a sua eficiência e, sobretudo, justificar o custo da sua aplicação nas instalações elétricas dos vários tipos de infraestrutura. Dessa forma, o presente trabalho apresenta testes de compatibilidade eletromagnética que mostram como o DPS pode ser empregado na manutenção da vida útil de televisores e refrigeradores.

2 | APARATO EXPERIMENTAL

Nos sistemas de distribuição de baixa tensão as descargas atmosféricas podem causar danos aos dispositivos elétricos, porém, apenas 10% desses danos são causados por descargas diretas. Os 90% restantes são provocados por tesões induzidas [6]. Segundo Silva [7], uma descarga atmosférica no primário de um transformador de distribuição (13.8kV – 220/127 V, 30kVA) gera uma tensão induzida no secundário que pode chegar a 8kV. Além disso, raios adjacentes podem induzir, por acoplamento, tensões transitórias na linha, as quais serão transferidas para os dispositivos que estiverem conectados a esta linha [8 – 9]. O DPS é utilizado para limitar a tensão transitória que atingiria os equipamentos a um nível mais baixo, atuando em um tempo muito curto e protegendo os equipamentos conectados ao circuito [10].

No Brasil os equipamentos eletrodomésticos são normatizados pela NBR 5410 [5]. Essa norma estabelece uma tensão impulsiva mínima de 1,5 kV que os eletrodomésticos devem ser capazes de suportar sem apresentar falhas. Porém, segundo o Institute of Electrical and Electronic Engineers – Surge Protective Committee (IEEE - SPDC), a tensão na entrada de uma edificação fica limitada em 6 kV [11], que é superior à proteção exigida pela NBR 5410 e pode levar a uma falha nos eletrodomésticos. Nesse contexto, o presente trabalho descreve a realização de testes de compatibilidade eletromagnética regidos pela Norma IEC 61000-4-5 de 2015 [12] em um modelo de televisor e um de refrigerador. Segundo esta norma, os testes devem ser realizados sob a configuração apresentada na Figura 1.

O gerador de onda combinada produz os surtos elétricos padronizados que são injetados nos conectores Neutro e Fase de uma rede elétrica de testes com o auxílio da rede de acoplamento, conforme ilustrado na Figura1. O gerador utiliza um aterramento exclusivo, através do qual ele descarrega o surto que retorna do circuito de teste. A rede de desacoplamento, ilustrada na Figura 1, é utilizada para evitar que o surto injetado passe para as instalações elétricas locais e provoque danos em outros equipamentos que não fazem parte do teste.

Uma tomada de 10 A é utilizada na saída da rede de acoplamento para que o equipamento sob teste esteja em condições reais de uso. A seguir descreve-se o gerador de onda combinada, a rede de acoplamento e desacoplamento utilizados nos experimentos bem como uma estimativa do impacto do uso do DPS na vida útil dos equipamentos.

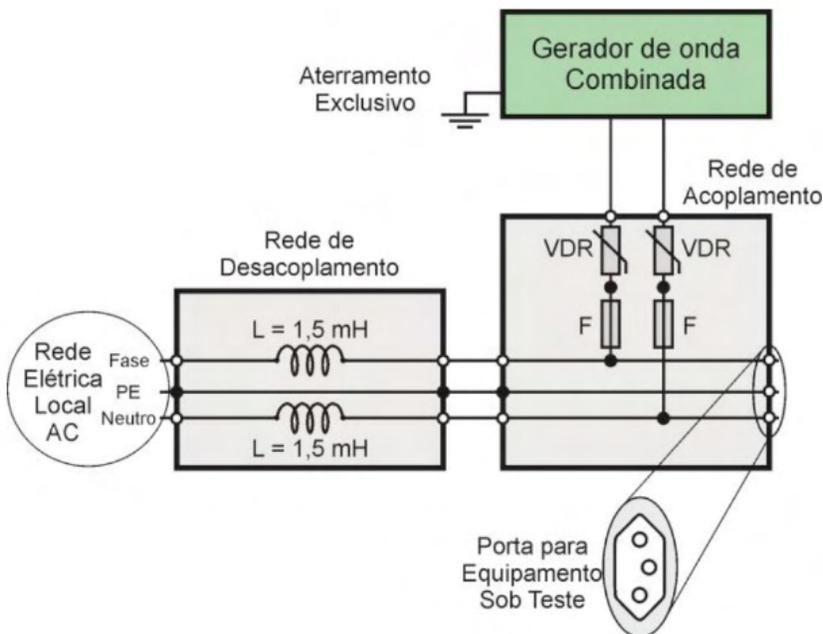


Fig 1 - Configuração das conexões do equipamento sobre teste para os testes de compatibilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

a. Gerador de Onda Combinada

O gerador de onda combinada produz surtos elétricos com forma de onda padronizada pela IEC 61000-4-5 [12] e parâmetros específicos como tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. A Figura 2 apresenta a forma de onda da tensão normalizada, na saída do gerador, quando em circuito aberto, atendendo às exigências da IEC 61000-4-5. Essa tensão de saída foi aplicada às cargas durante os experimentos. Dois tipos de geradores de ondas combinadas são especificados em função do tempo de subida (T_s) e tempo de duração (T_d), ilustrados na Figura 2. Para a onda de tensão esses geradores são definidos por: $10/700 \mu\text{s}$ ($T_s = 10 \mu\text{s}$ e $T_d = 700 \mu\text{s}$) e $1,2/50 \mu\text{s}$. Cada um tem suas aplicações específicas dependendo do tipo de porta a ser testada.

O gerador de ondas combinadas de $10/700 \mu\text{s}$ é usado para testar portas de comunicação simétricas que se destinam a ser diretamente conectadas a redes de telecomunicações externas. O gerador de ondas combinadas de $1,2 / 50 \mu\text{s}$ é usado em todos os outros casos e é exatamente o gerador aplicado para testar os eletrodomésticos neste trabalho. Esse gerador tem uma resistência interna de 2Ω e os parâmetros das formas de onda na saída (de tensão em circuito aberto exibida na Figura 2 e da corrente em curto-circuito, que pode ser encontrada na norma) estão apresentados na Tabela 1.

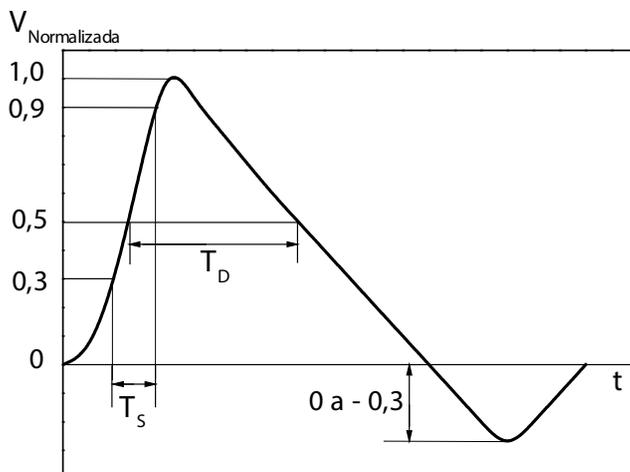


Fig. 2. Forma de onda da tensão normalizada aplicada aos equipamentos.

Fonte: Adaptada da Norma IEC 61000-4-5 [12].

	Tempo de Subida (TS) μs	Tempo de Duração (TD) μs
Tensão em Circuito Aberto	TS = $1,2 \pm 30\%$	TD = $50 \pm 20\%$
Corrente de Curto Circuito	TS = $8 \pm 20\%$	TD = $20 \pm 20\%$

TABELA I. Parâmetros da forma de Onda do Gerador 1,2/50 [12].

b. Rede de Acoplamento

A rede de acoplamento é responsável por permitir a inserção do surto de tensão proveniente do gerador na rede elétrica do equipamento sob teste, conforme ilustrado na Figura 1, e impedir que a tensão da rede local entre no gerador. O circuito da rede de acoplamento é um varistor, que permite a passagem do surto de alta tensão e impede a passagem da tensão da rede local para o gerador, em série com um fusível térmico, que em caso de falha do varistor desconecta o gerador da rede de testes. A saída da caixa de acoplamento é uma tomada de 10A padrão, na qual os equipamentos sob teste são conectados e recebem a alimentação para operação junto com o surto elétrico na tensão de testes definida no gerador.

c. Rede de Desacoplamento

A rede de desacoplamento permite a conexão do equipamento sob teste à rede elétrica local, que no laboratório é de $220V_{AC}$ - 60Hz, e impede a passagem do surto injetado no circuito pelo gerador para a rede local. A rede de desacoplamento é formada por duas bobinas de indutância 1,5 mH, como definido pela norma IEC 61000-4-5 [12]. As bobinas foram colocadas dentro de uma caixa de proteção conforme ilustrado na Figura 3.

Um transformador de corrente foi instalado no condutor fase para medição da corrente e confirmação de que o surto elétrico injetado pelo gerador não atinge a rede elétrica local.

3 | RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

O aparato experimental apresentado na Figura 1 foi montado no Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco IIT/UPE e um televisor e uma geladeira foram submetidos a surtos elétricos de alta tensão para avaliar a necessidade de utilização do DPS para proteção desses equipamentos. Também foram utilizados nos experimentos DPSs Classe III [13], aplicados em série à entrada de potência do equipamento sob teste.

Os ensaios foram realizados sob duas hipóteses de resultados: quantidade de surtos/pulsos até ocorrer a falha do equipamento ou não falhar. Ocorrendo a falha, a quantidade total de pulsos aplicados até então é registrada e, quando o aparelho não falhou, foi registrado 700 que é o número máximo de surtos ao qual cada equipamento poderia ser submetido. O tempo entre surtos aplicados pelo gerador é de 30 segundos e, para que o teste em um único equipamento fosse realizado em um dia, definiu-se que o número máximo de surtos seria de 700, que corresponde a aproximadamente 6 horas. As marcas e modelos dos equipamentos não serão mencionados, mas são equipamentos amplamente comercializados no Brasil.

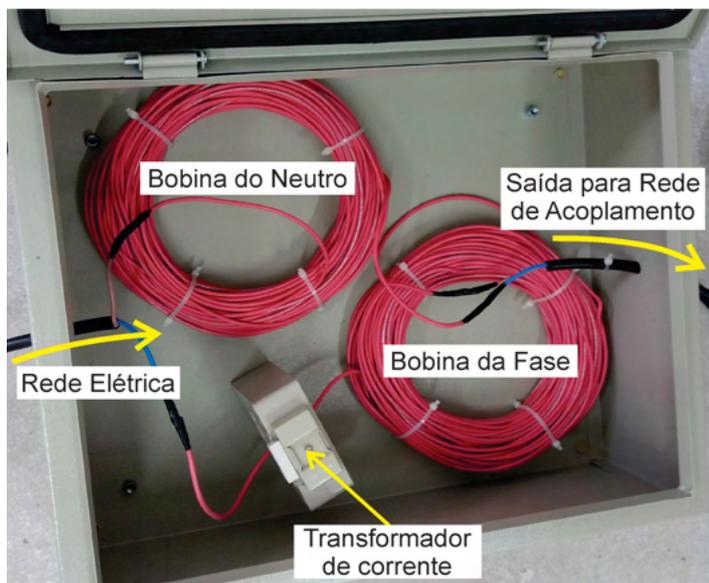


Fig. 3. Fotografia do circuito da rede de desacoplamento.

Fonte: Fotografia do autor.

a. Experimentos com Televisor

Um televisor com fonte de alimentação externa foi adquirido e submetido a surtos

elétricos de até 6kV. A Tabela II apresenta os resultados dos testes com esse equipamento. Observa-se que o televisor não apresentou falhas, mesmo sem a utilização dos DPSs Classe III na sua proteção, para surtos de até 6kV. Esse resultado mostra que para surtos até esse nível de tensão o televisor escolhido não precisa da proteção de um DPS.

Televisor sem DPS		
4 kV	5 kV	6 kV
700 (S)	700 (S)	700 (S)

S = Não ocorreu Falha no Equipamento.

TABELA II. Dados Experimentais com o Televisor

Entretanto, os surtos induzidos no secundário de um transformador podem chegar a 8kV [7], o que não foi testado pois o gerador disponível não atingia esse nível de tensão.

Os resultados motivaram a abertura da fonte de alimentação do televisor para constatar se o equipamento possui proteção interna específica. A Figura 4 apresenta uma fotografia da fonte de alimentação do televisor, na qual destaca-se o varistor responsável pela proteção desse dispositivo. Assim, ficou constatado que o circuito interno de proteção do modelo de televisor escolhido possui proteção eficiente contra os níveis e quantidade de surtos aplicados neste trabalho. Vale salientar que apesar do modelo possuir proteção interna o uso do DPS seria recomendado, uma vez que evitaria que o televisor recebesse os surtos diretamente e garantiria um tempo de vida ainda maior para o equipamento.

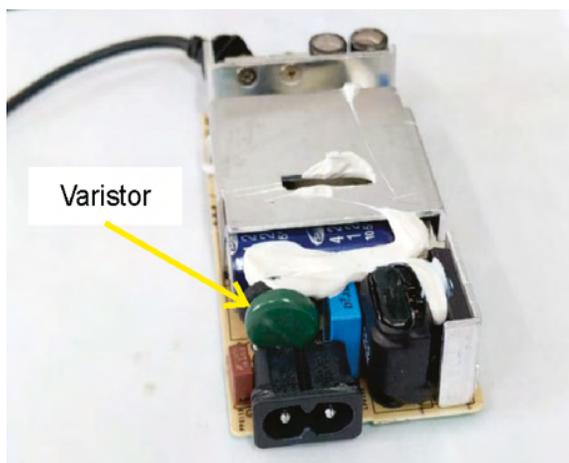


Fig. 4. Fotografia da fonte de alimentação do televisor utilizado nos testes.

Fonte: Fotografia do autor.

b. Experimentos com Refrigerador

Foram realizados dezoito (18) experimentos com um refrigerador comercial sendo nove com o refrigerador conectado diretamente ao circuito gerador de surtos e nove com o equipamento protegido por um DPS comercializado no Brasil. Por se tratar de um equipamento de custo elevado os experimentos foram realizados com um único refrigerador e as falhas apresentadas eram corrigidas pela equipe da UPE antes da próxima sequência de testes. A falha mais comumente apresentada foi a queima de um capacitor na placa de potência, apresentada na Figura 5. Essa placa foi substituída por uma nova em todos os testes. Realizava-se uma bateria de testes até a falha do refrigerador e, na sequência, as peças que apresentavam falha eram substituídas e o equipamento ficava em observação. Após comprovação de que o equipamento funcionava corretamente uma nova bateria de testes era realizada. Os resultados são apresentados na Tabela III.

Refrigerador sem DPS			
Teste	3 kV	4 kV	5 kV
1°	700 (S)	114 (FE)	1 (FE)
2°	700 (S)	225 (FE)	1 (FE)
3°	700 (S)	700 (S)	1 (FE)
Refrigerador com DPS			
Teste	5 kV	6 kV	7 kV
1°	700 (S)	160 (FD)	74 (FD)
2°	700 (S)	104 (FD)	55 (FD)
3°	700 (S)	256 (FD)	53 (FD)

FE = Ocorreu Falha no Equipamento / FD = Ocorreu Falha no DPS / S = Não ocorreu Falha no Equipamento nem no DPS.

TABELA III. Dados Experimentais com o Refrigerador.

Os resultados experimentais apresentados na Tabela III mostram a importância do uso do DPS no modelo de refrigerador escolhido, uma vez que um único surto de 5kV produz falha no equipamento. Com a proteção do DPS o conjunto suportou em média 60 surtos de 7kV. Vale salientar, que a falha apresentada foi apenas no DPS, ou seja, a placa de potência e todas as funcionalidades do refrigerador foram mantidos mesmo após o DPS apresentar falha com surtos de 7kV. Esses resultados mostram que o uso do DPS pode garantir que o equipamento não apresente falha precoce em decorrência de surtos elétricos de alta tensão.



Fig. 5. Fotografia do componente que falhou na placa de potência do refrigerador após surto elétrico.
Fonte: Fotografia do autor.

c. Análise sobre a Vida Útil dos Equipamentos

O estado brasileiro com a maior densidade de raios em 2019 foi Tocantins, com 19,8 raios por km² por ano [14]. Com os experimentos realizados foram determinados o número de surtos que cada equipamento pode suportar. Dessa forma, determinando o número de surtos que pode atingir uma residência, obtém-se o tempo de vida do equipamento considerando que a única falha possível seja devido a surtos provocados por descargas atmosféricas.

Um surto elétrico pode atingir um equipamento em uso na residência quando uma descarga atmosférica incide: a) na estrutura ou em uma área próxima à estrutura num raio de 500 m [15]; b) na linha externa de alimentação ou em uma área próxima a ela. A área considerada como próxima à linha consiste num comprimento de 1km de linha e distante até 2 km da linha (para um lado ou para o outro) [15], conforme ilustrado na Figura 6. Desconsiderando a sobreposição entre as duas áreas, a área total de influência de uma descarga na edificação é de 4,39 km². Assim, no estado de Tocantins, uma residência estaria sujeita a aproximadamente 87 raios por ano. Diante do exposto, os resultados com o refrigerador mostram que o equipamento poderia apresentar falha logo no início de uso sem a proteção do DPS uma vez que ele falhou com apenas um surto de 5kV. Com o DPS o conjunto suportou os 700 surtos (podendo suportar mais já que 700 foi o limite de pulsos aplicados no teste), considerando 85 surtos por ano isso corresponde a aproximadamente 8 anos.

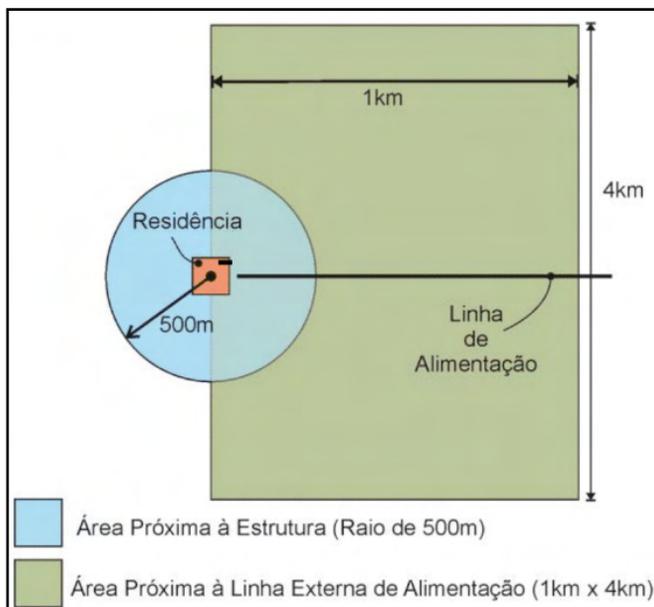


Fig 6 - Área de influência de uma descarga atmosférica na edificação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 | CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra como os testes de compatibilidade eletromagnética, em especial os de imunidade contra surtos elétricos de alta tensão possuem relevância na determinação da qualidade dos produtos produzidos no país e na comprovação da necessidade do uso de DPSs para proteção de equipamentos instalados nas regiões de incidência de descargas atmosféricas. Os resultados experimentais comprovam a necessidade de utilização do DPS nessas regiões e mostram que seu uso pode evitar a falha em um equipamento como um refrigerador logo no início de sua vida útil. Vale salientar que nos testes realizados nenhum equipamento apresentou falha quando utilizado em conjunto com o DPS. A análise sobre a vida útil do equipamento, apresentada neste trabalho, mostra um resultado importante no tocante ao cálculo do número de surtos que podem ser produzidos pela ocorrência de descargas atmosféricas. Esse resultado é relevante para o aprimoramento de circuitos de proteção das edificações, dos eletrodomésticos e dos DPSs.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CLAMPER Indústria e Comércio S.A pelo suporte técnico e financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. AMORIM, D.; Pennafort, R. e Neder V. “Máquina de lavar é objeto de desejo das famílias brasileiras, diz IBGE”. 2015, Disponível em: <https://goo.gl/6mgUXp>, Acesso em:17 de janeiro de 2018.
2. IEC – Internacional Electrotechnical Commission – IEC 62305-2 - Protection against lightning - Part 2: Risk management. Genebra, 2006.171.p.
3. KIDERMANN, G. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. São Paulo: ABDR Editora, 1997.132.p.
4. J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, R. K. Moreira, W. A. Barbosa, M. A. F. Lobo, A. R. Lobo, “Proteção de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos contra Surtos Elétricos em Instalações”, 1. Ed. Lagoa Santa – MG, Editora Clamper, 2016.
5. ABNT, NBR 5410, “Instalações Elétricas de Baixa Tensão”, versão corrigida, Março 2008.
6. Y. Zhang, S. Chen, X. Yan, W. Lv and C. Chen, “Observation and analysis of residual voltage of SPD connecting to overhead line,” 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Taipei, 2015, pp. 360-363.
7. Silva Neto, A. ; Piantini, A. “Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes Secundárias.” In: VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VII SBQEE), 2007, Santos. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VII SBQEE), 2007. v. único. p. 1-6.
8. F. J. Mo, J. J. Ruan and Y. P. Chen, “Surge Suppression and Electromagnetic Compatibility”, Power System Technology, Vol.28, No.5, pp:69-72, Mar.2004.
9. Y.Yang, R. Cheng, J. Shen, et al. “Method for online outdoor electrical equipment lightning warning based on grey relation analysis.” Electric Power, 45: 20-23, 2012.
10. V. Milardić, I. Uglesic and I. Pavić, “Selection of Surge Protective Devices for Low-Voltage Systems Connected to Overhead Line,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1530-1537, July 2010.
11. IEEE Std. C62.41 (IEEE 587) – “Recommended Practice on Characterization of Surge in Low-Voltage (1000V and less) AC Power Circuit”, PES SPDC, New York, 2002.
12. Norma IEC 61000-4-5:2015, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test”, Edition 3.0, 2014.
13. Norma IEC 61643-11:2011, “Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods”, 2011.
14. Folha de S.Paulo, Tocantins é Estado campeão em raios; em SP, São Caetano lidera ranking. Disponível em: <encurtador.com.br/ghpBQ> Acesso em 02 de maio de 2019.
15. ABNT, NBR 5419-2, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco”, Junho 2015.

CAPÍTULO 13

AUTOMAÇÃO DA ILUMINAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES - O SISTEMA DE CONTROLE DE ILUMINAÇÃO DALI: UM ESTUDO DE CASO

Data de aceite: 01/10/2021

Data da submissão: 06/09/2021

Marcos Noboru Kurata

Filiação: Teruyoshi Kurata / Quirina Kurata
IFSP Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo
São Paulo / SP
<http://lattes.cnpq.br/8712640364092545>

Ênio Carlos Segatto

Filiação: Ennio Mauro Segatto / Zuleika
Ambrozio Segatto
IFSP Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo – Campus São Paulo
São Paulo/ SP
<http://lattes.cnpq.br/9792994865902593>

RESUMO: Alguns sistemas de iluminação existentes nas edificações são arcaicos e consomem muita eletricidade quando comparados às novas tecnologias. Este artigo relata ensaios realizados com o sistema Dali - Digital Addressable Lighting Interface e lâmpadas fluorescentes tubulares de alta eficiência para determinar a economia de energia gerada em relação à iluminação tradicional e avaliar a viabilidade econômica da solução.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, controle da iluminação, sistema DALI, automação de iluminação

LIGHTING AUTOMATION AND ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS - THE DALI

LIGHTING CONTROL SYSTEM: A CASE STUDY

ABSTRACT: Some existing lighting systems in buildings are archaic and consume a lot of electricity when compared to new technologies. This article reports tests carried out with the Dali - Digital Addressable Lighting Interface system and tubular fluorescent lamps to determine the energy savings generated in relation to traditional lighting and to assess the economic viability of the solution.

KEYWORDS: Energy efficiency, lighting control, DALI system, lighting automation.

1 | INTRODUÇÃO

Com o advento da revolução industrial e a produção de grandes volumes de bens através da construção de fábricas, onde os meios de produção eram aglutinados com as pessoas que iriam operá-los para depois embalá-los e distribuí-los, não houve uma preocupação com a degradação que ocorria no meio ambiente. Acreditava-se que a disponibilidade de recursos era infinita e que os rejeitos dos processos poderiam ser descartados sem problemas.

As alternativas que surgiram para solucionar essa questão foram evoluindo ao passo em que o consumo e o crescimento urbano foram aumentando de forma exponencial. Processos de descarte e reciclagem, uso racional de materiais, novos produtos sintéticos que substituem matérias-primas de recursos naturais,

entre outros avanços, marcaram o fim do século XX e a entrada deste novo século. Entretanto, o foco das grandes organizações e potências econômicas está voltado para um problema: “como continuar atendendo à demanda por energias, sobretudo elétrica, considerando o acelerado crescimento populacional frente às limitações da produção energética”.

Embasado por essa premissa, este trabalho conduz a uma análise sobre as vantagens de se usar um sistema de automatização eletrônico de fontes de energia, especificamente o controle de iluminação artificial, no intuito de satisfazer não apenas à demanda, mas melhorar a eficiência dos projetos e contribuir com as discussões para eficiência energética visando políticas de sustentabilidade para o país.

2 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS PREDIAIS

A necessidade da utilização mais eficiente da energia elétrica em edifícios, levou ao desenvolvimento técnico em diversos sistemas prediais onde este insumo é utilizado. A figura 2 indica, no gráfico, o uso final energia elétrica em edifício comercial e permite verificar que os maiores sistemas consumidores são: ar condicionado, 42%; iluminação, 24%; equipamentos de escritório, 15% e elevadores e bombas, 13%.

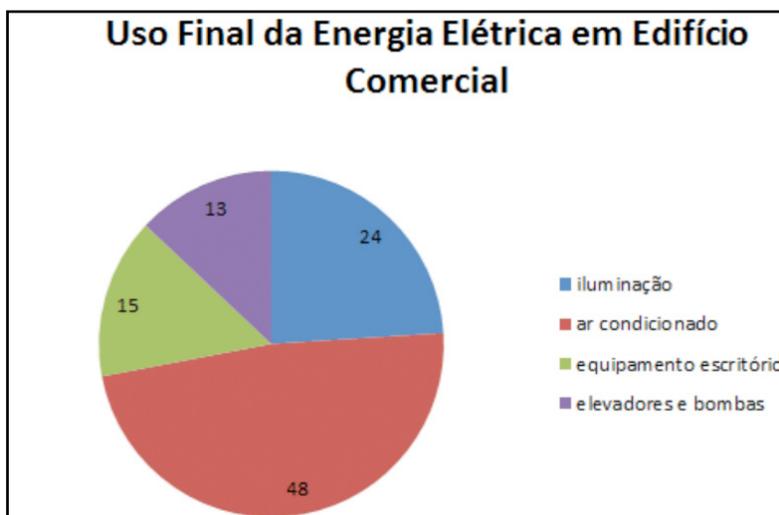


Figura 2 - Uso final da energia elétrica em edifício comercial.

Fonte: (LAMBERTS, 2013).

2.1 Sistemas de Controle de Iluminação

Os sistemas de controle de iluminação passaram de sistemas isolados, analógicos para digitais centralizados, conforme a figura 3.

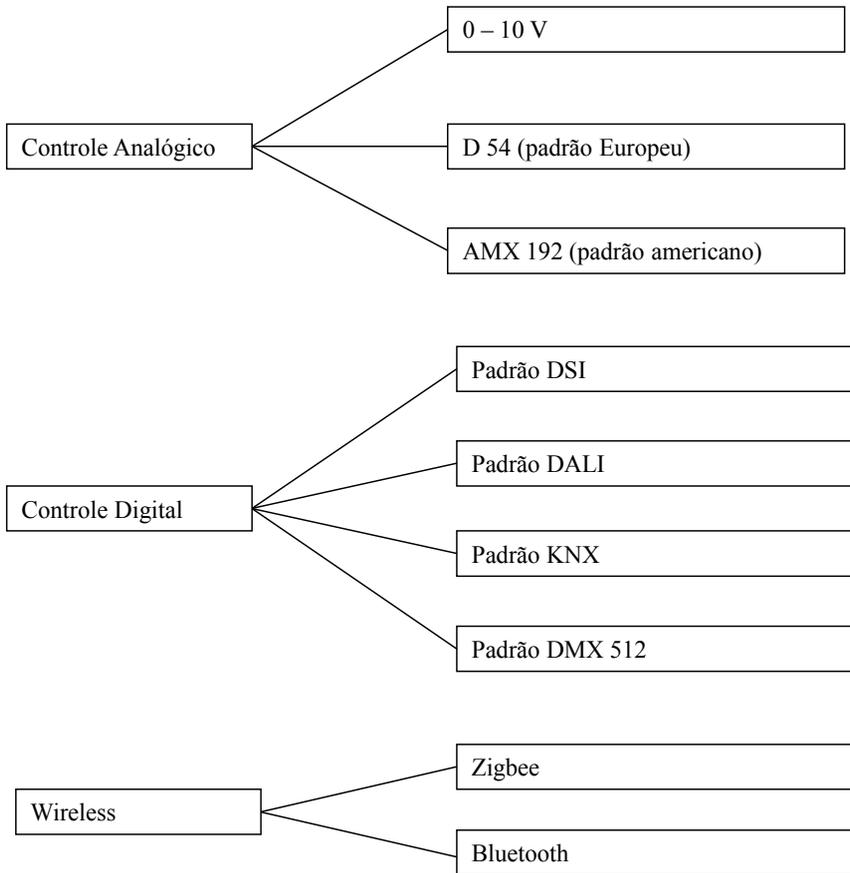


Figura 3 - Sistemas de Controle de Iluminação: Analógico, Digital e sem fio

Fonte: Própria

2.2 DALI – *DIGITAL ADDRESSABLE LIGHTING INTERFACE*

2.2.1 *Histórico*

Entre todos os protocolos digitais e analógico, o mais flexível e promissor para controles de iluminação e novas aplicações futuras é o DALI.

O padrão DALI, que é um acrônimo de *Digital Addressable Lighting Interface*, é um protocolo aberto que surgiu no final do ano de 1990, com a iniciativa dos principais fabricantes e desenvolvedores de sistemas de controle digital e analógico de iluminação e luminárias da época, como OSRAM, Helvar, Trilux, Tridonic e outros líderes. Ele é especificado pela norma internacional IEC 62386, sendo irrestrito a qualquer fabricante.

Até junho de 1996, apenas 34 marcas participavam do protocolo DALI e hoje já são mais de 120 empresas, organizações e desenvolvedores que participam do grupo de membros DALI. É possível conferir todos os membros, além de projetos já realizados com o

protocolo, no endereço eletrônico www.dali-ag.org.

No início, intuito era desenvolver um padrão de protocolo digital intercambiável entre diversos fabricantes, que facilitasse a aplicação e permitisse:

- Baixo custo de instalação, com redução dos cabos e fiação dos controles e comandos.
- Controle individual de lâmpadas e luminárias dentro de circuitos complexos.
- Capacidade de adicionar componentes, sensores e outros equipamentos propriedade.
- Via de informação e controle bidirecional entre a fonte e o controlador

Desde sua criação, foi submetido a vários testes que lhe possibilitaram muitos avanços e desde o 2001 assumiu importante papel na automatização de edifícios e indústrias, contribuindo diretamente para a eficiência energética das instalações. Um exemplo bastante divulgado do uso deste protocolo é o caso da Copa do Mundo de 2006, que teve o Estádio Olímpico de Berlim totalmente iluminado e controlado por centrais DALI.

Para a indústria o DALI trouxe muitos benefícios e também mudou a maneira como projetistas, *light designers*, instaladores e o próprio conceito das aplicações luminotécnicas, que agora contam com mais flexibilidade para aplicações simples ou complexas.

2.2.2 Áreas de aplicação do DALI

Ao contrário dos protocolos digitais que surgiram logo em seguida dos analógicos, o DALI não é uma releitura simplificada, ele vai além disso. Em poucos anos de avanço tecnológicos as empresas-membro do DALI desenvolveram e aperfeiçoaram as ferramentas de análise e controle.

Uma notável aplicação é marcada pela variação de tipos de luminárias, reatores e tipos de lâmpadas que hoje podem ser controladas por uma interface DALI. Inicialmente, o sistema era focado para luminárias de lâmpadas fluorescentes ligadas a reatores. Atualmente são agregados de maneira simples lâmpadas halógenas de 12 volts, lâmpadas de descarga e principalmente LED, não em sua forma pura, mas através de seus *drivers* de acionamento e controle.

Em vez de controlar apenas o sistema de acendimento e tempo de funcionamento das lâmpadas, o DALI oferece um mecanismo simples de controlar a luminosidade, por meio da integração de sensores, retornando ao controlador um mapeamento completo e instantâneo sobre a performance do sistema. Antes do seu desenvolvimento, esse tipo de automatização era muito oneroso e pedia de muita infraestrutura, além de ser restrito a marcas que não compartilhavam seus sistemas para intercambiar com outros fabricantes.

Outra vantagem do DALI é a descentralização dos controles, permitindo mais flexibilidade ao processo como um todo. Desta forma, grandes edifícios e empresas podem ter polos de controle e operação distribuídos por toda a instalação. Isso não impede que o

projeto do DALI seja unificado a qualquer momento para uma única central de controle.

Em termos de proporção e adequação do uso aos ambientes pode-se dizer que o DALI é altamente adaptável. Sua aplicação pode partir de uma única luminária com um único reator acoplados a um multisensor, que irá oferecer controle de luminosidade, detecção de movimento por sistema de infravermelho passivo (PIR – *passive infra-red sensor*) e até operação por controle remoto do tipo IR (*infra-red*). Esta configuração mínima requer um simples painel de controle ou o próprio controle remoto e se classifica como uma instalação autônoma de controle.

Partindo para uma configuração mais ampla, o DALI oferece a opção de se combinar com outros sistemas de controle, como um subsistema e como um sistema agrupado, na qual a central de controle energético do edifício poderá monitorar e designar operações ao sistema, corrigindo demandas, acionamentos e até mesmo cenários de iluminação.

A parte estrutural também ganha com o sistema DALI. Por se tratar de um sistema bidirecional, onde apenas um par de cabos envia e recebe informações protocoladas, a qualquer momento uma nova luminária pode ser inserida ou retirada do trecho sem ter que passar reformas ou alterações complexas.

Em termos técnicos o DALI também suas limitações. Um dispositivo controlador pode coordenar até 64 dispositivos em suas saídas. Essa linha de controle dispensa o uso de relés e pode ser associada a vários sensores espalhados pelo percurso, que é composto por uma estrutura cabeada muito simples. As figuras 4 e 5 exemplificam a instalação básica e suas limitações.

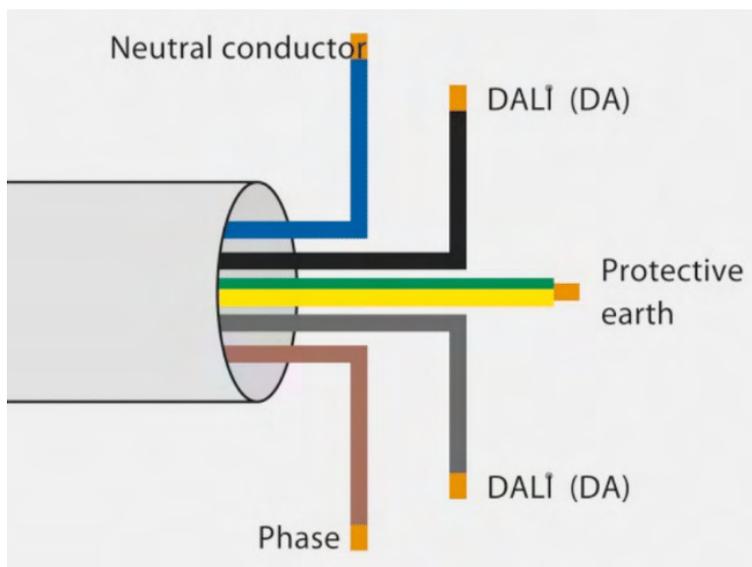


Figura 4 - Esquema de cabos estruturados do DALI

Fonte: OSRAM

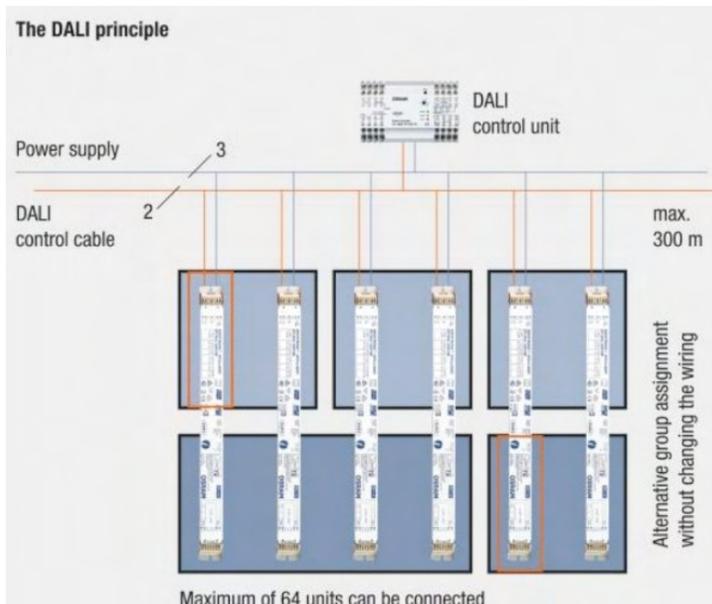


Figura 5 – Princípio básico de ligação ao controlador

Fonte: OSRAM

Basicamente, um controlador pode ser comparado a um controlador lógico programável – CLP – com a diferença que o DALI é exclusivo para iluminação e seus mecanismos. Entretanto à sua extensiva funcionalidade e flexibilidade, projetos com esse protocolo podem ser facilmente integrados a outros sistemas de automação de um edifício via *gateways*.

Como em todo sistema de controle o DALI também necessita de um certo treinamento na operação e desenvolvimento de toda a lógica que comandará a iluminação. Porém, as empresas já passam a oferecer cursos ou o próprio serviço de projeto, facilitando ainda mais para quem deseja instalar o DALI.

Simplificadamente, um sistema DALI, composto por um controlador unitário de 64 saídas, poderá ser programado via software, normalmente por uma plataforma Windows, e depois poderá ser controlado por algum mecanismo, seja por um computador ou software específico para algum mecanismo de interface homem-máquina. Entretanto, existem mecanismos controladores que acionam diretamente o controlador DALI, como por exemplo interruptores com dimerização digital. Alguns fabricantes também dão ao DALI um ar mais tecnológico, com sensores e acionadores que funcionam em paralelo e interoperáveis, permitindo ampliação das áreas de controle individual ou coletivas.

Com esse conceito simplificado de instalação do DALI, muitos edifícios comerciais, indústrias e até mesmo residências ou pequenos comércios investiram na aplicação dessa tecnologia e passam a se enquadrar como “edifícios verdes”.

Tipo de lâmpada	V (V)	I (A)	P (W)	S (VA)	F (Hz)	FP	Economia (W) (2)	Economia (VA) (2)
Osram 40 W (1), T10 - luz do dia especial	118,3	0,64	65,8	76	60	0,86		
Philips 40 W (1), T10 - branca luz do dia	120	0,66	68	78,4	60	0,86		
Slim Fluor ECP 6400 K, 36 W (1), T8 - branca luz do dia	116,9	0,51	58,6	60,6	59,9	0,96	-13,82	-22,70
Slim Fluor ECP 6400 K, 36 W (1), T8 branca luz do dia	115,9	0,52	58,6	60,1	60	0,96	-13,82	-23,34
Osram 28 W (1), T5 - cool white	119,6	0,49	56,5	58,5	60	0,96	-16,91	-25,38
(1) Considerando duas lâmpadas de cada potência (40, 36 e 28 W)								
(2) Economia comparada com a lâmpada Philips								

TABELA 1: Valores de consumo das lâmpadas fluorescentes tubulares de 40, 36 e 28W sem dimerização.

Já a tabela 2 mostra os dados obtidos dos ensaios com a dimerização acionada em diversas condições: com as janelas interna e externa fechadas ou abertas e com a iluminação do corredor de acesso ligada ou desligada.

	Ensaio 1 (1)	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
Janela externa	Fechada	Aberta	Aberta	50%	Fechada	Aberta	Aberta	50%	Aberta	Fechada	(4)	Aberta
Janela interna	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada	(4)	Aberta
Corredor	Apagado	Aceso	Apagado	Apagado	Apagado	Aceso	Apagado	Apagado	Apagado	Apagado	(4)	Apagado
V (V)	117	116,7	116,7	116,2	116,1	116,4	116,9	116,9	118,2	117,7	116,2	118,5
I (A)	0,98	0,82	0,86	0,94	0,98	0,94	0,91	0,94	0,69	0,97	1,04	0,52
P (W)	111	90,7	96,5	105	111	105	102	106	69,4	109	118	51,7
S (VA)	114	95,9	101	109	114	109	106	110	76,7	114	121	61,5
f (Hz)	60	60	60	59,9	59,9	60	60	60	30	60	60	59,9
FP	0,97	0,95	0,95	0,96	0,97	0,96	0,96	0,93	0,9	0,95	0,97	0,83
(2) (lux)	830	850	820	905	850	850	750	750	350	890	610	360
(3) (lux)	350	360	360	230	160	240	230	210	230	160	110	1240
(1) Medido logo após término do setup												
(2) Lux, altura de trabalho												
(3) Luz externa a um metro da janela externa, sensor a 2,05 m.												
(4) À noite, com todas as janelas fechadas.												

Tabela 2: Ensaio do sistema Dali com controlador, uma luminária no canal 1 e uma luminária no canal 2 (luminária de duas lâmpadas T5/28W).

Na tabela 3, é feita uma comparação entre as lâmpadas fluorescentes tubulares de 40W e o sistema com controle dimerizado. Na melhor condição, considerando-se a potência aparente, tem-se uma economia de 51%.

Condição de trabalho	Sem dimerização		Sistema Dali com uma luminária 2 x 28 W na rede Dali 1 e uma luminária 2 x 28 W na rede Dali 2				
			Set up de fábrica	Após setup inicial	Pós setup - Caso médio	Pós setup - Melhor caso	Pós setup - Melhor caso (2)
Lâmpada	Tubular Osram 40 W (1), T10 – luz do dia especial	Tubular Philips 40 W (1), T10 – branca luz do dia	T5, 28 W				
Grandeza							
V (V)	118,3	120	119,6	116,1	116,7	116,7	118,2
I (A)	1,24	1,32	0,98	0,98	0,86	0,82	0,69
P (W)	131,6	136	113	111	96,5	90,7	69,4
S (VA)	152	156,8	117	114	101	95,9	76,7
f (Hz)	60	60	60	60	60	60	60
FP	0,86	0,86	0,96	0,97	0,95	0,95	0,9
Economia (W) (4)			-16,91	-18,38	-29,04	-33,31	-48,97
Economia (VA) (3)			-25,38	-27,30	-35,59	-38,84	-51,08
(1) Para mesma base de comparação, foram consideradas quatro lâmpadas T10, 40 W, com quatro lâmpadas T5, 28 W.							
(2) Simulado um dia mais claro, pois as simulações anteriores foram realizadas em dias nublados.							
(3) Economia comparada com a lâmpada de 40 W, Philips.							

Tabela 3: Comparação entre o sistema dimerizado e uma lâmpada fluorescente tubular de 40W sem dimerização.

Os resultados obtidos foram os esperados, visto que as lâmpadas T5, 28W têm eficiência luminosa superior às de 40W. Além disso, com a dimerização obteve-se uma economia extra, pois o consumo diminui quando existe iluminação natural aproveitável. Adicionalmente o sensor de presença desliga a iluminação quando não há pessoas na sala. Na tabela 4 tem-se a especificação das lâmpadas.

	Philips 40 W, Extra luz do dia TL 40 W/ 750	Osram 40 W Luz do dia especial	ECP 36 W Branca luz do dia	Osram 28 W Cool white HE 28W/840L
Potência (W)	40	40	36	28
Temperatura de cor (K)	5000		6400	
Fluxo luminoso (lm)	2700			2900
Eficiência luminosa (lm/W)	70			103
Vida útil (horas)	20 000			20 000
Diâmetro	T10	T10	T8	T5

Tabela 4: Especificação das lâmpadas utilizadas.

4 | ANÁLISE FINANCEIRA:

Para verificação da viabilidade financeira da solução, foi feito um estudo considerando a substituição de 484 lâmpadas no denominado bloco D do campus São Paulo da instituição de ensino IFSP, Campus São Paulo.

A tabela 5 apresenta o consumo anual de energia, em kWh e R\$, das lâmpadas de 40W e das de 28W dimerizadas. Foi considerada a tarifa verde da Enel, de março de 2016, sem bandeira tarifária ou impostos.

A tabela 5 mostra uma estimativa de custos para a substituição das 484 lâmpadas de 40W por lâmpadas de 28W dimerizadas por um controlador Dali.

Estudo considerando 484 lâmpadas		
Tarifa horo-sazonal verde (R\$/kWh ponta e R\$/kWh fora de ponta), AES Eletropaulo, março 2016	0,3624	0,22596
484 lâmpadas 40 W (W)	16 456	
484 lâmpadas 28 W, com sistema Dali de controle (W), considerando economia de 45%	9051	
Utilização de horas fora de ponta em um dia	15	
Utilização de horas na ponta em um dia	3	
Utilização de horas fora de ponta (sábado)	10	
No mês		
Utilização de horas fora de ponta (considerando 22 dias)	330	
Utilização de horas na ponta (considerando 22 dias)	66	
Utilização de horas fora de ponta (quatro sábados)	40	
Total de horas fora de ponta	370	
Total de horas na ponta	66	
Comparação entre lâmpadas de 40 e 28 W: energia consumida e valor		
Consumo de energia fora de ponta (kWh)	6089	3349
Consumo de energia na ponta (kWh)	1086	597
Valor do consumo de energia fora de ponta, sem impostos (R\$)	1375,81	756,69
Valor do consumo de energia na ponta, sem impostos (R\$)	393,60	216,48
Valor mensal do consumo de energia (R\$)	1769,41	973,17
Total anual do consumo de energia elétrica (R\$)	21232,90	11678,10
Economia (R\$/ano)	9554,81	

Tabela 5: Consumo de energia (em kWh e R\$) de lâmpadas de 40W e de 28W dimerizadas.

5 | CONCLUSÕES

De acordo com os ensaios realizados, o sistema de dimerização fornece economia de 40%, na melhor condição.

No caso de um edifício em que o sistema de iluminação representa 50% do total de consumo de energia elétrica, na melhor condição, tem-se economia de 20%.

No caso de um *retrofitting*, o *payback* é de 6,3 anos.

REFERÊNCIAS

BARROS, Benjamin Ferreira; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo L. "Gerenciamento de Energia – Ações Administrativas e Técnicas de Uso Adequado da Energia Elétrica ". 1.ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

COEL "Interruptor horário, modelos: RTST-20 e RTSTL-20", ref.: B11 1148 131, rev. 6, 12/11. 2011. São Paulo.

Dali Organization. Disponível em: <<http://www.dali-ag.org/discover-dali/dali-standard.html>> Acesso em: 27 de fevereiro de 2016.

LEGRAND. Catálogo de Produtos: Soluções de Gerenciamento de Iluminação - Catálogo de produtos, 2010. São Paulo.

WESTPHAL, Fernando S.; GHISI, Enedir; LAMBERTS, Roberto. "Simulação Energética do Edifício Sede da Fiesc: Estudo de Caso de Retrofit no sistema de iluminação". 1997. 6 f. Estudo de Caso. Florianópolis: LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações UFSC.

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS E CONSTRUTIVAS NO EIXO DO ROTOR EÓLICO

Data de aceite: 01/10/2021

Data da submissão: 06/07/2021

Leonardo Pavan

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
campus Medianeira
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1184600095129914>

Evandro André Konopatzki

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
campus Medianeira
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/2271391188375487>

Cristiane Lionço de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
campus Medianeira
Medianeira – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/0915594224998333>

RESUMO: A geração de energia eólica vem aumentando nas últimas décadas e com isso também aumentaram os estudos voltados para a caracterização da sua eficiência – que depende de seus parâmetros construtivos, assim como das variáveis ambientais envolvidas no processo. O objetivo desta pesquisa foi identificar a influência das variáveis no eixo de rotação de aerogeradores. A partir de valores fornecidos pela literatura e pelos fabricantes de turbinas eólicas foram combinadas as seguintes variáveis: diâmetro do rotor; velocidade do vento; e ângulo de passo da turbina para verificar sua relação com a rotação e potência disponível no cubo de

rotores eólicos. Tal combinação foi construída a partir da modelagem das equações que representam a geração eólica com os cenários sendo construídos sob delineamento composto central rotacional (DCCR). Os resultados apresentam dependência combinadas das grandezas construtivas e ambientais com grau de dependência apresentado por duas equações teóricas. A conclusão desta pesquisa mostra a necessidade de ampliar os estudos para validar a dependência matemática entre a rotação do eixo e o ângulo de passo a fim de aumentar a acurácia dos seus sistemas de controle.

PALAVRAS-CHAVE: Velocidade do vento. Energia eólica. Rotação.

INFLUENCE OF THE ENVIRONMENTAL AND CONSTRUCTIVE VARIABLES ON THE AXIS OF WIND ROTOR

ABSTRACT: The generation of wind energy has been increasing in recent decades and with this, studies aimed at characterizing its efficiency have also increased – which depends on its construction parameters, as well as on the environmental variables involved in the process. The objective of this research was to identify the influence of variables on the rotation axis of wind turbines. From values provided by literature and by wind turbine manufacturers, the following variables has been combined: rotor diameter; wind speed; and turbine pitch angle to verify its relationship with the rotation and power available in the hub of wind rotors. Such combination was built from the modeling of the equations that represent the wind generation with the scenarios being built under central composite rotational design (CCRD). The

results show a combined dependence of the constructive and environmental quantities with the degree of dependence presented by two theoretical equations. The conclusion of this research shows the need to expand studies to validate the mathematical dependence between shaft rotation and pitch angle in order to increase the accuracy of their control systems.

KEYWORDS: Wind speed. Wind energy. Rotation.

1 | INTRODUÇÃO

A demanda por eletricidade aumenta cada vez mais e a produção de energia a partir de fontes renováveis torna-se essencial, sendo a energia eólica uma delas. É a energia existente na movimentação dos ventos, ou seja, é a energia cinética contida nas massas de ar da atmosfera. A energia contida no vento é não poluente como outros tipos de fontes, que são dependentes de combustíveis fósseis, tais como gás natural ou carvão. Para Montezano (2007) é uma alternativa energética competitiva na qual seu grande incentivo acontece na forma de baixo impacto ambiental.

O problema apresentado nesta pesquisa é representar matematicamente a rotação e a potência do rotor eólico de turbinas de eixo horizontal para controlar as variações e os efeitos das variáveis ambientais e das variáveis construtivas de um gerador sobre seu eixo, no ponto de acoplamento à máquina geradora.

2 | DESENVOLVIMENTO

A pesquisa teve abordagem quantitativa descritiva apresentando as características da representação matemática de um gerador eólico na rotação do eixo acoplado ao cubo rotor eólico, estabelecendo correlações estatísticas de aderência entre variáveis analisadas, seguindo o propósito de uma análise descritiva (VERGARA, 1998).

A técnica utilizada para definição da equação de regressão foi a otimização de processos apresentada por Rodrigues e lemma (2009). O delineamento das variáveis foi fatorial do tipo composto central rotacional caracterizado por quinze ensaios dos quais oito compuseram o modelo fatorial, seis representaram os pontos axiais e um retratou o ponto central.

As variáveis respostas buscadas nessa pesquisa foram a rotação do eixo do cubo do rotor (R), cuja unidade é radianos por segundo (rad/s) e a potência mecânica no eixo do rotor, unidade watt (W).

A construção das variáveis é dada por 2^n cenários fatoriais, acrescida de uma análise de ponto central e oito cenários com pontos axiais. A forma de definir a expansão dos pontos axiais é relacioná-los ao valor fatorial nominal pelo valor de transformação da variável axial (α) para os pontos extremos, definida pela Eq. (1).

$$\alpha = \pm \sqrt[1/4]{2^n} \quad (1)$$

Os níveis de variação foram escolhidos com base nas informações disponíveis pelos fabricantes de turbinas eólicas, conforme é apresentado na Tabela 1.

Variáveis	-α	-1	0	+1	+α
D: Diâmetro do rotor (m)	70,00	100,40	145,00	189,60	220,00
β: Ângulo de passo (°)	0,00	4,05	10,00	15,95	20,00
V _v : Velocidade vento (m/s)	3,00	7,46	14,00	20,54	25,00

Tabela 1 – Níveis para o DCCR

Fonte: Autoria própria (2020)

A potência transferida do vento para o eixo da turbina eólica pode ser calculada pela Eq. (2).

$$P_m = \frac{\rho \times A \times C_p \times V_v^3}{2} [W] \quad (2)$$

Onde ρ representa a densidade do ar, A representa a área do rotor, C_p o coeficiente de potência e V_v a velocidade do vento.

O coeficiente C_p apresentado na Eq. (3) é adimensional.

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} \quad (3)$$

Onde λ_i é a relação entre a velocidade tangencial de ponta da pá com a velocidade do vento no ponto “i” (adimensional); β é o ângulo de passo da turbina (°) e C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5 são parâmetros de ajuste de ganho.

Neste estudo foram adotados os parâmetros de ajuste de ganho indicados por Montezano (2007), que apresentou os valores de ajuste ótimos como sendo: $C_1 = 0,5176$; $C_2 = 98$; $C_3 = 0,4$; $C_4 = 5$ e $C_5 = 16,5$.

3 | RESULTADOS

Os cenários mostrados na Tabela 1 são uma relação dos valores apresentados na Tabela 1 e ilustram a combinação para as variáveis respostas estudadas.

Cenário	D(m)	β (°)	v_v (m/s)	P_m (MW)	R (rad/s)
1	100,40	4,05	7,46	0,74	1,19
2	189,60	4,05	7,46	2,63	0,63
3	100,40	15,95	7,46	-0,18	1,19
4	189,60	15,95	7,46	-0,63	0,63
5	100,40	4,05	20,54	15,39	3,27
6	189,60	4,05	20,54	54,89	1,73
7	100,40	15,95	20,54	-3,68	3,27
8	189,60	15,95	20,54	-13,12	1,73
9	70,00	10,00	14,00	1,06	3,20
10	220,00	10,00	14,00	10,45	1,02
11	145,00	0,00	14,00	12,43	1,54
12	145,00	20,00	14,00	-7,92	1,54
13	145,00	10,00	3,00	0,04	0,33
14	145,00	10,00	25,00	25,84	2,76
15	145,00	10,00	14,00	4,54	1,54

Tabela 1 – Cenários construídos para o DCCR para potência e rotação R.

Fonte: Autoria própria (2020).

3.1 POTÊNCIA TRANSFERIDA PARA O ROTOR

Os resultados obtidos por meio da simulação apresentaram P_m com valores negativos nos cenários 3, 4, 7, 8 e 12 mostrando que altos valores aplicados ao ângulo de passo da turbina podem levar o rotor a ter seu giro sustentado pela energia elétrica da rede ao invés da energia cinética do vento, ou seja, vai consumir energia ao invés de gerar.

Montezano (2007) explicou a relação de C_p com β por meio da relação entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, também definido pelo autor como lambda (λ), com os valores apresentados na Figura 1.

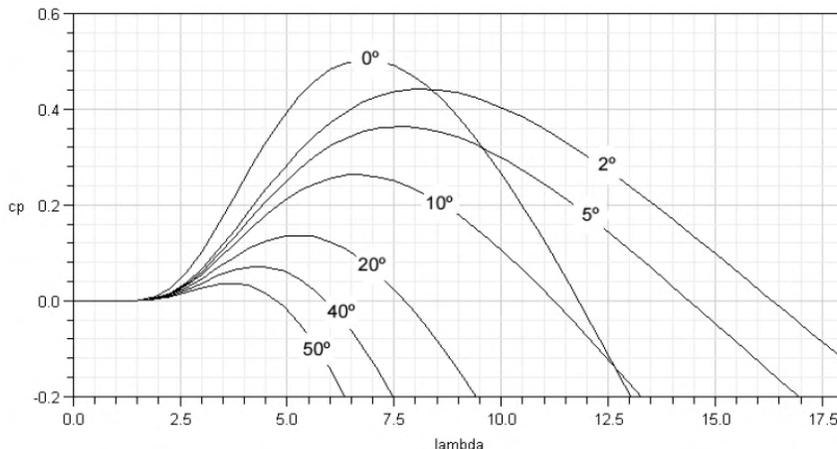


Figura1 – Dependência do coeficiente de potência com o ângulo de passo da pá (β) e da velocidade de ponta de pá com a velocidade do vento

Fonte: Montezano (2007)

Para Montezano (2007), o coeficiente de potência difere de valor nulo com uma velocidade de ponta de pá aproximadamente 2,5 maior que a que a velocidade do vento para ângulos de passo testados entre 0° e 50° . A Figura 1 deixa claro que existe um valor ótimo de λ para cada ângulo. Como por exemplo, para um valor de ângulo β de 0° o aproveitamento máximo é superior a 40% e quando esse ângulo aumenta o aproveitamento decresce.

O autor também observou que λ elevado pode tornar o C_p negativo, fator esse que implica em uma potência negativa no aerogerador causando o fenômeno de consumo de energia elétrica para sustentação do movimento das pás.

O cenário 6 apresentou valor de potência elevado e não constatado nos padrões construtivos atuais, denotado pela combinação de pequeno ângulo de passo e elevada velocidade do vento em uma turbina construída com pás com valor elevado de raio observa-se que a tecnologia atualmente existente não consegue atender tais condições construtivas e ambientais.

Na simulação realizada, a potência (em MW) apresentou dependência diretamente proporcional à velocidade do vento v_v e inversamente proporcional ao ângulo de passo β , sendo representada pela Equação de regressão (4).

$$P_m = (-9,19)\beta + (6,91)V_v - (10,36)\beta * V_v + (6,83) \quad (4)$$

A Figura 2 apresentada a seguir mostra a superfície de resposta da potência máxima transferida para o aerogerador sob as variáveis independentes velocidade do vento e ângulo de passo.

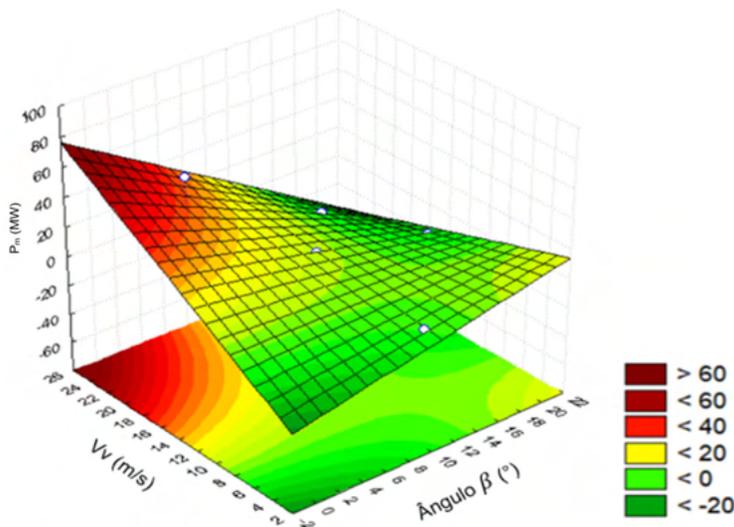


Figura 2 – Superfície de resposta da potência com influências da velocidade do vento (v) e do ângulo de passo (β).

Fonte: Autoria própria (2020).

Esta figura apresenta a dependência diretamente proporcional da potência gerada pela turbina eólica com a velocidade do vento. Também caracteriza que elevado ângulo de passo reduz o rendimento da turbina, podendo fazer com que a usina deixe de produzir energia e, para manter suas hélices girando, passa a consumi-la.

Nesse mesmo contexto Minnesota Municipal Power Agency [20--] também descreveu que para cada ângulo de passo diferente há um limite de relação λ que torna o coeficiente negativo. Esse coeficiente negativo faz com que a turbina deixe de fornecer energia ativa para a rede. Por esse motivo os projetos de geração eólica devem prever o corte de geração para altas velocidades de vento.

3.2 ROTAÇÃO NO EIXO DA TURBINA

O diâmetro de um rotor varia de acordo com a potência desejada para o aerogerador. A Tabela 3 apresenta alguns valores construtivos de diâmetro para aerogeradores entre 3 e 4,5 MW de potência de pico de geração.

Modelo	Potência da turbina (MW)	Diâmetro do rotor (m)	Rotação do cubo (RPM)	Área varrida do rotor (m ²)
N155	4,5	155	11	18.870
N155	4,8	155	11	18.870
N131	3,9	131	7,9 -15,4	13.478
N131	3,6	131	7,5 -13,6	13.478
AW148	3 a 3,6	148	6,2 -12,4	17.203
AW132	3,465	132	7 -14	13.685

Tabela 3 - Exemplificação do diâmetro de alguns modelos de turbinas eólicas.

Fonte: Adaptado do *site* da fabricante Nordex (2020).

Os dados da Tabela 3 não esgotam todas as possibilidades construtivas e servem apenas como exemplos trazidos de modelos utilizados por fabricantes de aerogeradores para facilitar as relações matemáticas aqui apresentadas.

A literatura não apresenta uma equação para modelar a rotação do eixo, sendo que para esta simulação foi constatada uma dependência diretamente proporcional a velocidade do vento e inversamente proporcional ao diâmetro do rotor. A regressão estatística é apresentada na Eq. (5).

$$R = (-0,58)D + (0,77)V_v - (0,25)D * V_v + (1,71) \quad (5)$$

A superfície de resposta da rotação do eixo do aerogerador sob as variáveis independentes velocidade do vento e diâmetro do rotor é apresentada na Figura 3, permitindo observar a dependência diretamente proporcional da rotação com a velocidade do vento e a dependência inversa da resposta (rotação) com o diâmetro do rotor.

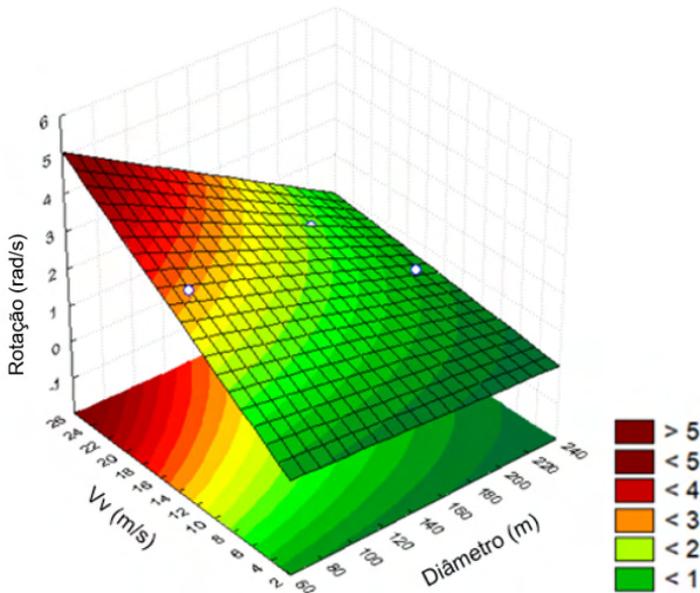


Figura 3 - Superfície de resposta da Rotação (R) com influências da velocidade do vento (V_v) e do diâmetro do rotor.

Fonte - Autoria própria (2020).

4 | CONCLUSÃO

A pesquisa teve como propósito encontrar uma correlação das variáveis diâmetro do rotor, velocidade do vento e ângulo de passo, pois possuem atuação direta para a geração de energia eólica e assim influenciando a fabricação de modelos de turbinas eólicas.

Foi possível verificar que as variáveis ambientais e construtivas possuem grande influência na rotação e potência disponível no eixo do rotor eólico pelos gráficos de superfícies, sendo necessária a realização de experimentos para validar as equações de regressão aqui apresentadas.

Foi observado nesse estudo que o ângulo de passo é a variável imprescindível para o controle da potência transferida para turbina eólica quando da variação na velocidade do vento, sendo que essa hipótese constitui a recomendação para trabalhos futuros com objetivo de verificar existência de dependência matemática entre a rotação do eixo e o ângulo de passo da pá do aerogerador.

REFERÊNCIAS

Minnesota Municipal Power Agency (MMPA). **Wind energy math calculations: calculating the tip speed ratio of your wind turbine**. Disponível em: <https://mmpa.org/wp-content/uploads/2015/09/Tip-Speed-Ratio-Provided-by-Kid-Wind-PDF.pdf>. Acesso em: 22 maio 2020.

MONTEZANO, B. E. M. **Modelo dinâmico de visualização de um aerogerador com velocidade de rotação variável e controle de passo em VRML**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

NORDEX. **The delta 4000 platform**. <https://www.nordex-online.com/en/product/platforms/#delta4000>. Acesso em 18 de maio 2020.

NORDEX. **The AW3000 platform**. <https://www.nordex-online.com/en/product/platforms/#awplatform>. Acesso em 18 de maio 2020.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento d experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

VERGARA, C. S. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas S.A, 1998.

VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA REGIÃO DO RECÔNCAVO DA BAHIA

Data de aceite: 01/10/2021

Data da Submissão: 24/08/2021

Gabriel Garcia Bastos de Almeida

Faculdade Maria Milza - FAMAM
Cruz das Almas - Bahia
<http://lattes.cnpq.br/3553697597208575>

Luanna Valéria Sousa Fonseca

Faculdade Maria Milza - FAMAM
Cruz das Almas - Bahia
<http://lattes.cnpq.br/3796167398106057>

Andréa Jaqueira da Silva Borges

Faculdade Maria Milza - FAMAM
Cruz das Almas - Bahia
<http://lattes.cnpq.br/5984997883918707>

RESUMO: Uma das mais utilizadas energias renováveis no mundo é a do sistema fotovoltaico, por conta do seu desenvolvimento energético e sua economia financeira. Por suas vantagens, foi realizada implantação desse sistema em uma instituição de ensino superior situada no recôncavo baiano. Nesse contexto, o objetivo desse estudo consiste em avaliar a viabilidade do sistema fotovoltaico implantado na Faculdade Maria Milza localizado no centro do recôncavo baiano. Foram coletados dados, no qual foi realizado um levantamento da energia fornecida pela concessionária e o emprego de dados do sistema de energia fotovoltaica. O método de procedimento foi o estudo de caso. Foi utilizado o software R, um programa de estatística, para análise dos dados das contas de energia

recolhidos durante o período de Janeiro à Dezembro do ano de 2019, ainda na utilização da energia elétrica proveniente da concessionária baiana, COELBA, para se chegar a uma média de consumo e de custo de quilowatt-hora. Em seguida foram recolhidos dados de potencial solar do recôncavo com a utilização do programa Meteororm 7.1 para o sistema fotovoltaico, obtendo assim uma comparação econômica e de eficiência entre ambas. Os resultados abordados apontam que com o investimento no sistema solar fotovoltaico, com vida útil de 10 a 20 anos na instituição de ensino superior, teria-se um retorno financeiro do investimento em dois anos e um mês, uma produção superior a 45.000 kWh, suficiente para toda a demanda e assim tendo uma grande economia significativa em comparação com o abastecimento da concessionária. Com isso, podemos concluir que está pesquisa, demonstrou que com um investimento no sistema solar fotovoltaico na Faculdade Maria Milza localizada no recôncavo da Bahia seria de máxima economia para o sistema de abastecimento elétrico da empresa, tanto quanto financeira, tendo em vista que a região é propícia para o desenvolvimento de energia solar, assim também contribuindo com a sustentabilidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar. Eletricidade. Engenharia. Meio Ambiente. Sustentabilidade.

FEASIBILITY OF THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN THE RECÔNCAVO DA BAHIA REGION

ABSTRACT: One of the most used renewable

energies in the world is the photovoltaic system, due to its energy development and financial savings. Due to its advantages, this system was implemented in a higher education institution located in the Bahian Recôncavo. In this context, the objective of this study is to evaluate the feasibility of the photovoltaic system implemented at Faculdade Maria Milza located in the center of Bahia's Recôncavo. Data were collected, in which a survey of the energy supplied by the concessionaire and the use of data from the photovoltaic energy system was carried out. The procedure method was the case study. The R software, a statistical program, was used to analyze the data from energy bills collected during the period from January to December of 2019, still in the use of electricity from the Bahia concessionaire, COELBA, to arrive at an average consumption and cost of kilowatt-hours. Then, solar potential data were collected from the Recôncavo using the Meeonorm 7.1 program for the photovoltaic system, thus obtaining an economic and efficiency comparison between them. The results discussed show that with the investment in the photovoltaic solar system, with a useful life of 10 to 20 years in the higher education institution, there would be a financial return on the investment in two years and one month, a production of more than 45,000 kWh, sufficient for all the demand and thus having a great significant savings compared to the supply of the concessionaire. Thus, we can conclude that this research has shown that with an investment in the photovoltaic solar system at Faculdade Maria Milza located in Bahia's Recôncavo, it would be of maximum savings for the company's electrical supply system, as well as financially, given that the region it is conducive to the development of solar energy, thus also contributing to environmental sustainability.

KEYWORDS: Solar energy. Electricity. Engineering. Environment. Sustainability.

1 | INTRODUÇÃO

No atual cenário mundial, com as diversas fontes de energia não renováveis, fez-se necessário que a engenharia buscasse propor novas fontes de energias mais limpas e renováveis para o consumo humano, desta forma foi-se abrangendo as diversas fontes providas da natureza para o abastecimento, uma delas é a energia fotovoltaica, oriunda de raios solares.

O termo energia sustentável pode ser usado para denominar tecnologias e recursos energéticos, que além de serem capazes de suprir as necessidades da humanidade, mais que também o façam de forma adequada com a preservação e a integridade dos sistemas naturais essenciais, evitando as drásticas mudanças climáticas na terra (BORBA; GASPAR, 2007).

A energia solar é inesgotável, a escala de tempo terrestre para o ser humano, e deve ser aproveitado ao máximo como fonte de calor e de luz, sendo que hoje ela é uma das alternativas energéticas mais promissoras para fornecer energia necessária ao engandecimento da humanidade (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre todos os projetos, a visão central da energia elétrica e seu abastecimento caracterizam-se pela eficiência e o desenvolvimento do Brasil, que tem como objetivo principal a eficácia no processo produtivo, reduzindo o consumo de energia fornecida pelas

concessionárias em 40%, tudo isso graças ao setor industrial que trabalha para que haja maior segurança no atendimento no quesito da demanda de energia com destaque nas fontes renováveis, pois elas são de extrema importância para fortalecimento da indústria brasileira no mercado global (FGV, 2016).

O sistema fotovoltaico, na qual se conhece atualmente, teve seu primeiro indício descoberto por Edmond Becquerel em 1839 através do aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica, acontecimento proveniente de absorção de luz. Posteriormente, em 1876 surgiu o primeiro equipamento fotovoltaico após estudos da física do estado sólido (SILVA; SOUZA, 2017).

No ano 1956 houve um grande impulso para o crescimento desse sistema, pois foi quando ocorreu a evolução da área eletrônica e tecnologia, onde houve um aumento no setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades distantes e a corrida espacial que também contribuiu para esse feito, pois fornecia menor custo, peso e segurança, além de fornecer a energia necessária para as viagens espaciais, o que continua sendo até os dias atuais (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia solar fotovoltaica é obtida através dos materiais semicondutores que captam e convertem a incidência da luz solar transformando em eletricidade, conectando a rede de distribuição da edificação residencial, comercial ou industrial, fazendo com que a própria edificação produza sua energia e seja auto-sustentável (CARVALHO JÚNIOR, 2019).

O funcionamento do sistema é bastante simples e explica que durante o dia os painéis absorvem a energia da luz solar e a mesma é convertida em energia elétrica, corrente contínua (CC) e o inversor a transforma em corrente alternada (CA), que pode ser consumida nas edificações, gerando energia para lâmpadas, eletrodomésticos e qualquer aparelho conectado à rede (CARVALHO JÚNIOR, 2019).

Existem dois tipos de sistemas fotovoltaicos, de acordo com a Bluesol (2017, p.37) “a resposta simples e direta é: o gerador solar fotovoltaico on-grid é ligado à rede elétrica, e o gerador fotovoltaico off-grid não é ligado à rede elétrica.”

A Instalação do sistema solar fotovoltaico on-grid interligado à rede elétrica pode se apresentar de duas formas diferentes, sendo que uma pode ser instalada de forma integrada a uma edificação ou de forma centralizada como em uma usina central geradora convencional, onde neste caso geralmente está um pouco distante do ponto de consumo (RÜTHER, 2004).

Conforme a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) de todas as fontes de energias renováveis, a energia solar fotovoltaica contém uma gama de vantagens, como por exemplo, exercer um papel fundamental em ajudar as hidrelétricas, que são as principais fontes de geração de energia do Brasil, diminuindo significativamente os aumentos de pico de demanda de energia durante o dia, não gera nenhuma emissão poluente ao produzir energia elétrica, sem a necessidade de uso de combustível o que minimiza drasticamente o custo. Contudo, a geração pelo sistema fotovoltaico pode ser gerada nos locais onde se deseja consumir a carga, reduzindo as linhas de transmissão e aumento da segurança energética

(BRASIL, 2016).

Quando se produz mais energia pelo sistema fotovoltaico do que se consome essa energia, ela pode ser injetada na rede de distribuição da concessionária por meio de um relógio de luz, que tem por objetivo medir a energia da rua quando não há sol e também a energia solar gerada em excesso, a edificação assim ganha um crédito de energia (TRAPANI, et. al, 2013).

Esse crédito é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que enfatiza o fato de haver regras específicas que variam de acordo com a localização e a classe de consumo. A agência mede por cada KWh gerado em excesso pelo sistema solar fotovoltaico da edificação e o consumidor recebe então o seu crédito em KWh que poderá ser utilizado de noite ou nos meses seguintes (CARVALHO JÚNIOR, 2008).

Há muitas vantagens para as edificações urbanas e o sistema de distribuição ser integradas ao sistema fotovoltaico, incluindo uma série de vantagens para o sistema elétrico, no qual se relaciona com a economia, que não vem sendo considerado e quantificado. (RÜTHER, 2014).

Entre as vantagens do sistema solar fotovoltaico podem ser citadas que as perdas por transmissão e distribuição de energia são minimizadas, redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição, edifícios solares fotovoltaicos não apresentam necessidade de área física dedicada, já que a mesma é ocupada pela edificação, os edifícios têm capacidade de oferecer suporte KVAR a pontos críticos da rede de distribuição melhorando a qualidade da energia, capacidade de oferecer um grande fator de capacidade e alimentadores da rede com picos diurnos, entre outros (KALOGIROU, 2016).

Nesse contexto, a Faculdade Maria Milza (FAMAM), situada no reconcavo baiano no território de Governador Mangabeira, localizada na rodovia BR 101, procurou ter um papel de suma importância no requisito de energias sustentáveis, para suprir seu próprio guarnecimento e promover a sustentabilidade ambiental na região.

A FAMAM sempre foi abastecida de energia elétrica pela concessionária do estado da Bahia, a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA), porém no início do ano de 2020, a faculdade tomou a iniciativa de implantar um projeto de viabilidade energética através de energias renováveis, pretendendo instalar painéis fotovoltaicos do sistema on-grid para seu próprio abastecimento, em um período de 20 anos. Nessa perspectiva, o objetivo desta pesquisa foi analisar a viabilidade econômica e a eficiência do sistema de energia solar na região da Faculdade Maria Milza pela produção e o próprio abastecimento de energia elétrica provida do sistema fotovoltaico on-grid a ser instalado.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia que desenvolveu esta pesquisa teve como modalidade o estudo de caso de abordagem quantitativa. A localização onde a pesquisa ocorreu foi no Recôncavo

Baiano, na cidade de Governador Mangabeira na BR 101 onde se encontra a instituição de ensino superior referida, a FAMAM.

Toda instituição ou empresa tem um contrato de fornecimento de demanda de potência contratada com a concercionária na qual não se pode abater o fornecimento produzido no sistema solar, esse contrato de potência a instituição ou empresa ainda irá pagar normalmente, o sistema fotovoltaico apenas abaterá a utilização de energia de consumo ativo na ponta e consumo ativo fora da ponta da faculdade.

A aplicação da viabilidade com a instalação do sistema fotovoltaico on-grid foi devidamente estudada no consumo ativo na ponta, que é o período onde o horário da procura de energia da concerssionaria é mais requisitado, tendo uma diaria consecutiva de 3 horas e consumo ativo fora da ponta, que é o período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta, abatendo assim todos os valores financeiramente ao da demanda que era fornecida pela concercionária e os valores de consumo em kWh.

Foram recolhidos os dados das contas de energia durante o período de Janeiro à Dezembro do ano de 2019, ainda na utilização da energia elétrica proveniente da concessionária COELBA, para se chegar a uma média de consumo e de custo de quilowatt-hora, foi utilizado o software R, um programa de estatística.

Foram recolhidos dados de potencial solar da região do recôncavo com a utilização do programa Meteonorm 7.1 para o sistema fotovoltaico, obtendo assim uma comparação econômica e de eficiência entre ambas.

Para a avaliação do potencial solar, foram escolhidos os dados climáticos e solarimétricos da base de dados Meteonorm 7.1, disponíveis no software de modelagem solar PVSyst. A base de dados meteorológicos do Meteonorm é privada e baseada em dados de estações em solo e dados de satélite.

Para o caso específico deste estudo, os dados disponibilizados foram obtidos no ano de 2019 do Meteonorm, versão 7.1, e são constituídos de médias mensais de longo prazo. O software faz a interpolação de dados de satélite com dados de medições das três estações meteorológicas mais próximas ao local da instalação.

Silva (2013) afirma que para estimar a produção média mensal de energia de um sistema fotovoltaico, pode ser encontrada utilizando a expressão da equação 1 a seguir:

$$GMM \text{ (kWh)} = P_{tot} \text{ (kWp)} \times RSM \text{ (h/dia)} \times PR \times n^{\circ} \text{ dias} \quad (1)$$

Onde:

GMM (kWh) é o valor médio de geração mensal. Diferentes épocas do ano geram diferentes valores mensais, uma vez que o nível de radiação solar varia bastante durante o ano, devido à mudança de posicionamento da terra em relação ao sol (estações do ano).

P_{tot} (kWp) é a potência total instalada em placas fotovoltaicas, dada pela multiplicação da potência de cada placa pelo número de placas.

RSM (h/dia) é a radiação solar média no período de um ano para o local onde o gerador será implantando.

Neste caso, NMRS = É a região do recôncavo baiano, considerando o número de horas de sol pleno por dia.

PR é a performance ratio ou eficiência global do sistema. Esse valor representa o percentual de eficiência do gerador como um todo, levando em conta todas as perdas inerentes aos equipamentos e a operação do sistema, como perda no inversor, perda nos condutores, queda de tensão, indisponibilidade do sistema etc., e às condições do local da instalação, como perdas por sombreamento, perdas por sujeiras nos módulos, variações de temperatura ambiente etc.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diferentes épocas do ano geram diferentes valores mensais, uma vez que o nível de radiação solar varia bastante durante o ano, devido à mudança de posicionamento da terra em relação ao sol (estações do ano). No Recôncavo, devido a sua localização na zona tropical, com duas estações bem definidas (verão e inverno) a incidência solar direta ocorre durante seis meses (verão) e que no inverno não há uma diminuição significativa da incidência dos raios solares nessa área, o que não compromete significativamente o sistema fotovoltaico, onde se encontra localizada a Faculdade Maria Milza.

O nordeste tem um grande potencial a respeito no desenvolvimento de produção de energia solar no Brasil, por exibir níveis elevados de insolação com baixa variabilidade durante o ano. (PEREIRA et al., 2006).

Foi verificada uma radiação média ou NMRS de 5,04 h/dia ou 5,04 kWh/m²/dia, valor retirado do programa Meteonorm, referente ao ano de 2019, conforme a Figura 1. A partir do levantamento dos dados meteorológicos referentes à região do Recôncavo da Bahia, obtidos por meio do programa Meteonorm, referente ao número de irradiação solar, desta forma foi possível estimar os valores da fórmula de produção média mensal de energia do sistema fotovoltaico.

Site Governador Mangabeira (Brazil)						
Data source	Meteonorm 7.2, Sat=85%					
	Horizontal global irradiation	Horizontal diffuse irradiation	Temperature	Wind Velocity	Linke Turbidity	Relative Humidity
	kWh/m ² .day	kWh/m ² .day	°C	m/s	[-]	%
January	6.20	2.63	26.7	3.30	3.086	78.1
February	6.09	2.61	26.6	2.89	2.876	80.0
March	5.26	2.33	26.2	2.70	3.220	81.4
April	4.33	2.37	25.1	2.40	3.017	85.6
May	3.92	1.95	24.5	2.79	2.876	84.4
June	3.36	2.01	22.9	3.01	2.729	87.0
July	3.85	1.90	22.5	3.10	2.577	85.8
August	4.84	2.12	23.0	3.29	2.654	84.0
September	4.74	2.36	24.0	3.41	3.086	81.8
October	5.32	2.73	25.4	3.70	3.017	78.0
November	6.20	2.68	25.9	3.70	3.220	79.7
December	6.42	2.40	26.7	3.49	3.470	77.4
Year	5.04	2.34	25.0	3.1	2.986	81.9

Figura 1: Dados meteorológicos e irradiação solar diária média da região do Recôncavo da Bahia, obtidos por meio do programa Meteonorm, referente ao ano de 2019.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Segundo a Solenerg (2012), com os dados meteorológicos podemos assim encontrar os valores da equação e estimar a produção do sistema fotovoltaico de acordo com o autor supracitado Silva (2013).

O Ptot (kWp) nesta instalação da instituição, o gerador fotovoltaico será produzido por 1.200 módulos de silício poli cristalino de 335 Wp, 144 células, resultando em uma potência instalada de 402 kWp. Neste caso, Ptotal = 402 kWp. Também foi estimado que com os 1.200 módulos, de medidas (1.992 mm x 992 mm / cada) ocuparam uma área total de 2.405 m².

O RSM (h/dia) como já foi citado, refere-se a um valor que é retirado de algum banco de dados solarimétricos e, neste projeto, foi considerado o banco do CRESESB. Já PR considerado foi de 75,8%, que é um valor razoável para considerar todas as perdas, já que não é possível mensurar todas elas fisicamente.

Assim, tomando como base a fórmula e os dados anteriormente citados, a produção média mensal estimada para o gerador do projeto foi de $GMM = 402 \times 5,04 \times 0,758 \times 30 = 46.073$ kWh.

No programa de estatística R, com a introdução dos dados de consumo mensal durante Janeiro à Dezembro do ano de 2019 da Instituição FAMAM ainda com o fornecimento da concessionária de energia COELBA, obteve-se uma média de consumo mensal de 41.010,35 kWh.

Comparando então o consumo médio mensal do período de Janeiro a Dezembro do ano de 2019 de consumo que era fornecido pela concessionária COELBA em que se verificou um resultado de 41.010,35 kWh, isso somando o consumo ativo na ponta e fora da ponta, à produção de energia fotovoltaica é de 46.073 kWh, sendo abatido no consumo ativo fora da

ponta, demonstrando que os 1.200 módulos foram suficientes para suprir todo o consumo energético da Faculdade Maria Milza, resultando ainda em um sobra de 5.062,65 kWh, na qual abateu no valor de consumo ativo na ponta, como mostra o Quadro 1.

MESES	CONSUMO COM A CONCESSIONÁRIA COELBA (kWh)	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO PELO SISTEMA FOTOVOLTAICO				
		Ptot (kWh)	RSM (h/dia)	PR	Dias	GMM (kWh)
Janeiro	22.187,20	402	6,22	0,758	31	58.755,34
Fevereiro	40.715,39	402	6,08	0,758	28	51.874,85
Março	46.210,38	402	5,25	0,758	31	49.592,53
Abril	48.863,55	402	4,33	0,758	30	39.582,61
Mai	47.592,45	402	3,71	0,758	31	35.045,39
Junho	30.922,23	402	3,36	0,758	30	30.715,37
Julho	35.003,57	402	3,65	0,758	31	34.478,62
Agosto	40.836,25	402	4,41	0,758	31	41.657,72
Setembro	43.685,02	402	4,72	0,758	30	43.147,79
Outubro	47.563,40	402	5,32	0,758	31	50.253,76
Novembro	48.392,43	402	6,25	0,758	30	57.134,25
Dezembro	40.152,27	402	6,42	0,758	31	60.644,58
TOTAL (kWh)	492.124,14				TOTAL (kWh)	552.882,80
Meses	12				Meses	12
Média (kWh) /Mês	41.010,35				Média (kWh) /Mês	46.073,57

Quadro 1: Diferença entre o consumo energético da concessionária e a estimativa da produção de energia pelo sistema fotovoltaico.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

O investimento em um sistema fotovoltaico de 1.200 módulos, com todos os componentes como inversores, transformadores, dispositivos de proteção CC/CA, as estruturas metálicas, cabos de isolamento, conectores e sistema de aterramento para a instituição FAMAM, verificou-se um valor médio de R\$ 1.330.000,00. Conforme o Quadro 2 pode-se estimar o retorno financeiro investido, levando-se em consideração o aumento da tarifa de energia de 11% ao ano.

Ano	Energia Gerada (kWh/ano)	Valor investido	Geração acumulada (R\$)	Balanco (R\$)
1	551.662,00	1.330.000,00	504.689,25	-825.310,74
2	549.019,84		1.061.710,48	-268.289,51
3	546.390,34		1.670.550,83	340.550,84
4	546.390,43		2.330.701,15	1.000.701,15
5	543.773,05		3.041.655,98	1.711.655,98
6	538.577,14		3.802.913,52	2.472.013,52
7	535.997,65		4.613.975,62	3.283.975,63
8	533.430,52		5.474.347,75	4.144.347,76
9	530.875,68		6.383.538,97	5.053.538,97
10	528.333,07		7.341.061,90	6.011.061,90
11	525.802,64		8.346.432,72	7.016.432,72
12	523.284,34		9.394.832,14	8.064.832,14
13	520.778,09		10.494.461,37	9.164.461,37
14	518.283,85		11.640.508,10	10.310.508,10
15	515.801,55		12.832.502,47	11.502.502,47
16	513.331,14		14.069.978,06	12.739.978,06
17	510.872,57		15.352.471,88	14.022.471,88
18	508.425,77		16.679.524,30	15.349.524,31
19	505.990,68		18.050.679,10	16.720.679,10
20	503.567,27		19.465.483,37	18.135.483,37
21	501.155,45		20.923.487,54	19.593.487,55
22	498.755,19		22.424.245,37	21.094.245,37
23	496.366,43		23.967.313,86	22.637.313,86
24	493.989,10		25.552.253,30	24.222.253,30
25	491.623,16			27.178.627,22

Quadro 2: Estimativa de retorno financeiro do sistema fotovoltaico na Instituição FAMAM localizada no recôncavo baiano no período de 2020 com o aumento anual da tarifa de energia de 11%.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

A partir deste Quadro 2 pode-se ver que com um investimento de R\$ 1.330.000,00, em aproximadamente dois anos e um mês a economia gerada é de R\$1.364.288,02 onde se tem um retorno financeiro do investimento inicial por completo.

Segundo Freitas e Miranda (2016) a tecnologia do sistema fotovoltaico vem ganhando espaço no mercado do Brasil, embora possua custos elevados e o retorno seja em longo prazo, ainda assim compensa o valor investido para obtenção do sistema.

A utilização desse tipo de sistema traz grandes benefícios aos usuários, onde através do cálculo de valor unitário mostra que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico tem menor custo do que a fornecida por concessionária, assim o usuário economizará no consumo da energia que o seu sistema produz (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

4 | CONCLUSÃO

O sistema fotovoltaico é capaz de gerar energia elétrica através de seus módulos, que captam a radiação proveniente do sol. Esse é um sistema sustentável de grande importância, no qual, produz energia elétrica sem poluir ou prejudicar o meio ambiente, tem sido um dos grandes geradores de energia ao redor do planeta.

Para uma boa produção de energia elétrica através do sistema fotovoltaico, obviamente é preciso que o sol incida nas placas ou módulos para sua captação durante o dia, nesse sentido existem regiões do Brasil no qual a incidência solar é mais propícia para esse sistema.

O recôncavo baiano demonstrou ter um grande fator climático para o desenvolvimento, abastecimento e consumo de energias geradas pelo sistema fotovoltaico na região. Com isso verificou-se que na Faculdade Maria Milza, ao possui uma grande área para essa produção, levando em conta que a instituição possui uma estrutura que possibilitou todas as instalações dos 1.200 módulos, totalizando uma área de 2.405 m² no qual é necessária para suprir toda sua demanda energética.

A instalação do sistema de energia fotovoltaico on-grid suprirá toda a demanda da Faculdade Maria Milza de consumo ativo fora de ponta e consumo ativo na ponta, uma vez que, deixa de pagar o consumo de energia para a concessionária, pagando apenas o valor de contratado de potência.

Então com o investimento para a instalação do sistema fotovoltaico on-grid na instituição superior de ensino FAMAM, será produzido em média 46.073 kWh de demanda de consumo elétrico, que supriu toda a necessidade de consumo da instituição que em média era de 41.010,35 kWh, assim aliviando financeiramente em questão energética de consumo na ponta e fora da ponta na qual era contabilizada para a concessionária do estado da Bahia e que agora é produzida pelo sistema solar.

O investimento financeiro de R\$ 1.330.000,00 com a instalação do sistema fotovoltaico, obteve-se um retorno em dois anos e um mês, no qual os sistemas têm uma garantia de

fabricação de mais de dez anos.

Concluindo assim que com a instalação do sistema fotovoltaico on-grid na instituição de ensino superior da FAMAM localizada no recôncavo baiano recolherá grandes benefícios financeiros e energéticos com a produção de energia solar, uma vez que possui grande espaço e estrutura para as placas geradoras, reduzindo o pagamento da conta de demanda energética da concessionária COELBA e produzirá sua própria fonte de consumo energética limpa e sustentável durante anos., por estar localizada em uma região onde a geração de energia por meio do sistema solar é bastante vantajoso.

REFERÊNCIAS

SOUZA, R. **Energia Solar / Tudo sobre Energia Solar / Sistema Fotovoltaico Off-Grid (Isolado): Você acha que sabe tudo?. Blue Sol - energia solar.** Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/diferenca-sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-e-isolados/>> Acesso: 30 jun. 2020.

BORBA, M. C. V.; GASPAR, N. F. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho.** São Paulo: FAPESP, 2007.

BRASIL. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Energias Renováveis: Gestão eficiente da energia na indústria da construção.** Brasília: CBIC, 2016.

CARVALHO JÚNIOR, R. **Instalações Elétricas e o Projeto de Arquitetura.** 9. ed. São Paulo: Blucher, 2019.

DANTAS, S. G. Dantas; POMPERMAYER, F. M. **VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL E POSSÍVEIS EFEITOS NO SETOR ELÉTRICO.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília: Rio de Janeiro : Ipea , 2018

FGV EAESP. **Panorama de Energias Renováveis: Setor Industrial e América Latina,** São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas da Fundação Getulio Vargas, 2016.

FREITAS, M. G. D; MIRANDA, A. D. A. R. **Custo/Benefício e Implantação de Sistema Fotovoltaico.** Universidade de Rio Verde – UNIRV, Goiás, Volume, Número, p. 2-15, nov/2016. Disponível em: <<http://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/CustoBeneficio%20e%20Implata%C3%A7%C3%A3o%20de%20Sistema%20Fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2020

KALOGIROU, S. A. **Engenharia de Energia Solar - Processos e Sistemas.** São Paulo: Elsevier Editora, 2016

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. In: MANUAL de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. cap. 1, p. 47-65. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 29 jun. 2020.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: UFSC / LABSOLAR, 2004

SILVA, J. V. C. **Pré-dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para a universidade do sudoeste da Bahia, campus de Itapetinga**. Universidade de Lavras- MG, 2013. Disponível em: <<https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2013/03/TCC-Valderi.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2020.

SILVA, G. D. P.; SOUZA, M. J. R. **ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO: IMPLICAÇÕES PARA UM SISTEMA FLUTUANTE NO LAGO BOLONHA, BELÉM-PARÁ**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.6, n.2, 2017

SOLENERG. **Cálculos do Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

TRAPANI, K.; et. at. **Novel offshore application of photovoltaics in comparison to conventional marine renewable energy technologies**. Renewable Energy, v. 50, p. 879-888, 2013.

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.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acoplamento magnético ressonante forte 84

Automação de iluminação 150

C

Cálculo de perdas de energia 39

Composto direito/esquerdo (CRLH) 117

Controle da iluminação 150

Correlação-cruzada 15

Custos anuais de construção de linhas de distribuição 39

D

Detecção 94, 154

Durabilidade de rede de Bragg 25

E

Eficiência energética 7, 150, 151, 153, 160

Encapsulamento 25, 27, 29, 30, 31, 32, 35

Energia eólica 161, 162, 168

Enlace analógico a fibra óptica 1, 13

Enlace fotônico sob baixa polarização 1

Estruturas periódicas 117

F

FBG 5, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 35, 36, 37

Fotovoltaico 7, 94, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180

Fuzzy Logic 5, 54, 55, 65, 68

I

Índice de refração negativo 117

Inteligência artificial 55

L

Lei de Kelvin 38, 39

LTE 7, 118, 125, 127, 128, 129, 136, 137

M

Metamateriais 6, 84, 117

N

Neuro-Fuzzy 127, 129, 130, 133, 134, 136, 137

O

Otimização estática 39

P

Perda de propagação 127, 128, 136

Permeabilidade negativa 117

Permissividade negativa 117

PID 6, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105

Planejamento de potência reativa 106

Proteção contra surtos 139, 140

R

Rádio propagação sobre pontes 127

Rede de fibra de Bragg (FBG) 15

Refrigerador 139, 140, 141, 146, 147, 148

Reversão 94

Revisão literária 94

RFBG 5, 25, 26, 27, 28, 31, 32

RF em fotônica 1

Rotação 161, 162, 164, 166, 167, 168, 169

S

Sensor à fibra óptica 15

Sistema DALI 150, 154, 155

Sistemas de alívio 15

Sistemas de distribuição 106, 115, 141

Sistemas de potência 106

Supercondutividade 84

Surtos elétricos 7, 139, 140, 141, 142, 144, 146, 148, 149

T

Televisor 139, 140, 141, 144, 145

Transmissão de energia sem fio 6, 84

V

Vazão 14, 15

Velocidade do vento 161, 163, 164, 165, 166, 167, 168

Vida útil 47, 139, 140, 141, 147, 148, 170

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  @atenaeditora
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA 2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br