

ENGENHARIA ELÉTRICA

Relatos de Pesquisa

Acbal Rucas Andrade Achy
Gildeberto de Souza Cardoso
Huilman Sanca Sanca
(Orgs.)



Editora UFRB

Engenharia elétrica: relatos de pesquisa

REITOR

Fábio Josué Souza dos Santos

VICE-REITOR

José Pereira Mascarenhas Bisneto

SUPERINTENDENTE

Rosineide Pereira Mubarack Garcia

CONSELHO EDITORIAL

Ana Lúcia Moreno Amor

Danillo Silva Barata

Josival Santos Souza

Luiz Carlos Soares de Carvalho Júnior

Maurício Ferreira da Silva

Paulo Romero Guimarães Serrano de Andrade

Robério Marcelo Rodrigues Ribeiro

Rosineide Pereira Mubarack Garcia (presidente)

Sirlara Donato Assunção Wandenkolk Alves

SUPLENTES

Carlos Alfredo Lopes de Carvalho

Marcílio Delan Baliza Fernandes

Wilson Rogério Penteado Júnior

COMITÊ CIENTÍFICO

(Referente ao Edital nº. 001/2020 EDUFRB – Coleção Sucesso
Acadêmico na Graduação da UFRB)

Acbal Rucas Andrade Achy

Gildeberto de Souza Cardoso

Huilman Sanca Sanca

EDITORA FILIADA À



Associação Brasileira
das Editoras Universitárias

Acbal Rucas Andrade Achy
Gildeberto de Souza Cardoso
Huilman Sanca Sanca
(Orgs.)

Engenharia elétrica: relatos de pesquisa



Editora UFRB
Cruz das Almas - Bahia
2022

Copyright©2022 by Acbal Rucas Andrade Achy, Gildeberto de Souza Cardoso
e Huilman Sanca Sanca

Direitos para esta edição cedidos à EDUFRB.

Projeto gráfico e editoração eletrônica:

Antonio Vagno Santana Cardoso

Capa

Huilman Sanca Sanca

Revisão e normatização técnica:

Acbal Rucas Andrade Achy

A reprodução não-autorizada desta publicação, por qualquer meio,
seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9.610/98.

E57

Engenharia elétrica: relatos de pesquisa / Organizadores: Acbal Rucas Andrade Achy, Gildeberto de Souza Cardoso e Huilman Sanca Sanca. – Cruz das Almas, BA: EDUFRB, 2022.

252p.; il.

Este Livro Eletrônico é parte da Coleção Sucesso Acadêmico na Graduação da UFRB – Volume XXIX.

ISBN: 978-65-88622-81-0.

1.Engenharia elétrica – Sistemas de energia elétrica.
2.Engenharia elétrica – Pesquisa e desenvolvimento – Análise.
I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. II.Achy, Acbal Rucas Andrade.
III.Cardoso, Gildeberto de Souza. IV.Sanca, Huilman Sanca.
V.Título.

CDD: 621.3

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB. Responsável pela Elaboração – Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5/1615). Os dados para Catalogação foram enviados pelos usuários via formulário eletrônico.

Livro publicado em 27 de abril de 2022.



Editora UFRB

Rua Rui Barbosa, 710 – Centro
44380-000 Cruz das Almas – Bahia/Brasil

Tel.: (75) 3621-7672

editora@reitoria.ufrb.edu.br

www.ufrb.edu.br/editora

Sumário

Agradecimentos.....09

Apresentação

Acbal Rucas Andrade Achy, Gildeberto de Souza Cardoso,
Huilman Sanca Sanca 11

PARTE I

PESQUISAS RELACIONADAS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Localização de faltas em linhas de transmissão

Fellipe Meira Souza e Souza,
Huilman Sanca Sanca 17

Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão

Maurício Andrade Marinho,
Huilman Sanca Sanca 39

Avaliação dos algoritmos de estimação de fasores em SEE

Alfredo Plinio de Araújo Neto,
Huilman Sanca Sanca 63

Aplicação residencial do Programa Brasileiro de Etiquetagem

Railana Araujo da Silveira,
Joaquim Jorge Martins Galo 85

PARTE II

PESQUISAS RELACIONADAS A ENERGIA FOTOVOLTAICA

Sistemas fotovoltaicos flutuantes: Estimativa de potencial

Luiza Rocha Gumes,
Huilman Sanca Sanca 111

Projeto de um sistema FV para o pavilhão das engenharias UFRB
Fillipe De Almeida Andrade,
Acbal Rucas Andrade Achy 127

Projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede
Vitor Oliveira E Silva,
Joaquim Jorge Martins Galo 149

PARTE III

PESQUISAS RELACIONADAS A ÁREA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Projeto de bancada de gerenciamento inteligente de energia
Vitor Oliveira e Silva,
Teófilo Paiva Guimarães Mendes 175

Sistema térmico para análise de modelagem e controle
Acbal Rucas Andrade Achy,
Camilla de Almeida Araújo 189

Desenvolvimento de sistema didático de automação e controle
Breno Prazeres Barbosa,
Gildeberto de Souza Cardoso,
Teófilo Paiva Guimarães Mendes 219

Sobre os autores 247

Agradecimentos

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, principalmente, a todos os autores, discentes e professores, que contribuíram com as suas pesquisas para o desenvolvimento desta obra, aos docentes que trabalharam no comitê acadêmico e, finalmente, à EDUFRB pela oportunidade de reunirmos aqui todos esses “relatos de pesquisa” que são, apenas, uma pequena amostra de todas as pesquisas que vem sendo desenvolvidos no Curso de Engenharia Elétrica da UFRB.

Apresentação

*Acbal Rucas Andrade Achy
Gildeberto de Souza Cardoso
Huilmán Sanca Sanca*

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) é uma das principais instituições de ensino superior pública do estado da Bahia e, principalmente, do Recôncavo baiano. Com os seus 64 cursos de graduação e os seus 34 cursos de pós-graduação, entre especializações, mestrados e doutorados, a UFRB vem formando profissionais nas mais diversas áreas do conhecimento, contribuindo assim, no desenvolvimento sócio econômico desta região e fornecendo profissionais ao mercado laboral que ano-a-ano vem necessitando de profissionais altamente qualificados.

Na graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, aborda-se o estudo e aplicações da eletricidade para solucionar problemas nas mais diversas áreas, a exemplo da geração, transmissão, distribuição, proteção, controle e operação da energia elétrica, desenvolvimento de *hardwares*, equipamentos médicos, desenvolvimento de técnicas de controle industrial, dentre outros.

Com o intuito de estimular a sistematização e socialização de pesquisas científicas, experiências, inovações tecnológicas, inovações educacionais e culturais, fundamentalmente desenvolvidas nos cursos de graduação, é que surgiu a iniciativa denominada “Coleção Sucesso Acadêmico na Graduação da UFRB” que objetiva a publicação das experiências educativas e de pesquisa, exitosas e relevantes, em formato de livro-eletrônico, *e-book*. Portanto, é com muito prazer que apresentamos esse volume, composto por trabalhos de discentes, professores e grupos de pesquisa do curso de En-

genharia Elétrica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia intitulado “Engenharia Elétrica: Relatos de Pesquisa”.

Nesta obra, apresentam-se, alguns dos principais trabalhos de pesquisa desenvolvidos por estudantes e professores e, nesta ocasião, abordando, principalmente, temas das áreas de Sistemas Elétricos de Potência, Energias Renováveis e Automação ao longo dos seus 10 capítulos, os quais estão cuidadosamente selecionados e divididos em três partes, isto, com a intensão de auxiliar o leitor em seu percurso pelos diversos relatos de pesquisa que encontrará aqui.

Na Parte I, apresentam-se alguns temas relacionados aos Sistemas Elétricos de Potência, destacando-se as análises realizadas em linhas de transmissão (LT) da energia elétrica, especificamente, no que diz respeito ao diagnóstico de faltas em LT e as suas aplicações, e que são abordados temas como a localização e classificação de faltas em linhas de transmissão elétrica e a estimação de fasores para aplicação na proteção das LT, utilizando-se, modelos matemáticos, básicos e atuais, para a análise e diagnóstico de faltas em sistemas de energia elétrica. Por outro lado, nesta Parte I, aborda-se também, uma aplicação prática da análise de eficiência energética, isto, de acordo com o programa brasileiro de etiquetagem aplicado a residências típicas do Recôncavo.

Na Parte II, apresentam-se alguns temas relacionados às energias renováveis, especificamente, da energia solar fotovoltaica. É muito conhecido da necessidade da diversificação da matriz energética brasileira, principalmente, com fontes oriundas de energias menos poluentes e, notadamente, renováveis. Com este intuito, nesta Parte II, apresentam-se algumas análises e aplicações práticas, nos processos e etapas para a elaboração de projetos fotovoltaicos apresentando-se todos os cálculos necessários para este fim. Apresenta-se, inicialmente, uma estimativa de

potencial fotovoltaico do reservatório na usina hidrelétrica Pedra do Cavalo utilizando-se a tecnologia de sistemas fotovoltaicos flutuantes. Seguidamente, apresentam-se, dois projetos, de aplicação prática, de sistemas fotovoltaicos onde são mostrados todos os cálculos, em detalhe, para a elaboração de projeto até o seu comissionamento.

Na Parte III, apresentam-se alguns temas relacionados à Automação e Controle. Inicialmente, apresenta-se um projeto de bancada de gerenciamento inteligente de energia, que objetiva a que os discentes adquiram maiores conhecimentos sobre os sistemas de energia híbridos e o gerenciamento dos seus componentes. Seguidamente, apresenta-se um sistema térmico para análise de modelagem e controle, objetivando-se o desenvolvimento e implementação de um kit didático para estudos de modelagem e técnicas de controle em sistemas térmicos de aquecimento. Finalmente, apresenta-se um estudo para o desenvolvimento de um sistema didático de automação e controle objetivando-se o desenvolvimento de um sistema supervisorio em ambiente virtual, fundamentado nos ambientes de aprendizagem simulados, para o aprimoramento e melhora do ensino/aprendizagem dos discentes do curso.

Convidamos-vos a conhecer alguns estudos realizados desta instigante área do conhecimento.

PARTE I
PESQUISAS RELACIONADAS A SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Localização de faltas em linhas de transmissão

*Fellipe Meira Souza e Souza
Huilman Sanca Sanca*

Introdução

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são projetados para fornecer eletricidade dentro de padrões definidos de qualidade, confiabilidade e continuidade. Com o aumento cada vez mais constante do consumo de energia elétrica em todo o mundo, a configuração deste sistema tem se tornado cada vez mais complexa, e à medida que cresce, também aumentam o número de ocorrência de defeitos. Dentre os componentes de um SEE, a linha de transmissão (LT) é o elemento mais susceptível a falhas, principalmente por conta de sua larga extensão e os mais diversos tipos de locais onde se encontram, dificultando o trabalho das concessionárias de energia em operações de manutenção, reparo e monitoramento. Apresenta-se na Tabela 1, de acordo com Coury (1987), um registro de ocorrência de faltas em um sistema elétrico de 500 kV em um período de dez anos, a partir dela, é possível notar a predominância das faltas em linhas de transmissão, somando cerca de 80% do total das faltas que ocorreram.

Tabela 1: Faltas que ocorrem no Sistema Elétrico.

Equipamentos Faltosos	Número de Faltas
Linha de Transmissão	82
Circuitos Disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Erro humano	5

Fonte: Adaptada de Coury (1987).

Um sistema de proteção pode ser definido como um conjunto de equipamentos que têm como objetivo proteger o SEE contra faltas ou quaisquer outras condições adversas de operação. Portanto, para um bom funcionamento do sistema, é necessário que o a proteção atue de forma rápida e precisa para evitar possíveis indisponibilidades de fornecimento, acarretando em severas punições para as empresas de energia elétrica por parte da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Portanto, este trabalho tem como avaliar um método de localização de falta utilizando fasores das componentes da frequência fundamental, onde será realizado, especificamente um levantamento bibliográfico de diferentes métodos para localização de faltas, avaliando suas vantagens e limitações, realizar as simulações de ocorrência de faltas através do programa Alternative Transient Program (ATP), para serem implementados os métodos de localização de faltas no programa *MATLAB*[®]:

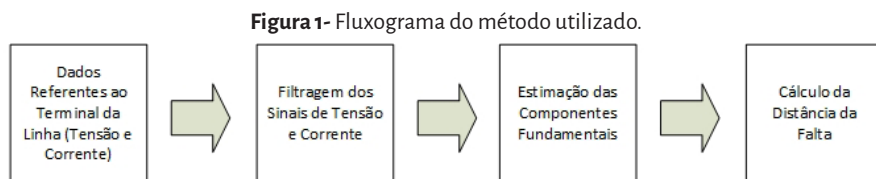
- Avaliar o desempenho do método e validar o algoritmo implementado considerando diferentes situações de faltas em LT's reais variando os seguintes parâmetros:
- Local de ocorrência da falta;
- Tipo de falta;
- Resistência de falta;
- Ângulo de incidência da falta.

Materiais e métodos

Nesta seção apresenta-se o método de localização de faltas que será utilizado no trabalho, desde a etapa de aquisição dos dados dos RDP's (Registradores Digitais de Perturbação) até a estimação do ponto da falta, utilizando um algoritmo computacional.

A metodologia se baseia na estimação do ponto da falta através da estimação dos fasores fundamentais de sinais de tensão e corrente utilizando dados de um terminal da linha.

Mostra-se, na Figura 1, as sub-rotinas que serão implementadas através do programa Matlab para a localização da falta. A simulação dos eventos faltosos no sistema elétrico a ser utilizado serão realizados no programa ATP (*Alternative Transiente Program*) e será apresentado no próximo capítulo.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Filtragem dos sinais

Para que uma determinada componente de frequência f do sinal analógico possa ser completamente reconstituída durante um processo de amostragem realizado por conversores analógicos digitais (A/D), a frequência deve ser, no mínimo, igual a $2f$ (Teorema de Nyquist).

Quando ocorrem faltas na linha, gerando dessa forma transitórios eletromagnéticos que possuem componentes de alta frequência juntamente com os componentes da frequência fundamental, e como a taxa de amostragem dos relés digitais são fixas, é necessário uma filtragem analógica antes dos relés processar os dados obtidos dos transformadores de instrumentos (TP's e TC's) para evitar que ocorra uma sobreposição dos espectros de frequência (*aliasing*) (MACHADO, 2013). Para evitar este problema, são utilizados filtros passa-baixas, também chamados de fil-

tros *anti-aliasing*, cuja frequência de corte deve ser, no máximo, igual a metade da taxa de amostragem (PHADKE; THORPE, 2009).

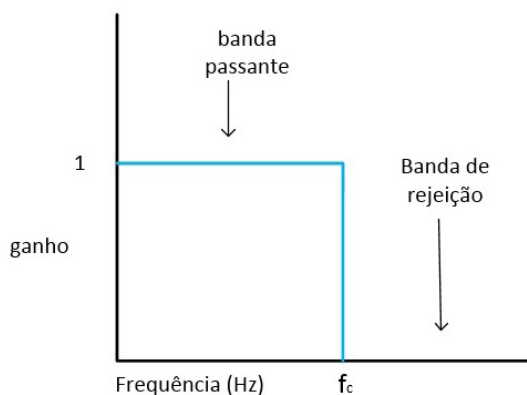
O efeito *aliasing* causa uma dificuldade na distinção entre as componentes de alta e baixa frequência no processo de digitalização, ou seja, uma componente de baixa frequência que não existia no sinal original pode se tornar aparente no sinal amostrado devido à sobreposição de espectros de frequência. Consequentemente, o sinal digitalizado pode não corresponder corretamente ao sinal original se não for considerado o efeito deste fenômeno (LAURENTI *et al.* 2009). Neste trabalho será utilizado o filtro passa-baixa *Butterworth* para a realização deste processo.

Filtros Butterworth

Existem diversos tipos de filtros analógicos, como Butterworth, Chebyshev, Bessel. Em algoritmos de proteção, os filtros Butterworth de segunda ordem são normalmente os mais utilizados (PHADKE; THORPE, 2009), devido ao fato de não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007).

Um filtro passa-baixa real deveria possuir uma zona bem definida de delimitação entre a banda de passagem e a banda de rejeição. No entanto, a curva da amplitude versus frequência não possui um ponto de demarcação bem definido indicando os extremos de cada banda. Portanto, um filtro real é uma aproximação de um filtro ideal (LAURENTI *et al.*, 2009). Na Figura apresenta-se a característica de um filtro passa-baixa ideal com frequência de corte f_c .

Mesmo diante de uma relação inversa entre a exatidão do filtro e seu tempo de resposta, os filtros Butterworth de segunda ou terceira ordem já satisfazem os requisitos de operação dos relés digitais em aplicações práticas (SILVA, 2009).

Figura 2: Filtro passa-baixa ideal.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Estimação dos Fasores Fundamentais

O método proposto neste trabalho utiliza as componentes fundamentais de tensão e corrente para estimar o ponto de ocorrência de uma falta. Após a ocorrência de uma falta no sistema elétrico, os sinais de tensão e corrente pós-falta sofrem algumas alterações que impedem uma melhor análise. Esses sinais apresentam além da componente fundamental, uma componente CC e componentes de alta-frequência. Desta forma, para uma eficiente localização do ponto de falta, é necessário um método para extrair a componente fundamental de corrente e tensão do sinal pós-falta.

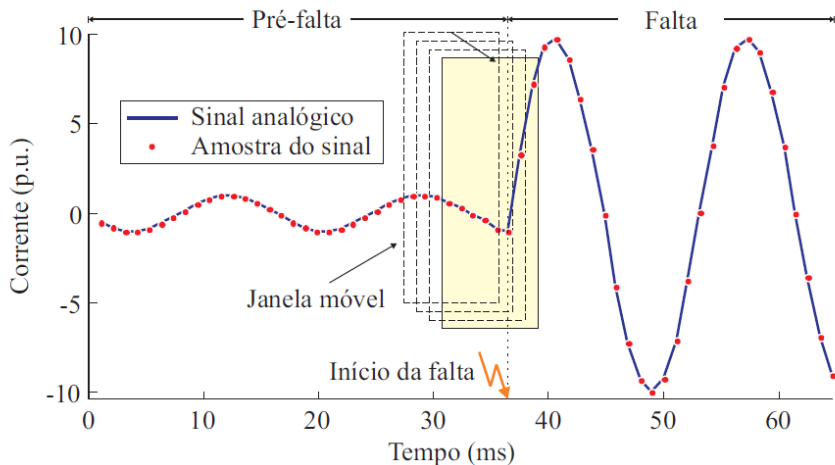
Janelamento dos sinais

Para realizar a estimação dos fasores fundamentais de tensão e corrente é necessário realizar mais uma importante etapa. A partir das amostras das formas de onda obtidas através da filtragem do sinal analógico, inicia-se um processo chamado de janelamento. Os algoritmos

de estimação fasorial utilizam como entrada um conjunto específico de amostras do sinal a ser estimado, denominado janela de dados. Para cada instante de amostragem a janela de dados é deslocada até que uma nova amostra seja incluída na janela e a anterior seja descartada (PHADKE; THORPE, 2009).

Na Figura 3 apresenta-se o processo de janelamento para um dado sinal de corrente durante os períodos de pré-falta e falta (LOPES, 2014). A cada atualização da janela de dados, a estimação do módulo e da fase do fasor na frequência fundamental relativo ao sinal avaliado é realizada.

Figura 3: Janelamento de um sinal de corrente.



Fonte: Adaptado de Lopes (2014).

TDF de Ciclo Completo

A extração das componentes fundamentais foi feita utilizando a TDFCC (Transformada de Fourier de Ciclo Completo), que extrai a componente fundamental da forma de onda a partir do produto de um ciclo de amostras dessa forma de onda com as funções seno e cosseno.

Um sinal $x(t)$ periódico e contínuo no tempo pode ser representado matematicamente pela seguinte expressão (equação 1).

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (1)$$

Sendo ω_0 a frequência angular; a_0, a_n, b_n são os coeficientes da série de Fourier e n é a n -ésima harmônica do sinal $x(t)$. Com intuito de extrair a componente de frequência fundamental de um sinal $x(t)$, devem ser calculados os coeficientes a_n e b_n da série de Fourier, sendo estes, respectivamente, as partes real e imaginária do sinal avaliado.

A partir do equacionamento apresentado em Phadke; Thorpe, (2009), utilizou-se o desenvolvimento da série de Fourier para um período equivalente a um ciclo fundamental de um sinal digitalizado periódico e considerando N amostras por ciclo, as componentes reais e imaginárias desse sinal periódico são:

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N} m\right) \quad (2)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N} m\right), \quad (3)$$

sendo $x(k - N + m)$, em (2) e (3), a m -ésima amostra da k -ésima janela de dados do sinal x janelado.

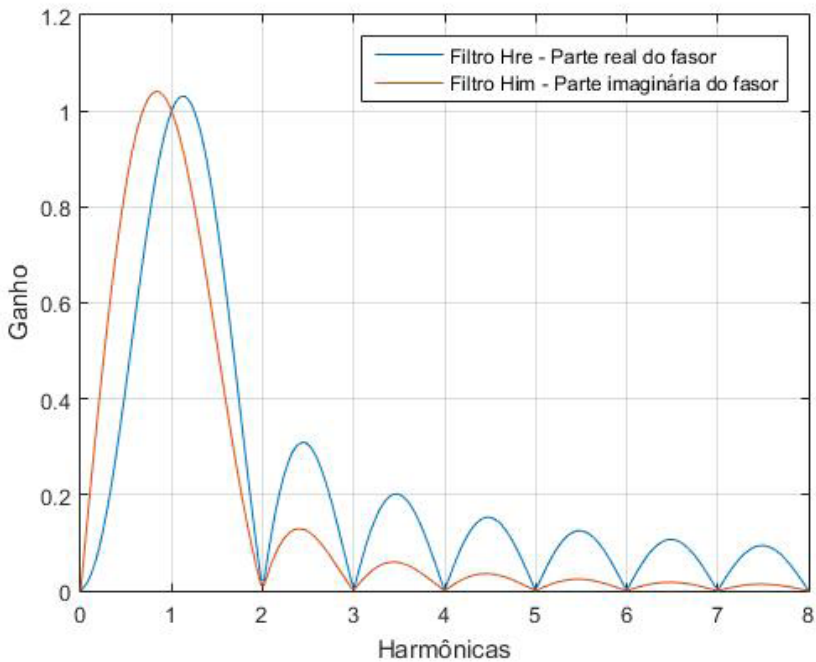
Após o equacionamento da parte real e imaginária, pode-se obter o módulo $|X|$ e a fase $\angle X$ na frequência fundamental dos fasores em análise a partir de:

$$|X| = \sqrt{X_{re}^2 + X_{im}^2} \quad (4)$$

$$\angle X = \tan^{-1} \frac{X_{im}}{X_{re}} \quad (5)$$

A resposta em frequência para o algoritmo da TDFCC é mostrada na Figura 4. Como se pode notar, os módulos são unitários para a frequência fundamental e as demais componentes harmônicas são eliminadas.

Figura 4: Módulo da resposta em frequência para o método TDFCC.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Localização da falta

Nesta seção serão apresentados os princípios envolvidos na técnica de localização de faltas utilizando fasores fundamentais de tensão e corrente trifásico de um terminal da LT, baseado no equacionamento de fasores de tensão e correntes pré e pós-falta (TAKAGI *et al.*, 2009). Os fasores capturados do terminal da LT são utilizados pelos relés de proteção para calcular a impedância aparente entre o equipamento e o local da falta, e dessa forma conseguir estimar o local onde ocorreu o defeito.

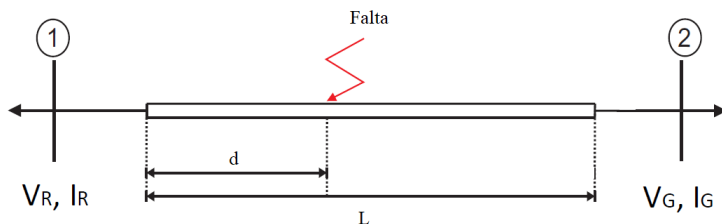
Esses algoritmos são utilizados devido à sua simplicidade de implementação e por fornecerem boas estimativas do local de falta em diferentes condições de configuração da LT.

Como já citado neste trabalho, existem algoritmos que utilizam dados de um terminal e dois terminais da linha, cada um possui suas particularidades e dependendo do cenário de falta, apresentam melhores ou piores resultados (DAS *et al.*, 2014).

Método de Um Terminal

Apresenta-se, na Figura 5, um sistema elétrico sob a ocorrência de uma falta. Este modelo servirá como base para a demonstração da formulação matemática utilizada no método que será aplicado neste trabalho.

Figura 5: Sistema elétrico com dois terminais sob condição faltosa.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Considerando a Figura 5, pode-se encontrar a relação entre a tensão e corrente para a barra R de acordo com a Lei de Kirchhoff. Sendo Z_F a impedância de falta e \hat{I}_F o fasor de corrente de falta:

$$\hat{V}_R = dZ_{L1}\hat{I}_R + Z_F\hat{I}_F, \quad (6)$$

sendo Z_{L1} a impedância de sequência positiva da LT. Os valores de \hat{V}_R e \hat{I}_R irão variar de acordo com o tipo de falta. Na Tabela 2 apresentam-se alguns valores aplicados neste trabalho.

Tabela 2: Sinais de entrada para o método aplicado.

Tipos de Falta	\hat{V}	\hat{I}
AT	V_A	$I_A + K_0 I_0$
BT	V_B	$I_B + K_0 I_0$
CT	V_C	$I_C + K_0 I_0$
AB, ABT, ABC	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$
BC, BCT, ABC	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$
CA, CAT, ABC	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$

Fonte: Autoria Própria (2020).

Sendo o sinal I_0 a corrente de sequência zero e K_0 é o fator de compensação da corrente de sequência zero, que pode ser determinado segundo: (DAS *et al.*, 2014).

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}, \quad (7)$$

sendo Z_{L0} a impedância de sequência zero da LT.

Dividindo-se a equação (6) por \hat{I}_R , tem-se a equação que serve como base para o desenvolvimento de algoritmos de um terminal baseados na estimação das componentes fundamentais de corrente e tensão:

$$Z_{aparente} = \frac{\hat{V}_R}{\hat{I}_R} = dZ_{L1} + Z_F \frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_R}. \quad (8)$$

O método utilizado neste trabalho foi proposto por Takagi *et al.* (1982), onde foi desenvolvido um algoritmo que minimizasse a influência das variáveis que não são conhecidas (Z_F e \hat{I}_F). A escolha deste método se deu por conta da sua facilidade de implementação e por ser um algoritmo já bastante difundido em pesquisas de localização de faltas apresentando sempre bons resultados pra diversas condições de falta.

De acordo com (DAS *et al.*, 2014), o método de Takagi propõe uma melhora em relação ao método da reatância simples (um método mais básico que considera que a impedância de falta é puramente resistiva) através da retirada da corrente da carga da corrente total da falta. Usando o princípio da superposição, o sistema durante a falta é decomposto em uma rede pré-falta e “puramente” em falta.

Para eliminar a dependência da resistência de falta para o cálculo do local do defeito, o método de Takagi considera que a linha de transmissão é homogênea, ou seja, as impedâncias das fontes possuem o mesmo ângulo de impedância que a LT. Dado essas considerações, este método utiliza de uma corrente ΔI que significa a diferença entre a corrente pós e pré-falta. A partir destas informações, o local da falta é estimado de acordo com os valores imaginários dos fasores envolvidos no cálculo mediante:

$$d = \frac{\text{imag}(\hat{V}_R \Delta \hat{I}_R^*)}{\text{imag}(Z_{L1} \hat{I}_R \Delta \hat{I}_R^*)}, \quad (9)$$

sendo \hat{I}_R^* o conjugado do elemento incremental de corrente pós e pré-falta. Conforme Tabela 2, os valores de \hat{V}_R e \hat{I}_R irão variar de acordo com o tipo de falta.

Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises das simulações realizadas no algoritmo de localização de faltas, utilizando apenas um terminal da LT. O algoritmo completo foi implementado no programa MATLAB e testado usando-se dados obtidos através das simulações do programa ATP.

Os resultados serão apresentados através de tabelas e gráficos. O erro percentual relativo (ϵ_{rel}) foi calculado de acordo com a equação (10).

$$\epsilon_{rel} (\%) = \left| \frac{d_{estimada} - d_{real}}{d_{estimada}} \right| \times 100 \quad (10)$$

$$\epsilon_{abs} (km) = |d_{estimada} - d_{real}| \quad (11)$$

$$\epsilon_{med} (\%) = \left| \frac{\sum_1^N \epsilon_{rel} (\%)}{N} \right|. \quad (12)$$

Sendo, $d_{estimada}$ é a distância calculada através do algoritmo de localização e d_{real} é a distância real de onde ocorre a falta a partir dos dados de simulação do programa ATP. Sendo N o número de testes realizados, o erro absoluto (ϵ_{abs}) e o erro médio total (ϵ_{med}) são calculados em (11) e (12), respectivamente.

Foram realizadas simulações para os mais diversos tipos de falta que podem ocorrer numa linha de transmissão. As faltas que foram analisadas a priori possuíam como característica um ângulo de incidência de 90° e uma resistência de falta de 10Ω , além disso, o sistema de aquisição de dados possuía uma taxa de amostragem de $960Hz$. Após as primeiras simulações com estes parâmetros, foram realizadas algumas alterações para se avaliar o desempenho do método em condições distintas de comportamento de uma falta.

Localização de faltas

Para avaliar o desempenho do método de localização para qualquer tipo de falta existente em uma linha de transmissão, foram realizadas diversas simulações. A princípio, apenas foi variada a distância para verificar a precisão do algoritmo de localizar as faltas em qualquer ponto da linha.

Pode-se observar a partir da Tabela 3, referente a simulação de uma falta na fase A do sistema elétrico em questão, que a distância de ocorrência da falta foi variada a cada 9 km de extensão da LT (Este mesmo padrão foi mantido para as outras simulações nas demais fases). Foram calculados a partir de (10), (11) e (12) os erros relativos (%), absolutos (km) e médios (%) de cada uma das configurações de falta. As Tabelas 3, 4, 5 e 6, apresentam alguns dos resultados encontrados para as diversas configurações de falta que podem ocorrer nas três fases de um sistema elétrico.

Tabela 3: Falta fase-terra AT.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	18,90	0,90	4,762
27	27,08	0,08	0,295
36	35,79	0,21	0,587
45	44,71	0,29	0,649
54	53,75	0,25	0,465
63	62,80	0,20	0,318
72	71,88	0,12	0,167
81	80,93	0,07	0,086
90	89,98	0,02	0,022
99	99,00	0,00	0,000
108	108,01	0,01	0,009
117	117,00	0,00	0,000
126	125,98	0,02	0,016
135	134,94	0,06	0,044
144	143,89	0,11	0,076

153	152,84	0,16	0,105
162	161,78	0,22	0,136
Erro Médio			0,455

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4: Falta fase-fase-terra ABT.

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	15,94	2,06	12,923
27	25,42	1,58	6,216
36	34,86	1,14	3,270
45	44,24	0,76	1,718
54	53,41	0,59	1,105
63	62,58	0,42	0,671
72	71,94	0,06	0,083
81	81,22	0,22	0,271
90	90,28	0,28	0,310
99	99,40	0,40	0,402
108	108,47	0,47	0,433
117	117,52	0,52	0,442
126	126,53	0,53	0,419
135	135,52	0,52	0,384
144	144,48	0,48	0,332
153	153,42	0,42	0,274
162	162,33	0,33	0,203
Erro Médio			1,733

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5: Falta fase-fase (BC).

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	17,08	0,92	5,386
27	24,99	2,01	8,043
36	33,32	2,68	8,043

45	41,93	3,07	7,322
54	50,72	3,28	6,467
63	59,66	3,34	5,598
72	68,69	3,31	4,819
81	77,78	3,22	4,140
90	86,93	3,07	3,532
99	96,11	2,89	3,007
108	105,33	2,67	2,535
117	114,58	2,42	2,112
126	123,84	2,16	1,744
135	133,12	1,88	1,412
144	142,41	1,59	1,116
153	151,72	1,28	0,844
162	161,04	0,96	0,596
Erro Médio			3,925

Fonte: Autoria própria(2020).

Tabela 6: Falta fase-fase-fase (ABC).

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	16,93	1,07	6,320
27	25,84	1,16	4,489
36	34,91	1,09	3,122
45	44,05	0,95	2,157
54	53,11	0,89	1,676
63	62,24	0,76	1,221
72	71,46	0,54	0,756
81	80,66	0,34	0,422
90	89,73	0,27	0,301
99	98,84	0,16	0,162
108	107,91	0,09	0,083
117	116,97	0,03	0,026
126	126,00	0,00	0,000
135	135,01	0,01	0,007
144	144,00	0,00	0,000
153	152,97	0,03	0,020
162	161,93	0,07	0,043
Erro Médio			1,224

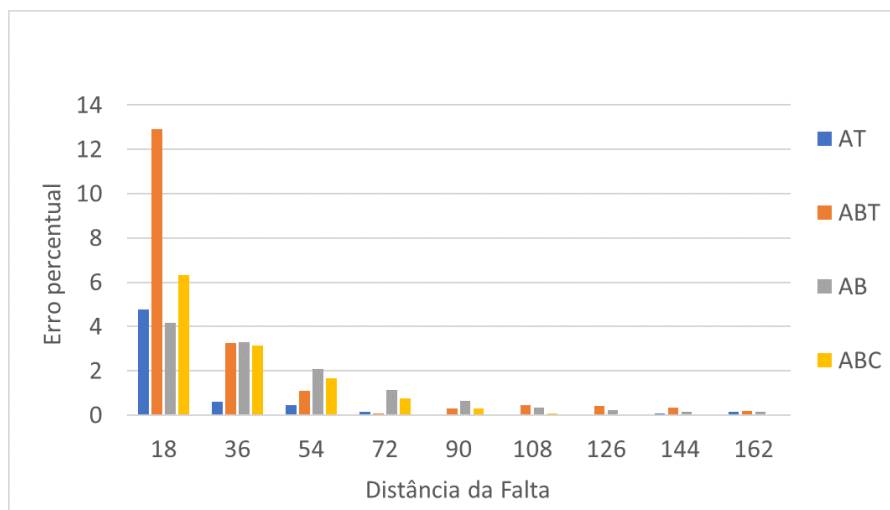
Fonte: Autoria própria (2020).

Como pode-se observar, o algoritmo apresentou valores de erros bem satisfatórios para a localização de faltas dos mais diversos tipos de faltas.

Algo que é perceptível após a análises das tabelas é que as faltas que ocorrem mais próximas ao terminal de medição que fornecem os dados de tensões e correntes utilizados no algoritmo, tem sua localização estimada de maneira mais precisa do que as faltas distantes do terminal de medição.

O gráfico da Figura 6 mostra diversos cenários de falta para a fase A. A partir do mesmo é possível notar o quanto o erro percentual diminuiu à medida que se aproxima do terminal de medição. É importante notar também que os valores dos erros relativos encontrados para faltas que envolvem a terra são bastante próximos das faltas que não envolvem a terra, exceto para a falta ABT, que ocorreu bem distante do terminal de medição e teve um erro superior a outros tipos de falta que ocorreram no mesmo local.

Figura 6: Comparação de diversos cenários de falta na fase A.C.



Fonte: Autoria própria(2020).

Diferentes Condições de Falta

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações referentes a fase A do sistema elétrico em estudo com algumas mudanças nos parâmetros de falta como o ângulo de incidência e resistência de falta. Novas condições de simulação:

- Ângulo de incidência de 45° e resistência de falta de 10Ω (não foi alterada em relação a simulação anterior), variando-se as distâncias do ponto de falta;
- Ângulo de incidência de 45° e resistência de falta de 2Ω .

Tabela 7: Falta fase-terra (AT) com ângulo de incidência de 45° e resistência de falta de 10Ω .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	18,31	0,31	1,693
27	26,74	0,26	0,972
36	35,61	0,39	1,095
45	44,65	0,35	0,784
54	53,74	0,26	0,484
63	62,86	0,14	0,223
72	71,96	0,04	0,056
81	81,03	0,03	0,037
90	90,09	0,09	0,100
99	99,11	0,11	0,111
108	108,12	0,12	0,111
117	117,11	0,11	0,094
126	126,07	0,07	0,056
135	135,02	0,02	0,015
144	143,96	0,04	0,028
153	152,89	0,11	0,072
162	161,81	0,19	0,117
Erro Médio			0,356

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 8: Falta fase-terra (AT) com ângulo de incidência de 45° e resistência de falta de 2 Ω .

Distância Real (km)	Distância Estimada (km)	Erro Absoluto (km)	Erro (%)
18	20,01	2,01	10,045
27	29,02	2,02	6,961
36	38,07	2,07	5,437
45	47,10	2,10	4,459
54	56,11	2,11	3,760
63	65,11	2,11	3,241
72	74,08	2,08	2,808
81	83,03	2,03	2,445
90	91,95	1,95	2,121
99	100,85	1,85	1,834
108	109,73	1,73	1,577
117	118,59	1,59	1,341
126	127,44	1,44	1,130
135	136,26	1,26	0,925
144	145,06	1,06	0,731
153	153,85	0,85	0,552
162	162,60	0,60	0,369
Erro Médio			2,926

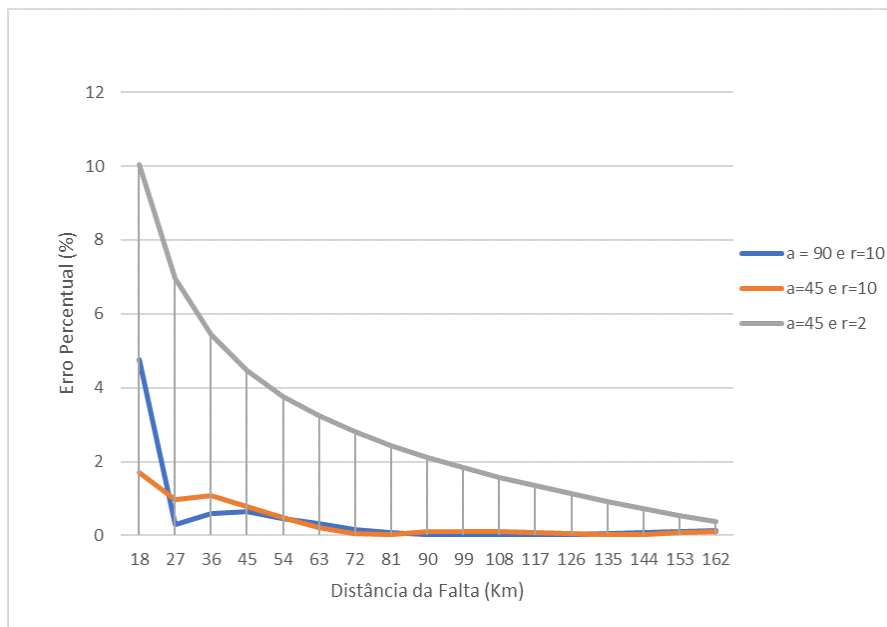
Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da análise das Tabelas 7 e 8, é possível notar que o algoritmo não sofreu muita influência nos resultados obtidos quando foi variado apenas o seu ângulo de incidência, entretanto, quando foi alterada a resistência de falta, os resultados sofreram uma considerável redução na sua precisão.

A seguir, na Figura 7, mostra-se a comparação entre os resultados obtidos dos erros relativos referentes a uma falta fase-terra na fase A do sistema elétrico, apenas alterando os parâmetros de ângulo de incidên-

cia e resistência de falta da simulação apresentada na seção anterior. Este gráfico foi gerado a partir das simulações realizadas e resultados mostrados nas Tabelas 7 e 8. Sendo as variáveis a e r , o ângulo de incidência da falta e a resistência de falta, respectivamente.

Figura 7: Variação dos parâmetros de uma falta AT.



Fonte: Autoria própria (2020).

Observou-se a partir da Figura 7 a discrepância entre os valores dos erros percentuais de localização da falta AT quando foi variado o valor da resistência de falta. A comparação entre as situações onde foram variados apenas os ângulos de incidência, mostram um comportamento muito similar das curvas. É importante observar, mais uma vez, que o comportamento da curva apresenta um decaimento do erro relativo em relação aos terminais da LT, se aproximando de zero no terminal referente ao RDP 2.

Conclusões

Um método para localização de faltas em linhas de transmissão baseado na estimação dos fasores da frequência fundamental foi avaliado utilizando simulações originadas a partir do programa ATP. O algoritmo utilizado para a determinação da distância de ocorrência da falta foi submetido a diversos testes para sua validação. Foram variados parâmetros como tipo de falta, local da falta, ângulo de incidência e resistência de falta. O algoritmo em estudo utiliza dados de apenas um terminal da LT. Ao final, foram calculados os erros relativos para cada tipo de simulação realizada.

O sistema de aquisição dos dados apresentou bons resultados na estimação dos fasores de tensão e corrente. Este sistema possui uma etapa de filtragem através de um filtro Butterworth e estimação fasorial, na qual foi aplicada a TDFCC, que é uma ferramenta que se mostra bastante eficaz em trabalhos relacionados a localização de faltas utilizando fasores fundamentais existentes na literatura.

Os resultados obtidos através das simulações foram bastante satisfatórios para localização de todos os tipos de faltas testados (faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas). O algoritmo mostrou uma maior precisão para a localização de faltas que se apresentavam próximo ao terminal de medição que estava sendo utilizado para o algoritmo, visto isso, observou-se a importância de se implementar posteriormente um método que utilize dados de dois terminais da LT em análise.

Com relação aos outros testes realizados, onde foram alterados os valores de resistência de falta e ângulo de incidência, o algoritmo não sofreu grandes alterações nos valores dos erros relativos quando foi variado apenas o ângulo, entretanto, houve uma queda significativa na precisão quando a resistência de falta foi alterada.

Referências

COURY, D. **Um estimador ótimo aplicado à proteção dos sistemas elétricos de potência**. PhD thesis, Dissertação (Mestrado) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.

PEREIRA SOBRINHO, A. H. **Avaliação dos efeitos da compensação série sobre os transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão**. 2013. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) . Centro de Engenharia Elétrica e Informática Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCC. 2013.

MACHADO, E. **Compensação dinâmica dos transitórios de baixa frequência de transformadores de potencial capacitivos para otimização da proteção de linhas de transmissão**. PhD thesis, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2013.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. Wiley Online Library, 2009.

LAURENTI, M. T. **Um algoritmo aplicado à localização digital de faltas em linhas de transmissão utilizando dados de dois terminais**. PhD thesis, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2009.

COURY, D; OLESKOVICZ, V.; M. GIOVANINI R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. SEL/EESC/USP, 2007.

SILVA, K. **Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão**. PhD thesis, Ph. D. dissertation, Universidade Federal de campina Grande, 2009.

LOPES, F. V. **Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais**. PhD thesis, Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2014.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHIY.; YAMAURA, M.; KONDOW, R. e MATSUSHIMA, T. **Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data.** IEEE Transactions on Power apparatus and systems, no. 8, p. 2892–2898, 1982.

SANTOSO, S.; DAS, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. **Impedance-based fault location in transmission networks:** theory and application. IEEE Access, vol. 2, p. 537–557, 2014.

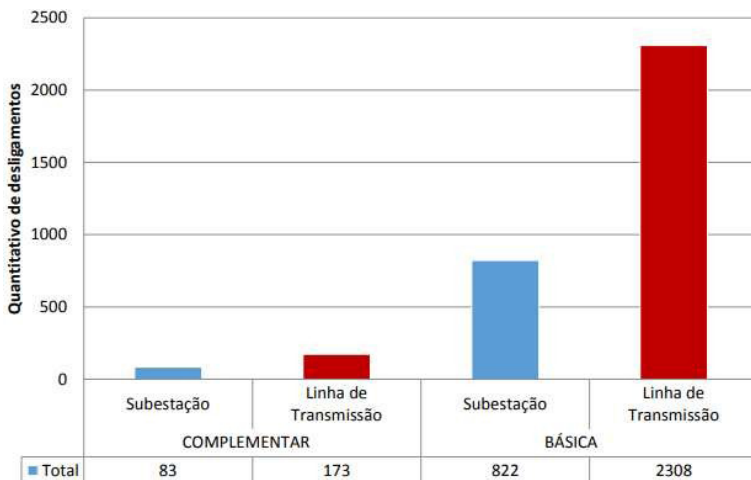
Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão

Maurício Andrade Marinho
Huilman Sanca Sanca

Introdução

O sistema elétrico de energia é dividido em três componentes fundamentais: as usinas geradoras, o sistema de transmissão e o sistema de distribuição. Além disso, divide-se pelo nível de tensão, sendo classificado em sistema de geração, transmissão e distribuição, cada uma das áreas com um nível de tensão distinto. A linha de transmissão (LT) de energia elétrica é o mais susceptível a falhas, devido a ter influências externas e internas para sua operação. Na Figura 1 apresenta-se a incidência de faltas no sistema de elétrico.

Figura 1: Incidência de faltas no sistema elétrico de energia.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

Na Figura 1 destaca-se o elevado número de incidência de faltas em LT, devido a fatores externos como: descargas atmosféricas, galhos de árvores e intempéries. E fatores internos como: falha de isoladores, cabos de energia em contato e falha de equipamentos de proteção e controle.

Observações práticas indicam que, entre 70% a 80% das faltas, surgem de uma fase para à terra. O número de faltas que envolvem às três fases apresenta-se com uma menor incidência, em torno de 5% (STEVENSON, 1974).

A LT tem uma função relevante no sistema elétrico. No entanto, é a mais favorável a falhas, por causa da sua extensão, o clima variado em que se encontra e também a sua topologia. Devido a esses fatores, detectar e classificar as faltas em LT estão entre as etapas que as concessionárias utilizam para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Logo, realizar a detecção e classificação de faltas são relevantes para a operação, continuidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Neste capítulo realiza-se uma análise de faltas com técnicas convencionais com a finalidade de detectar e classificar as faltas em LT. O método utilizado neste trabalho para realizar a detecção baseia-se nas energias dos coeficientes de detalhe da Transformada Wavelet (TW), através de uma comparação com o limiar de mudança abrupta (universal threshold), esta metodologia de detecção de faltas é baseada nos trabalhos de (INÁCIO, 2010; UKIL, ZIVANOVIC, 2005; PEREIRA *et al.*, 2016). Já o método de classificação de faltas faz uso das energias da corrente de fase, através do cálculo das energias normalizadas proposto em Costa, (2010).

Realizou-se a simulação do sistema elétrico teste no programa *Alternative Transient Program* (ATP), este programa permite simular um sistema elétrico de potência, realizar a simulação de faltas, variação do tipo de falta, resistência de falta, localização da falta, ângulo de incidência,

dentre outras características. Aqui utiliza-se um sistema simplificado de 230 kV para simulação e aquisição de dados.

Obteve-se resultados satisfatórios para as técnicas utilizadas. Evidencia-se que as técnicas implementadas se mostram eficientes, devido ao nível de acertos que estas técnicas possuem. As técnicas utilizadas para detecção e classificação de faltas mostraram-se robustas, além da sua resposta não sofrer influência da variação do local e tipo de falta. Este trabalho consiste em analisar, detecção e classificação de faltas em LT de energia elétrica.

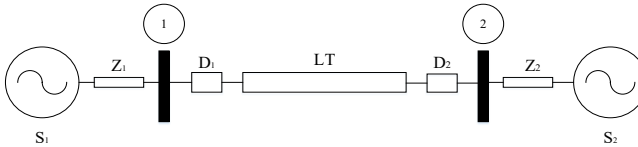
Objetivam-se, especificamente:

- Analisar e implementar a técnica através da transformada Wavelet discreta (TWD);
- Simular o sistema de transmissão no ATP e utilizar rotinas no Matlab para realizar a técnica de detecção e classificação;
- Validação da metodologia implementada através de vários cenários de faltas: Localização da falta, tipo de falta, resistência de falta, ângulo de incidência de falta.

Materiais e métodos

O sistema elétrico analisado

Para avaliação das técnicas de detecção e classificação de faltas implementados, um sistema elétrico, simplificado, de 230 kV foi modelado e simulado no programa ATP. Este sistema é similar ao utilizado em (COSTA, 2006), conforme mostrado na Figura 2. Este sistema consiste de duas fontes, S_1 e S_2 , impedâncias de cada fonte Z_1 e Z_2 , dois barramentos 1 e 2, disjuntores D_1 e D_2 , finalmente dois RDPs localizados em cada extremidade da linha, RDP_1 e RDP_2 . Não foi representado os registradores de perturbação (RPD) na Figura 2.

Figura 2: Sistema simplificado da linha de transmissão utilizada.

Fonte: Adaptado de Costa (2006).

Os parâmetros da LT e da fonte, encontram-se na Tabela 1.

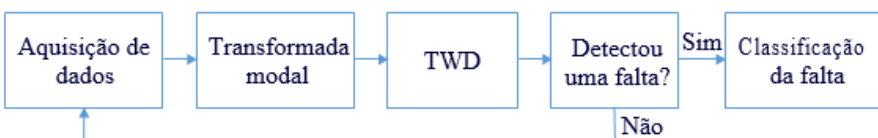
Tabela 1: Sistema de transmissão simplificado de 230 kV.

Fonte S_1	LT(230kVe180km)	Fonte S_2
$Z_1 = 0,871 + j25,661\Omega$	$R_1 = 0,098\Omega/\text{km}$ $X_1 = 0,510\Omega/\text{km}$	$Z_1 = 0,968 + j28,513\Omega$
$Z_o = 1,014 + j18,754\Omega$	$R_o = 0,532\Omega/\text{km}$ $X_o = 1,541\Omega/\text{km}$ $Y_1 = 3,252\Omega/\text{km}$ $Y_o = 2,293\Omega/\text{km}$	$Z_o = 1,127 + j20,838\Omega$

Fonte: Adaptado de Costa (2006).

Lógica computacional implementada

A implementação do algoritmo computacional envolve vários estágios, sendo eles: aquisição de dados, transformada modal, transformada Wavelet discreta, detecção da falta e por fim a classificação da falta. Apresenta-se na Figura 3 o fluxograma do algoritmo implementado. Cabe mencionar que, para realizar o desenvolvimento do fluxograma analisou-se as propostas de trabalhos de (VALINS, 2005; SILVA, 2003; INÁCIO, 2010).

Figura 3: Fluxograma da Lógica Computacional Implementada.

Fonte: Adaptado de Valins (2005) e Silva (2003).

O fluxograma, conforme mostrado na Figura 3, possui além dos estágios destacados, etapas que correspondem a cada estágio específico, sendo eles: cálculo da energia dos sinais de corrente, cálculo do limiar (*universal threshold*), este último é essencial para realizar a detecção de faltas, extração dos coeficientes de detalhe da transformada Wavelet para os componentes da transformada modal e cálculo da energia dos coeficientes de detalhe da transformada Wavelet. Nas seções a seguir, detalha-se cada estágio do fluxograma.

Aquisição dos dados

A aquisição de dados compõe o primeiro estágio do fluxograma apresentado na seção anterior. Nesta etapa é extraído os valores de tensões e correntes nas fases A, B e C. A extração dos parâmetros acontece em um registrador digital de perturbação - RDP. O RDP é definido no arquivo principal do programa ATP, para armazenar os sinais faltosos.

Os dados provenientes do RDP não precisam ser filtrados, pois a técnica utilizada é baseada em componentes de alta frequência.

O programa ATP é um simulador digital para sistemas de potência muito utilizado. Este programa permite uma representação detalhada do sistema elétrico, possibilita que seus resultados de simulação sejam utilizados para estudos de transitórios, proteção e aplicação em controle.

A transformada modal

Em sistemas trifásicos as fases são acopladas entre si, por conseguinte, as perturbações de alta frequência geradas durante uma falta geralmente aparecem nas fases não faltosas (ALMEIDA, 2007). A motivação para utilizar a transformada modal se baseia na sua funcionalidade, permite que o sistema trifásico seja tratado como um sistema com três

circuitos monofásicos independentes. Os valores de tensão e corrente de fase são transformados em componentes modais desacoplados, são eles: um modo terra (modo 0) e dois modos aéreos (modo α e modo β), estes componentes também são conhecidos como modo aéreo 1 e modo aéreo 2 (ALMEIDA, 2007).

Nesta pesquisa é utilizada a matriz de transformação de Clarke, dada pela equação:

$$A_M = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Neste capítulo a transformada modal de Clarke é aplicada para o sinal de corrente, pelo uso da matriz de transformação, para obter os componentes modais. Cabe citar, que a transformada modal pode ser aplicada para o sinal de tensão. A equação para transformação para o domínio modal é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = A_M \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em que $I_{0\alpha\beta}$ são os vetores modais de corrente I_{abc} e são os vetores de corrente de fase. As componentes modais são aplicadas para realizar a detecção de faltas em linhas de transmissão, a partir da transformação para o domínio Wavelet de cada componente modal.

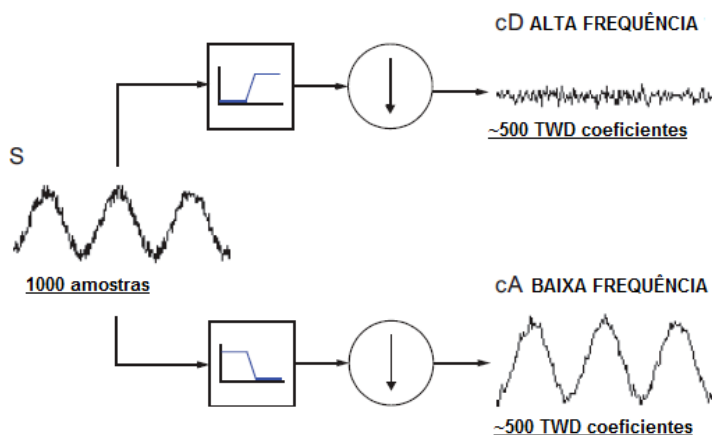
Transformada Wavelet discreta

Por meio do método de análise multiresolução - AMR é implementada a ferramenta da transformada Wavelet discreta, esta técnica permite analisar os sinais em múltiplas bandas.

O método da AMR fornece coeficiente de aproximação e coeficiente de detalhe, o coeficiente de aproximação compreende as baixas frequências do sinal original, enquanto define-se o coeficiente de detalhe como a diferença sucessiva entre aproximações, o coeficiente de detalhe compreende o sinal original em altas frequências (SILVA, 2003).

A relação detalhada entre a Análise Multiresolução - AMR e a TWD não é objetivo desta pesquisa, no entanto para maiores informações uma sugestão é buscar o trabalho de Mallet (1989). Representa-se na Figura 4 o processo para obter os coeficientes de aproximação e os coeficientes de detalhe. O algoritmo possui dois estágios, o primeiro é a filtragem do sinal original, em que para o coeficiente de detalhe o sinal passa por um filtro passa-alta, para o coeficiente de aproximação o sinal passa por um filtro passa-baixa, o segundo estágio é a subamostragem do mesmo sinal, na Figura 4 tem-se que S é o sinal, CC (corrente continua) é o coeficiente de detalhe da TWD, CA (corrente alternada) é o coeficiente de aproximação da TWD, na Figura 4 representa-se a subamostragem em que as amostras são reduzidas por um fator 2.

Figura 4: Processo para obter os coeficientes de aproximação e de detalhe.



Fonte: Adaptado de Misiti *et al.* (2009).

A seguir tem-se a formulação matemática para encontrar os coeficientes de detalhe e os coeficientes de aproximação:

$$cA_j(k) = \sum_n h(n - 2k)c_{j-1}(n) \quad (3)$$

$$cD_j(k) = \sum_n g(n - 2k)c_{j-1}(n) \quad (4)$$

Sendo que, utiliza-se a escala dos coeficientes $j = 1$, $h(k)$ e $g(k)$ são os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

Cabe citar que, os coeficientes de aproximação possuem informações de baixa frequência e os coeficientes de detalhe possuem informações de alta frequência.

Nesta pesquisa, utiliza-se apenas os coeficientes de detalhe para alcançar os objetivos propostos. Então, neste trabalho é utilizado apenas os coeficientes de detalhe de nível 1 de decomposição, com Wavelet mãe *Daubeshies - db4*, a escolha da Wavelet mãe é justificada, pois utiliza-se nas literaturas a Wavelet mãe *db4* que possui resultados mais satisfatórios para processamento de energia.

A detecção de faltas

Baseia-se nos trabalhos de Inácio (2010); Ukil, Zivanovic (2005) e Pereira *et al.* (2016) para implementar a técnica de detecção de faltas em linhas de transmissão, realiza-se a técnica de mudança abrupta da variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe da TWD. O método de detecção, consiste em um algoritmo que detecta faltas através de sinais de corrente extraídos do registrador digital de perturbação. O algoritmo recebe os sinais de corrente e transforma para o domínio modal. Da Tabela 2 pode-se verificar que, o emprego de apenas uma dessas

componentes modais não é eficiente, pois não detecta todos os tipos de faltas, é necessário utilizar duas das componentes modais para realizar a detecção de faltas, o α e β ou α e β (SOARES, 2001). Nesta pesquisa utiliza-se das três componentes modais, o, β e α , o que reforça o método de detecção de faltas em linhas de transmissão.

Tabela 2: Requisitos para a utilização das componentes modais na detecção de faltas em linhas de transmissão.

Componente	Restrição
α	Não detecta faltas sem terra
β	Não detecta faltas fase-fase BC
α e β	Não detecta falta fase-terra AT
α e β	Não detecta faltas fase-fase BC
α e β	Sem restrição
α e β	Sem restrição

Fonte: Adaptado de Soares (2001).

Em seguida, com os sinais de corrente no domínio modal, realiza-se o cálculo dos coeficientes de detalhe da TWD com decomposição nível 1 e Wavelet mãe Daubeshies - db4, então, a partir da equação 5 calcula-se a variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe.

$$\Delta E_{d_{jk}} = |d_{jk}|^2 \quad (5)$$

Sendo $\Delta E_{d_{jk}}$ a variação instantânea de energia para a amostra k , d_j o coeficiente de detalhe, k o índice da amostra atual, jk o índice do coeficiente de detalhe.

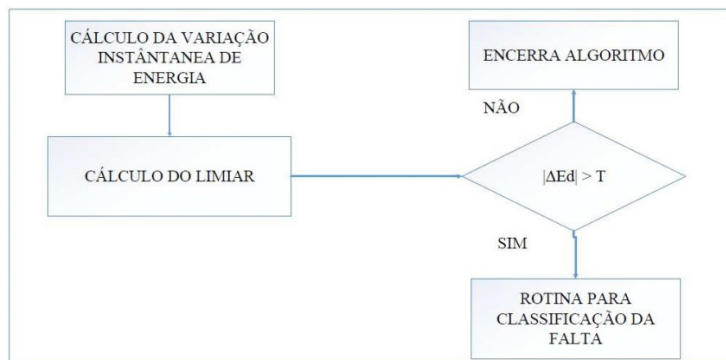
Em seguida, realiza-se o cálculo do limiar para comparação com a variação instantânea de energia, definida na equação 5, calcula-se o limiar universal *threshold* através de:

$$T = \sigma \sqrt{\log_e n}, \quad (6)$$

sendo T o limiar universal threshold, σ o desvio padrão médio absoluto da variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe, n o número de amostras da variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe da TWD.

Para realizar a detecção de faltas aplica-se uma comparação para identificar se o valor absoluto da variação instantânea de energia calculado em (5) é maior que o valor do limiar (*universal threshold*) calculado em (6). Um fluxograma em detalhes para a lógica de detecção mostra-se na Figura 5.

Figura 5: Lógica para detecção de faltas.



Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2016).

Por meio da comparação, uma sentença é verificada e caso seja verdade, é salvo em um vetor de dados os valores de faltas da variação instantânea de energia. Em seguida, utiliza-se o vetor de dados para realizar a lógica para o módulo de classificação de faltas.

Cabe citar, que o vetor de dados é vazio para uma operação em regime permanente do sistema, se uma falta ocorrer o vetor de dados é preenchido com os valores faltosos, através do vetor de dados realiza-se uma lógica, verifica-se se o vetor de dados está vazio ou com dados de faltas, então, caso o vetor de dados esteja preenchido com valores de faltas a rotina de classificação é acionada.

A classificação de faltas

O algoritmo para classificação de faltas implementado nessa pesquisa é baseado na proposta do trabalho de Costa (2010).

O método de classificação de faltas consiste em 3 etapas, primeiro realiza-se o cálculo das energias das correntes de fase. A energia de cada corrente de fase é dada por:

$$Energia_{I_f} = \sum_{k=1}^{k=n} |I_{f[k]}|, \quad (7)$$

sendo $Energia_{I_f}$ a energia do sinal da corrente, k o índice da amostra atual, f o índice que representa a fase, I_f a corrente de fase, k o índice da corrente de fase, n o número de amostras do sinal.

Em seguida, encontra-se as energias normalizadas de cada fase, e do neutro, as energias normalizadas são definidas no trabalho de Costa (2010) como coordenadas de faltas (A, B e C). Através das equações 8, 9, 10 e 11 realizam-se os cálculos das energias normalizadas.

$$A = \frac{Energia_{I_a}}{Energia_{I_b} + Energia_{I_c} + Energia_{I_N}} \quad (8)$$

$$B = \frac{Energia_{I_b}}{Energia_{I_a} + Energia_{I_c} + Energia_{I_N}} \quad (9)$$

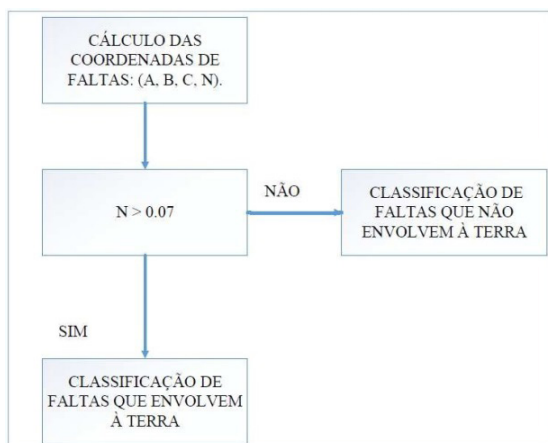
$$C = \frac{Energia_{I_c}}{Energia_{I_a} + Energia_{I_b} + Energia_{I_N}} \quad (10)$$

$$N = \frac{Energia_{I_N}}{Energia_{I_a} + Energia_{I_c} + Energia_{I_b}} \quad (11)$$

Sendo A a coordenada de falta para a fase A, B a coordenada de falta para a fase B, C a coordenada de falta para a fase C e N a coordenada de falta para o neutro N.

Logo após, implementa-se a lógica de classificação de faltas conforme mostrado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6: Lógica para Classificação de faltas.



Fonte: Adaptado de Costa (2010).

A coordenada de falta N tem um papel fundamental no método de classificação de faltas, pois, divide o fluxo do algoritmo em faltas que envolvem à terra ou faltas que não envolvem à terra, através da comparação do valor de N, em que, caso $N > 0,07$, o fluxo do algoritmo seguirá para classificação de faltas que envolvem à terra, para um valor de N abaixo do valor especificado (0,07) as faltas não envolvem à terra. Cabe citar, que 0,07 é um valor empírico adotado para a comparação com a coordenada de falta N. O valor a ser comparado com a coordenada de falta N não é igual a zero, pois, caso uma falta não envolva a terra, mas inclua ruído significativo no neutro, esta coordenada tem a possibilidade de não ser igual a zero, logo adota-se um limiar entre 0 e 1, para comparação com a coordenada de falta N.

As coordenadas de faltas restantes são localizadas de acordo com o tipo de falta e formam uma equação de um plano, em que $A + B + C = 1$. Pode-se mapear as coordenadas de faltas com base no tipo de falta, logo a classificação da falta é feita de forma automática. Através das coordenadas de faltas pode-se mapear um triângulo de faltas, em que cada coordenada de falta é um vértice do triângulo.

Uma falta monofásica à terra AT possui coordenadas de faltas com $A > B > C$ ou $A > C > B$ (COSTA, 2010). Para encontrar o parâmetro $1/3$ utilizado nos fluxogramas das Figuras 7 a 9, Costa (2010) realiza a seguinte análise, sendo uma falta com $A > B > C$, ou seja, do tipo AT se o valor intermediário for mais próximo do menor valor, $A - B > B - C$.

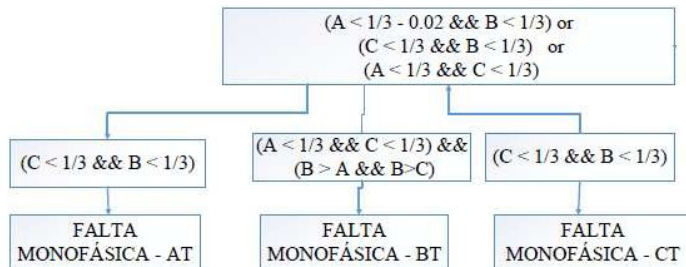
Visto que $A + B + C = 1$, então, realizando algumas operações algébricas, encontra-se

$$B < 1/3 \text{ (valor intermediário menor que o, 33).}$$

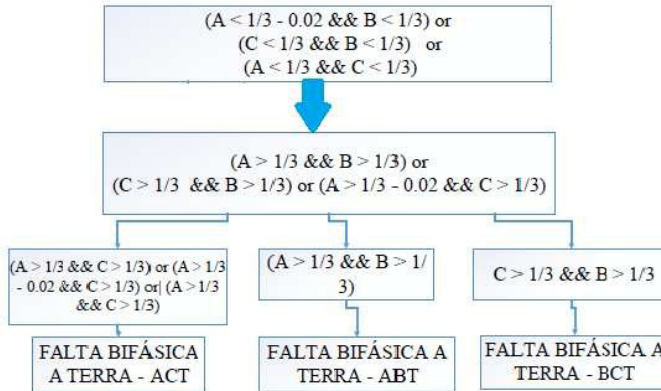
Caso o valor de B seja mais próximo de A, ou seja, $A - B < B - C$, então caracteriza-se como uma falta bifásica envolvendo as fases A e B e $B > 1/3$. Seguindo essa mesma lógica, encontra-se as relações para os outros tipos de faltas (COSTA, 2010).

Os fluxogramas da lógica implementada para faltas que envolvam à terra, mostram-se nas Figuras 7 e 8 a seguir.

Figura 7: Lógica para Classificação de faltas que envolvam à terra.



Fonte: Adaptado de Costa (2010).

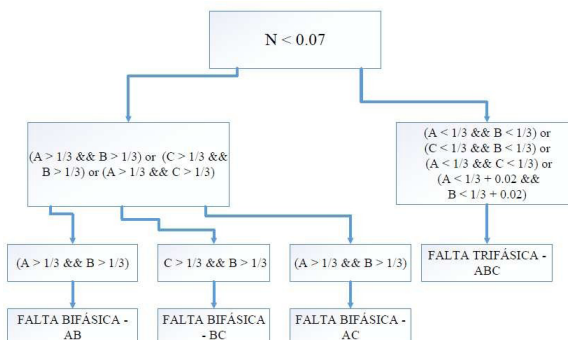
Figura 8: Lógica para Classificação de faltas bifásicas à terra.

Fonte: Adaptado de Costa (2010).

Além das Figuras 7 e 8, abaixo tem-se uma breve discussão da implementação da lógica para:

- Uma falta é monofásica quando N é maior que 0.07 e duas das coordenadas de faltas apresentam valores menores que $1/3$.
- Uma falta é bifásica à terra quando N é maior que 0.07 e duas das coordenadas de faltas apresentam valores maiores que $1/3$.

O fluxograma da lógica implementada para faltas que não envolvam à terra mostra-se na Figura 9.

Figura 9: Lógica para Classificação de faltas que não envolvam à terra.

Fonte: Adaptado de Costa (2010).

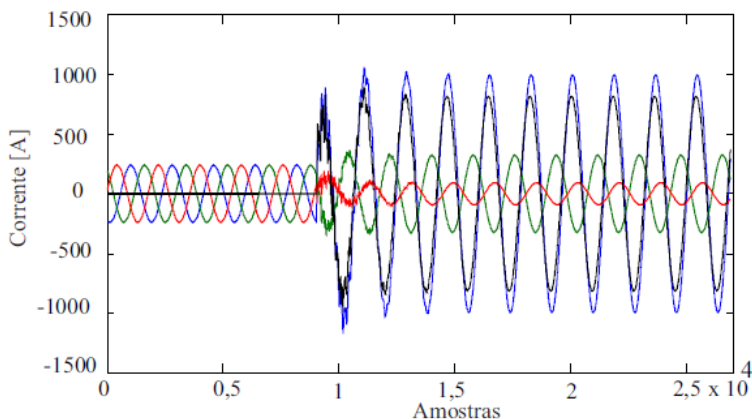
Abaixo, em formato de itens, tem-se uma breve discussão da implementação da lógica.

- Uma falta é trifásica quando N é menor que 0.07 e duas das coordenadas de faltas apresentam valores menores que $1/3$.
- Uma falta é bifásica quando N é menor que 0.07 e duas das coordenadas de faltas apresentam valores maiores que $1/3$.

Resultados e discussões

A oscilografia de uma falta monofásica é apresentada na Figura 10, o sinal de corrente da fase A e do neutro N possuem uma amplitude elevada durante a incidência da falta, enquanto as outras fases não são influenciadas com a mesma intensidade e com a mesma duração. O que evidencia uma falta AT.

Figura 10: Oscilografia para uma falta monofásica à terra AT.



Fonte: Autoria própria (2020).

Obteve-se 100% de acertos para os métodos aplicados para faltas em LT com as seguintes características: variação da distância, $d_f = \{18, 27, 36, \dots, 153, 162\}$, com uma resistência de falta $r_f = 10\Omega$ e ângulo de incidência 90° .

As energias normalizadas, ou seja, as coordenadas de faltas para o tipo de falta AT com distância $d_f = 72 \text{ km}$ é dada na Tabela 3, a coordenada de falta A tem um valor maior do que as outras coordenadas de faltas (B e C), além disso a coordenada de falta N é diferente de zero, satisfazendo uma condição de falta monofásica à terra na fase A.

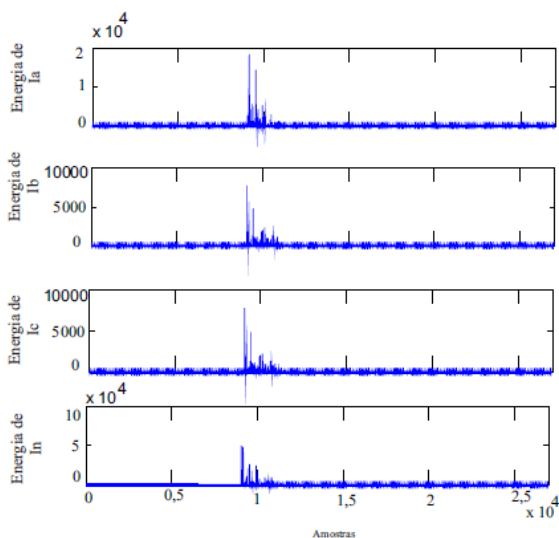
Tabela 3: Coordenadas de faltas para uma falta AT.

A	B	C	N
0,917	0,043	0,038	1,057

Fonte: A autoria própria(2020).

Em seguida, na Figura 11, apresenta-se a variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe da TWD, para cada fase da corrente, em uma situação de falta na fase A para à terra, para uma localização de falta $d_f = 72 \text{ km}$. Observa-se que o pico de energia na fase A é maior que nas outras fases, além disso existe uma variação de energia instantânea no sinal da corrente de neutro, isso ocorre devido à falta envolver a fase A e o terra.

Figura 11: Energia dos coeficientes de detalhe da TWD para cada fase de corrente.



Fonte: A autoria própria (2020).

Na Tabela 4 apresenta-se a taxa de acertos para detecção e classificação de faltas para todos os tipos de faltas monofásicas simuladas, com uma distância de falta $d_f = \{18', 27', 36' \dots 153 162\}$ km com uma resistência de falta $r_f = 10\Omega$ e ângulo de incidência 90°

Tabela 4: Taxa de acertos para faltas monofásicas.

Tipo de falta	Taxa de acertos na detecção	Taxa de acertos na classificação
AT	100%	100%
BT	100%	100%
CT	100%	100%

Fonte: Autoria própria (2020).

Obteve-se 100% de acertos para os métodos aplicados para faltas bifásicas em LT. As coordenadas de faltas para o tipo de falta AB com distância $d_f = 126 \text{ km}$ é dada na Tabela 5, a coordenada de falta A e a coordenada de falta B tem um valor maior do que a coordenada de falta C, cabe citar que a coordenada de falta C é próxima de zero. Além disso a coordenada de falta N é igual a zero, pois, a falta não envolve à terra, satisfazendo uma condição de falta bifásica.

Tabela 5: Coordenadas de faltas para uma falta AB.

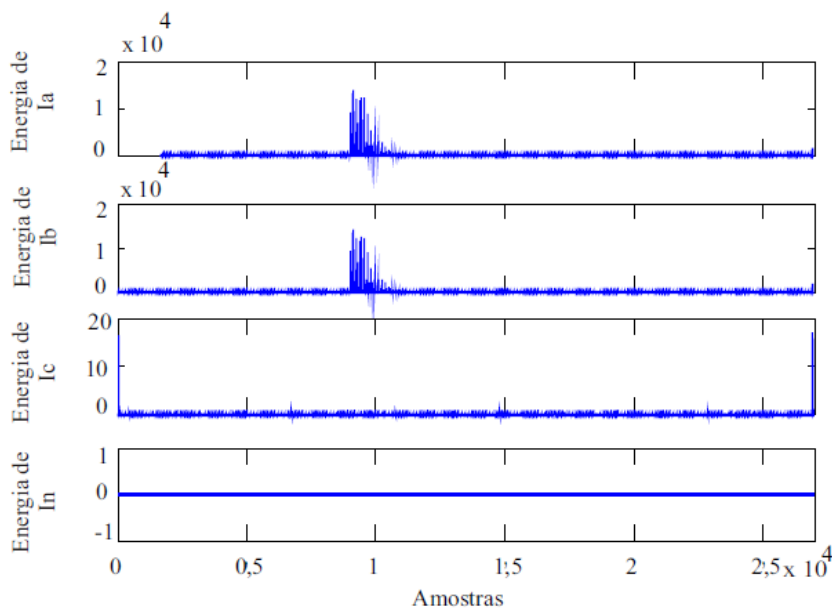
A	B	C	N
0,459	0,535	0,005	0,000

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 12 apresenta-se a variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe da TWD, para cada fase da corrente, para a situação de falta bifásica, as fases faltosas são A e B, C é a fase sã, para uma localização de falta $d_f = 126 \text{ km}$. Nesta figura analisa-se que o pico de energia na fase A e na fase B possui um valor da ordem de 10^4 . A variação de energia instantânea no sinal de corrente do neutro é igual a zero, pois, a falta não envolve a terra.

Por outro lado, na fase C existe uma parcela de variação instantânea de energia diferente de zero, devido ao acoplamento magnético entre as fases do sinal de corrente, então a perturbação envolve o sinal de corrente da fase C com uma influência significativa. A influência no sinal de corrente da fase C, é pequena e de curta duração, esta característica colabora para não interferir na eficácia do método de classificação, o método de detecção é imune a influência que uma fase faltosa realiza em uma fase sã, pois utiliza a transformada modal para realizar o desacoplamento magnético entre as fases.

Figura 12: Energia dos coeficientes da TWD para cada fase de corrente.



Fonte: Autoria própria(2020).

Obteve-se 100% de acertos para os métodos de detecção e classificação de faltas, para faltas trifásicas em LT com as características $d_f = \{18, 27, 36, \dots, 153, 162\} km$: com uma resistência de falta $r_f = 10 \Omega$ e ângulo de incidência 90° .

As coordenadas de faltas para o tipo de falta trifásica ABC com distância $d_f = 153 \text{ km}$ é dada na Tabela 6, as coordenadas de faltas possuem valores próximos, a influência de uma falta trifásica é a mesma para as energias normalizadas A, B e C. A coordenada de falta N é igual a zero, pois, a falta não envolve à terra, satisfazendo uma condição de falta trifásica.

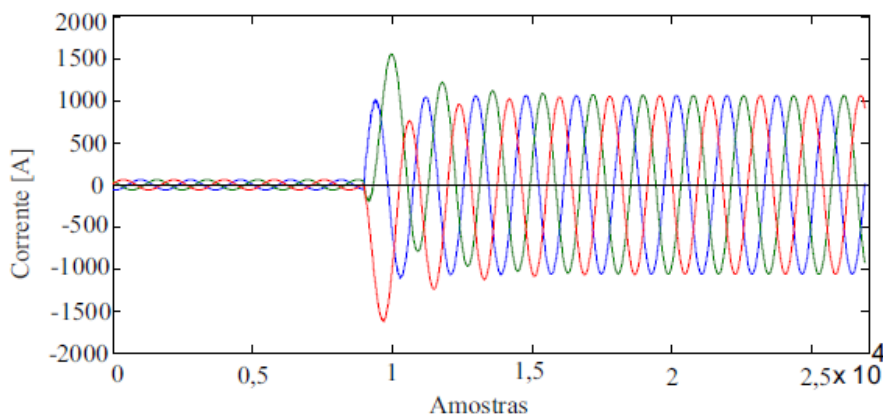
Tabela 6: Coordenadas de faltas para uma falta trifásica – ABC.

A	B	C	N
0,320	0,332	0,346	0,000

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 13 apresenta-se a oscilografia de uma falta trifásica, para uma localização de falta $d_f = 153 \text{ km}$ uma resistência de falta $r_f = 10 \Omega$ e ângulo de incidência 90° .

Figura 13: Oscilografia para uma falta trifásica.

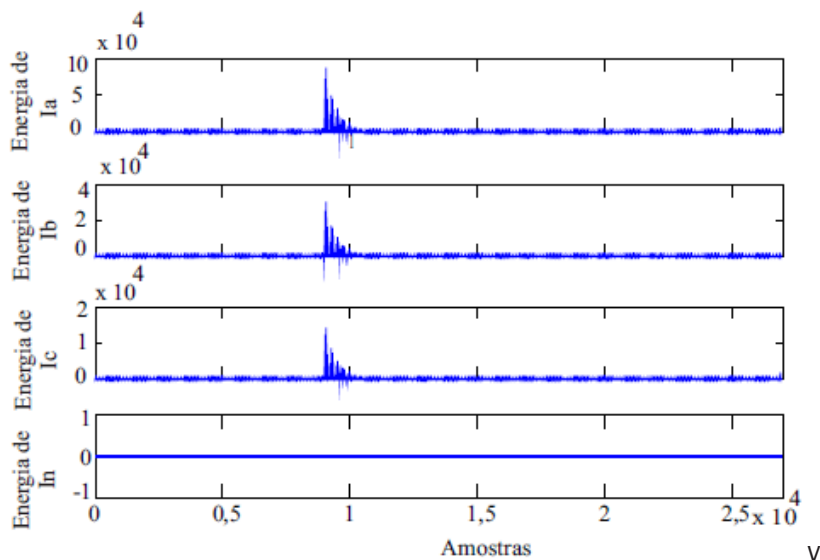


Fonte: Autoria própria (2020).

Em seguida, na Figura 14 apresenta-se a variação instantânea de energia dos coeficientes de detalhe da TWD, para cada fase da corrente, para a situação de falta trifásica. Nesta Figura analisa-se que o pico de energia na fase A, na fase B e na fase C possuem um valor da ordem de 104

no instante da falta. A variação de energia instantânea no sinal de corrente do neutro é igual a zero, pois, a falta não envolve a terra.

Figura 14: Energia dos coeficientes da TWD para cada fase de corrente.



Fonte: Autoria própria (2020).

Resultados com parâmetros diferentes

Esta seção apresenta os resultados de detecção e classificação de faltas para $r_f = 2\Omega$ e ângulo de incidência de 45° .

Na Tabela 7 apresenta-se o desempenho dos métodos de detecção e classificação de faltas para faltas monofásicas: AT, BT e CT.

Tabela 7: Taxa de acertos para faltas monofásicas.

Tipo de falta	Taxa de acertos na detecção	Taxa de acertos na classificação
AT	100%	100%
BT	100%	100%
CT	100%	100%

Fonte: Autoria própria(2020).

A seguir, na Tabela 8 apresenta-se os valores de coordenadas de faltas para uma falta AT, com $d_f = 18 \text{ km}$.

Tabela 8: Coordenadas de faltas para uma falta monofásica – AT.

A	B	C	N
0,877	0,102	0,020	0,519

Fonte: Aatoria própria(2020).

Analisa-se que a coordenada de falta A possui o maior valor dentre as coordenadas de faltas, além disso, a coordenada de falta N não é nula, pois, o transitório é de uma falta AT.

A seguir, apresenta-se os resultados para faltas: bifásica e finalmente trifásica.

Na Tabela 9 apresenta-se a taxa de acertos para faltas: AB, AC e BC. Para uma faixa de distância de falta $d_f = 18, \dots, 162 \text{ km}$.

Tabela 9: Taxa de acertos para faltas bifásicas.

Tipo de falta	Taxa de acertos na detecção	Taxa de acertos na classificação
AB	100%	100%
BC	100%	100%
AC	100%	100%

Fonte: Aatoria própria (2020).

Na Tabela 10 apresenta-se os resultados para uma falta trifásica. Constata-se que, para a variação do ponto da falta ao longo da linha, não ocorre erro de detecção e de classificação.

Tabela 10: Faltas trifásicas - ABC.

Distância	Detectou	Classificou
18	Sim	Sim
27	Sim	Sim
36	Sim	Sim
45	Sim	Sim

54	Sim	Sim
63	Sim	Sim
72	Sim	Sim
81	Sim	Sim
90	Sim	Sim
99	Sim	Sim
108	Sim	Sim
117	Sim	Sim
126	Sim	Sim
135	Sim	Sim
144	Sim	Sim
153	Sim	Sim
162	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria (2020).

Conclusões

Neste trabalho, realizou-se a detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão. As faltas em sistemas de transmissão são anomalias que provocam a interrupção do fluxo de energia para os consumidores, além do desgaste de equipamentos e elementos do sistema. Através da proteção em linhas de transmissão, realiza-se a detecção da falta, etapa essencial para informar aos operadores o estado do sistema elétrico de energia e contribui para a isolação do sistema faltoso. A classificação da falta colabora para maior velocidade de manutenção do sistema faltoso, pois, os operadores possuem detalhes com informações de quais fases estão envolvidas na falta, o que aumenta a velocidade de manutenção da linha de transmissão.

Implementou-se a detecção de faltas por meio das energias da transformada Wavelet discreta, através do limiar de comparação (*universal threshold*), e a classificação de faltas por meio das energias das correntes de fase do sistema de transmissão. Através da simulação do sistema de transmissão no programa ATP, obteve-se uma base de dados, com vários tipos de faltas. Através da avaliação dos métodos utilizados, para os

tipos de faltas simulados no programa ATP, constatou-se que a faixa de variação de distância $d_f = 18, \dots, 162 \text{ km}$, não influenciou na resposta do algoritmo. Evidencia-se que a metodologia utilizada é imune para uma falta em qualquer ponto da linha, para a faixa de distância citada.

Avaliou-se o método para dois tipos de valores de ângulo de incidência 45° e 90° e de resistência de falta $r_f = 2 \Omega$ e $r_f = 10 \Omega$, obteve-se uma resposta satisfatória para os parâmetros de falta avaliados.

Referências

Almeida, Aryfrance Rocha. **Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão usando ICA**. 2007. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA. Link: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/tede/443>

ANEEL. Relatório de Análise de Desligamento forçado so Sistema de Transmissão. Publicado em meio eletrônico. Maio de 2017. <https://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-avisos/-/asset_publisher/CfU3tFksDuKs/content/relatorio-de-analise-de-desligamentos-forcados-do-sistema-de-transmissao-edicao-2017/656808?inheritRedirect=false> Acesso em: 02 de fevereiro de 2020.

COSTA, F. B. **Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão baseadas na transformada wavelet**. 2006. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

COSTA, F. B. **Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada Walvelet para uso em registradores digitais de perturbação**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

INÁCIO, M. J. **Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando transformada wavelet e rede lógica neurofuzzy com**

aprendizado participativo. 2010. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. 2010.

MALLET, S. G. **A theory for multiresolution signal decomposition:** The wavelet representation. IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, 1989.

MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGG, J. **Wavelet toolbox guide.** 4. p. 153, 2009.

PEREIRA, S. **Transformada wavelet aplicada a análise automática de oscilografias de curta duração em unidades geradoras.** Dissertação (mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SILVA, M. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet.** 2003. 231f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

SOARES, L. R. **Wavelets na identificação e localização de faltas em linhas de transmissão.** Recife, PE: Dezembro de, 2001.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** McGraw-Hill do Brasil, 1974.

Abhisek Ukil, Rastko Živanović. **Abrupt change detection in power system fault analysis using adaptive whitening filter and wavelet transform.** Electric Power Systems Research, Volume 76, Issues 9–10, 2006.

VALINS, T. F. **Relé digital de distância baseado na teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.

Avaliação dos algoritmos de estimativa de fasores em SEE

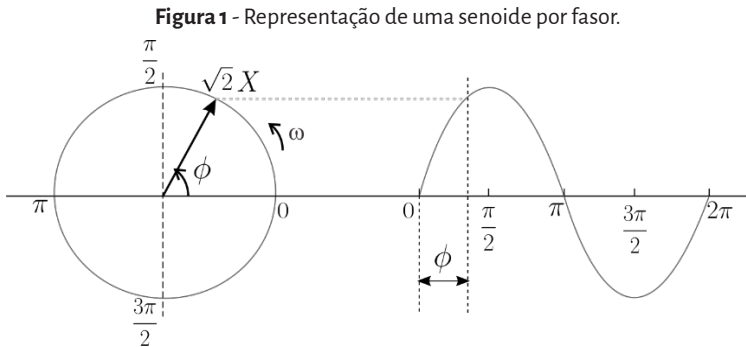
*Alfredo Plinio de Araújo Neto
Huilmán Sanca Sanca*

Introdução

A crescente expansão dos sistemas elétricos de energia (SEE), ao mesmo tempo em que permite o fornecimento amplo de energia elétrica a extremos ainda não explorados, aumenta na mesma proporção sua complexidade operacional de manutenção e proteção, devido a ameaças de naturezas diversas aos quais os sistemas de transmissão estão sujeitos. Para proteger o sistema da ocorrência destas anormalidades, utiliza-se modernos sistemas de proteção, a fim de evitar desligamentos não programados de seus componentes. Os desafios da transmissão de energia por longas distâncias estão diretamente ligados a exigência de eficientes sistemas de proteção, pois está o fato de que a linha de transmissão é o elemento de um sistema elétrico de potência mais suscetível a defeitos (KÜSEL, 2014). Sua utilização em larga escala no sistema de transmissão e distribuição de energia aumenta a dificuldade de manutenção preventiva.

Os dispositivos de proteção atuam de modo a reduzir os defeitos de operação caso a falta ocorra. Torna-se então propício para estas aplicações o uso de relés de proteção, sendo o relé de distância o mais empregado para a proteção de linhas de transmissão. A atuação dos relés baseia-se na observação de parâmetros tais como tensão, corrente, impedância, frequência, entre outros. A operação correta desses dispositivos torna-se possível com a utilização de estimativa de fasores, ferramenta fundamental para indicar o estado do SEE.

Um fasor é um número complexo composto por uma magnitude X e fase Φ , conforme mostra-se na Figura 1. São ferramentas básicas que permitem a análise de circuitos de corrente alternada.



Fonte: Adaptado de Rocha (2016).

No sistema de transmissão de energia em corrente contínua, os sinais de corrente e tensão do SEE serão sinais alternados, normalmente são definidos por uma função trigonométrica do tipo seno ou cosseno. Por definição matemática, possuem amplitude $\sqrt{2}X$, fase Φ , e frequência f_0 . Em termos de aplicação, a medição dos fasores de tensão e corrente em tempo real facilita procedimentos de controle baseados em medições direta do sistema (ROCHA, 2016).

Segundo Formiga (2012), a estimação fasorial possibilita determinar a característica da onda senoidal fundamental, amplitude e ângulo de fase, permitindo ao relé de proteção mensurar as características de falha, e uma vez detectadas, liberar o acionamento dos disjuntores caso a falta seja persistente.

Os métodos de estimação fasorial são estudados em diversos aspectos na literatura, fazendo uso de diferentes técnicas. As técnicas em sua grande maioria são baseadas na Transformada Discreta de Fourier (TDF). Todos eles são compostos de uma formulação matemática, caracterizados

por um módulo de amplitude e ângulo de fase, elementos estes presente nas operações algorítmicas dos dispositivos de proteção. Entretanto, muitos dos métodos estão sujeitos a limitações que comprometem características como precisão e velocidade de resposta, devido a erros particulares identificados que interferem na plena eficiência dos métodos quando aplicadas a testes. Motivados a solucionar estas limitações, trabalhos atuais objetivam na proposição de novas formulações e adaptações aos métodos de estimação fasorial, com a finalidade de superar estas inconformidades que comprometem a eficiência e robustez quando aplicadas na proteção.

A motivação para este trabalho advém da influência dos métodos de estimação fasorial existentes na operação dos dispositivos de proteção. Uma implementação, análise e avaliação de métodos de estimação de fasores usados na aplicação direta de sistemas de proteção digital é o objetivo deste trabalho. Serão avaliados três métodos presentes na literatura, no intuito de estudar seu desempenho quando aplicados a estimação de fasores. Quanto melhor as características de resposta dos algoritmos, maior torna-se a confiabilidade de operação dos dispositivos de proteção, fundamentais para minimizar os riscos provenientes de ocorrências de falta.

Algoritmos de estimação de fasores

Os conceitos básicos sobre os algoritmos de estimação de fasores analisados neste trabalho requer uma compreensão breve sobre série de Fourier e transformada de Fourier. Essas formulações são utilizadas para extrair as componentes fundamentais dos sinais periódicos. Nesta seção, apresenta-se o equacionamento matemático proposto em cada método em estudo ao longo das análises realizadas neste trabalho, permitindo identificar o módulo e a fases do fasor na frequência fundamental.

Série de Fourier

A série de Fourier descreve as expressões fundamentais para um período equivalente a um ciclo de um sinal periódico. Considere-se um sinal $x(t)$ periódico e contínuo no tempo onde t é a variável que representa o tempo e $x(t) = x(t + T_0)$ para $T_0 \neq 0$. Pode-se dizer que o menor valor de T_0 que satisfaz a relação apresentada é chamado de período e a frequência com que o sinal se repete é dada por $f_0 = \frac{1}{T_0}$.

Desta forma, a série de Fourier pode ser expressa a partir de:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t). \quad (1)$$

Onde:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) dt, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt. \quad (4)$$

Para extrair a componente de frequência fundamental do sinal avaliado, geralmente recorre-se as componentes a_n e b_n , normalmente denominadas como sendo a parte real e imaginária do sinal periódico em estudo. Ao incluir a componente DC a_0 e simplificando a expressão, têm-se:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} A_n \cos(2\pi n f_0 t + \varphi_n). \quad (5)$$

Onde A_n e φ_n representa o módulo e a fase do sinal avaliado, obtidos por:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (6)$$

$$\varphi_n = \arctan(-b_n/a_n). \quad (7)$$

O fasor e a frequência fundamental do sinal é dado por:

$$X_n = \frac{A_n}{\sqrt{2}} \angle \varphi_n = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n - jb_n). \quad (8)$$

Algoritmo de Fourier de ciclo completo

De acordo com Phadke; Thorp (2009), a estimação do fasor na frequência fundamental se dá por meio da correlação entre suas amostras em um ciclo e as amostras em um ciclo dos sinais de referência seno e cosseno:

$$X_{re,CC}(k) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (9)$$

$$X_{im,CC}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right). \quad (10)$$

Filtro cosseno modificado (Fourier modificado)

O algoritmo cosseno modificado foi desenvolvido por Hart *et al.* (2000) no intuito de superar limitações apresentadas pelo filtro cosseno clássico, em Schweitzer III Hou (1993). Para este método, as partes real e imaginária do sinal avaliado são calculadas através das expressões:

$$X_{re,CM}(k) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (11)$$

$$X_{im,CM}(k) = \frac{X_{re,CM}(k-1) - X_{re,CM}(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{\text{sen}\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}. \quad (12)$$

Algoritmo de Guo (Fourier modificado)

Proposto em Guo; Chen (2013), o método também é baseado em adaptações do algoritmo de Fourier de um ciclo havendo modificações apenas no cálculo da parte imaginária.

$$X_{re,GUO}(k) = X_{re,CC}(k) \quad (13)$$

$$X_{im,GUO}(k) = X_{im,GUO}(k) + \frac{2}{N} \cotg\left(\frac{2\pi}{N}\right) (PS_2 - PS_1). \quad (14)$$

Onde: $PS_2 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2k)$ e $PS_1 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2k-1)$.

Materiais e métodos

Dois grupos de sinais foram utilizados para avaliar o desempenho dos algoritmos de estimação de fasores: sinais analíticos gerados a partir de funções pré-definidas e sinais obtidos de uma simulação de falta de um sistema elétrico de potência de 230 kV no programa *Alternative Transient Programs* (ATP). Os sinais analíticos são úteis quando se deseja garantir a presença de determinadas harmônicas e constantes de tempo da componente CC de decaimento exponencial nos sinais de teste. Por outro lado, os sinais simulados do sistema elétrico reproduzem situações mais reais, contemplando os diferentes tipos de falta a partir da mudança de parâmetros de ângulos de incidência, resistência de falta, tipo de falta

considerada e pontos de ocorrência da falta. Para as simulações de ambos grupos de sinais, considera-se uma taxa de amostragem de 0,5208 ms (32 amostras/ciclo).

Para que o processo de estimação fasorial seja possível, são aplicadas técnicas de processamento digital de sinais. Por se tratar de uma análise quantitativa da resposta no tempo dos algoritmos de estimação de fasores a partir de sinais analíticos, a primeira etapa de digitalização dos sinais é a limitação dos pacotes de frequência do sinal avaliado, com o intuito de evitar erros na conversão analógico-digital (A/D) (PHADKE; THORP, 2009). Neste processo, são normalmente utilizados filtros analógicos passa-baixa, operado pelos relés digitais como filtro *anti-aliasing*, pois são filtros que mais se aproximam da forma ideal. Dos mais utilizados em relés de proteção podemos destacar o filtro passa-baixa *Butterwort*. O filtro apresenta uma banda de transição aceitável para aplicações na estimação fasorial, além de distorção de fase baixa quando comparado aos outros filtros (SILVA, 2014).

Uma vez disponíveis as amostras das formas de onda sob análise, obtidas a partir dos filtros analógicos passa-baixas, inicia-se o processo de janelamento dos sinais. Os algoritmos de estimação de fasores utilizam como entrada um conjunto específico de amostras do sinal a ser estimado, denominado janela de dados. Segundo Phadke e Thorp (2009), para cada instante de amostragem a janela de dados é deslocada até que nova amostra seja incluída na janela e a mais antiga seja descartada. Para cada janela de dados, estimam-se a amplitude e a fase do fasor na frequência fundamental do sinal avaliado (SILVA, 2009).

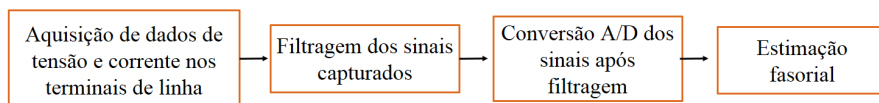
Os sinais são fornecidos dos dois grupos de análises que serão detalhados nos tópicos a seguir. No programa *Matlab*[®] (licença estudantil),

são implementados os filtros passa-baixa do tipo Butterworth de terceira ordem com frequência de corte de 180 Hz, janelamento dos sinais e em sequência a discretização analógico-digital dos sinais avaliados, com o objetivo de tratar os sinais de entrada, bem como condicioná-los para o uso dos dispositivos de proteção digital. Na Figura 02 é ilustrado o fluxograma que sintetiza a metodologia proposta.

A estimação fasorial dos sinais é obtida através da função complexa do fasor estimado pelos métodos em estudo. As expressões dos algoritmos Fourier de ciclo completo (9) (10), cosseno modificado (11) (12) e método de GUO (13) (14) representam o cálculo das partes real e imaginária dos sinais a serem estimados.

Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma que sintetiza a metodologia proposta.

Figura 2 - Metodologia proposta.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Sinais analíticos

Considere os sinais a seguir:

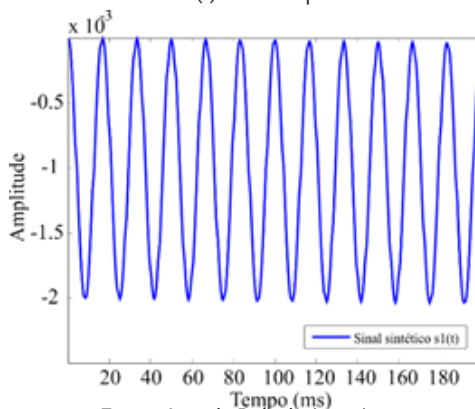
$$s_1(t) = \cosh(h\pi 120t) - e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (15)$$

$$s_2(t) = \cosh(h\pi 120t) + \sinh\left(\frac{h}{2}\right) + e^{\frac{-t}{\tau}}, \quad (16)$$

sendo h h -ésima componente harmônica do sinal e τ a constante de tempo da componente CC de decaimento exponencial.

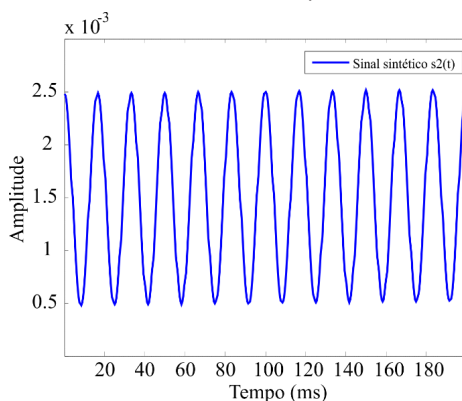
Os modelos referem-se ao fasor fundamental sob influência da componente CC de decaimento exponencial. O sinal $s_1(t)$ contém a componente fundamental do sinal subtraída de uma componente fundamental CC de decaimento exponencial, já o sinal $s_2(t)$ contém a componente fundamental do sinal somada a uma componente CC de decaimento exponencial, conforme as, conforme mostrado nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3 - Simulação do sinal de entrada $s_1(t)$ com componente harmônica de primeira ordem.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 4 - Simulação do sinal de entrada $s_2(t)$ com componente harmônica de primeira ordem.



Fonte: Autoria Própria (2020).

No total seis simulações serão realizadas e permitirão obter o desempenho em resposta no tempo dos métodos de estimação de fasores para cada sinal analítico avaliado, conforme os parâmetros mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nas simulações.

Sinal Analítico	h	τ
$S_1(t)$		
$S_2(t)$	1,2,3	5

Fonte: Aatoria Própria (2020).

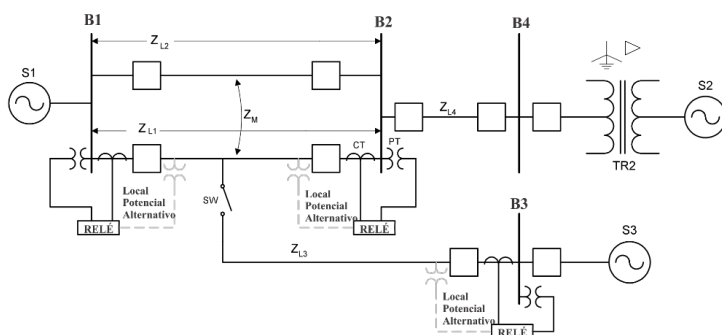
As estimações paramétricas aplicadas aos métodos avaliados nesta etapa foram obtidas via MATLAB, que utilizou os sinais sintéticos indicados nas Figuras 3 e 4, além das demais simulações mostradas pelos parâmetros da Tabela 1, utilizados como dado de entrada. Os sinais de entrada (identificados como sinais analíticos) passam por um processo de filtragem digital, após o janelamento dos sinais analógicos a serem estimados. Os procedimentos, quando aplicados, reduzem as interferências presentes na mesma, tornando-o um sinal adequado para análise. Para os sinais sintéticos das Figuras 3 e 4, as interferências são visivelmente desprezíveis, por apresentar menor quantidade de amostras. Ao mesmo tempo, tal condição não diminui a importância do procedimento de filtragem digital na estimação fasorial.

Sinais do sistema elétrico de energia

As simulações utilizaram o SEE simplificado ilustrado na Figura 5. O modelo do sistema de energia para o estudo de caso é baseado no modelo de referência EMTP para teste de relé de linha de transmissão, que é introduzido pelo IEEE PES Power System Relaying Comitê (PSRC). O sistema de transmissão de 230 kV foi modelado no ATP, que permite

uma representação detalhada do sistema elétrico utilizado para uma simulação de falta. O sistema constitui-se de três LT, cada uma com aproximadamente 64 km de comprimento: a primeira linha ($L_{1,2}$) é uma linha de circuito duplo entre os barramentos B_1 e B_2 ; a segunda linha (L_3) é retirada da linha (L_1) de circuito duplo e termina no barramento B_3 ; a terceira linha (L_4) do sistema conecta-se entre os barramentos B_2 e B_4 . Os parâmetros da linha são calculados em 60 Hz com uma resistividade do solo equivalente a $50(\Omega - m)$. As fontes S_1 e S_3 de 230 kV são modeladas como fontes ideais, constituintes de fontes senoidais com uma impedância de Thevenin. A fonte S_2 conectada ao barramento B_4 através de um transformador elevador é modelado como uma máquina com tensão de 24 kV. Para o sistema de energia da Figura 4, será submetido uma falta trifásica aplicada uma distância de 90 km do barramento B_1 , com resistência de falta de 0Ω e ângulo de incidência 90° .

Figura 5 - Modelo de sistema de linha de transmissão de 230 kV a ser modelado no ATP.



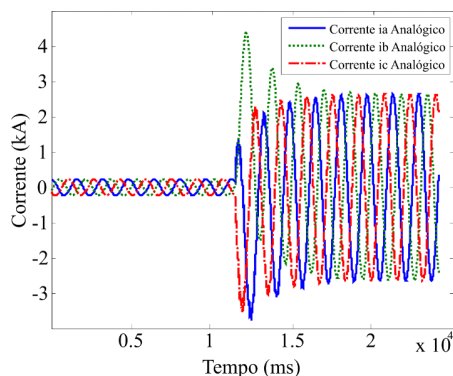
Fonte: Adaptado de IEEE PES *Power System Relaying Committee* - PSRC (2004).

O resultado é a obtenção de dados que permitem obter os sinais analíticos de tensão e corrente gerados pela falta característica, conforme mostrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Em ambas as simulações, observa-se um equilíbrio entre as três fases até o instante da falta. No ins-

tante quando é detectado a falta, ocorre então a interferência nas três fases do sistema elétrico. A partir destas simulações, entende-se que estes sinais não são apropriados para o processo de estimação fasorial.

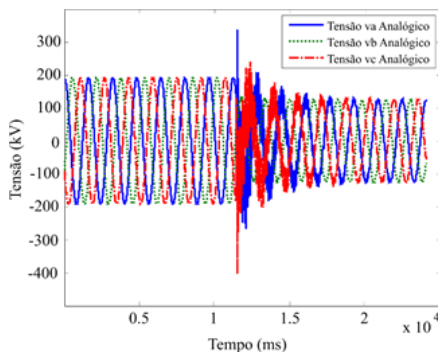
No *Matlab*[®], utiliza-se os sinais analíticos de entrada das Figuras 6 e 7, para aplicar filtragem digital, posterior do janelamento dos sinais analógicos e discretização A/D, afim de diminuir as interferências presentes na mesma. O resultado é a atenuação completa dos ruídos anteriormente presentes nos sinais mostrados nas Figuras 6 e 7, conforme apresenta-se nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 6 - Formas de onda para a falta trifásica do sinal corrente.

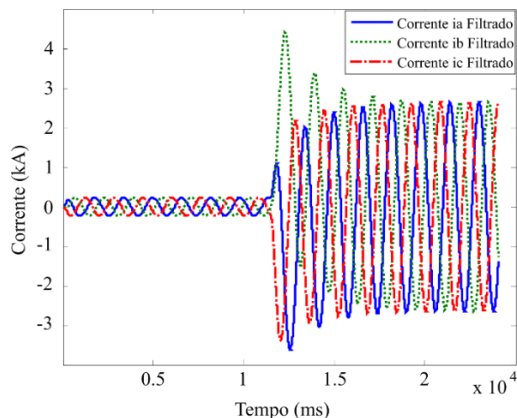


Fonte: Autoria Própria (2020).

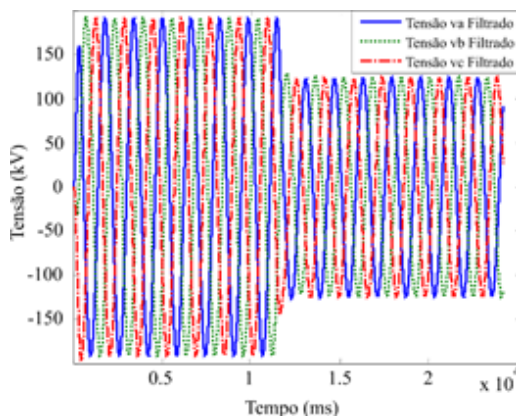
Figura 7 - Formas de onda para a falta trifásica do sinal tensão.



Fonte: Autoria Própria (2020).

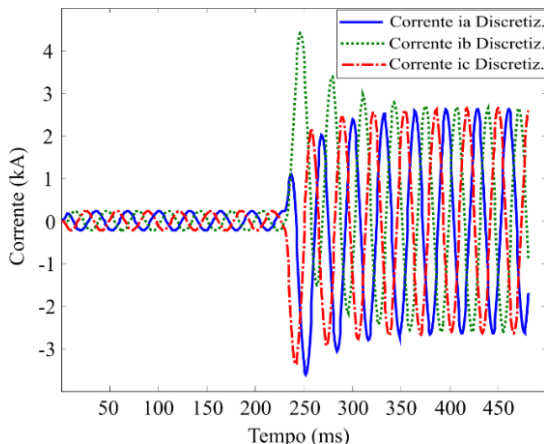
Figura 8 - Formas de onda do sinal corrente após processo de filtragem.

Fonte: Autoria Própria (2020).

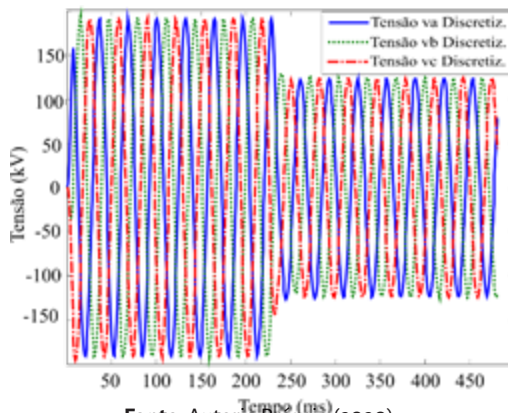
Figura 9 - Formas de onda do sinal tensão após processo de filtragem.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se os sinais de corrente e tensão discretizados. Este processo converte os sinais analógicos para a forma digital em intervalos de tempo precisos definidos pela frequência de amostragem f_s , que neste trabalho é igual a 1920 Hz. Os sinais digitais permitem que o esforço computacional seja reduzido quando aplicados na estimação fasorial, além de reduzir o número de amostras do sinal.

Figura 10 - Formas de onda do sinal corrente após discretizados.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 11 - Formas de onda do sinal tensão após discretizados.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados as simulações e resultados da estimação fasorial obtidas pelas técnicas baseadas nos métodos TDFCC, CM e GUO, onde são submetidos a comparação da resposta no tempo. As

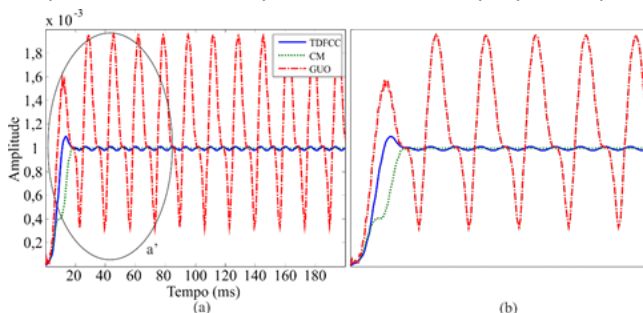
simulações que expressam as características de resposta dos métodos foram executadas a partir do programa *Matlab*®.

Análise dos sinais analíticos

As simulações de resposta no tempo dos algoritmos de estimação de fasores obtidas a partir dos sinais analíticos é avaliada durante a fase de transição entre os regimes permanente de pré-falta e de falta do sinal, que nesse caso já ocorre nos primeiros instantes do sinal aplicado.

Apresenta-se, na Figura 12, o desempenho dos métodos TDFCC, CM e GUO sobre os módulos de amplitude estimados para o sinal sintético $s_1(t)$. Nota-se que as formas de ondas na fase de transição entre os regimes permanente de pré-falta e de falta do sinal deixam de ser puramente senoidais. Tal comportamento é proveniente da influência da componente DC de decaimento exponencial. Os métodos TDFCC e CM apresentam trajetória com menores impactos de perturbação na fase transitória. Em termos de precisão gráfica, a amplitude estimada pelo método CM converge para o valor final rapidamente devido ao seu melhor percurso. O algoritmo proposto por GUO apresenta o pior desempenho para este caso, o método além de apresentar trajetória com ruídos na fase de transição, propagar-se sob características não-senoidais instantes após falta.

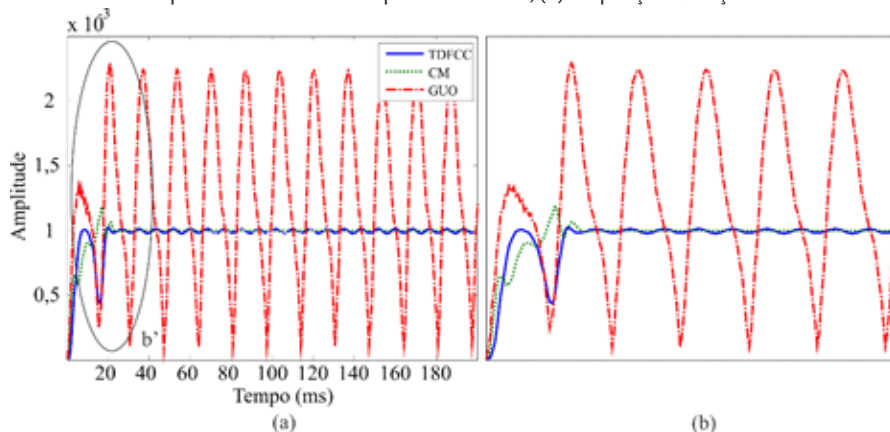
Figura 12 - (a) Resposta no tempo da estimativa de amplitude do fasor para o sinal $s_1(t)$, com componente harmônica de primeira ordem; (b) ampliação da seção a' .



Fonte: Autoria Própria (2020).

Apresenta-se, na Figura 13, o desempenho dos métodos TDFCC, CM e GUO sobre os módulos de amplitudes estimados para o sinal sintético $s_2(t)$. Durante a fase de transição entre os regimes permanente de pré-falta e de falta, o comportamento não senoidal dos módulos de amplitude é ainda mais intenso. A amplitude estimada pelo método CM apresenta melhor convergência. Os métodos TDFCC e CM apresentam trajetória com distorções significativas, mas com comportamento suave. Em termos de precisão, o método CM tem melhor convergência. O algoritmo proposto por GUO apresenta o pior desempenho, o método apresenta ruídos ainda maiores no módulo de amplitude na fase de transição, além de propagar-se sob características não-senoidais após falta do sinal.

Figura 13 - (a) Resposta no tempo da estimativa da amplitude do fasor para o sinal $s_2(t)$ com componente harmônica de primeira ordem; (b) ampliação da seção b' .



Fonte: Autoria Própria (2020).

As demais simulações do grupo de sinais analíticos testados com os parâmetros da Tabela 1 apresentam comportamentos semelhantes, as mesmas indicam maior distorção do sinal na faixa de transição entre os regimes permanente de pré-falta e de falta quando comparados as simu-

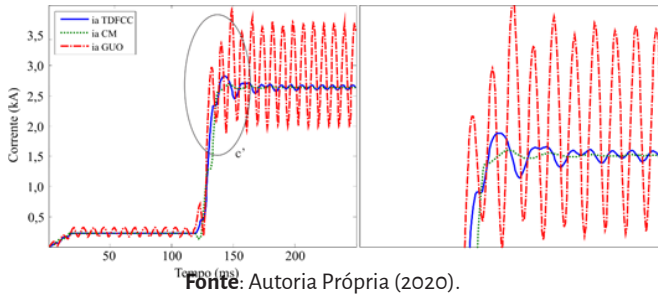
lações mostradas nas Figuras 12 e 13. As distorções senoidais são justificadas devido a interferência da componente DC de decaimento exponencial e contribuição do aumento da componente harmônica.

Análise dos sinais do sistema elétrico

O desempenho da resposta no tempo dos algoritmos de estimação de fasores a partir do SEE é avaliado durante a fase de transição entre os regimes permanente de pré-falta e de falta sobre módulos de corrente e tensão. Os sinais de corrente e tensão são obtidos em simulações no programa ATP, que permite uma representação detalhada do sistema elétrico utilizado para simulação de faltas na LT. Esses sinais analíticos são tratados no *Matlab*[®], de forma que estejam nas condições favoráveis para o processo de estimação fasorial.

Apresenta-se, na Figura 14, a resposta no tempo sobre os módulos de amplitude do fasor fundamental de corrente na fase A, a partir dos métodos de estimação fasorial em estudo. Como comportamento natural esperado, nos primeiros instantes após a falta, as formas de onda de tensão e corrente deixam de ser puramente senoidais, tal comportamento comprova as oscilações comuns nos módulos dos fasores estimados quando detectado a falta, provenientes dos efeitos causados pela presença da componente DC de decaimento exponencial. As oscilações nos módulos de corrente no instante de falta estão mais presentes nos módulos de corrente calculados pelo método baseado na TDFCC. O método CM sobressai-se com o melhor desempenho, pois apresenta trajetória mais suave nas condições pré e pós-falta. O algoritmo proposto por GUO apresenta mudanças significativas no módulo de corrente quando propício a falta, tornando-se assim, o método com a pior resposta transitória.

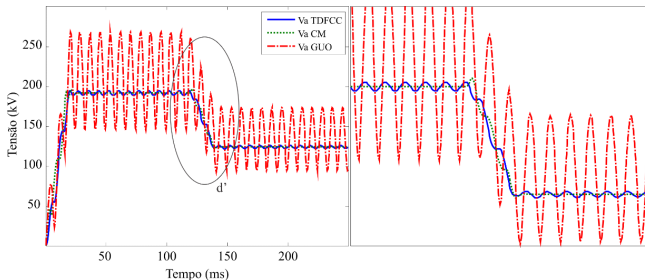
Figura 14 - Resposta no tempo dos módulos de amplitude do fasor corrente na fase A da falta ABC; (b) ampliação da seção c'.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Por outro lado, o desempenho dos métodos em estudo sobre os módulos de tensão apresenta resposta mais suave quando comparadas com o desempenho dos métodos nos módulos de corrente. As oscilações presentes na fase transitória de pré e pós-falta são menos afetadas pela componente DC, como mostra na Figura 15, respectivamente. Os métodos TDFCC e CM apresentam desempenhos parecidos na fase transitória, ambos com trajetória suave e convergência compatível. O método de GUO apresenta comportamento que difere totalmente dos demais métodos avaliados, não há nenhuma variação incomum de comportamento durante a fase transitória de pré e pós-falta, seu desempenho não nos dá a segurança que possibilite avaliar o método com o melhor ou pior desempenho.

Figura 15 - Resposta no tempo dos módulos de amplitude do fasor tensão na fase A da falta ABC; (b) ampliação da seção d'.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Para as demais fases B e C, poucas são as alterações nas características de resposta da estimação de fasores dos métodos avaliados sobre os módulos de corrente e tensão. Os módulos de tensão seguem com respostas mais suaves na fase transitória de pré e pós-falta, o que inviabiliza a análise de desempenho de método de forma gráfica. Já os módulos de corrente apresentam uma maior percepção de análise, mas que ao mesmo tempo segue o mesmo padrão de comportamento.

Conclusões

Neste trabalho foi apresentado a análise e implementação dos métodos de estimação de fasores e utiliza como principais ferramentas três algoritmos distintos: Transformada de Fourier de Ciclo Completo (TD-FCC), Cosseno Modificado (CM) e algoritmo de GUO. Tendo em vista a importância do uso dos métodos de estimação fasorial nos dispositivos de proteção, este trabalho apresenta os procedimentos que determinam as características de ondas senoidais fundamentais, que permitem mensurar de desempenho das mesmas em condições de falta. Análises comparativas foram realizadas frente aos métodos a partir de duas aplicações, que foram utilizados para avaliar a resposta no tempo dos métodos propostos, especificamente a faixa transitória de pré e pós-falta.

Dos resultados obtidos, constatou-se que a influência dos harmônicos nos sinais analíticos só aumentou as interferências nos módulos de amplitude dos métodos estimados. De acordo com os resultados gráficos obtidos, o método proposto baseado na TDFCC é bastante adequado para os sinais que apresentam parâmetros mais comprometedores.

Para as simulações obtidas pelo sistema elétrico, a amplitude em todos os casos analisados depende dos valores de tensões e correntes no instante imediatamente anterior à ocorrência do distúrbio. Entretanto,

de um modo geral, a influência desta componente é mais presente nos sinais de corrente. Os resultados indicam que nos módulos de corrente o método CM possui melhor resposta transitória com menos oscilações. Os módulos de tensão apresentam resposta transitória suave, livre de grandes oscilações.

A componente CC de decaimento exponencial presente nos sinais tem grande relevância no desempenho instável dos métodos propostos neste trabalho, comprovado da revisão bibliográfica realizada como um dos maiores problemas na estimação fasorial.

Conclui-se que os parâmetros de resposta no tempo obtidos pelas simulações não são precisos o suficiente para garantir a definição de melhor método para os dispositivos de proteção. Nesses casos, sugere-se que mais parâmetros de falta devam ser avaliados afim de garantir total confiabilidade do algoritmo quando a sua velocidade, convergência, eficiência e aplicação.

Referências

FORMIGA, D. A. **Estimação de fasores para proteção de sistemas elétricos baseada em mínimos quadrados e morfologia matemática**, Dissertação (Mestrado), Centro de Tecnologia de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande no Norte, RN, 116 p. 2012.

GUO, Y; KEZUNOVIC, M. C. D. **Simplified Algorithms for Removal of the Effect of Exponentially Decaying DC-offset on the Fourier Algorithm**, IEEE Transaction on Power Delivery, v. 18, n. 3, p. 711-717, 2003.

KÜSEL, B. F. **Proteção de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 132 p. 2014.

PHADKE, A. G; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**, 2^o Edition, New York, USA: John Willey Sons Inc. 2009.

Power System Relaying Committee. **EMTP reference models for transmission line relay testing report**, draft 10a, Tech. Rep. 2004.

ROCHA, R. V. **Algoritmos recursivos e não-recursivos aplicados à estimação fasorial em sistemas elétricos de potência**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2016.

SCHWEITZER, E. O.; HOU, D. **Filtering for protective relays**, In: WESCANEX93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE., p. 15-23. 1993.

SILVA, C. D. L. **Estimação fasorial aplicada a relés de proteção numéricos utilizando os métodos de ajuste de curva e redes neurais artificiais**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, RS, 77p. 2014.

SILVA, K. M. **Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, PE, 208p. 2009.

Aplicação residencial do Programa Brasileiro de Etiquetagem

*Railana Araujo da Silveira
Joaquim Jorge Martins Galo*

Introdução

O Brasil vivenciou uma grande crise energética no ano de 2001, não havia como abastecer as usinas hidrelétricas – a principal fonte de energia elétrica brasileira, devido à falta de chuvas e os baixos índices dos reservatórios. Em virtude dos acontecimentos relacionados à crise energética, surge à necessidade de criar mecanismos para o uso racional de energia elétrica. Além disso, o aumento do custo de energia demanda que estes mecanismos tenham grande impacto para os mais diversos setores. Alguns desses mecanismos são o PBE EDIFICA e o PROCEL, programa voltado para a análise do nível de eficiência energética (EF), não só de eletrodomésticos e carros, mas também de edificações, e programa que tem como desígnio primordial constatar as edificações que evidenciam as mais aconselháveis classificações de eficiência energética em um dado padrão.

No Brasil, vários procedimentos para promover a conservação de energia foram elaborados ao longo dos últimos anos, em decorrência do cenário que vem sendo presenciado e a necessidade de garantir meios para preservar os recursos naturais para as gerações futuras e a necessidade de evidenciarmos de forma efetiva o conceito do desenvolvimento sustentável em todos os âmbitos das atividades do ser humano.

Em consequência disto, a EF aplicada a edificações é denotada em consonância com o debate conceitual a respeito das questões relaciona-

das à sustentabilidade e eficiência na Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, suas proposições, seus argumentos e medidas correntes no Brasil e no mundo.

Em 2009, o Programa Brasileiro de Etiquetagem foi implantado pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME), com o propósito de disponibilizar aos consumidores informações que lhes permitissem avaliar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos e selecionar em sua decisão de compra, aqueles de maior eficiência em relação ao consumo de energia, reduzindo o valor das contas de energia elétrica da população em geral. Além disso, o PBE visa reduzir investimentos em novas unidades geradoras (PNE, 2010).

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) criado em 1985, é um programa ligado ao MME, com o intuito de estabelecer parâmetros para auxiliar nos procedimentos de conservação de energia elétrica, conferindo condições favoráveis para a utilização eficaz e eficiente da energia elétrica e redução dos gastos desnecessários.

Em 2009, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) expediu o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PBE EDIFICA), criado pelo PROCEL como meio de impulsionar excelentes níveis de Eficiência Energética em edificações novas ou já construídas, tanto comerciais, residenciais e dos setores público ou privado.

Atualmente o Brasil vem evidenciando a utilização de etiquetas que mensurem o nível de eficiência energética de edificações para propiciar um melhor uso de energia, e verificar a melhor arquitetura e componentes que compõem a edificação. Além disso, essas novas propostas incentivam e impulsionam a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação) em edificações, e a busca por um melhor desempenho energético da edificação.

Para o uso desse procedimento de etiquetagem, é imprescindível a aceitação do método por parte dos profissionais envolvidos, principalmente os profissionais das áreas de arquitetura e engenharia. Para tanto, este método deve apresentar aspectos que o tornem afável e eficiente, tais como aplicabilidade clara, a viabilidade econômica e um método que assegure uma avaliação com eficácia dos requisitos que de fato serão contribuintes para o aditamento da eficiência energética.

Assim, o tema abordado neste trabalho tem sua importância, pois por ser um programa recente e que ainda está sendo disseminado é pouco discutido no meio acadêmico em disciplinas que podem englobar o assunto. Além disso, o trabalho em questão vai de encontro com o método proposto pelo Regulamento Técnico de Qualidade - Residencial (RTQ-R), inferindo que os requisitos técnicos avaliados pelo RTQ-R não se aplicam a todas as edificações já construídas e nem a todas as regiões geográficas, buscando verificar a sua aplicabilidade, os aspectos que são avaliados e por estes, analisando a possível inserção de aspectos que são pertinentes no objeto de estudo deste trabalho.

Em consonância com o PBE Edifica e o Manual do RTQ-R, e levando-se em conta que no contexto que estamos atualmente e que a aplicação do Programa Brasileiro de Etiquetagem está em avanço, é imprescindível que as novas construções estejam sendo formuladas visando um maior empenho energético e conforto. Uma vez que as residências típicas da cidade de Governador Mangabeira em sua composição apresentam em seus elementos construtivos como em portas, janelas e telhados materiais e propriedades que não favorecem tanto os quesitos iluminação e ventilação natural, o que pode estar atrelado a fatores como condição social e fator de segurança.

Este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade de aplicação do método prescritivo para obter o nível de eficiência energética em cin-

co edificações localizadas na região da Zona Bioclimática 8, típicas da cidade de Governador Mangabeira/BA, conseqüentemente será estudado destas qual obteve melhor pontuação de acordo com suas características construtivas e propor medidas que contribui para a melhor pontuação na determinação região estudada.

Materiais e métodos

Eficiência energética e edificações residenciais

No Brasil, houve cerca de 35% de aumento no consumo de eletricidade nos últimos 10 anos, estando entre os 20 países que mais emitem gases de efeito estufa desde a década de 90, em decorrência do crescimento acelerado da urbanização, do consumo de energia e das emissões de dióxido de carbono (CO₂). A partir, daí, é que vigora a atuação da Eficiência Energética, aplicada não só a equipamentos, mas às edificações, com o intuito de reduzir em torno de 50% o consumo de energia em edifícios novos e 30% para edifícios já construídos.

Em resumo, eficiência energética é a capacidade de diminuir o gasto de energia mantendo-se, contudo, a quantidade e qualidade do serviço energético prestado por determinado aparelho. Não se trata, pois, do racionamento do serviço, mas sim da substituição do aparelho objetivando a redução do consumo de energia (CÓRREA, 2016).

Ademais, as aplicações de eficiência energética não se restringem à apenas aparelhos, segundo o PROCEL, o consumo de energia elétrica no Brasil em edificações residenciais, comerciais e de serviços públicos, é bastante elevado, estando aproximadamente em 50% de toda a eletricidade consumida no país (PROCEL, 2006).

As medidas convencionais que podem ser empregadas para melhorar o desempenho energético dos edifícios podem ser classificadas

em aquelas que estão imediatamente relacionadas com a envoltória do edifício, por exemplo, os elementos de construção, e aqueles que se relacionam com a operação dos sistemas de energia usada para aquecimento, arrefecimento, ventilação, abastecimento de água quente, etc. (ABREU, 2015; apud KOLOKOTSA *et. al.*, 2009).

A eficiência energética mostrar-se então como uma alternativa à necessidade de construção de novas fontes de energia, promovendo o uso mais adequado dos recursos atuais, promovendo ainda maior desenvolvimento tecnológico, com significativa redução de desperdícios e das perdas operacionais (BEN, 2016), de certo modo é empregar o uso racional de energia, buscando-se manter o mesmo padrão de qualidade e produtividade.

Os materiais de construção têm uma forte influência sobre as condições de conforto do ambiente interior. A especificação dos materiais exige o entendimento de suas propriedades e de sua adequação às características plásticas do projeto. O uso de isolamento térmico ou proteção solar em paredes, janelas e telhados, o tipo de telha e o tipo de vidro empregado nas janelas devem ser estudados a fim de se evitar ganhos térmicos excessivos e obter melhorias nas condições de conforto no interior (LAMBERTS *et al.*, 2014). Dessa forma, a eficiência energética está extremamente em elo com os elementos construtivos de uma edificação, visto que quanto maior for o benefício da utilização desses materiais maior desempenho energético será obtido em edificações. À vista disso, para construção de edifícios mais eficientes energeticamente, é preciso está de acordo com as condições ambientes de sustentabilidade e com menor consumo de energia (LAMBERTS *et al.*, 2014).

A ELETROSUL - Centrais Elétricas S.A. e a ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., em parceria com o PROCEL, como o objetivo de

buscar eficiência energética, visando o uso racional de energia e de água, criaram, por meio da UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina / LA-BEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, um projeto de uma residência unifamiliar eficiente, que serve também para trabalhos dos profissionais da comunidade acadêmica e do mercado da construção civil (ELETROSUL, 2014). Segundo a ELETROSUL (2014), a Casa Eficiente foi projetada para se tornar uma vitrine de tecnologias de ponta de eficiência energética e conforto ambiental para edificações residenciais.

Programa brasileiro de etiquetagem em edificações

No ano de 2001, foi regimentado o Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País (GT-Edificações) por meio do decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, que constitui processos para a análise da eficiência energética das edificações construídas no Brasil, no intuito de estabelecer o uso racional da energia elétrica, e regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, a Lei da Eficiência Energética, que disciplina *in verbis* “Art. 1º. A Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente” (BRASIL, 2001).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PBE EDIFICA) é um organismo criado pelo PROCEL em parceria com o INMETRO, lançado em 2009 com sua versão para edificações comerciais, de serviços e públicos, e em 2010, para edifícios residenciais, unifamiliares e multifamiliares. A etiqueta foi desenvolvida como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem, com a missão de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação, etc.) nas edificações brasileiras, reduzindo desperdícios e impactos ambientais (INOVATECH, 2018).

Segundo o INMETRO, a etiqueta é uma forma de evidenciar os requisitos mínimos de desempenho, estabelecidos em normas e regulamentos técnicos. A ENCE classifica o nível de eficiência energética de aparelhos, veículos e edifícios em faixas que vão de A de mais eficiente a E menos eficiente, fornecendo informações relevantes, como por exemplo, o consumo de combustível dos veículos e a eficiência na lavagem e no uso da água em lavadoras de roupa. Existem dois tipos de ENCE, uma para cada etapa de inspeção: ENCE - Projeto da Edificação, entregue após a inspeção de projeto; e a ENCE - Edificação Construída, entregue após a inspeção na edificação construída (INMETRO, 2013).

Para a aplicação da etiquetagem foi lançado em 2009, o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ), integrado ao RTQ está o Manual para aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e o RTQ-R, que apresenta os quesitos técnicos para a análise da Eficiência Energética das edificações. O objetivo do RTQ-R, conforme o INMETRO (2012) é de orientar o leitor quanto à aplicação do RTQ-R para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais e esclarecer eventuais dúvidas a respeito dos métodos de classificação, levando em consideração que devem ser atendidos pela edificação em avaliação os requisitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para as Unidades Habitacionais e edificações unifamiliares há dois sistemas individuais que compõem o nível de eficiência energética de acordo com a Zona Bioclimática e a região geográfica em que a edificação se localiza: a envoltória e o sistema de aquecimento de água. Em edificações multifamiliares pondera-se a pontuação total de todas as UH's pelas suas áreas úteis. Para obter o nível de eficiência das áreas de uso comum, são avaliadas as áreas comuns de uso frequente (iluminação artificial,

bombas centrífugas e elevadores) e as áreas comuns de uso eventual (iluminação artificial, equipamentos, sistema de aquecimento de água para banho, piscina e sauna) existentes na edificação. Para as áreas de uso comum também é possível somar bonificações (INMETRO, 2012). E outros documentos auxiliares, com o Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética (RAC), todos lançados pelo INMETRO.

A Avaliação da Conformidade é o processo sistematizado, com regras pré-estabelecidas, devidamente acompanhado e avaliado, de forma a propiciar adequado grau de confiança de que um produto, processo ou serviço, ou ainda um profissional, atende a requisitos pré-estabelecidos pela base normativa, com o menor custo possível para a sociedade (INMETRO, 2013).

Método de avaliação e aplicação da etiquetagem

A elaboração do trabalho contempla primeiramente uma revisão bibliográfica abrangendo os conceitos fundamentais e trajetória histórica dos programas que deram margem para a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem, nos levando assim ao acesso do material que contém as informações para a aplicação da etiquetagem da edificação e seu nível de eficiência energética.

O estudo também é composto de dados bibliográficos e descritivos do método específico do programa de etiquetagem para residências, sendo este o método prescritivo o qual é avaliado em mais adequado para este tipo de edificação, evidenciando os parâmetros utilizados para tal finalidade. Uma vez definidos e estudados os parâmetros, serão aplicados em residências típicas localizadas em Governador Mangabeira, Bahia, observando se a edificação em análise atende aos pré-requisitos básicos, uma área inferior a 500 m² e sem condicionamento artificial de ar.

Em sequência serão retiradas as informações primordiais da residência para a aplicação da metodologia prescritiva de etiquetagem. Essas informações serão colocadas na planilha de Análise da Unidade Habitacional, elaborada pelo CB3E, as quais são disponibilizadas pelo site do PBE Edifica¹. A partir dos resultados obtidos, será avaliada a influência dos componentes construtivos das edificações na sua classificação e propor possíveis mecanismos que podem ser aplicadas as residências no local estudado.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem de Eficiência Energética, segundo o Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Residenciais prevê dois métodos de avaliação. São eles: o método da simulação e o método prescritivo.

No método da simulação o desempenho da envoltória da edificação é determinado por meio de simulação computacional. Para tanto, deve-se modelar a geometria da edificação sob avaliação e realizar simulações para duas condições: uma para a edificação quando naturalmente ventilada e outra para a edificação quando condicionada artificialmente. Para a avaliação da edificação utilizando a simulação deve-se atender aos pré-requisitos estabelecidos quanto ao programa e ao arquivo climático utilizado na simulação. Estas exigências têm a intenção de garantir a obtenção de resultados coerentes (INMETRO, 2010).

No método prescritivo o desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional é determinado pelo seu equivalente numérico (EqNumEnv), estabelecido através das equações de regressão múltipla para unidades habitacionais autônomas, de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação está localizada. O equivalente numérico do desempenho térmico da envoltória a ser utilizado para o cálculo da pontuação

¹ <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/planilhas-catalogo>

geral da UH deve ser o referente à eficiência quando naturalmente ventilada. O nível de eficiência da envoltória quando condicionada artificialmente é de caráter informativo. O cálculo do Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv) visa prever como a envoltória de uma edificação vai impactar o seu consumo de energia. O extenso território do Brasil abrange diferentes realidades climáticas que exigem estratégias distintas para alcançar condições de conforto térmico e eficiência energética nas edificações (INMETRO, 2010).

Neste trabalho será discutido apenas o método prescritivo, pois é o mais recomendado para a análise de residências unifamiliares, e neste caso, usaremos adequações conforme a estrutura e elementos construtivos das residências, isto porque para a aplicação do método ele pressupõe edificações com componentes construtivos em vidro, com ampla abertura para ventilação e iluminação natural, e outros componentes que é possível encontrar em edificações de alto padrão ou multifamiliares, o que não se assemelha as residências que neste trabalho serão analisadas, que apresentam poucas áreas de iluminação e ventilação natural, em seus componentes construtivos apresentam uma área bem reduzida em vidro predominando o elemento madeira, e se classificam como edificações de baixo e médio padrão.

Para a aplicação do RTQ-R, mediante o método prescritivo serão tomadas como bases características das residências como a eficiência da envoltória, o sistema de aquecimento de água e verificação de bonificações.

A envoltória é o conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas, empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem. Não estão incluídos pisos, estejam eles ou não em contato com o solo (INMETRO, 2012). O RTQ-R recomenda que cada ambiente da edificação seja avalia-

do, assim são analisadas as propriedades dos materiais construtivos das fachadas e da cobertura, das áreas de aberturas e da existência de dispositivos de sombreamento, considerando as suas dimensões.

Utilizando o Anexo V do RAC para a determinação das propriedades como absorvância solar, transmitância térmica, capacidade térmica. Ainda para a avaliação da envoltória é considerada a orientação solar das fachadas das residências, e a posição dos ambientes em relação ao contato com o solo.

Para a avaliação da eficiência do sistema de aquecimento de água o RTQ-R, busca verificar se a edificação possui sistemas eficientes de aquecimento, como sistemas de aquecimento solar, a gás, bombas de calor, não deixando de avaliar caso o sistema de aquecimento seja elétrico.

A avaliação das bonificações verifica mecanismos existentes nas edificações que beneficiem sua eficiência final, cada bonificação apresenta uma pontuação, que é estabelecida de acordo com o Manual do RTQ-R para as medidas que aumentem a EF da residência analisada podendo chegar ao máximo de 1,0 (um) ponto, e tomam-se como base os seguintes quesitos:

- Ventilação Natural (porosidade, dispositivos especiais, centro geométrico, permeabilidade): até 0,40 pontos;
- Iluminação Natural (Profundidade e Refletância do teto): até 0,30 pontos;
- Uso racional de água: até 0,20 pontos;
- Condicionamento artificial de ar: até 0,20 pontos;
- Iluminação artificial: até 0,10 pontos;
- Ventiladores instalados no teto: 0,10 pontos;
- Refrigeradores instalados na UH: 0,10 pontos;
- Medição Individualizada: 0,10 pontos.

O nível de eficiência de cada requisito equivale a um número de pontos correspondentes, atribuídos apresenta-se conforme a Tabela 1 e em escala conforme a Tabela 2.

Tabela 1: Equivalente Numérico (EqNum) para cada nível de eficiência.

Nível de Eficiência	EqNum
A	5
B	4
C	3
D	2
E	1

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2: Classificação do nível de eficiência com a pontuação em escala.

Pontuação (PT)	Nível de Eficiência
$PT \geq 4,5$	A
$3,5 \leq PT < 4,5$	B
$2,5 \leq PT < 3,5$	C
$1,5 \leq PT < 2,5$	D
$PT < 1,5$	E

Fonte: Autoria própria(2020).

As edificações analisadas são de uso residencial unifamiliar, ou seja, possui uma única unidade habitacional autônoma (UH) no lote, e se encontram na etapa de construções já existentes. As residências selecionadas para a amostra da análise são típicas da cidade de Governador Mangabeira/BA, isto é, são construções com materiais construtivos que são recorrentes na cidade, tendo poucas variações, principalmente em relação às partes em vidros dispostos em suas janelas e portas, que contribui na iluminação natural da residência.

Os materiais construtivos de janelas, portas e telhados seguem o mesmo modelo da Residência 1 umas das residências avaliadas, conforme apresentados nas Figuras 1, 2 e 3:

Figura 1. Fachada frontal da residência 1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 2. Porta da residência 1.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 3. Janelas da residência 1.



Fonte: Autoria própria (2020).

A orientação das fachadas, que são os elementos que fazem parte do fechamento da edificação, tem papel fundamental na análise da eficiência da envoltória. Por este motivo define-se a orientação de cada uma das fachadas. Esta definição segue o seguinte parâmetro:

- i. De 0 a 45,0° e de 315,1° a 360,0° a orientação geográfica é Norte;
- ii. De 45,1° a 135,0°, a orientação geográfica é Leste;
- iii. De 135,1° a 225,0°, a orientação geográfica é Sul;
- iv. De 225,1° a 315,0°, a orientação geográfica é Oeste.

Com esta análise e com o auxílio de um aplicativo de bússola digital, o Compass Galaxy (SZYMON, 2017) foi observado que a residência 1 possui sua fachada frontal para a orientação norte com variação de 2,1°, a residência 2, uma variação da fachada frontal de 45,3° logo a orientação geográfica é para o leste, a residência 3 possui sua fachada frontal para a orientação sul com variação de 165°, a residência 4 possui sua fachada frontal para a orientação sul com variação de 148°, e a residência 5 possui fachada frontal para Norte com variação de 11,3°.

As edificações em estudo estão localizadas na cidade de Governador Mangabeira, na Bahia e pertence, segundo o software “ZBBR – Zoneamento Bioclimático do Brasil” disponível no site do LABEEE da UFSC, à Zona Bioclimática 8. Conforme a NBR 15220-3, para a zona bioclimática, em que a cidade de Governador Mangabeira está localizada, as diretrizes construtivas são: aberturas para ventilação grandes, sombreamento das aberturas, vedações externas: leve refletora para as paredes e para as coberturas, e estratégias de condicionamento térmico passivo para o verão com ventilação cruzada permanente.

A eficiência energética das residências foi analisada de acordo com as recomendações do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações

pelo RTQ-R, considerando as características arquitetônicas, estruturais e elétricas que regem as edificações em estudo.

A classificação final da residência na zona bioclimática com relação à eficiência energética foi obtida usando a Planilha de Cálculo de Desempenho da UH, elaborada pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética de Edificações (CB3E) e disponibilizada no site do PBE Edifica.

O nível de eficiência energética para Unidades Habitacionais Autônomas ou residências unifamiliares é avaliando tomando-se os requisitos relacionados ao desempenho térmico da envoltória, à eficiência do(s) sistema(s) de aquecimento de água e a devidas bonificações. De acordo com a pontuação final obtida é atribuída uma classificação que varia do nível A (mais eficiente) ao E (menos eficiente).

Para as UH's de edificações unifamiliares há dois sistemas individuais que estabelecem o seu nível de eficiência energética: a envoltória e o sistema de aquecimento de água. Estes são avaliados separadamente, obtendo-se níveis de eficiência para cada um deles, cuja combinação em uma equação, de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação se encontra, resulta em uma pontuação para a UH. A esta pontuação pode-se somar bonificações, que resultará na Pontuação Total da UH (PT_{UH}) e no seu nível de eficiência correspondente (INMETRO, 2012). Deste modo, será mostrada a análise dos três quesitos: envoltória, bonificações e sistema de aquecimento de água.

Resultados e discussões

Envoltória

Para a análise da envoltória, alguns pré-requisitos serão primordiais para a classificação das residências. Em relação aos ambientes serão

tomados os Ambientes de Permanência Prolongada que são “ambientes de ocupação contínua por um ou mais indivíduos, incluindo sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório, sala de TV ou ambientes de usos similares aos citados” (INMETRO, 2012).

Para a determinação da eficiência energética de edificações alguns componentes construtivos são indispensáveis para o cálculo da classificação. Assim os elementos construtivos da cobertura e das paredes externas que fazem parte das residências avaliadas neste trabalho são paredes em argamassa interna 2,5 cm, bloco cerâmico 9x14x24 cm e argamassa externa 2,5 cm, com transmitância 2,39 W/m²k e capacidade térmica 152 kJ/m²k; as coberturas possuíam componentes construtivos em forro gesso 3 cm, câmara de ar e telha cerâmica 1 cm, com transmitância 1,94 W/m²k e capacidade térmica 37 kJ/m²k, laje pré-moldada 12 cm sem telhamento, com transmitância 2,95 W/m²k e capacidade térmica 167 kJ/m²k; e cobertura de telha de barro (1 cm) sem forro com transmitância 4,55 W/m²k e capacidade térmica 18 kJ/m².

Para a análise foram colocados na planilha os dados de transmitância térmica (U) que é a transferência de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, e a capacidade térmica (C_p) que é o calor necessário para alterar em uma unidade a temperatura de um sistema. Analisou-se também a absorptância térmica (α) que é o “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície, geralmente relacionada à cor” (INMETRO, 2014). A absorptância térmica foi obtida através do acesso da NBR 15220-2 (2005) que apresenta uma lista das absorptâncias por tipo de superfície e o anexo V, do RT-Q-R, possui uma lista com valores de acordo com algumas cores e tipos de tintas encontradas no mercado.

Com relação a cores e absorvância (α), na residência 1 notou-se que as paredes possuem uma pintura de coloração verde escura de absorvância 0,70. A residência 2 notou-se que a residência possui nas paredes uma pintura de coloração amarela de absorvância 0,30. A residência 3 notou-se que a residência possui nas paredes uma pintura de coloração verde clara de absorvância 0,40, para a residência 4 notou-se que a residência possui nas paredes uma pintura de coloração branca de absorvância 0,20, e para a residência 5 com pintura na cor amarela de absorvância de 0,30. Para a cobertura de telha de cerâmica, foi considerada, a superfície telha com absorvância de 0,75. Cobertura de laje pré-moldada, foi considerada, a superfície concreto aparente com absorvância de 0,65. Por serem considerados valores altos, a absorvância terá uma influência significativa na eficiência da residência. Estes valores podem ser vistos no anexo V do RAC que apresenta alguns valores de absorvância para determinados tipo de superfície e de cores.

As áreas de paredes externas, desconsiderando as aberturas, são postas na planilha de acordo com sua orientação geográfica. As áreas de aberturas externas também são utilizadas na classificação da envoltória que compreende o vão na parede, e sua orientação geográfica.

As esquadrias das áreas de permanência prolongada da residência 1 e 3 são do de tipo madeira com perfis de vidro transparente, basculante e basculhante. Nenhuma das janelas possui dispositivo de sombreamento, como venezianas, acoplados a elas, mas são sombreadas totalmente por varanda. Logo, o somb que define a existência de dispositivo de proteção solar é igual a 0,2. A residência 2 possui elementos construtivos bastante semelhantes. Para o somb, é protegido por varanda apenas as aberturas pertencentes à orientação geográfica Leste, nas demais orientações não há dispositivos, logo somb = 0. A residência 4 e 5 não possui dispositivo de proteção solar logo somb=0.

O fator das aberturas para ventilação indicado por F_{vent} é um valor adimensional proporcional à abertura para ventilação em relação à abertura do vão seus valores variam de 0 a 1. Também, as portas das varandas são tipo madeira com perfil de vidro transparente e são sombreadas devido à geometria da edificação pela varanda. Em tabelas em anexo temos os respectivos F_{vent} para cada ambiente de permanência prolongada nas residências avaliadas e tabelas com as áreas de abertura de cada ambiente.

Para o pré-requisito pé direito é considerado o valor médio deste na edificação, assim na residência 1, 3 e 5 o pé direito é de 2,80 m e da residência 2 e 4 é de 3,10 m. Outras propriedades necessárias para a avaliação do desempenho da envoltória foram obtidas com a utilização do software Autodesk AutoCAD 2017 (versão para estudante), entre estas propriedades estão às áreas de aberturas para ventilação e iluminação.

De posse dos dados expostos previamente, classificou-se a envoltória de cada ambiente segundo duas variáveis. Tais variáveis representam o indicador de graus hora para resfriamento, e o consumo relativo para refrigeração. A variável, consumo relativo para aquecimento não se aplica para a zona B8. Esta classificação é apenas inicial, pois foram avaliados outros requisitos da envoltória no objetivo da obtenção do resultado final.

A zona bioclimática também tem parcela significativa nos pré-requisitos da envoltória dos ambientes. Assim, foram analisados os pré-requisitos das paredes externas, cobertura, iluminação natural dos ambientes e ainda os fatores para iluminação e ventilação natural. O resultado desta avaliação verifica o atendimento dos ambientes aos pré-requisitos destes critérios.

Sistema de aquecimento de água

Para aquecer a água do banho os usuários das cinco edificações estão restritos ao uso de chuveiros elétricos, o que consome grande quantidade de energia elétrica. Segundo o RTQ-R, o baixo nível de eficiência energética atribuído a residências que não possuem sistema de aquecimento de água se justifica pelo fato de o proprietário aquecer a água para o banho com o uso de chuveiro elétrico. Assim, nas regiões Norte e Nordeste o nível D é o nível máximo atingido nas residências que utilizam aquecimento elétrico. Os chuveiros elétricos das residências são todos de 4400 Watts.

Bonificações

Este tópico tem por finalidade avaliar as bonificações presentes na residência. Tal análise envolve critérios como a porosidade das paredes, que por sua vez é função das áreas de aberturas. Além disso, também são considerados critérios relacionados à ventilação e iluminação natural, entre outros. Esta avaliação resultará em uma pontuação final para o quesito bonificações. O primeiro quesito avaliado foi à porosidade da envoltória, considerando as áreas totais de fachadas nas orientações geográficas Norte, Sul, Leste e Oeste, incluindo todos os ambientes da unidade residencial, determinando assim um percentual de porosidade nas quatro orientações.

Em seguida, analisaram-se as bonificações relacionadas à iluminação natural. Utilizando os valores das profundidades dos ambientes de permanência prolongada incluindo lavanderia e cozinha, foi verificado que todos os ambientes atenderam a este quesito. As residências receberam 0,2 de bonificação pelo atendimento deste critério. Todos os ambien-

tes da edificação possuem refletância maior que 0,6. Portanto todos os ambientes atenderam a este pré-requisito e por isso a residência recebeu 0,1 de bonificação. Com relação à iluminação artificial todos os ambientes possuem fontes de iluminação com eficiência superior a 75 lm/W ou com selo Procel, recebendo assim 0,1 de bonificação.

A planilha de cálculo utilizada ainda considera vários outros quesitos de bonificação. Como exemplo destas bonificações pode-se citar a permeabilidade, o uso racional de água, condicionamento artificial de ar e outros. Por não estarem presentes nas residências estudadas ou não ter atendido o pré-requisito, não foram recebidas estas bonificações.

Classificação final das Unidades habitacionais

De posse de todos os resultados obtidos anteriormente, determinou-se através da planilha o equivalente numérico da pontuação final de cada residência e sua classificação com relação à eficiência energética, como podemos observar na tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Pontuação final das tipificações das residências.

Tipificação	Pontuação
1	2,81
2	2,62
3	2,82
4	2,55
5	2,55

Fonte: Autoria Própria (2020).

Com o resultado final obtido, pode-se afirmar que as residências tiveram uma razoável classificação energética na zona bioclimática 8, levando em conta que seus materiais construtivos não são comuns aos que

aparecem na metodologia do RTQ-R, além disso observou-se que todas as cinco residências típicas, classificaram-se em nível de eficiência C, correlacionando os valores numéricos em escala obtidos da Tabela 2 com a classificação da eficiência da Tabela 1. Mais adiante neste trabalho encontram-se recomendações futuras que podem melhorar esta classificação na região estudada.

Conclusões

Com base no estudo realizado nos modelos residenciais típicos da cidade de Governador Mangabeira, foi possível exemplificar a metodologia e a aplicabilidade do RTQ-R, utilizando o método prescritivo, e cálculos realizados pela Planilha de Cálculo de Desempenho da Unidade Habitacional, desenvolvida pelo CB3E. Abordou as questões relacionadas à eficiência energética em residências unifamiliares, consideraram-se, também, as questões relacionadas ao zoneamento bioclimático e as condições das edificações estudadas.

Por meio da pontuação final do estudo de caso, constatou-se que as residências que apresentam o mesmo padrão possuem nível de eficiência energética muito próxima. Entretanto, foi possível observar que a residência tipo 3, que possui áreas de iluminação natural mais abrangentes obteve melhor pontuação final. Assim, o resultado da edificação mais eficiente será a que obteve a maior pontuação na aplicação do método, no nosso caso a do tipo 3. É importante ressaltar que o clima característico desta zona, influencia no resultado obtido reforçando a importância de considerar o clima do entorno da edificação com relação à localização geográfica e elementos construtivos.

Outros fatores preponderantes para que se melhore a obtenção de níveis mais altos de eficiência nas residências estudadas, é com relação

ao sistema de aquecimento de água, que se restringe ao sistema de aquecimento elétrico, e usar mecanismos de uso racional de energia e água.

Estabelece-se como recomendações futuras propor para as residências típicas as que foram estudadas neste trabalho aderir às medidas como uso racional de água, como reservatórios de captação de água da chuva e mecanismo sustentáveis de aquecimento de água, o que é propício às condições climáticas de onde estão localizadas. Buscar uma residência de alto padrão e com elementos construtivos atípicos dos citados, na zona bioclimática estudada e aplicar o método prescritivo, comparando os resultados obtidos com os obtidos neste trabalho.

Recomenda-se também à comunidade acadêmica incluir a Etiqueta de Edificações no escopo de componente curricular adequada, contribuindo para a formação de profissionais integrados ao atual contexto de construções mais eficientes.

Referências

ABNT. **ABNT NBR 15220-2** - Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 15220-3** - Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ABREU, CRYSTYANE GERTH SILVEIRA. **Eficiência Energética em edificações: o caso dos prédios públicos existentes**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2015.

BEN, Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanco Energético Nacional**, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001**. Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, DF, 19 dez. 2001.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 10 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da república Federativa do Brasil. Brasília, DF, 26 jul. 2000.

CORRÊA, FRANCYEL. **Eficiência energética em edifícios públicos**: estudo dos requisitos para eficiência energética em uma edificação escolar. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil; Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2016.

ELETROBRÁS; INMETRO; CB3E. **Cartilha para o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações**. Rio de Janeiro, 2013.

ELETROSUL. **Casa Eficiente**. Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/ampnbsp/casa-eficiente-home>. Acesso em: 04 de junho de 2019.

IGUAÇU ENERGIA. **A crise do apagão**. Disponível em: <http://www.ienergia.com.br/energia/apagao.aspx>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

INMETRO. **Instituto Nacional De Metrologia. Anexo V. Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros**. Anexo da Portaria: nº 50/2013.

KOLOKOTSA, D.; DIAKAKI, C.; GRIGOROUDIS, E.; STAVRAKAKIS, G.; KALAITZAKIS, K. Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. **Journal of Advances in Building Energy Research**. Volume 03, p. 121 - 146, 2009.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª edição, 5. Rio de Janeiro, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia Prático de Eficiência Energética**, Brasília, 2014.

PBEEDIFICA. **Conhecendo a Etiqueta PBE EDIFICA**. Disponível em: pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica. Acesso em: 16 de maio de 2019.

PROCELINFO. **Edificações**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B82BBD82C-FB89-48CA-98A9-620D5F-9DBD04%7D>. Acesso em 12 de maio de 2019.

SECHINI, DJONATA; FRIES, EDUARDO CEZAR. **Viabilidade da etiquetagem de eficiência energética para o sistema de iluminação: estudo de caso pós retrofit**. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil; Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.

VIANA, ALGUSTO. N. C.; BORTONI, EDSON. C. N.; NOGUEIRA, FÁBIO, J. H.; HADDAD, JAMIL; NOGUEIRA, LUIZ A. H.; VENTURINI, OSVALDO J. YAMACHITA, ROBERTO A.: **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**, 1. Ed. São Paulo, 2012.

PARTE II
PESQUISAS RELACIONADAS
A ENERGIA FOTOVOLTAICA

Sistemas fotovoltaicos flutuantes: estimativa de potencial

*Luiza Rocha Gumes
Huilmann Sanca Sanca*

Introdução

Classicamente, o sistema elétrico de potência (SEP) é dividido principalmente em três grupos: geração, transmissão e distribuição. A geração é a etapa de obtenção e transformação de fontes primárias de energia em energia elétrica. Convencionalmente, a geração de energia elétrica é obtida através de fontes hidrelétricas, com o aproveitamento do potencial hidráulico e termoeletricas com a queima de combustíveis fósseis. Há, também, a geração de energia elétrica através de fontes complementares como a energia fotovoltaica, através do aproveitamento da energia solar e energia eólica, através do movimento das turbinas gerado pelo vento (MEDEIROS, 2017).

Na transmissão, ocorre o transporte de energia elétrica para os centros de consumo em alta tensão e na distribuição, a energia é distribuída, em média e baixa tensão, para os grandes, médios e pequenos consumidores (MEDEIROS, 2017).

Com a Revolução Industrial no século XVIII, a demanda de energia elétrica aumentou significativamente e com o avanço da tecnologia, a tendência é aumentar cada vez mais. Atualmente, no Brasil, por exemplo, o Ministério de Minas e Energia (MME) estima um crescimento de 3,7% ao ano no consumo de eletricidade entre os anos de 2016 e 2026 (MME, 2017).

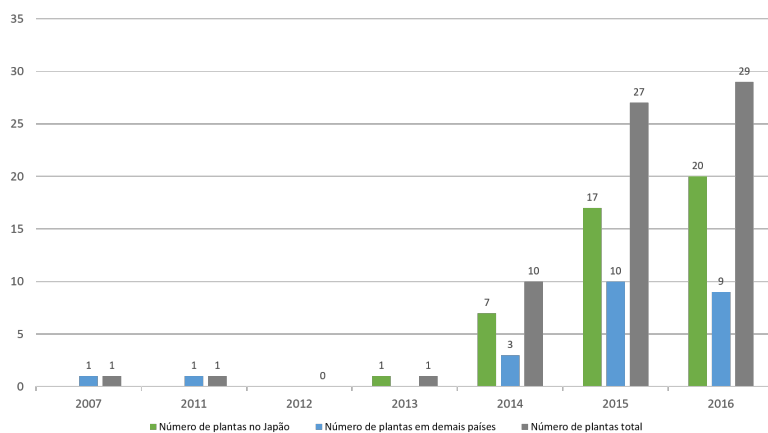
Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2019), 60,71% da geração de energia elétrica no Brasil é através de fontes hidrelétricas. Deste modo, há uma grande necessidade de diversificar a matriz energética no país através de fontes complementares, como por exemplo, a energia solar que representa, apenas, 1,21% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2019).

A energia solar fotovoltaica tem certas vantagens, pois não emite gases poluentes, não produz ruídos durante a geração e tem baixo custo de manutenção. No entanto, quando exposta a altas temperaturas, a placa fotovoltaica diminui a sua eficiência. Diante deste problema, a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes é uma alternativa eficaz, pois esse tipo de usina fotovoltaica é 11% mais eficiente que as usinas fotovoltaicas convencionais (BORBA; NOVAK, 2018). Além disso, reduz em até 50% a evaporação da água do reservatório, possibilitando uma maior geração de energia elétrica pelas hidrelétricas (BORBA; NOVAK, 2018).

A grande extensão de áreas alagadas no Brasil, para a geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas, propicia a implantação de sistemas fotovoltaicos flutuantes, utilizando áreas pouco exploradas. Além disso, esses sistemas possuem outras vantagens, como: não utilização de terras para a implantação da usina, que podem ser utilizadas para outra finalidade; por estar presente em uma hidrelétrica, já apresenta uma infraestrutura adequada para a distribuição de energia e manutenção. No entanto, pode-se observar algumas desvantagens em relação aos sistemas fotovoltaicos implantados em terra, como: dificuldade de acesso; os módulos devem suportar altos níveis de umidade; as vibrações podem rachar os módulos, diminuindo sua eficiência; aumento do custo, pois são necessários a utilização de equipamentos extras, como plataformas flutuantes e ancoras (BORBA; NOVAK, 2018).

Apesar do sistema fotovoltaico flutuante estar em desenvolvimento, essa tecnologia já está sendo adotada em diversos países. A China, detém as duas maiores usinas solares flutuantes do mundo com uma capacidade acumulada de 60 MW, situada em Anhui. Apesar disso, a maioria dos projetos flutuantes estão situados no Japão, conforme a Figura 1 (SOLARPLAZA, 2019).

Figura 1 – Quantidade de plantas solares fotovoltaicas flutuantes instaladas por ano.



Fonte: Adaptado de Solarplaza (2019).

Em Sobradinho – BA, há o maior projeto de Pesquisa & Desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil. A usina fotovoltaica flutuante que foi instalada pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), situada no reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Essa usina foi inaugurada em agosto de 2019 com a capacidade de geração de 1 MW_p, contendo 3.792 módulos fotovoltaicos, abrangendo uma área de 11 mil m². Futuramente a capacidade de geração de energia da usina aumentará para 2,5 MW_p, com um investimento total de R\$ 56 milhões (CHESF, 2019).

Algumas abordagens sobre arranjos fotovoltaicos flutuantes já foram feitas. No trabalho de Strangueto (2014), é realizada a estimativa

total do potencial energético brasileiro considerando os reservatórios de hidrelétricas que apresentam uma área igual ou superior a $0,01 \text{ km}^2$ com o aproveitamento de 80% e 8% dos reservatórios. Souza (2018), aborda sobre a viabilidade econômica para a implantação do sistema fotovoltaico flutuante na Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta, em Porto Primavera, São Paulo. O projeto tem uma potência de 200 kW_p e abrange uma área de $0,42 \text{ km}^2$. Além disso, neste trabalho também aborda sobre o impacto que o sistema causa na evaporação da água do reservatório, ou seja, realiza-se cálculos para dimensionar o volume de água economizado. Já Medeiros e Ferreira (2018) aborda sobre a viabilidade econômica para a implantação do sistema fotovoltaico flutuante. O estudo foi realizado na Usina Hidrelétrica de Sobradinho. O projeto ocupa uma área de $0,076\%$ do reservatório e apresenta uma capacidade de $194,6 \text{ MW}_p$. No trabalho de Silva e Souza (2018), estima-se a geração de energia fotovoltaica flutuante no Lago Bolonha, em Belém. O projeto ocupa $0,01\%$ do lago e apresenta uma potência de $28,06 \text{ kW}$.

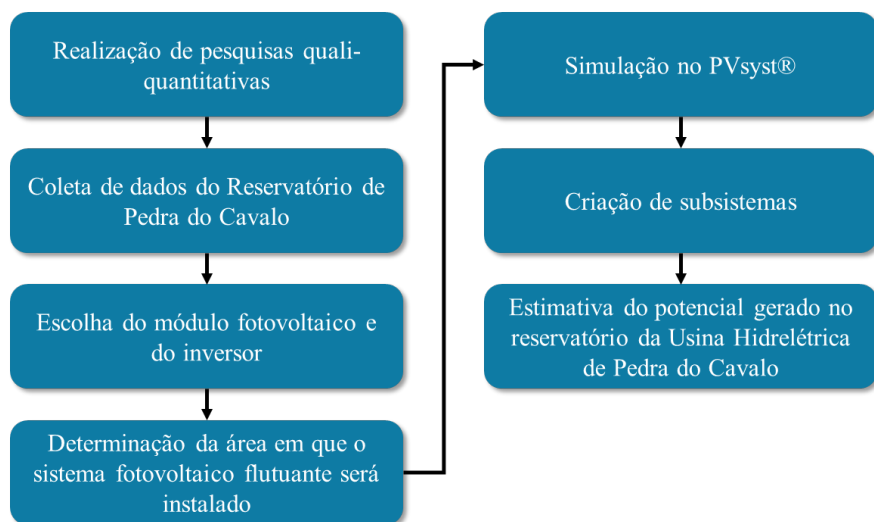
Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal estimar o potencial de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes no reservatório da Hidrelétrica de Pedra do Cavalo. Como objetivos específicos, tem-se: compreender o funcionamento da geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes, obter informações sobre o reservatório da barragem de Pedra do Cavalo e simular o potencial gerado pelo sistema fotovoltaico flutuante através do programa PVsyst® versão 6.88.

Materiais e métodos

A análise, quali-quantitativa foi realizada através de revisões bibliográficas sobre sistemas fotovoltaicos de modo geral, arranjos fotovol-

taicos flutuantes e reservatórios de hidrelétricas. Em seguida, precisa-se seguir as seguintes etapas: coleta de dados do reservatório de Pedra do Cavalo, escolha do módulo fotovoltaico e do inversor, determinação da área em que o sistema fotovoltaico flutuante será instalado, simulação no PVsyst® versão 6.88, criação de subsistemas e por fim, a estimativa do potencial gerado no reservatório da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do trabalho realizado.



Fonte: Autoria própria (2020).

Área de estudo

O reservatório Pedra do Cavalo (Figura 3) está localizado no Rio Paraguaçu, a cerca de 40 km da sua foz na Baía de Todos os Santos, entre as cidades de São Félix e Cachoeira, no Recôncavo Baiano, na latitude de $12^{\circ}36'$ e longitude de $38^{\circ}59'$. Este reservatório tem como área mínima 95 km^2 , correspondente à cota de 106 m. Optou-se por escolher a área míni-

ma pois, em períodos de seca, a água pode chegar a este nível e utilizando uma área maior, a disposição dos módulos poderia ser afetada ao reduzir o nível de água e conseqüentemente afetar o sistema fotovoltaico flutuante (ASSOCIADOS et al., 2001).

Figura 3 – Vista da barragem Pedra do Cavalo.



Fonte: Associados et al. (2001).

A construção da barragem foi projetada para a Campanha de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu (DESENVALE), pelo Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores (CNEC), sendo a principal função o controle de cheias das cidades de São Félix e Cachoeira, com o custo total do empreendimento de 176.886.255,00 reais. Além disso, o reservatório tem como principais demandas (ASSOCIADOS et al., 2001):

- Abastecimento urbano e rural de água para os 59 municípios da bacia Paraguaçu;
- Geração de energia para suprir o sistema da Chesf no Nordeste, com 160 MW instalados;
- Dessedentação de rebanhos;
- Irrigação.

Simulação no PVsyst® versão 6.88

O *software* utilizado para estimar o potencial de energia elétrica gerado é o PVsyst® versão 6.88. Esse *software* foi desenvolvido por André Mermoud, em 1992, com o objetivo de estudo e simulação de sistemas fotovoltaicos, permitindo o usuário analisar o módulo fotovoltaico com diferentes configurações, como posição e dimensionamento, gerando um relatório com gráficos e tabelas, possibilitando a verificação da configuração do módulo para gerar energia com maior precisão (PVSYST, 2013).

Para realizar a simulação no reservatório da Hidrelétrica de Pedra do Cavalo é necessário adicionar os seguintes parâmetros de entrada no PVsyst® versão 6.88:

- Localidade do reservatório da hidrelétrica – utilizando o banco de dados do *software* PVsyst® versão 6.88 para que o software encontre os valores de irradiação no local;
- Albedo – quantidade de irradiação que a superfície não absorve (LUIZ, 2013). O valor médio para um corpo d'água sem nebulosidade no Rio Grande do Sul é de 0,124; já na Bacia Amazônica, estudos indicam que o valor do albedo é de 0,051; e em Rondônia, o valor varia entre 0,08 a 0,1 (STRANGUETO, 2014). Sendo assim, utiliza-se a aproximação de 0,1, pois é o valor mediano entre os estudados;
- Inclinação do módulo solar e ângulo azimutal – para isso, necessita-se fazer a comparação da irradiação incidida no módulo em diversos ângulos. O maior valor de irradiação anual se dá com a inclinação de 13°. O ângulo azimutal selecionado é de 0°, ou seja, o módulo está em direção ao norte geográfico.

Configuração do sistema:

- a) Área do reservatório: define-se, inicialmente, a área de $0,1 \text{ km}^2$ pois o PVsyst® versão 6.88 não suporta uma área maior e posteriormente serão criados subsistemas para abranger toda a área do reservatório;
- b) Modelo dos módulos fotovoltaicos: seleciona-se o modelo YL250P-29b ($250 \text{ W}_{\text{so}}$), pois foi utilizado no trabalho de Silva e Souza (2018), possui dados no PVsyst® versão 6.88 e possui comercialização no Brasil, com certificação no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), que analisa a conformidade do produto, ou seja, verifica se a produção do inversor seguiu os requisitos mínimos necessários para a segurança do usuário (INMETRO, 2019);
- c) Modelo do inversor: seleciona-se o modelo INGECON SUN 760TL X300 que resultará em um menor número de inversor para o projeto. O fabricante foi escolhido pois contém suas características no banco de dados no software PVsyst® versão 6.88 e é o fabricante mais utilizado em arranjos fotovoltaicos que participaram do projeto estratégico da ANEEL para a implantação de geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira (STRANGUETO, 2014).

Criação de subsistemas

Após a realização da simulação, deve-se dimensionar a quantidade de subsistemas para abranger a área mínima do reservatório (95 km^2) e considerar 80% dessa área como útil (76 km^2), pois os 20% restantes representam áreas de segurança, uma vez que o arranjo deve ter uma distância entre as margens do reservatório devido ao sombreamento, vege-

tação e exclusão das áreas próximas à tomada d'água, vertedouro, entre outras instalações da usina hidrelétrica (STRANGUETO, 2014).

Conforme mostrado na Figura 4, a geometria do reservatório é muito irregular e tornou-se inviável o estudo mais detalhado sobre a área para dispor os subsistemas ou para saber se o reservatório é muito utilizado para navegação e pesca. Além disso, pode-se haver restrições ambientais ao instalar o arranjo fotovoltaico, pois o mesmo pode afetar a fauna e flora presente no reservatório, visto que o sistema impedirá a entrada de iluminação. Sendo assim, optou-se, também, considerar 50% (47,5 km²) e 10% (9,5 km²) da área mínima do reservatório.

Figura 4 – Mapa do reservatório da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavallo.



Fonte: Associados *et al.* (2001).

Resultados e discussões

Serão apresentadas a avaliação e resultados da metodologia para estimativa de potencial apresentada no capítulo anterior. Para a obten-

ção dos resultados e validação da metodologia, são realizadas duas etapas. Na primeira, faz-se uma avaliação do potencial para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho por ter-se informações e dados reais do sistema fotovoltaico flutuante desta usina. Na segunda, faz-se então, a estimativa do potencial para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

Simulação na Usina Hidrelétrica de Sobradinho

A Usina Hidrelétrica de Sobradinho apresenta uma capacidade de 1 MW_p , sendo assim, realizou-se uma simulação no *software* para esta potência, resultando em 4.000 módulos fotovoltaicos, que têm capacidade de gerar 1.526 MWh/ano de energia. Como mostra-se na Seção 1, o projeto real apresenta 3.792 módulos. Sendo assim, a simulação no *software* não apresenta uma precisão aceitável. No entanto, os valores podem estar divergindo pois o valor da inclinação e o modelo do módulo são diferentes. Diante disso, altera-se o modelo do módulo para um que tenha a potência um pouco maior. Realizando-se uma segunda simulação com o módulo YL260P-29b que apresenta uma potência de 260 W_p e com as mesmas condições anteriores, tem-se como resultado, 3.840 módulos fotovoltaicos, um valor mais próximo da quantidade real de módulos no projeto. Sendo assim, fica validada a metodologia e, conseqüentemente, pode-se confiar nos resultados que metodologia e o *software* disponibiliza. Além disso, este projeto tem capacidade de gerar 1.523 MWh/ano de energia.

A partir desta simulação que se obteve resultados similares, conseqüentemente validou-se a metodologia, na próxima seção será realizada a avaliação e simulação para a Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

Potencial na Hidrelétrica de Pedra do Cavalo

A simulação feita no PVSyst® versão 6.88 resultou em 61.578 módulos fotovoltaicos sendo 22 em série e 2.799 em paralelo, com a necessidade de 16 inversores, tendo uma potência nominal de 15.395 kW_p, podendo gerar 23.456 MWh/ano. Outros resultados da simulação são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da simulação.

Parâmetros do Sistema	Valor
Número de Módulos	61.578
Número de Inversores	16
Potência	15.395
Índice de Performance	81,19%
Irradiação Horizontal Global	1859,6 kWh/m ² (por ano)
Temperatura Ambiente	25,96°C
Energia de saída do Arranjo	23.885
Energia injetada na Rede	23.456

Fonte: Autoria própria (2020).

A fim de determinar a área total a ser utilizada no projeto, deve-se levar em consideração espaçamento entre as fileiras de painéis em razão do sombreamento causado pela inclinação dos mesmos e para eventuais serviços de manutenção. Para não ocorrer muitas perdas, considera-se o espaçamento de 1,5 m, visto que o módulo fotovoltaico tem uma largura de 0,99 m e a passarela de manutenção apresenta 0,5 m. Sendo assim, obtém-se 151.481,88 m². Para abranger 76 km² (80% do reservatório) são necessários 501 subsistemas.

Para projetar 501 subsistemas, serão necessários 30.850.578 módulos fotovoltaicos com a geração de aproximadamente 11.751 GWh/ano e com uma potência de aproximadamente 7.713 MW_p.

Para abranger 47,5 km² (50% do reservatório), necessita-se de 313 subsistemas com um total de 19.273.914 módulos fotovoltaicos, gerando aproximadamente 7.342 GWh/ano, com uma potência de 4.819 MW_p. Já com a uti-

lização de 10% do reservatório (9,5 km²), o projeto terá 62 subsistemas, com 3.817.836 módulos fotovoltaicos podendo gerar aproximadamente 1.454 GWh/ano, com uma potência de 954 MW_p, como apresenta-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa do potencial e da energia gerada no reservatório da Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

Porcentagem da área mínima	Quantidade de módulos	Potência (MW _p)	Energia gerada (GWh/ano)
80%	30.850.578	7.713	11.751
50%	19.273.914	4.819	7.342
10%	3.817.836	954	1.454

Fonte: Autoria própria (2020).

Para a comparação dos resultados da com as duas maiores usinas fotovoltaicas flutuantes do mundo, deve-se converter a potência de pico em potência eficaz, pois a primeira relaciona-se com a maior potência que o sistema gera em um dia e a segunda, relaciona-se com a produção de energia contínua durante o dia, obtendo os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Conversão de potência de pico para potência eficaz.

Porcentagem da área mínima	Potência (MW _p)	Potência Eficaz (MW)
80%	7.713	5.454
50%	4.819	3.408
10%	954	675

Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se notar que utilizando-se apenas 10% do reservatório, a potência obtida é maior do que a potência instalada em Anhui, na China. Sendo assim, o reservatório apresenta uma grande capacidade de geração de energia através de sistemas fotovoltaicos flutuantes. No entanto, percebe-se que há uma enorme quantidade de módulos fotovoltaicos para um projeto inicial, o que se pode tornar inviável.

Diante disso, optou-se por realizar uma simulação com a mesma potência de geração da Usina fotovoltaica flutuante de Sobradinho (1

MW_p), o maior projeto do Brasil, resultando em 20 módulos fotovoltaicos em série e 200 em paralelo e considerando o espaçamento de 1,5 m entre as fileiras de painéis, o sistema ocupa uma área de 9.840 m², que representa 0,01% do reservatório sendo capaz de gerar 1.497 MWh/ano.

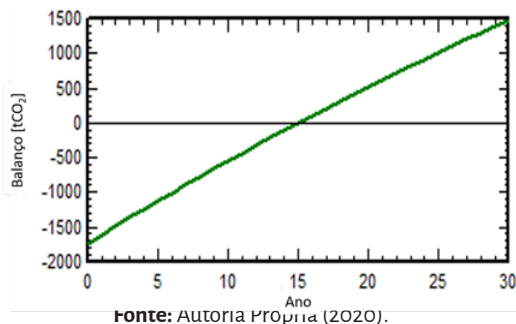
Pode-se perceber que os resultados obtidos nessa simulação estão próximos das características do projeto da usina fotovoltaica flutuante de Sobradinho, sendo esta a mais viável para um projeto inicial.

Convertendo-se 1 MW_p para a potência eficaz, obtêm-se uma potência 707 kW. Como a Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo tem uma capacidade de gerar 160 MW, a geração fotovoltaica complementar essa geração da hidrelétrica, resultando em um potencial de 160.707 kW.

Uma análise importante a se fazer em projetos fotovoltaicos é a quantidade da emissão de gás carbônico evitada com a instalação do projeto, pois a energia solar fotovoltaica não emite gases poluentes, diferente de outras gerações de energia como nas usinas termelétricas.

A Figura 5 representa a emissão de CO₂ evitada em 30 anos no projeto de 1 MW_p , sendo um total de 1.490,537 toneladas de CO₂. Analisando-se o gráfico, deve-se levar em consideração que para a produção de módulos fotovoltaicos há emissão de CO₂ e, devido a isso, somente após 15 anos essa emissão será compensada.

Figura 5 – Gráfico da emissão de CO₂ evitada em 30 anos no projeto de 1 MW_p gerado no PVsyst® versão 6.88.



Além das vantagens da energia fotovoltaica já abordadas nesse trabalho, percebe-se também que esse tipo de geração de energia é uma alternativa para a redução da emissão de gases que intensificam o efeito estufa, provocando o aquecimento global.

Conclusões

O trabalho teve como objetivo a estimativa do potencial a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes no reservatório da Hidrelétrica de Pedra do Cavalo. E verificou-se que utilizando-se 80% da área do reservatório, resulta na potência de 7.713 MW_p, podendo produzir 11.751 GWh de energia no ano e aproveitando-se 10% do reservatório, obtém-se uma potência de 954 MW_p, com capacidade de gerar 1.454 GWh/ano. Com esses resultados, constata-se que o reservatório de Pedra do Cavalo tem um enorme potencial para a geração de energia fotovoltaica flutuante.

Ao analisar os resultados encontrados na simulação, observou-se que utilizando-se apenas 10% da área do reservatório, já resultaria em um projeto que demandaria uma quantidade enorme de módulos fotovoltaicos. Como essa tecnologia é recente no Brasil, o projeto poderia tornar-se inviável. Diante disso, foi feita uma simulação com a capacidade de 1 MW_p, que tem a capacidade de gerar 1.497,5 MWh/ ano, sendo necessária a utilização de 4.000 módulos fotovoltaicos.

Apesar do grande potencial do reservatório de Pedra do Cavalo, os resultados obtidos no o arranjo fotovoltaico com capacidade de 1 MW_p indicam uma maior viabilidade para a implantação inicial dessa tecnologia, pois servirá como fonte complementar de energia na Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

Referências

ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 09 abr 2019.

ASSOCIADOS, I. C. *et al.* **Estudos da Viabilidade da Motorização da Barragem da Pedra do Cavallo**. [S.l.: s.n.], 2001. Acesso em: 26 abr 2019.

BORBA, R. A.; NOVAK, L. H. **Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes: Aspectos Positivos e Desafios**. Gramado, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/151> . Acesso em: 09 abr 2019.

CHESF. **Chesf energiza Usina Solar Flutuante**. 2019. Disponível em: https://www.chesf.gov.br/_layouts/15/Chesf_Noticias_Farm/Noticia.aspx?IDNoticia=373. Acesso em: 04 out 2019.

INMETRO. **O que é o Inmetro**. 2019. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp?iacao=imprimir>. Acesso em: 17 Nov 2019.

LUIZ, A. M. **Energia Solar e Preservação do Meio Ambiente**. [S.l.]: Livraria da Física, 2013. Acesso em: 15 abr 2019.

MEDEIROS, C. **Introdução ao Estudo de Sistemas Elétricos de Potência**. Goiânia, 2017. Disponível em: [http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDo-cente/admin/arquivosUpload/18795/material/01\)SistEletricosCap01_Fundamentos.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDo-cente/admin/arquivosUpload/18795/material/01)SistEletricosCap01_Fundamentos.pdf). Acesso em: 02 Dez 2019.

MEDEIROS, G. A. de S.; FERREIRA, L. **Utilização de um sistema fotovoltaico flutuante para operação coordenada com usina hidrelétrica e sua viabilidade financeira: Estudo de caso da UHE Sobradinho**. Recife, 2018. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.sepope.com.br/wp-content/uploads/2018/09/SP09.pdf>. Acesso em: 22 nov 2019.

MME. **Projeção da demanda de energia elétrica**. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>

PublicacoesArquivos/publicacao245/topico261/DEA%20001_2017%20%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf. Acesso em: 09 abr 2019.

PVSYST. PVSyst – Meteororm Database. Suíça: PVSyst SA, 2012. Disponível em: <http://www.pvsyst.com/en/>. Acesso em: 03 jun. 2019.

SILVA, G. D. P. D.; SOUZA, M. J. R. **Estimativa De Geração De Energia através De Um Sistema Fotovoltaico**: Implicações Para Um Sistema Flutuante No Lago Bolonha, Belém-Pará. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46194>. Acesso em: 22 nov 2019.

SOLARPLAZA. **Floating Solar Plants**: Niche Rising to the Surface? 2019. Disponível em: <https://northamerica.solar-asset.management/news-source/floating-plants-article/#download=https://www.solarplaza.com/channels/markets/11968/top-100-floating-solar-projects/>. Acesso em: 16 abr. 2019.

SOUZA, V. A. A. F. de. **Estudo de viabilidade econômica para a instalação de painéis solares flutuantes no espelho d'água da hidroelétrica Engenheiro Sergio Motta (Porto Primavera)**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10025757.pdf>. Acesso em: 22 nov 2019.

STRANGUETO, K. M. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos flutuantes em reservatórios de hidroelétricas**. Campinas, 2014. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/304920/1/Strangueto_KarinaMaretti_D.pdf. Acesso em: 10 abr 2019.

Projeto de um sistema FV para o pavilhão das engenharias UFRB

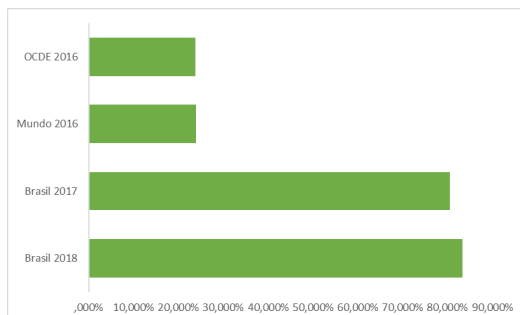
*Fillipe De Almeida Andrade
Acbal Rucas Andrade Achy*

Introdução

O crescimento econômico e social de uma nação está diretamente associado ao potencial energético acessível para seu uso, especificamente a energia elétrica tem um papel indispensável no desenvolvimento da sociedade no século 21. Por este motivo, a eletricidade é um tema de grande estudo no mundo, principalmente quando se trata da geração sustentável desse tipo de energia.

Delimitando a área de estudo para o Brasil, temos que esta nação tem um potencial para produção de eletricidade, por meio de fontes renováveis, consideravelmente alto em relação ao restante dos países, pois dispõe de muitos recursos primários para gerar energia como é mostrado na Figura 1, que apresenta o gráfico de comparação em porcentagem de fontes renováveis no Brasil e no mundo.

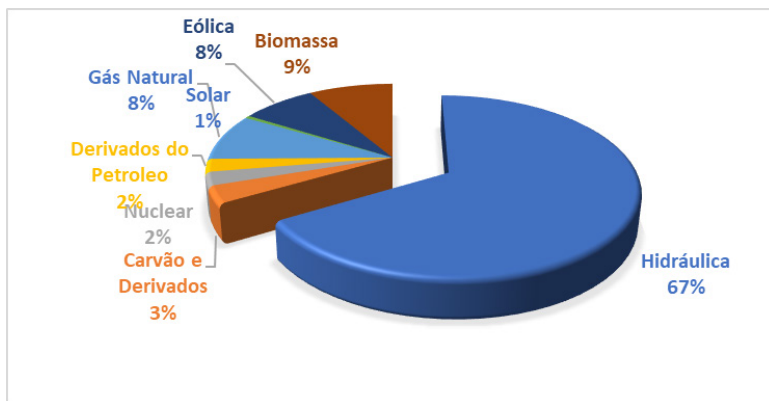
Figura 1: Gráfico comparativos das matrizes renováveis brasileiras e mundiais.



Fonte: EPE *et al.* (2019).

A energia elétrica produzida no Brasil tem uma grande concentração na fonte hidráulica com 66,6% como observa-se na Figura 2, que mostra o balanço de produção da energia elétrica brasileira no ano de 2018. Esta configuração pode ser prejudicial ao país, pois, se sustenta na dependência das condições climáticas, em períodos de fortes secas e estiagens, estas comprometem a produção de energia nas hidrelétricas, acarretando um maior preço de distribuição nas concessionárias pelo fato do acionamento das termoeletricas, que são de base não-renovável. Este fato faz que sua população fique refém das condições hídricas do país. Porém, é um motivados de temas de pesquisas científicas que se voltem a diversificação para melhor distribuição da porcentagem das fontes geradoras de energia elétrica.

Figura 2: Matriz da Energia Elétrica brasileira.

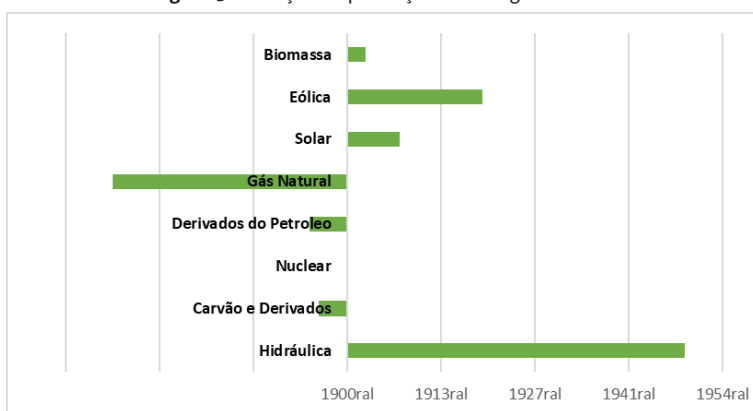


Fonte: EPE *et al.* (2019).

Uma das desvantagens da energia hidráulica é a implementação de hidrelétricas com barragens, as quais trazem grandes impactos ambientais, pelo fato de que sua construção normalmente inundam áreas florestais com grande biodiversidade. Fomentando o país a trazer incentivos para produção de fontes alternativas e ecológicas como a energia

solar, onde ocorre micro geração de eletricidade para suprir, na maioria das vezes, residências e edifícios, entretanto há um grande crescimento deste tipo de geração em fazendas e indústrias. Efetivando um aumento considerável desta produção, sendo a terceira fonte que mais cresce no país como divulgado na Figura 3, que demonstra a variação da produção das várias fontes energéticas disponíveis no Brasil.

Figura 3: Variação da produção de energia elétrica.



Fonte: EPE *et al.* (2019).

Através das informações coletadas na reitoria da universidade sabe-se que a mesma sofre de vários problemas de instabilidade da rede elétrica, principalmente a unidade sede, onde ocorrem frequentes quedas de energia. Atrelado a isso tem-se um alto consumo de energia, acarretando em contas de energia na ordem de centenas de mil reais. Dessa maneira é de suma importância o estudo de projetos de sistemas fotovoltaicos como forma de redução do gasto com eletricidade.

A escolha de um local de instalação viável, o pavilhão das engenharias é um lugar que se encaixa nos requisitos para estudo, pois é um edifício com vários aparelhos específicos de engenharia que consome uma grande quantidade de eletricidade. Incentivando dessa maneira, o estu-

do de um sistema FV (Fotovoltaico) para que esse local seja autossuficiente no seu consumo de energia.

Materiais e métodos

Local de Estudo

A primeira análise a ser realizada para a proposta de projeto de geração fotovoltaica acoplada a rede é a localização de onde será realizada a instalação do sistema. O local escolhido foi o Pavilhão das Engenharias da UFRB, situado no campus de Cruz das Almas. Neste local foram coletadas informações de:

- Descrição do prédio (quantidade e função de cada ambiente);
- Contabilização das cargas instaladas em cada ambiente;
- Folha de dados dos equipamentos para análise de potência;
- Cálculo da demanda estimada do prédio;
- Consumo estimado médio;
- Dimensionamento do projeto.

Descrição do Prédio

As instalações internas do prédio estão listadas na Tabela 1, ocorrendo que algumas salas não foram listadas pelo difícil acesso, ao todo no térreo existem 1 saguão de entrada, 1 sala de apoio administrativo, 7 salas de aula, sendo que, algumas funcionam como laboratório, 2 corredores, 1 copa e 2 banheiros. O segundo pavimento é composto por: um saguão de entrada, dois corredores, dois banheiros, catorze salas de aula com a mesma peculiaridade do térreo e uma sala de apoio técnico.

Tabela 1: Caracterização do Prédio.

Andar	Instalações
Térreo	1 Sala dos Técnicos, 1 saguão de entrada, 7 Salas de aula, Corredores, 1 Copa
1º Andar	1 Sala dos Técnicos, 1 Espaço Público, 13 Salas de Aula, 1 Sala para Empresa Júnior, Corredores.

Fonte: Autoria própria (2020).

Contabilização das cargas instaladas no prédio

A Tabela 2 apresenta todas as cargas que foram possivelmente catalogadas no local do projeto da instalação fotovoltaica não havendo a separação de aparelhos por pavimento. O cálculo da potência ativa se deu pela Equação 1, fazendo a relação das grandezas de quantidade e potência por unidade contidas na Tabela 2.

$$S = \frac{P \times Qtd}{F.P.} \quad (1)$$

Em que: S: Potência Aparente; P: Potência Ativa; Qtd: Quantidade de Aparelhos; F.P.: Fator de Potência.w

Tabela 2: Demanda Total do Prédio.

Equipamentos	Quantidade	Potência por Unidade (W)	Fator de Potência	Potência Ativa Total (kVA)
Lâmpadas	483	40	1	19,32
Tomadas	534	100	1	53,4
Ar-condicionado 21000 Btu	21	2354	0,88	56
Microcomputador	103	100	0,65	15,85
Motor Trifásico Assíncrono (1,5 cv)	6	1100	0,6	11
Fonte de Tensão	6	200	0,6	2
Fonte de Frequência	6	5	0,6	0,05
Osciloscópio	6	30	0,65	0,27
Ar-condicionado 30000 Btu	5	3480	0,9	21,5

Máquina de Solda	4	1000	0,6	6,67
Motor Trifásico (0,25 cv)	4	180	0,59	1,2
Ventilador	4	65	0,65	0,4
Refletor	4	500	0,98	2,04
Tomada Trifásica	3	600	1	1,8
Retroprojektor	3	210	0,9	0,7
Impressora	3	90	0,65	0,41
Estufa Industrial	2	6000	1	12
Cafeteira	1	750	0,7	1,07
Motor Trifásico (3 cv)	1	2200	0,61	3,6
Geladeira	1	110	0,59	0,19
Elevador	1	11000	0,64	17,19
Micro-ondas	1	1200	0,9	1,33
Betoneira (2 cv)	1	1000	0,8	1,25

Fonte: Autoria própria (2020).

Nem todos os equipamentos contêm informações de potência a vista para ser catalogado, ou pelo fato de estarem em locais de difícil acesso, ou pelo fato, da etiqueta de informação estar ausente, assim para os equipamentos que não se conseguiu ler as informações técnicas, suas potências foram preenchidas utilizando a norma - 04.14- 01.001 NDU COELBA – NORMA FORNECIMENTO DE ENERGIA EM TENSÃO SECUNDÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO A EDIFICAÇÕES INDIVIDUAIS – que contém em anexo as potências médias dos Aparelhos Eletrodomésticos mais comuns.

Cálculo da demanda do prédio

O cálculo da demanda de energia do prédio foi realizado com base na seção da norma MEMORIAL TÉCNICO - CÁLCULO DA DEMANDA DE UNIDADES DO GRUPO, descrita na norma - 04.14-01.001 NDU COELBA (COELBA, 2019a). Segundo a norma, a demanda total da edificação é calcula de acordo com a Equação (2).

$$De = a + b + c + d + e + f + g \text{ [kVA]} \quad (2).$$

Sendo:

- De: Demanda Total;
- a: Demanda referente a tomadas e iluminação;
- b: Demanda referente a aparelhos eletrodomésticos e de aquecimento;
- c: Demanda sobre os aparelhos de ar-condicionado;
- d: Demanda aplicadas a motores monofásicos e trifásico;
- e: Demanda referente a máquina de solda a transformador;
- f: Demanda sobre os aparelhos de raios X;
- g: Demandas para bombas e aparelhos de hidromassagem.

Dada Tabela 2 e as recomendações da norma calculou-se as parcelas da demanda total:

Parcela “a”, que representa soma das demandas referentes à iluminação e tomadas de uso geral.

- Potência Total das Lâmpadas e Refletores = 21,36 kVA;
- Potência Total das Tomadas Simples e Trifásicas = 55,2 kVA;
- Potência Total da de Tomadas e Lâmpadas = 76,56 kVA.

De acordo com a norma 04.14-01.001 NDU COELBA, temos que para escolas e ambientes semelhantes a demanda parcial “a” é calculada como: atribuir 100 % da potência para os primeiros 12 kVA; e 50 % para a potência excedente, sendo assim tem-se que:

- Potência (a) = 100% x 12 kVA + 50% x 62,56 kVA;
- Potência (a) = 44,3 kVA.

A Parcela “b” diz respeito a soma das demandas dos aparelhos eletrodomésticos e de aquecimento.

- Potência Total dos Microcomputadores = 15,85 kVA;
- Potência Total dos Ventiladores = 0,4 kVA;
- Potência Total Fonte de Tensão = 2 kVA;
- Potência Total do Osciloscópio = 0,05 kVA;

- Potência Total da Fonte de frequência = 0,27 kVA
- Potência Total do Retroprojektor = 0,7 kVA;
- Potência Total da Geladeira = 0,19 kVA;
- Potência Total da Impressora = 0,41 kVA;
- Potência Total da Cafeteira = 1,07 kVA;
- Potência Total do Micro-ondas = 1,33 kVA;
- Potência Total da Estufa Industrial = 12 kVA.

Seguindo a norma Quadro 02 (04.14-01.001 NDU COELBA) para os eletrodomésticos em geral obtemos a seguinte informação:

Para os oitos eletrodomésticos de maior consumo aplica-se o fator de demanda de 70%, assim:

- Potência (b1) = 70% x (15,85 + 0,4 + 2 + 0,05 + 0,27 + 0,7 + 0,19 + 0,41) kVA;
- Potência (b1) = 13,91 kVA. Para os eletrodomésticos de aquecimento foi utilizada o Quadro 03 da norma (04.14-01.001 NDU COELBA).

Para os 2 aparelhos com potência até 3,5 kW aplica-se a demanda de 75%, sendo assim:

- Potência (b2) = 75% x (1,07 + 1,33+12) kVA;
- Potência (b1) = 10,8 kVA.

A parcela “b” da demanda total final é calcula por;

- Potência (b) = Potência (b1) + Potência (b2);
- Potência (b) = (13,91 + 10,8) kVA;
- Potência (b) = 24,71 kVA.

Os aparelhos de ares-condicionados são alocados na parcela “c” da demanda e a regra de cálculo é. Entre 21 á 30 equipamentos o fator de demanda utilizado será de 80 %, deste modo tem-se:

- Potência (c) = 80% x (56 + 21,5) kVA;
- Potência (c) = 62 kVA.

Por fim, a última parcela calculada é a “d”, que compõe a demandas dos motores monofásicos e trifásicos, esta parcela é subdividida em d1, d2, d3 e d4.

A subparcela d1 trata da demanda dos motores monofásicos calculados como sendo:

A demanda individual de 1 motor monofásico é de 2,44 kVA:

- Potência (d1) = 2,44 kVA.

A subparcela d2 destina-se a demanda de motores trifásicos e seu cálculo é como se segue:

Para 4 motores trifásicos de 0,25 cv a demanda individual é 0,36 kVA:

- Potência (d2) = $4 \times 0,36$ kVA;
- Potência (d2) = 1,44 kVA.

A demanda individual de 6 motores trifásicos de 1,5 cv é 1,75 kVA.

- Potência (d3) = $6 \times 1,75$ kVA;
- Potência (d3) = 10,5 kVA.

Uma unidade de um motor trifásico de 15 cv tem a demanda individual de 20,16 kVA.

- Potência (d4) = 20,16 kVA.

Sendo a potência total da parcela “d” igual a:

- Potência (d) = Potência (d1) + Potência (d2) + Potência (d3) + Potência (d4);
- Potência (d) = $(2,44 + 1,44 + 10,5 + 20,16)$ kVA;
- Potência (d) = 34,54 kVA.

A demanda total foi calculada pela equação e resultando de 165,55 kVA ou 152,31 kW com fator de potência de 0,92 conforme a norma do fator de potência em prédios.

Estimativa do Consumo de Energia Elétrica

O consumo de energia elétrica médio do prédio em kWh tem a importância de estimar o quanto de energia o prédio consome mensalmente e é calcula por:

$$C = Pot \times h \times Dias. \quad (3)$$

Em que:

- C: Consumo médio [kWh];
- Pot: Potência do aparelho;
- h: Tempo médio de utilização do aparelho;
- Dias: Dias do mês que os aparelhos são utilizados (30 dias).

Por este motivo, foi confeccionada a Tabela 3 que é destinada ao consumo nos dias úteis e a Tabela 4 onde mostra o gasto energético nos finais de semana. Sucendendo que, houve a diferenciação dos dias pelo fluxo de aulas no pavilhão ser maior nos dias úteis em relação aos finais de semana.

Tabela 3: Consumo Médio dos Aparelhos em dias úteis.

Tipo de Aparelho	Potência (kW)	Tempo Médio (Horas)	Dias	Consumo Médio (kWh)
Lâmpadas e Tomadas	40,76	8	22	7123,76
Eletrodomésticos em Geral e de Aquecimento	22,73	8	22	4000,48
Ar-condicionado	57,04	4	22	5019,52
Motores Monofásicos e Trifásicos	31,78	0,5	6	95,34

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4: Consumo Médio dos Aparelhos nos Finais de Semana.

Tipo de Aparelho	Potência (kW)	Tempo Médio (Horas)	Dias	Consumo Médio (kWh)
Lâmpadas e Tomadas	40,76	4	8	1304,32
Eletrodomésticos em Geral e de Aquecimento	22,73	4	8	727,36
Ar-condicionado	57,04	2	8	912,64
Motores Monofásicos e Trifásicos	31,78	0	8	0

Fonte Autoria própria (2020).

- Considerando as Tabela 3 e 4, tem-se:
- Consumo em dias úteis = 16.298,1 kWh;
- Consumo em finais de semana = 2.944,32 kWh.

Sucedendo-se que consumo total do prédio mensal é a soma dos consumos descritos acima, é da ordem de 19.242,42kWh.

Simulação no Software PVsyst® versão 6.88

A partir dos dados coletados sobre o prédio do pavilhão de engenharia (localização geográfica, área da cobertura, estimativa da demanda de consumo de energia elétrica) foi utilizado o PVsyst® versão 6.88 para a elaboração do projeto de geração FV acoplado a rede de distribuição.

Radiação no Local

Utilizando a base de dados *Meteonorm*, disponibilizada no *software*, foi possível obter a irradiação solar anual que incide sobre o Pavilhão das Engenharias que se localiza na posição geográfica 12,68°12'41" Sul, e 39,09°-39'5" Oeste. A Tabela 5 mostra, o resultado da irradiação solar no prédio, além deste resultado, pode ser visto também na tabela, a velocidade média do vento, a temperatura ambiente, e a irradiação difusa.

Tabela 5: Radiação Solar no Pavilhão das Engenharias.

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Radiação Global (kWh.m²)	6,20	6,08	5,26	4,32	3,91	3,36	3,84	4,83	4,72	5,31	6,19	6,41
Radiação Difusa (kWh.m²)	2,69	2,66	2,33	2,12	1,81	1,62	1,99	1,95	2,35	2,71	2,68	2,58
Temperatura (°C)	26,7	26,6	26,1	25,0	24,4	22,8	22,4	23,0	24,0	25,4	25,9	26,7
Vel. do vento (m/s)	3,3	2,9	2,7	2,4	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,7	3,7	3,5

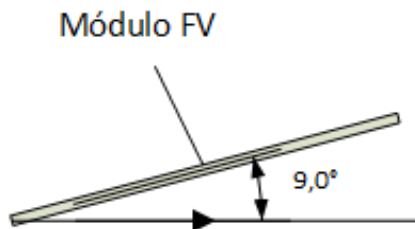
Fonte: PVsyst® versão 6.88 *et al.* (2019).

Observando os valores obtidos na Tabela 5 da figura é possível inferir que anualmente a irradiação média por dia que incide no Pavilhão das Engenharias é de 5,08 kWh/m.

Orientação das Placas FV

Para uma melhor captação da energia solar é indispensável ajustar a inclinação e direção das placas FV, sendo assim, foi utilizado o PVsyst® versão 6.88 para obter a direção e inclinação para um melhor rendimento do módulo fotovoltaico. Na função do *software* “Orientation” mostra a energia que será captada a cada angulação do módulo como mostra a Figura 4, que exemplifica o grau a ser instalado o painel em relação ao solo que é de 9°, sendo que as placas sempre têm que estar apontadas para o norte geográfico.

Figura 4: Posição dos Módulos Fotovoltaicos em Relação ao Solo.



Fonte: Autoria própria (2020).

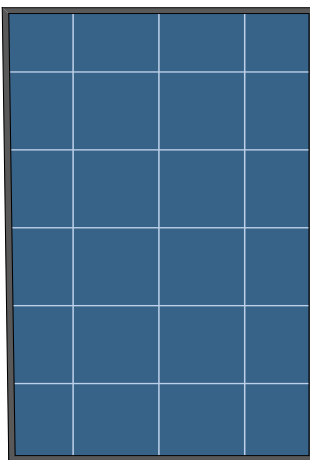
Para a configuração descrita, o programa mostrou a quantidade de radiação que a incide sobre a placa que representa o valor de 1868 kWh/m², em seguida o melhor fator de transposição no valor de 1,02, significando um percentual de maximização da radiação recebida pelo sol.

Dimensionamento do Projeto

A escolha do módulo solar foi baseada no melhor custo-benefício, para isso, foi feita uma prévia pesquisa de mercado coletando informa-

ções de qual módulo FV é o mais adequado à instalação, sendo assim, a placa fotovoltaica escolhida foi o painel solar CS6U-330P da Canadian Solar com suporte de instalação orçada em média R\$ 770,00, cotação feita em 15/06/2019 na Minha Casa Solar, com potência de 330 Wp, ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Módulo representativo do FV Solar CS6U-330P.



Fonte: Adaptado de Minha Casa Solar (2019b).

Determinado o conjunto de módulos fotovoltaicos, é preciso escolher o inversor apropriado para o sistema com base na potência fornecida pelo conjunto FV, deste modo é necessário o uso da: Equação (4).

$$P_T = \frac{C}{t \times \eta} [kWp]. \quad (4)$$

Em que:

- P_T : Potência total dos painéis;
- C : Consumo de energia do prédio por dia;
- t : Tempo de exposição dia;
- η : Rendimento global do sistema.

Desse modo, o consumo escolhido foi o do pavilhão com o valor de 641,41 kWh, tendo como base o valor de consumo encontrado no Tópico 2.4 dividindo pelos 30 dias do mês, e o tempo de exposição dos módulos será fixado de 8 horas da manhã até 4 da tarde contabilizando 8 horas de exposição. E por fim o rendimento global do sistema que está associado a perdas por temperatura, acúmulo de sujeira nos módulos, o cabeamento do sistema e perdas associadas ao inversor. Para o sistema em questão vamos considerar uma eficiência de 80% que está no padrão estipulado.

$$P_T = \frac{641,41}{8 \times 0,8}$$
$$P_T = 100,22 \text{ kWp}$$

Sendo que, é essa a potência máxima que o sistema de placas fotovoltaicas pode fornecer para o inversor por dia. Entretanto, o software utilizado tem o limite de 30 kWp para a simulação, com isso foi feito 4 subsistemas que produzem 25 kWp por dia e para essa capacidade foi escolhido um inversor Fronius de 25 kW, exemplificado na Figura 6, que custa R\$ 22.240,00, cotação na data 15/06/2019 na Minha Casa Solar.

Figura 6: Inversor Fronius 25 kW.



Fonte: Adaptação de Minha Casa Solar (2019a).

Por fim, é necessário a escolha dos dispositivos de segurança do projeto baseando-se norma NBR 5419:2015. À vista disso, foi escolhido o

DPS Clamper Solar 1040V 40ka - 12331, como mostrado na Figura 7, pela sua qualidade e custo-benefício. O produto foi cotado dia 07/08/2019 no Mercado Livre com o preço de R\$ 185,87.

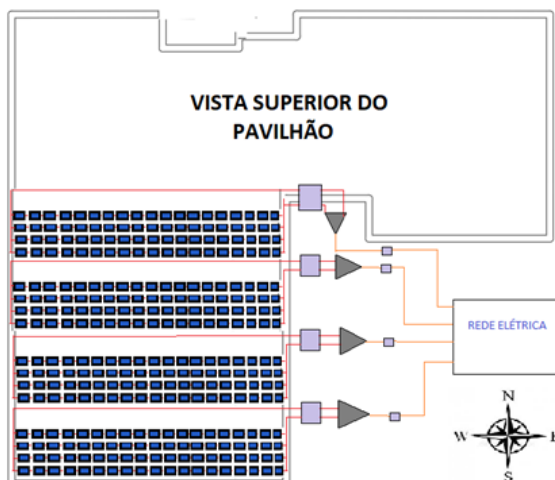
Figura 7: DPS Clamper Solar 1040V 40ka – 12331.



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2019).

O dimensionamento do projeto elaborado com ajuda do PVsyst® versão 6.88, primeiramente consiste em 304 painéis solares, quatro inversores e vinte DPS (Dispositivos de proteção contra surtos). Divididos em um conjunto de quatro subsistemas, sendo que cada um desses contém 76 módulos solares, cinco DPS e um inversor conforme visto na Figura 8, onde mostra o a planta do projeto.

Figura 8: Planta Baixa do Projeto.



Fonte: Autoria própria (2020).

sendo a legenda da imagem dada por:

- **Quadrado (Azul):** Módulos FV;
- **Quadrado (Cinza):** Dispositivos de Proteção;
- **Triângulo (Cinza):** Inversor;
- **Linha (Vermelha):** Cabos CC;
- **Linha (Laranja):** Cabos CA.

Com a finalidade de sabermos se o projeto é viável no pavilhão é necessário saber que a área do local estudado é de 3355,74 m², conforme a Figura 9 que mostra uma vista superior do pavilhão.

Figura 9: Vista por Satélite do Pavilhão das Engenharias.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Desta maneira, sabemos que cada subsistema contém uma área de 148 m² como ditos pelo PVsyst[®] versão 6.88, contando que são quatro subsistemas a área obtida foi 592 m². Demonstrando que é viável a instalação do projeto, pois a área que será utilizada é menor que a disponível.

Perdas do Sistema Fotovoltaico

O *software* PVsyst® versão 6.88 com os dados inseridos no programa, gerou um relatório de perdas do sistema. Sendo, que estas informações disponíveis são dadas por um padrão de teste, podendo em situações adversas o resultado ser discrepante do que o mostrado na Tabela 6, que mostra todas as perdas do sistema fotovoltaico estudado.

Tabela 6: Perdas do Sistema FV.

Tipo de Perda	Perda (%)
Qualidade do módulo	0,4
Temperatura do módulo	10,3
Sujeira no Módulo	2,4
Efeito Joule (Cabos)	1,2
Perda Global do Sistema	12,5

Fonte: PVSyst (2019).

Resultados e discussões

Investimento do Projeto

Para a quantificação do valor do sistema FV foi utilizado os valores ditos no trabalho dos equipamentos utilizados. Ocorrendo também, a inclusão da taxa de instalação e manutenção da ordem de R\$ 5.000,00 e de custos diversos no valor de R\$ 10.000,00 considerando essencialmente o tamanho do projeto. Dessa maneira foi construída a Tabela 7, que apresenta todos os custos do projeto e o valor final a ser investido.

Tabela 7: Tabela de Investimento.

Tipo de Equipamento	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Total (R\$)
Módulo FV	304	770,00	234.080,00
Inversor	4	22.240,00	88.960
DPS	20	185,87	3.717,40
Instalação	1	5.000,00	5.000,00
Custos Diversos	1	10.000,00	10.000,00

Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da Tabela 7, temos que para a implementação do sistema no Pavilhão das engenharias no mínimo deve ser investido R\$ 341.757,40. Podendo ocorrer eventuais gastos adicionais ao decorrer da vida útil do sistema, como manutenção entre outros gastos.

Gasto Mensal de Energia Elétrica

A viabilidade financeira do projeto se dá pelo conhecimento do investimento e da economia que irá gerar. Primeiramente, para uma análise de viabilidade do projeto deve ter a noção que o Pavilhão das Engenharias tem um consumo de energia mensal muito alta como mostrado no levantamento de carga na seção 2.4, tendo um valor de 19.242,42 kWh. As tarifas de energia variam em torno de R\$ 0,696 de acordo com a Tabela de Tarifas e Preços Finais de Energia Elétrica da COELBA (2019b). Pode-se descobrir o consumo mensal de acordo com:

$$G = C \times Trf \text{ [R\$]}. \quad (5)$$

Em que:

- G : Gasto mensal;
- C : Consumo médio;
- Trf : Tarifa mensal descrita no documento do órgão de distribuição de energia.

Com este número podemos quantificar que o Pavilhão das Engenharias em ponto de vista energético é muito custoso a universidade causando uma aplicação de R\$ 13.392,72 reais por mês, evidenciando a necessidade de um método de redução desse gasto. Com este viés, a implantação do sistema fotovoltaico é mais que necessária, pois supriria esse gasto que poderia ser investido em outros setores acadêmicos. Para a implantação do projeto é necessário, ter se em vista que ela é um siste-

ma conectado à rede, sabendo que a energia gerada pelas placas é para o consumo diário de energia do pavilhão, não necessitando de armazenamento de energia como baterias entre outros.

Estudo de Viabilidade

Para começar com o estudo de viabilidade e tendo a consciência dos gastos causados na conta de energia e no sistema a ser implantado, foi possível calcular com quantos tempo é possível quitar o investimento mediante:

$$A \text{ (meses)} = \frac{\text{Investimento no sistema}}{\text{Gasto no consumo mensal}} \quad (6)$$

$$A \text{ (meses)} = \frac{341.757,40}{13.392,72}$$

$$A \text{ (meses)} = 25,52 \text{ meses}$$

Com este resultado temos que o débito será quitado aproximadamente em dois anos e dois meses, tendo em comparação com o custo de sistemas fotovoltaicos em residências é um investimento com um retorno consideravelmente rápido. Sendo assim, é mais que viável o investimento de um sistema fotovoltaico pelo seu rápido benefício financeiro e ambiental como assim mostrado nos relatórios expostos pelo PVsyst® versão 6.88, todavia, é necessário salientar que é um investimento substancialmente alto para o orçamento da universidade e demandará de uma manutenção em certos momentos, para um bom funcionamento do sistema em si.

Conclusões

Um projeto de geração fotovoltaico no Pavilhão das Engenharias foi dimensionado com base na pesquisa de campo de levantamento de

cargas, para ter uma estimativa de consumo do local, com o propósito de construir sistema FV com o auxílio do software PVsyst® versão 6.88.

O projeto final conta com um total de 304 módulos fotovoltaicos, 20 DPS para proteção do sistema contra surtos e quatro inversores subdivididos em 4 grupos geradores de energia. A escolha do módulo CS6U-330P da Canadian Solar e do DPS Clamper Solar 1040V 40ka - 12331 foi feita com base de uma análise econômica de custo benefício entre os outros modelos, em seguimento a escolha do inversor foi realizado mediante a um cálculo que evidenciou a necessidade de um aparelho que suportasse 25 kW, trazendo a escolha de uma inversora Fronius por sua qualidade e garantia.

Através das informações evidenciadas na monografia, sendo que, muitos destes dados foram gerados pelo programa PVsyst® versão 6.88, que fez simulações necessárias para a viabilidade do projeto, sendo ele responsável pelos relatórios de custo-benefício do investimento a ser aplicado. Mostrando que, o sistema custa aos cofres da faculdade um valor de R\$ 341.757,40, tendo um retorno considerado rápido em relação a maioria dos projetos FV residenciais, pelo fato de que em 2 anos e dois meses o custo do projeto será quitado por causa do alto preço da conta de luz paga pela universidade

Apesar das afirmativas dadas pelo texto, o projeto pode ser melhorado com dados exatos da energia consumida pelo prédio para um melhor dimensionamento do sistema, já que o levantamento de cargas é uma estimativa. Além do mais, o preço do investimento do projeto pode ser reduzido, pelo fato de que a UFRB ser um órgão governamental gozando de planos de subsídio e financiamento.

Enfim, um estudo de viabilidade favorável a implantação do sistema fotovoltaico foi indicada, colocando em consideração o impacto ambiental causado pelo sistema e o grande custo-benefício em geral. Evi-

denciando de fato, o objetivo central do trabalho que é uma alternativa sustentável e economicamente viável de uma fonte energética abundante, diante da alta demanda por energia no país.

Referências

COELBA. **Portal de serviços da coelba:** Normas e padrões. 2019a. Disponível em: servicos.coelba.com.br/comercial-industrial/Documents/Normas%20e%20Tarifas/SMO4.14-01.001.pdf. Acesso em: 05 mar. 2019.

MERCADO LIVRE. **Dps clamper solar 1040v 40ka - 12331. 2019.** Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1230360443-dps-clamper-solar-1040v-40ka-12331-_JM?matt_tool=17674455&matt_word&gclid=CjwKCAjw7anqBRALEiwAgvGgm2KCa1agDEoh9o8tS_GurqfrUgJvCDYD-8-IYUUD-oW7m2wm7W-AH6xoC8xcQAvD_BwE&quantity=1. Acesso em: 07 ago. 2019.

MINHA CASA SOLAR. **Inversor Fronius 25,0kW (Grid-Tie) com Wi-FiEco 25,0. 2019a.** Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/produto/inversor-fronius-25-okw-grid-tie-com-wi-fi-eco-25-0-79185>. Acesso em: 15 jun. 2019.

MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar 330W Canadian Solar CS6U-330P. 2019b.** Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-330wcanadian-solar-cs6u-330p-79230>. Acesso em: 15 jun. 2019.

EPE. **Balanço energético nacional.** Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética., 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%EF%BF%BDrio/%20S%EF%BF%BDntese/%20BEN/%202019/%20Ano/%20Base/%202018.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2019.

GOOGLE EARTH. **Visão Superior do Pavilhão das Engenharias,** Cruz das Almas, Bahia, Brasil. 2019. Disponível em: <https://earth.app.googleusercontent.com/u4cZ6i>. Acesso em: 21 jul. 2019.

PVSYST. PVSyst – **Meteonorm Database**. Suíça: PVSyst SA, 2012. Disponível em: <http://www.pvsyst.com/en/>. Acesso: 04 mar 2019.

COELBA. **Tabela de tarifas e preços finais de energia elétrica – grupo b**. 2019b. Disponível em: <http://servicos.coelba.com.br/residencial-rural/Documents/tarifa-abril/coelba-tarifas-precos-grupo-b.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2019.

Projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede

*Vitor Oliveira E Silva
Joaquim Jorge Martins Galo*

Introdução

Durante os anos de 2001 e 2002 o Brasil passou pelo que ficou conhecido na história como Crise do Apagão, um desbalanceamento na oferta e demanda de energia no Sistema Integrado Nacional que causou falta de energia em vários pontos do país. Isso ocorreu devido ao baixo índice de chuvas que diminuiu os níveis dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas do Brasil, sendo que essas usinas representam 60% da Matriz Energética Brasileira segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). À época a decisão do governo foi ordenar um racionamento de 20% da energia consumida.

Outras ações tomadas pelo Governo foram a retomada de investimentos em modernização do setor elétrico e na equipe, incentivo em políticas de eficiência energética e desde 2012 na Geração Distribuída (GD). A geração centralizada, caracterizada por grandes usinas de alto investimento no geral tem uma característica em comum, que independente da fonte de energia ela demanda de bastante espaço ou de estar afastada dos grandes centros urbanos, seja por emissão de gases, elevados ruídos ou espaço disponível. Isso faz com que o setor precise investir em longas redes de transmissão para transportar essa energia até os consumidores, deixando pelo caminho um largo desperdício de energia devido as perdas.

A Geração Distribuída é a forma de geração de energia onde a fonte está próxima aos centros de consumo. Essa proximidade provoca um

ganho relacionado ao transporte da energia, que ao percorrer caminhos menores reduz as perdas, além de postergar investimentos necessários na ampliação da rede (EL-KHATTAM; SALAMA, 2004).

Para evitar futuras crises energéticas é preciso diversificar e ampliar a matriz energética Brasileira. Segundo dados da ANEEL só a Geração Distribuída entrou com 1.129.523,65 kW de potência instalada só considerando de janeiro a novembro de 2019 e um total de 1,8GW de potência desde a publicação da Resolução 482 que instaurou o Sistema de Compensação de Energia. Dos 1,8GW apenas 30,7MWp são provenientes de órgãos públicos, o que significa que 98,3% do investimento vem de fundos privados, aumentando e diversificando a matriz energética brasileira sem a necessidade da execução de grandes leilões de energia e nem de investimentos públicos (ANEEL, 2019). Dentre as formas de geração distribuída a mais escolhida é a Energia Solar Fotovoltaica. Além de limpa e inesgotável os sistemas fotovoltaicos tem se popularizado bastante pela sua simplicidade de inovação e pelos benefícios econômicos desta.

Para ajudar na tomada de decisões em instalações de sistemas e sua análise de economia esse trabalho estará analisando os procedimentos necessários para a empreender nesse caminho. A primeira parte do projeto consiste no levantamento geográfico do local, analisando as condições de sua estrutura e identificando qual o espaço disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos e apontando suas inclinações e direções. A partir disso deve ser realizado o dimensionamento do sistema em quantidade de energia a ser gerada, levando em consideração o histórico de consumo da unidade consumidora de estudo e o desempenho dos equipamentos disponíveis no mercado. O projeto elétrico do sistema foi feito com base na NBR 16690 sobre instalações fotovoltaicas.

Materiais e métodos

De acordo com Pinho; Galdino (2014) o projetista de um sistema de energia solar conectado à rede deve ser capaz de definir dois blocos: um para geração e outro para condicionamento de potência a fim de dimensionar o sistema e, o mesmo, sugere as seguintes etapas para a elaboração do projeto: 1. Levantamento de Recurso Solar; 2. Definição da Localização; 3. Levantamento da demanda e consumo de Energia; 4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico; 5. Dimensionamento dos Equipamentos de condicionamento.

Levantamento de recurso solar

A unidade consumidora a ser analisada nesse trabalho está localizada em 12°51'50.0"S 38°22'16.1"W na cidade de Salvador - Bahia segundo as coordenadas obtidas pelo aplicativo Google Maps. Uma residência que está em um local afastado do centro da cidade e bem arborizado. Foi definido que o sistema será instalado dentro da propriedade da unidade consumidora no modelo Geração Local para evitar gastos com estruturas e reforma em uma usina de solo no modelo de Geração Remota. As informações de Irradiação Solar foram levantadas no SunData pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito que agrupa as informações do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2017) em um sistema de busca por latitude e longitude. O SunData calcula, a partir da irradiação média diária no plano horizontal, a irradiação considerando um ângulo igual a latitude, a maior média anual e maior mínimo mensal respectivamente expostos na Tabela 1. A estação de medição mais próxima do local de instalação sistema está localizado em 12.9°S, 8.349°W a 4.7km de distância em linha reta. A primeira coluna indica qual a inclinação dos módulos que resulta nas insolações das próximas colunas.

Tabela 1: Horas de sol a Pico em Salvador – BA.

Inclinação	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média	Delta
0°N	6,26	6,13	5,87	4,65	4,06	3,75	4,01	4,59	5,42	5,79	6,07	6,39	5,25	2,64
13°N	5,82	5,89	5,90	4,90	4,46	4,20	4,4	4,93	5,56	5,65	5,70	5,87	5,28	1,69
19°N	5,98	5,99	5,91	4,84	4,36	4,08	4,34	4,85	5,54	5,71	5,83	6,05	5,29	1,97
33°N	4,79	5,13	5,51	4,92	4,75	4,59	7,82	5,09	5,36	5,04	4,76	4,75	4,96	0,93

Fonte: Pereira, *et al.* (2017).

Para obter o histórico de temperatura foram adotados os dados disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. A estação meteorológica está localizada na região de Ondina (13.01° S 38.53 W) a 23 quilômetros de distância do local de instalação que é a estação de dados de Salvador e a mais próxima da unidade consumidora. Foram considerados as temperaturas máximas média de cada mês entre 2000 e 2017 e depois tratados de forma a tirar a média simples de cada mês para ter uma noção da temperatura média dado o histórico. O resultado está descrito na Tabela 2 e esses serão os dados utilizados para o projeto.

Tabela 2: Média das temperaturas máxima.

Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
31,09	31,29	31,01	29,72	28,11	27,12	26,56	26,84	27,78	29,24	30,06	30,82

Fonte: BDMEP (2019).

Definição da localização

O local da unidade consumidora é uma residência de dois andares sendo que sobre o andar superior tem duas águas de telhado cerâmico

orientadas uma para o norte com 17.2° de azimute e outra para o lado oposto (sul) com 197.2° de azimute. Além dessas duas têm mais 4 águas em nível inferior as anteriores e por isso foram desconsideradas para esse trabalho. Considerando o estudo realizado em Júnior *et al* (2016) vamos utilizar os dados obtidos para a irradiação na cidade de Bom Jesus da Lapa de forma empírica. Essa cidade foi escolhida por estar localizada na latitude 13.27°, a mais próxima da latitude do local real de instalação. Neste o autor traz em seu estudo a energia de forma normalizada para diferentes inclinações e orientações em um mesmo local o que resulta em uma amostra de melhor desempenho em sistemas apontados para o norte e com um ângulo de inclinação entre 10° e 25° (Figura 1).

Figura 1: Energia anual normalizada de um SFCR sob diversos ângulos de Orientação em Bom Jesus da Lapa.

Azimute	NORTE					LESTE					SUL					OESTE				
	0	10	20	30	40	50	70	90	135	180	225	270	290	310	320	330	340	350		
Inclinação	0	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96		
	5	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,95	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98		
	10	0,99	1	1	1	0,99	0,99	0,98	0,97	0,94	0,92	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99		
	15	1	1	1	1	1	1	0,98	0,96	0,92	0,89	0,9	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99		
	20	1	1	1	1	1	0,99	0,98	0,96	0,89	0,85	0,86	0,92	0,94	0,97	0,98	0,98	0,99		
	25	1	1	1	1	0,99	0,99	0,97	0,94	0,86	0,8	0,83	0,9	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98		
	30	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,96	0,93	0,83	0,76	0,79	0,87	0,91	0,94	0,95	0,96	0,97		

Fonte: Júnior *et al.* (2016).

Por esta razão foi definido que os módulos deverão estar preferencialmente na inclinação voltada para o norte 17.2°. Por questões de segurança na instalação do sistema foi optado por seguir a recomendação de Villalva (2019b) e não instalar o sistema em uma inclinação diferente do telhado mesmo que se tenha um pequeno ganho na eficiência do projeto, o que unido aos estudos de Júnior *et al.* (2016) mostra não ser justificável fazer uma estrutura para modificar o ângulo de inclinação da instalação.

Levantamento da demanda e consumo de energia

A unidade consumidora tem um contrato com a Companhia de Eletricidade da Bahia (COELBA) e se enquadra na modalidade de consumidor do tipo B1 - Residencial sendo atendido com 127V monofásico e 220V bifásico. Portanto sua fatura é feita sem horo sazonalidade e não necessita a contratação de demanda. A carga declarada na concessionária é de 24640 W, o que indica que a potência do sistema fotovoltaico deve ser menor ou igual a esse valor ou deve se prever uma mudança no padrão de carga.

A visita técnica constatou que o padrão de entrada tem um disjuntor trifásico GE33C63 que de acordo com seu datasheet tem uma corrente nominal de 63A, como a tensão de fornecimento da unidade consumidora é de 127V monofásico temos uma carga instalada de 24 kW. Afim de trabalhar com os prazos definidos pela REN 482 vamos definir esse valor como limite para o sistema.

A partir da fatura de energia da unidade consumidora foi obtido seu histórico de consumo (Tabela 3). Não foi informado nenhuma previsão de aumento de consumo por parte dos moradores portanto é esperado que se repita em média o consumo de energia. A partir de uma média simples foi estimado o consumo médio durante o ano em 695,3 kWh.

Tabela 3: Histórico de Consumo em kWh.

Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
650	612	662	571	581	789	803	728	599	740	746	699

Fonte: Autoria Própria (2020).

Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Em Pinho e Galdino (2014) o autor traz que para o dimensionamento do gerador fotovoltaico conectado à rede tem de se considerar todas

as informações da Resolução Normativa 482 e o sistema de compensação de energia para prever os momentos em que o sistema gere mais energia do que está sendo consumida. Considerando que a unidade consumidora tem ligação trifásica é estipulado pela regulação que o consumo mínimo será de 100 kWh e, portanto, esse valor deve ser retirado do consumo médio para os cálculos. Como os dados de insolação são diários precisamos de uma base de consumo médio diário que foi calculado dividindo por um valor médio de 30 dias.

Considerando um sistema ideal e desconsiderando as perdas, momentaneamente, a partir da energia consumida diária e do HSP médio anual é possível obter a potência ideal do sistema. Esse valor será considerado para o início do projeto e a partir do momento que se for considerando as perdas esse valor será reconsiderado. O resultado encontrado é utilizado para considerar o valor inicial dos equipamentos de condicionamentos a ser definido na seção seguinte. Uma pesquisa no mercado pelos módulos fotovoltaicos disponíveis foi realizada e os dados obtidos pelos datasheets de cada módulo estão na Tabela 4.

Tabela 4: Informações dos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

Fabricante	CANADIAN	QCELLS	QCELLS	BYD
Modelo	CS6U	L-C5	Q. Peak	PHK-36
Tensão de Circuito Aberto	45,50	46,10	48	45,19
Tensão de Máxima Potência (V)	37	37,7	39,1	37,83
Corrente de Curto Circuito (A)	9,34	9,3	9,83	9,2
Corrente de Máxima Potência (A)	8,78	8,76	9,33	8,72
Potência Máxima (W)	330	330	365	330
Eficiência do Módulo	16,72%	16,90%	18,30%	16,70%
Tolerância de Potência (W)	0 até 5%	0 até 5%	0 até 5%	0 até 5%
Tensão máxima do Sistema (V)	1000	1000	1500	1000
Corrente de Fusível Máxima (A)	15	20	20	15
Temperatura Operacional			-40 °C até +85 °C	

Coefficiente de Temperatura de Tensão β (%/°C)	-0,31	-0,31	-0,28	-0,31
Coefficiente de Temperatura de Potência γ (%/°C)	-0,41	-0,4	-0,39	-0,43
Coefficiente de Temperatura de Corrente α (%/°C)	0,053	0,050	0,040	0,050
Temp. operacional nominal	45±2 °C	45±3 °C	45±3 °C	45±3 °C
Número de Células	72	72	72	144
Tipo da Célula	POLI	POLI	MONO	POLI
Peso (Kg)	22,4	22,5	24	22,2

Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se, pela análise da Tabela 4, que o módulo Monocristalino tem uma eficiência melhor em relação aos demais módulos considerando que os módulos acima tem aproximadamente a mesma dimensão. Porém o custo ainda não se justifica em relação aos policristalinos. Entre os demais pode-se perceber que apesar de muito pequena o módulo da QCELLS L-G5 tem uma vantagem em relação aos demais nos quesitos da eficiência e as perdas relacionadas a temperatura tendo um γ menor que os demais módulos policristalinos disponíveis. O Módulo da BYD PHK-36 tem a tecnologia HALF-CELL e, por isso, tem o dobro do número de células.

Dados os motivos relacionados acima e aliado a uma questão de custos, o módulo alemão da QCELSS L-G5 foi definido para o projeto e esse trabalho estará utilizando os dados relacionados acima para os cálculos a diante. Para encontrar o valor real do número de placas que precisaremos para compensar a energia da unidade consumidora deve se considerar as perdas que são causadas por:

- *Sombreamento* – Utilizando a ferramenta de designer da SolarEdge foi feito o modelo 3D da casa com base nas visitas técnicas e na sua planta baixa. O software previu uma perda de 1% por sombreamento. Essa perda é como dito em Almeida (2012) relacionado tan-

to a causas previsíveis como construções ao redor, linhas de transmissão, árvores quanto as imprevisíveis como pássaros, dejetos ou folhas caídas;

- *Direção e Inclinação* – Baseada na Figura 1 e considerando a inclinação do telhado em 10° de acordo com o levantado em visita podemos considerar a energia normalizada para o sistema em questão como 1, sem perdas relativas;
- *Degradação dos Módulos* – Os módulos fotovoltaicos tem uma degradação em sua eficiência com o passar do tempo. O fabricante do módulo escolhido dá uma garantia de 0,7% de degradação anual. Utilizaremos esse valor como parâmetro para o cálculo;
- *Sujidade* – O acúmulo de sujeira sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos reduz a irradiação nas células causando uma diminuição na energia gerada. De acordo com John (2015) a energia diária perdida pela sujidade é em média de 0.35% por dia;
- *Temperatura* – As perdas relacionadas a temperatura envolvem os parâmetros β e γ indicados no datasheet do módulo e as médias de temperaturas na Tabela 2.

Demais perdas foram consideradas de forma empírica para o Cabeamento CA e CC por efeito Joule e o Descasamento dos módulos proporcionados pela mínima diferença entre os módulos. Para cada um desses fatores foi considerado uma perda de 0,5%. Todas as perdas estão descritas na Tabela 5 que demonstra as perdas considerando a potência de 330Wp para cada módulo por mês considerando que o sistema trabalhará com uma temperatura 29°C maior que a temperatura ambiente de cada mês.

Tabela 5: Perdas relacionadas aos módulos fotovoltaicos.

	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	MEDIA
K_{somb}	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
REDUÇÃO	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W	3,3W
K_{temp}	14,04%	14,12%	14,00%	13,49%	12,84%	12,45%	12,22%	12,34%	12,71%	13,30%	13,62%	13,93%	13%
REDUÇÃO	46,3W	46,6W	46,2W	44,5W	42,4W	41,1W	40,3W	40,7W	41,9W	43,9W	45,0W	46,0W	43,7W
K_{cc}	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
REDUÇÃO	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W
K_{ca}	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
REDUÇÃO	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W
K_{desc}	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
REDUÇÃO	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W	1,7W
K_{suj}	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%	0,64%
REDUÇÃO	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W	2,1W
K_{degr}	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%
REDUÇÃO	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W	2,3W
K_{total}	17,88%	17,96%	17,84%	17,33%	16,68%	16,29%	16,06%	16,18%	16,55%	17,14%	17,46%	17,77%	17,1%
REDUÇÃO	58,99W	59,25W	58,89W	57,18W	55,06W	53,75W	53,01W	53,38W	54,62W	56,55W	57,63W	58,63W	56,4W

Fonte: Autoria própria (2020).

A quantidade mínima de módulos (equação 1) para gerar a energia necessária pode ser determinada dividindo a potência ideal pela potência nominal do módulo menos a redução de potência média encontrada na Tabela 5..

$$Qtde_{min} = \frac{P_{ideal}}{P_{mod} - Perdas} = \frac{3,78k}{330 - 56,4} = 13,82 \cong 14 \text{ Módulos} \quad (1)$$

A quantidade final de módulos será determinada apenas após a seleção do equipamento de condicionamento que será definida na próxima subseção.

Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento

No caso de um Sistema fotovoltaico conectado à rede o equipamento de condicionamento necessário é o inversor que vai depender da potência do gerador e as características de tensão e corrente dos módulos. Os inversores disponíveis no mercado com uma faixa de potência próxima à calculada para o gerador estão listados na Tabela 6 com suas principais características obtidas em seus respectivos *datasheets*.

Tabela 6: Informações dos inversores disponíveis no mercado.

Fabricante	FRONIUS	FRONIUS	FRONIUS	SMA	SMA	ABB	ABB
Modelo	PRIMO 4	PRIMO 5	PRIMO 6	SunnyBoy 4000TL	SunnyBoy 5000TL	UNO-4.0	UNO-5.0
Potência Nominal de Entrada (W)	4000	5000	6000	4200	5250	4000	5000
Corrente de Entrada Max - A (A)	12	18	18	15	15	32	38
Corrente de Entrada Max – B (A)	12	18	18	15	15	16	19
Tensão Max de Entrada (Vdc)	1000	1000	1000	600	600	600	600
Tensão Mínima de Entrada (Vdc)	80	80	80	100	100	90	90
Tensão Inicial de Entrada (Vdc)	80	80	80	125	125	140	140
Alcance Min MPPT (Vdc)	80	80	80	140	175	130	145
Alcance Max MPPT (Vdc)	800	800	800	500	500	530	530

Tensão MPPT Nominal (Vdc)	710	710	710	365	365	360	360
Número de MPPTs	2	2	2	2	2	2	2
Potência Nominal de Saída (W)	4000	5000	6000	4000	5000	4000	5000
Potência Máxima de Saída (W)	4000	5000	6000	4000	5000	4000	5000
Tensão Nominal de Saída (Vac)	230	230	230	320	230	230	230
Tensão Mínima de Saída (Vac)	180	180	180	180	180	180	180
Tensão Máxima de Saída (Vac)	270	270	270	270	270	270	270
Frequência de Rede (Hz)	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Corrente Nominal de Saída (A)	17,4	21,7	26,1	N/A	N/A	17,2	22,0
Corrente Máxima de Saída (A)	17,4	21,7	26,1	22	22	19	24
Eficiência Máxima	97,7%	97,8%	97,8%	97%	97%	97%	97,4%
Eficiência Européia	97,1%	97,1%	97,3%	98%	98%	97%	97%
Altura (mm)	645	645	645	435	435	553	553
Largura (mm)	431	431	431	470	470	418	418
Espessura (mm)	204	204	176	176	175	175	175
Peso (kg)	21,5	21,5	21,5	16	16	15	15
Grau de Proteção	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65

Fonte: Autoria própria (2020).

Entre os inversores disponíveis percebe-se uma eficiência maior nos inversores da marca Fronius que inclusive possuem uma maior tensão de entrada, o que possibilita séries de módulos maiores. Além disso o inversor foi o que se mostrou mais atraente financeiramente. Considerando as perdas do inversor da Fronius aos cálculos da seção anterior é necessário aumentar o valor encontrado na equação 1. As perdas inerentes ao inversor estão relacionadas à sua eficiência que para efeitos de cálculo foi utilizado a eficiência dos inversores Primo 5.0-1 e Primo 4.0-1 (2,9%).

$$Qtde_{min} = \frac{P_{ideal}}{P_{mod} - Perdas} = \frac{3,78k}{330 - 9,6 - 56,4} = 14,32 \cong 15 \text{ Módulos} \quad (2)$$

Os 15 módulos determinados pela equação 2 resultam numa potência nominal do sistema de 4,95 kWp. Esse sistema traz um fator de dimensionamento do inversor menor que 0,8 para o Primo 4.0, muito alto para o Primo 6.0 e, considerando que um pré-requisito do projeto foi que o sistema possa ser facilmente ampliado futuramente em caso de aumento no consumo da residência, o inversor selecionado para esse projeto foi o Primo 5.0 que com os 15 módulos traz uma FDI de 1,01.

Por motivos comerciais e pedido pelo investidor do projeto foi definido que o sistema seria um pouco maior que do que mínimo necessário, sendo definido a utilização de 16 módulos de 330Wp com o inversor Fronius Primo 5.0 o que resulta num sistema com uma potência total calculada na equação 3.

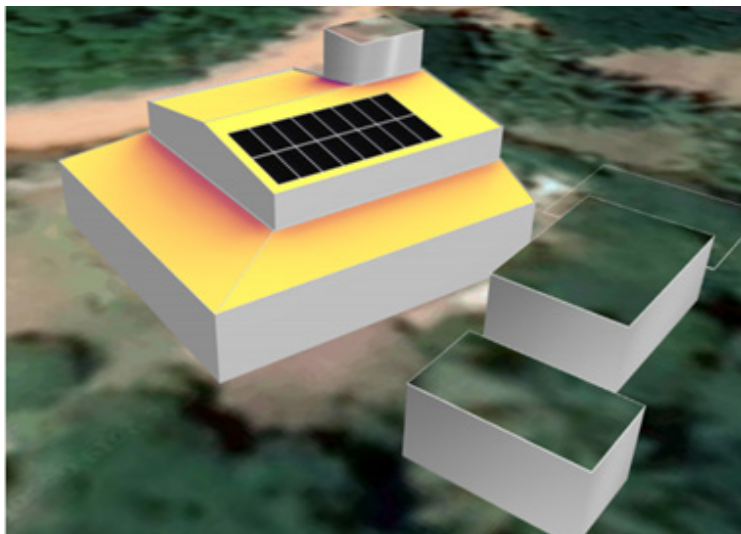
$$P_{sist} = Qtde_{mod} * P_{mod} = 16 * 330 = 5,26kW_p \quad (3)$$

Arranjo fotovoltaico e equipamentos de proteção

O arranjo fotovoltaico a ser colocado no telhado foi projetado no Designer do SolarEdge conforme a Figura 2 foi levado em consideração o

resultado de sombreamento dado pelo software para posicionar os módulos e suas dimensões de acordo com seu datasheet.

Figura 2: Desenho do Arranjo Fotovoltaico projetado pelo Designer do SolarEdge .



Fonte: Autoria própria (2020).

O arranjo elétrico escolhido foi aquele que teve o menor custo agregado. Considerando a corrente máxima do inversor (18 A) e a corrente máxima dos módulos (9,3 A), de acordo com as Tabelas 7 e 5 respectivamente, a quantidade de strings por MPPT é limitada a um. Já a tensão máxima que o Inversor suporta é de 1000 V, isso é o fator limitante do tamanho da *string*. Como cada módulo tem uma tensão de circuito aberto de 46,1 V uma simples divisão resulta o número máximo de módulos, como na equação 4.

$$\frac{V_{MAXdc}}{V_{OC}} = \frac{1000}{46,1} \cong 21 \text{ Módulos} \quad (4)$$

Apesar de ter duas entradas no inversor foi definido utilizar apenas uma *string* com 16 módulos pois além de ter uma eficiência maior devido

a trabalhar com uma corrente menor tem um custo reduzido na quantidade de materiais. A partir disso pode-se definir os principais parâmetros do sistema fotovoltaico que estão dispostos na Tabela 7

Tabela 7: Informações do Sistema.

Potência do Sistema	5,28 kWp
Número de Strings	1
Módulos por String	16
Tensão Máxima de Circuito Aberto	737,6 V
Máxima Corrente de Curto Circuito	9,3 A
Fator de Dimensionamento do Inversor	1,04

Fonte: Autoria própria (2020).

Os equipamentos de proteção necessários para o sistema fotovoltaico são divididos entre a parte CC e a parte CA. A parte CC ficará na *String Box* que é uma encapsulamento de isolamento para os equipamentos de proteção. Todos os equipamentos utilizados são próprios para sistemas fotovoltaicos.

Proteção CC

Como o sistema tem somente uma *string* não existe o risco de corrente reversa e, portanto, não é necessário a proteção para tal assim como para sobrecorrente.

O sistema fotovoltaico tem um dispositivo seccionador conforme os dados da Tabela 8 e um dispositivo de proteção contra surtos como descrito na Tabela 9.

Para dimensionar esses equipamentos foram utilizados os dados do sistema na Tabela 7. Como a tensão de circuito aberto do sistema fotovoltaico é de 737,6V o DPS disponível com tensão 10% acima deste é o de 1000V.

Tabela 8: Dispositivo de Proteção contra Surtos de Corrente Contínua.

Fabricante	Dehn
Tensão Máxima Contínua	1000 V
Nível de Tensão de Proteção	<4kV
Corrente Nominal de Descarga	12,5kA
Corrente Máxima de Descarga	40 kA

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 9: Chave Seccionadora CC.

Fabricante	Merz
Tensão Máxima Contínua	1000 V
Classe de Corrente	25kA
Tensão nominal de surto	8 kV

Fonte: Autoria própria (2020).

Como dispositivo seccionador-interruptor foi utilizado o dispositivo descrito na Tabela 10 e foi especificado utilizando as informações de corrente e tensão saída do Inversor.

Tabela 10: Disjuntor CA.

Fabricante	ABB
Tensão de funcionamento	230/400V
Número de Polos	Bipolar
Frequência	50/60 Hz
Corrente Nominal	25 A

Fonte: Autoria própria (2020).

O dispositivo de proteção contra surto utilizado tem as características da Tabela 11 baseado na tensão de saída do inversor que é a mesma da rede.

Tabela 11: Dispositivo de Proteção contra Surtos de Corrente Alternada.

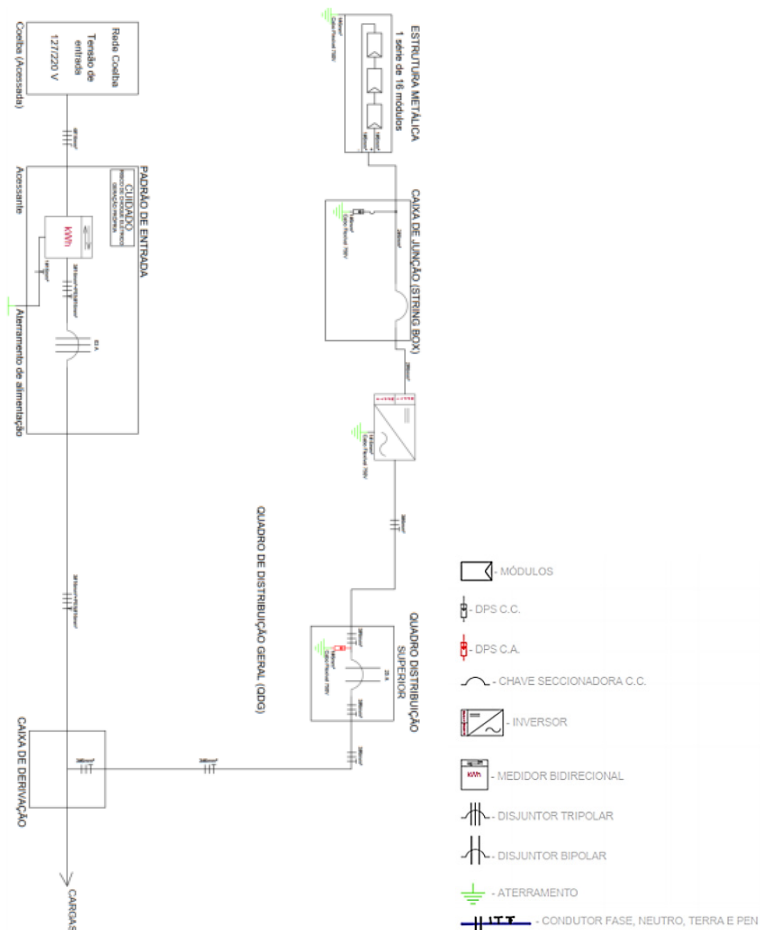
Fabricante	ABB
Tensão Máxima	275 V
Nível de Tensão de Proteção	<1kV
Corrente Nominal de Descarga	5 kA
Corrente Máxima de Descarga	20 kA

Fonte: Autoria própria (2020).

Diagrama unifilar

O Diagrama unifilar do sistema está projetado como na Figura 3. O cabeamento CA vai utilizar os eletrodutos já existentes na construção visto que tinha espaço disponível para isso e para acessar o padrão de entrada os condutores precisaram passar antes com uma caixa de derivação.

Figura 3: Diagrama Unifilar.



Fonte: Autoria própria (2020).

Projeção da geração

Considerando os dados da Tabela 1 e as perdas consideradas é possível estimar uma geração anual e mensal. Esse cálculo é realizado pela multiplicação simples da quantidade de módulos pela potência dos módulos compensada das perdas e pela Horas de Sol a pico por dia. O resultado para cada mês está na Tabela 12.

Tabela 12: Estimativa de Geração Mensal.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Wp	261,9	261,6	260,4	263,7	265,8	265,5	267,9	267,5	264,6	264,3	263,3	260,6	263,93
HSP	5,98	5,89	5,23	4,21	4,05	3,67	5,45	5,21	5,73	5,61	6,27	6,27	5,30
Energia _{dia}	25,06	26,64	21,77	17,75	17,22	15,59	23,35	22,31	24,25	23,74	26,41	26,18	22,36
Energia _{mês}	777	690	675	533	534	468	724	692	727	736	792	811	680
Energia _{ano}													8.158,4

Fonte: Autoria própria (2020).

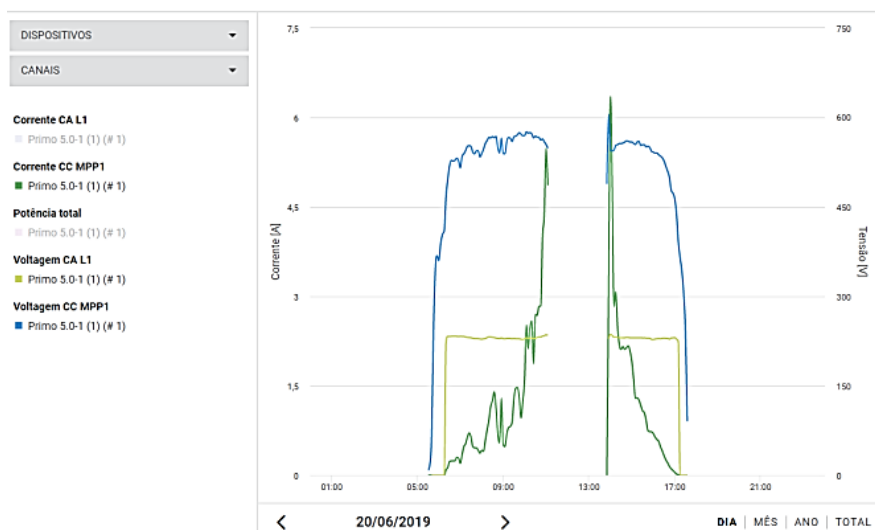
Resultados e discussões

Para o monitoramento do sistema foi utilizado o sistema Solar Web disponibilizado pela fabricante do Inversor. A plataforma disponibiliza dados em tempos reais sobre a geração de energia, e dados como a corrente e tensão em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC) e potência ativa e reativa instantânea. Para isso o inversor está conectado à internet via WiFi e coleta dados a cada cinco minutos. Os dados coletados são armazenados e disponibilizados de forma gratuita para análise.

O sistema facilita a verificação de faltas e/ou falhas no sistema. Por exemplo um dia com a geração abaixo do esperado pode significar uma falta de energia na unidade consumidora representado pela ausência de

Tensão em CA na medição. Como na Figura 4 que traz as medições do sistema no dia 20 de junho de 2019 onde percebe-se a ausência de dados da Tensão CA (em amarelo) no período aproximadamente das 11:00 até as 14:00. Foi averiguado que realmente houve uma falta no fornecimento de energia da distribuidora e por conta do sistema de Anti-Ilhamento o Gerador Fotovoltaico se desligou do sistema de distribuição. Análises como essas foram realizadas e detalhadas na próxima seção deste trabalho.

Figura 4: Dados medidos no dia 20 de junho de 2019.



Fonte: Adaptado de solarweb.com (2019).

Os dados de monitoramento do sistema foram cedidos pela proprietária para uso exclusivo desse projeto e suas consequências na área acadêmica. As informações de geração do sistema foram compiladas utilizando software para planilhas com agrupamentos diário e mensal. Os dados de geração de energia por mês estão na Tabela 13 assim como a performance do sistema comparado ao que foi projetado.

Tabela 13: Quantidade de energia gerada por mês em relação ao projetado.

Mês	Gerado (kWh)	Projetado (kWh)	Performance
Mar	193,82	261	74%
Abr	704,4	533	132%
Mai	678,65	534	127%
Jun	581,67	468	124%
Jul	624,57	727	86%
Ago	639,68	669	96%
Set	736,33	751	98%
Out	764,61	736	104%
Nov	757,59	792	96%

Fonte: Autoria própria (2020).

Para este trabalho foi analisado a geração do sistema até o dia 30 de novembro de 2019, totalizando 256 dias de produção, iniciando no dia 20 de março, com um total de 5.675 kWh de energia gerada alcançando uma média de 22,19 kWh/dia. Esta média não pode ser comparada com a média geral obtida na Tabela 14 pois os meses de maior eficiência do verão ainda não teve geração no sistema. Mas pode se obter a média do projetado entre março e novembro sendo 21,4 kWh/Dia o que é bem próximo da média obtida pela geração. Considerando a duração da análise do sistema ele estaria projetado para uma geração próxima de 5.478,4 kWh o que significa uma taxa de performance do sistema de 104% em relação ao projetado.

Os meses de março e julho foram os que tiveram uma performance mais abaixo do esperado. Como o sistema foi ativado somente no dia 20 de março, este mês só teve geração durante 10 dias que coincidiram com um período de chuva sendo a provável causa da baixa performance do sistema.

Os meses de abril, maio e junho tiveram performances bem acima do esperado. Isso deve-se em parte ao clima do local. Os dados de temperatura utilizados para o cálculo foram uma média para a cidade de Salvador que tem uma grande extensão e um clima bastante urbano. O local de instalação é bem arborizado e tem uma boa circulação de vento o que faz

com que o sistema tenha um maior resfriamento diminuindo as perdas do sistema. Outro fator é que alguns fatores de perda (sujeidade e degradação) são fatores que vão afetar o sistema com o passar do tempo.

A Plataforma pvSpots SOLARGIS permite a simulação de um sistema fotovoltaico a partir dos valores de inclinação e azimutal além das coordenadas e especificações dos equipamentos utilizados na instalação. Segundo a empresa, o software utiliza dados de irradiação do satélite Meteosat MSG e o ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), da temperatura do ar e vapor de água do Global Forecasting System, um modelo de previsão do tempo administrado pelo governo dos Estados unidos. Ambas as fontes tem dados que cobrem o globo inteiro.

A versão DEMO do software limita a quantidade de dados a ser disponibilizado pelo período de 6 meses (abril a setembro) e por isso esta verificação focou nesses meses para o estudo. Os principais dados fornecidos são listados a baixo e os dados mensais estão organizados na Tabela 14:

- Estimativa Baixa: Produção de energia fotovoltaica esperada em uma estimativa baixa;
- Estimativa Alta: Produção de energia fotovoltaica esperada em uma estimativa alta;
- Melhor Estimativa: Produção de energia fotovoltaica mais provável;
- Irradiação solar: Irradiação solar horizontal em kWh/m².

Tabela 14: Dados previstos de geração e Irradiação.

Mês	E baixa	E melhor	E alta	Irradiação
Abr	611,81	661,39	711,45	5,25
Mai	584,36	631,58	678,14	4,8
Jun	500,66	550,21	599,18	4,3
Jul	539,4	587,87	638,45	4,44
Ago	613,9	666,13	718,31	5,05
Set	629,65	683,31	737,81	5,42

Fonte: SOLARGIS (2019).

Os dados obtidos ajudam a entender a baixa performance encontrada no mês de julho visto que a geração foi maior do que a Melhor estimativa e próximo da estimativa mais alta. A Irradiação medida para o mês foi menor do que o valor histórico usado para calcular com isso é possível afirmar que o mês de Julho de 2019 na verdade foi um mês que fugiu do histórico de irradiação solar.

Comparando a energia gerada com a melhor da estimativa do Solargis o sistema instalado teve uma performance de 103% em relação ao projetado com um desvio padrão de 13,3% que cai para 12,5% considerando os dados diários.

Conclusões

Esse trabalho apresentou um projeto e instalação de um sistema fotovoltaico e uma análise do desempenho do sistema e dos equipamentos instalados, este serve de subsídio para futuros trabalhos no setor fotovoltaico e na academia, principalmente para utilização na Universidade Federal do Recôncavo onde esse trabalho estará disponibilizado em sua biblioteca. Também poderá servir de auxílio na decisão gerencial de empresas em análise de instalações fotovoltaicas como um investimento e entender todo seu o processo e os requisitos para sua instalação.

O projeto realizado nesse trabalho foi dimensionado de acordo com as normas vigentes e foi projetado para uma geração que compensasse toda a energia consumida da unidade em estudo. Utilizando 16 Módulos de 330Wp (5,28kWp) foi previsto uma geração total de 5.206 kWh entre os meses de abril e novembro. Durante este mesmo período foi registrado uma geração total de 5.487kWh mais uma geração de 193,82kWh nos dez dias do mês de março. A Tabela 15 retoma os dados obtidos com sua análise de desempenho médio alcançando 104% da energia que foi projetada para o período.

Tabela 15: Resultados Mensais.

Mês	Geração (kWh)	Performance (kWh/kWp)	Projetado (kWh)	Desempenho
Mar	187	99,9	261	72%
Abr	704	133,4	533	132%
Mai	679	128,5	534	127%
Jun	582	110,2	468	124%
Jul	625	118,3	724	86%
Ago	663	125,5	692	96%
Set	713	135,1	727	98%
Out	765	144,8	736	104%
Nov	758	143,5	792	96%
Total	5675	126,6	5467	104%

Fonte: Autoria própria (2020).

O sistema do SOLARGIS se mostrou com uma exatidão bem aceitável tendo um desvio padrão de 2,21 na avaliação da geração de energia. Não se pôde analisar todos os aspectos climáticos na comparação dos sistemas devido à ausência de dados nos meses do verão que tem um alto índice de geração esperada. Uma recomendação futura de trabalho é aumentar a análise de dados referente a ambos os sistemas analisando inclusive o índice de degradação dos módulos.

O aproveitamento da energia fotovoltaica na forma de geração distribuída é perfeitamente viável e facilmente previsível de retorno. Apesar dos meses que estiveram fora da curva os valores projetados para o sistema estiveram dentro de uma margem de erro aceitável menor que 5%. Alguns softwares como o PV*SOL e PVSYST já conseguem fazer uma estimativa da geração baseada em esquemas 3D com análises mais específicas. Outra recomendação de trabalho futuro é comparar a projeção de diversos softwares em relação ao que está sendo gerado e indicar os mais próximos do real.

Alguns pontos muito importantes para o setor estão relacionados à sua estabilidade e a condição de cumprir contratos, para isso além de projetos bem dimensionados e aprofundados é necessário contar com uma segurança na regulamentação tarifária por conta da ANEEL. A Geração

Distribuída Unida a geração fotovoltaica une dois pilares de desenvolvimento do ser humano: Sustentabilidade e Economia.

Referências

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.

ANEEL. **Dados da Geração distribuída** - ANEEL. 2019. Disponível em: shorturl.at/ehstZ. Acesso em: 01 dez. 2019.

EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M. M. Distributed generation technologies, definitions and benefits. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 71, n. 2, 2004.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [S.l.]: CEPEL - CRESESB, 2014. v. 1.

PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**—2ª Edição, São José dos Campos. 2017.

JÚNIOR, A. et al. **Análise de desempenho de sistemas fotovoltaico com diferentes ângulos de inclinação e azimute localizados em palmas-to**. XIV CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

VILALVA, M. G. **Módulos mono cristalinos v ao dominar o mercado de energia solar**. 2019. Disponível em: <https://www.canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/182-modulos-mono-vaio-dominar-o-mercado-solar>. Acesso em: 01 dez. 2019.

VILALVA, M. G. **Vale a pena ajustar a angulação dos módulos solares nos telhados**. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/99-vale-a-pena-ajustar-a-angulacao-dos-modulos-solares-nos-telhados>. Acesso em: 04 nov. 2019.

JOHN, J. J. **Characterization of soiling loss on photovoltaic modules, and development of a novel cleaning system**. Arizona State University, USA, 2015.

PARTE III
PESQUISAS RELACIONADAS A ÁREA DE
AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Projeto de bancada de gerenciamento inteligente de energia

*Vitor Oliveira e Silva
Teófilo Paiva Guimarães Mendes*

Introdução

Com o constante crescimento de demanda da energia elétrica passa a existir a necessidade que novas tecnologias sejam desenvolvidas no intuito de tornar o fornecimento mais eficiente. Aliada a esse crescimento, a preocupação com o meio ambiente se faz cada vez mais necessária. A redução na utilização de combustíveis fósseis e da emissão de gases carbônicos vem sendo fatores cada vez mais importantes na agenda mundial. Notícias de que lideranças mundiais estão fazendo ações de promoção à utilização de energias de fonte renováveis são cada vez mais constantes e nelas se destacam as energias solar e eólica.

Neste cenário o Brasil se encaixa com um grande potencial para aproveitar estas fontes de energia devido ao seu clima e geografia favorável, principalmente na região que se estende do sudoeste baiano até os litorais cearense e potiguar (CRESESB, 2004). Com a aprovação da resolução normativa Nº482 da ANEEL (ANEEL, 2012), que estabelece as condições para que os consumidores possam gerar sua própria energia e ainda ceder o excedente para a concessionária de energia em troca créditos, a tendência dessa tecnologia é crescer. Com este cenário descrito, desponta a necessidade das empresas no ramo de energia se adaptarem ao novo mercado em surgimento de micro e minigeradores, causando a estas empresas menos receitas por um lado, porém contrabalançando com menos despesas em novos investimentos.

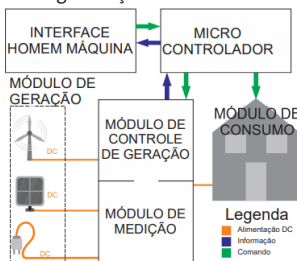
Este trabalho se baseia no desenvolvimento de um projeto que permita estudantes conhecerem um pouco mais sobre a adequação de um sistema híbrido de energias renováveis e não poluentes e o gerenciamento de energia e seus componentes.

Materiais e métodos

A proposta da bancada é ter um ambiente em que os estudantes possam praticar e se habituar ao comportamento de fontes de energias alternativas, como administrá-las com o consumo de residências, e conhecer mais sobre práticas de gerenciamento pelo lado da demanda e geração distribuída.

Para isso foram considerados como critérios de projeto a serem atendidos as seguintes características: Sistema de geração de energia de fontes renováveis; Adaptação para utilizar a energia da rede; Possibilidade de medições de grandezas elétricas; Monitoração em tempo real das condições de operação e previsão das mesmas; Capacidade de transmitir sinais de monitoração e comando; Simulação de cargas de consumo; Automação dos equipamentos que simulam o consumo; Ambiente em que o usuário possa controlar o consumo e geração. Com o intuito de simplificar a construção e exposição do material, todo o projeto foi dividido em módulos conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1: Diagramação dos blocos da bancada.



Fonte: Autoria própria (2020).

Módulo de consumo

Este módulo tem como objetivo simular uma residência e seu perfil de consumo. Os pré-requisitos destes módulos são: Dispositivos dissipadores de energia; habilitar a automação dos equipamentos; possibilitar uma simulação do consumo variável de uma residência real.

Para se aproximar do consumo de uma residência real, foi estabelecido alguns equipamentos comuns a residências. Esses equipamentos tem uma potência muito elevada para serem adicionados como são na bancada, por isso para simplificar sua construção foi preciso dimensionar a potência utilizada no projeto a partir de uma escala trazendo uma proporção a todos os equipamentos. Com base na segurança foi determinado uma tensão de distribuição em 5VDC e com base nos dispositivos de geração disponíveis no mercado uma potência de 2W.

As demandas de cada aparelho foram somadas para encontrar a demanda máxima. Como o objetivo é reduzir a demanda total para se adequar a geração do projeto, foi estabelecido uma porcentagem de participação na demanda para cada aparelho que então foi redimensionada para a baixa potência. Esse novo valor reduzido foi utilizado para encontrar a resistência que irá dissipar a quantidade de demanda encontrada quando sobre o efeito de 5VDC através de: $R = V^2 / P$. Onde: R = Resistência, V = Tensão e P = Potência. Os valores utilizados e seus resultados de redimensionamento obtidos estão na tabela 1.

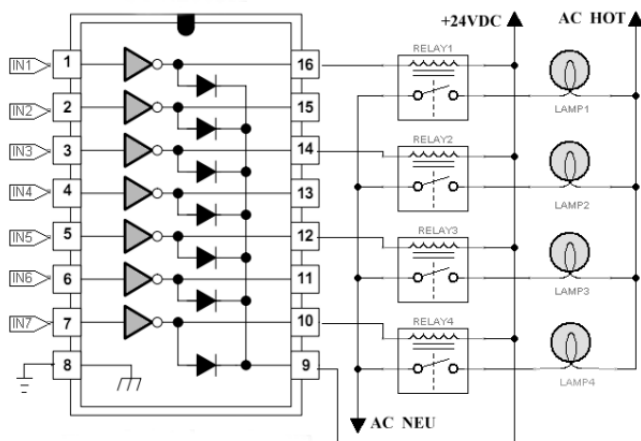
Tabela 1: Descritivo dos Equipamentos utilizados.

Equipamento	Potência	Fator de Demanda	Demanda	Demanda Modificada	Resistência calculada	Resistência Comercial
Chuveiro	4400	1,00	4400	0,91	27,56	27
Ferro Elétrico	1000	1,00	1000	0,21	121,25	120
Geladeira	265,31	1,00	265,31	0,05	457,02	470
Ar 7500 BTU	978,26	1,00	978,26	0,20	123,94	120
Iluminação Geral	614,55	0,86	528,51	0,11	229,42	220
TUGs	1043,75	0,86	897,63	0,19	135,08	130
Maquina de Lavar	1666,67	1,00	1666,67	0,34	72,75	75
TOTAL:			9,7	2,01		

Para habilitar a automação do módulo, é necessário que o microcontrolador seja capaz de controlar o estado de alimentação de cada componente (ligado/desligado). Portanto, para isolar o circuito do microcontrolador do circuito geral foi utilizado um Relé para cada equipamento. Foi utilizado o modelo CTK1C5VDC, que utilizam uma tensão de 5VDC para ativar a bobina e suportam até 12A em 28VDC.

O acionamento e liberação do eletroímã interno do relé gera uma tensão inversa na bobina causada pelo campo magnético. Essa tensão reversa pode danificar o microcontrolador e a solução encontrada para este problema foi a utilização de diodos em paralelo com a saída do relé que desviam a corrente. Para este projeto foi escolhido o CI ULN2003 (Figura2) composto por 7 transistores *Darlington* que além de aumentar a proteção também fornece um ganho de corrente para acionar os relays.

Figura 2: Circuito do CI ULN2003.



Fonte: adaptado de <http://www.bristolwatch.com/ele/uln2003a.htm> Acesso em 02/09/2017.

Com a possibilidade de dois contatos de relé foi decidido que cada equipamento poderá ser controlado de forma automática por meio do

microcontrolador ou manualmente por meio de chaves de dois estados. Para tornar uma interface mais amigável, LEDs foram adicionados ao esquema para indicar qual o estado de cada equipamento. O software Eagle, versão estudantil, foi escolhido para projetar o circuito e a placa impressa devido à sua compatibilidade com a impressora LPKF disponível no laboratório da Universidade. O circuito proposto neste trabalho para o módulo de consumo pode ser encontrado link do repositório do projeto no github.

Módulo de Geração

Para o módulo responsável por fornecer energia ao sistema foi estipulado os seguintes pré-requisitos: Ser capaz de gerar em pelo menos 7VDC; ter pelo menos uma fonte de energia renovável; ter pelo menos uma fonte de energia contínua; gerar em tensão contínua.

Por causa do grande crescimento no mercado de Energia Solar e Eólica e devido ao fator de complementação entre elas, foi escolhido utilizar uma fonte de energia de cada e uma fonte de energia da originada da rede da concessionária para, em conjunto, alimentar o módulo de consumo. No primeiro protótipo do sistema referente a energia solar é utilizado dez células solares de 5VDC e 30mA conectados em duas *strings* de cinco módulos em paralelo. Essa configuração fornece até 10VDC e 150mA, totalizando um sistema de 1,5Wp.

No protótipo do sistema de energia eólica, para gerar energia foi utilizado o motor FK180SH-09450. Que possui tensão operacional de 12 a 24 V e tensão nominal de 12V e entrega até 0,5 W de potência. (MABUCHI MOTORS, 2017). O sistema foi montado de forma que o motor que vai gerar a energia será movimentado por um segundo para que fosse possível simular o sistema mesmo em condições sem vento.

Para simular o acoplamento a rede foi utilizada a fonte de alimentação FlyPower PS301AJAK3000E que entrega 9V e 3000mA. Ela irá transformar a energia AC recebida da rede em DC e reduzir a tensão para 9V.

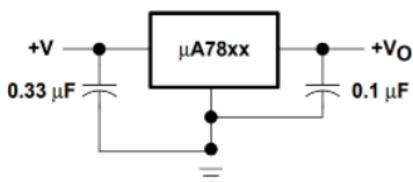
Módulo de controle geração

Esse módulo será responsável por administrar o fornecimento de energia ao sistema. As funcionalidades requeridas foram: Regular a tensão entregue ao consumidor; controlar estado do fornecimento. Esse módulo vai receber a tensão gerada por cada fonte e, através de relés do mesmo tipo utilizado no módulo de consumo, fará a seleção de qual fonte será utilizada.

Para manter o fluxo de energia das fontes geradoras para o consumo, evitando corrente reversa naquelas com menor tensão, foi utilizado um diodo 1N4007 na entrada de cada fonte de energia. Como as fontes de energia podem variar na voltagem entregue, a depender de condições ambientais como intensidade do vento e luminosidade, é necessário a utilização de um regulador de tensão (Figura 3) para que a energia seja mais estável. No protótipo foi utilizado o regulador de tensão LM7805, um capacitor de 330nF e um capacitor cerâmico de 100nF, estes últimos com a função de desacoplar a entrada do regulador e evitar oscilações na saída.

Da mesma forma que no módulo de consumo, um ULN2003 foi utilizado para proteger o microcontrolador da corrente reversa gerada ao desativar o relé.

Figura 3: Circuito Regulador de tensão.



Fonte: adaptado de Spark Fun Electronics INC (2017).

Microcontrolador

Os microcontroladores são dispositivos que integram de maneira mais simplificada hardware e software. Eles podem ser programados para exercerem funções específicas. Uma das placas mais populares no mercado são as da empresa Arduino, que oferece uma plataforma open-source baseada em uma estrutura fácil de utilizar de hardware e software.

Para o protótipo deste projeto, foi escolhido o Arduino Mega 2560 baseado no ATMEGA2560. A escolha se baseou na quantidade de portas analógicas disponíveis, preço e disponibilidade de material para estudos e módulos embarcados compatíveis. Ele tem 54 portas digitais, 16 portas analógicas, um clock de 16MHz e uma conexão USB utilizada para se comunicar com o computador.

As portas digitais do Arduino funcionam como entrada ou saída de estado lógico HIGH e LOW (5v ou 0v). As portas analógicas funcionam com um conversor analógico digital de 10 bits (0 a 1024) com uma resolução de 4,88 mV.

O Arduino IDE é uma plataforma escrita na língua de programação Java que contém um editor de código capaz de compilar e carregar os programas direto na placa. Ele também tem a vantagem de ter sido construído com o intuito de que pessoas leigas comecem a se familiarizar com desenvolvimento de software e façam seus programas.

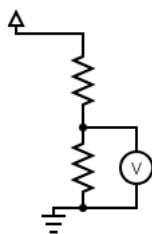
Módulo de medição

A função deste módulo é medir os valores de tensão e corrente sendo geradas e consumidas. Para medir a corrente neste protótipo foi utilizado o sensor de corrente ACS712 da Allegro Microsystems, um sensor do tipo hall que gera um sinal de corrente quando um campo magnético é produzido pelo condutor que quer ser medido. Outros sensores foram avaliados

para utilização como o SCT-013 que tem a vantagem de ser não invasivo e o ACS714 que suporta maiores temperaturas, porém tem menor disponibilidade no mercado e são mais caros. O ACS712 foi escolhido devido a sua baixa interferência, baixa resistência interna ($1.2\text{m}\Omega$) e alto tempo de resposta ($5\mu\text{s}$) além de tensões de operação compatível com o microcontrolador. (ALLEGRO MYCROSYSTEMS, INC. 2010) O módulo do sensor dispõe de um pino de alimentação, um pino de terra e um pino de saída analógica. O condutor que deve ser medido entra em contato com os bornes.

A Allegro disponibiliza esse sensor no mercado em 3 sensibilidades: -5 a $+5$, -20 a $+20$ e -30 a $+30$ A. Cada um deles tem diferentes respostas na saída analógica variando de 66 à 188 mV/A com $2,5\text{v}$ de offset. Para o protótipo produzido o mais indicado é o ACS712 de -5 a 5 A porém foi encontrado apenas o sensor com uma sensibilidade -20 a 20 A que tem uma saída de 100 mV/A. Para medir a tensão foi utilizada para o protótipo as portas analógicas do microcontrolador com um circuito divisor de tensão (Figura 5) para que não ultrapasse a tensão nominal do Arduino. A tensão de saída é medida e convertida em sinal digital pela porta analógica do Arduino que calcula a tensão de entrada a partir da equação baseada na 1ª Lei de Ohm: $V_{in} = V_{out} * (R_1+R_2)/R_2$. Cada sistema de micro autogeração e consumo deve ter seu próprio sistema de medição.

Figura 5: Circuito Divisor de Tensão.



Fonte: Autoria própria (2020).

Interface homem máquina - IHM

A interface homem máquina deve ser capaz de passar informações e controle necessário para que o usuário realize uma determinada ação no sistema (ISO, 2006). Para o protótipo a interface utilizada foi o Monitor Serial, uma interface gráfica integrada ao Arduino IDE que facilita o controle e comunicação com o microcontrolador. Esta pode ser acessada com um clique na parte superior direita do software.

Para configurar os parâmetros, simular consumo diário, gerar algoritmos de gerenciamento pelo lado da demanda, o usuário utiliza a interface do aplicativo para configurar como desejar. O código utilizado no protótipo se encontra no Apêndice.

Resultados e discussões

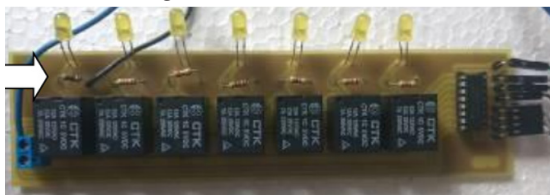
Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos de desempenho do protótipo e de cada módulo a partir do código desenvolvido pelos autores. O código utilizado para simular e encontrar estes resultados foi feito em Linguagem C no próprio Arduino IDE, e teve como objetivo testar o funcionamento básico do protótipo e avaliar a compatibilidade dos equipamentos utilizados. Para isso foram impressas as placas de circuito impresso do módulo de consumo e de controle da geração. Foram utilizadas 8 portas analógicas como entrada para medir tensão e corrente e 10 portas digitais para controlar os relés do módulo de consumo e de geração com uma taxa de comunicação do Arduino com o monitor serial configurada para 9600 bps.

Os comandos disponíveis para configuração durante o código eram: Números de '1' a '7' – liga desliga equipamentos do módulo de consumo; 'E' – Ativa/Desativa o fornecimento de energia eólica; 'S' – Ativa/Desativa o fornecimento de energia solar; 'R' – Ativa/Desativa o forne-

cimento de energia da rede; 'D' – Comando de debug com o intuito de identificar problemas no código; 'G' – Dá informações de geração, informando tensões, correntes e estados de cada fonte; 'C' – Dá informações do consumo e da energia entregue; 'I' – Da informações dos estados e das cargas instaladas.

A automação no protótipo do Módulo de consumo (Figura 5) funcionou como esperado, porém o microcontrolador não conseguia fornecer potência o suficiente para manter todos os relés do módulo de consumo ativos. Alguns dos LEDs utilizados não suportaram a corrente do circuito sozinhas. Para solucionar isso futuramente, pode-se adicionar um resistor em série com o LED para reduzir a corrente considerando o seu consumo no cálculo de consumo. Apesar disso, foi possível identificar o consumo de energia funcionando sem mais problemas, com exceção da resistência de 27Ω utilizado por conta de uma corrente elevada que acabou danificando a resistência após alguns testes.

Figura 5: Módulo de Consumo.



Fonte: Autoria própria (2020).

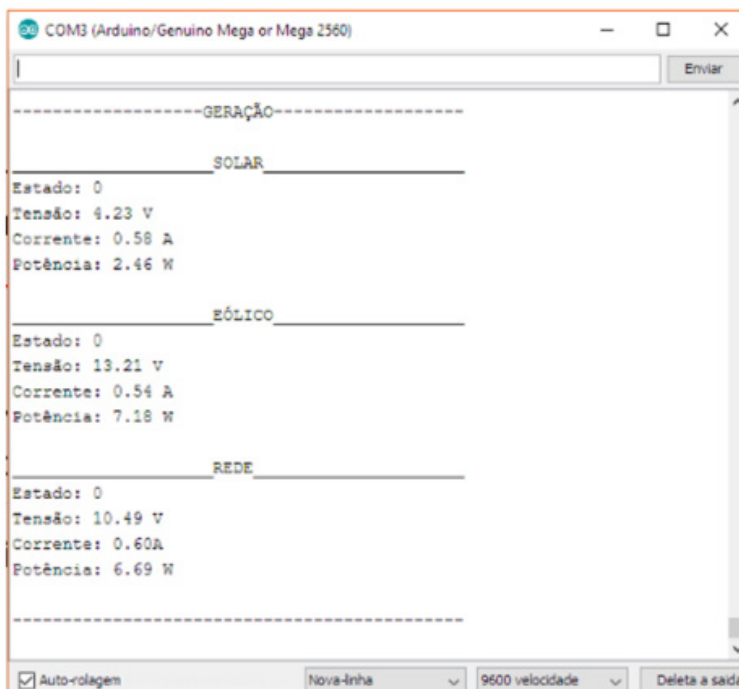
O módulo de Geração (Figura 6) funcionou como o projetado, e todos os módulos foram capazes de entregar a potência esperada. É aconselhável, em melhoramentos futuros, que sejam utilizadas mais fontes de energia renováveis ou fontes com maior potência para poder trabalhar de forma mais independente da rede. A avaliação deste módulo foi feita a partir do comando 'G' no monitor serial, e teve a tensão conferida por um multímetro e corrente através da Lei de Ohm. A resposta na IHM pode ser vista na figura 7.

Figura 6: Módulo de Geração.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7: Resposta ao Comando de Geração.



A tensão entregue ao consumo foi estável quando a tensão das fontes estavam a, no mínimo, 7 V, o requisitado pelo dispositivo. Como pode

ser visto na figura 8. O módulo de medições funcionou fazendo 60 medidas por segundo, e obtendo a média da soma para calcular a potência a cada segundo e calcular o consumo em Ws. As medidas de tensão funcionaram de forma esperada. Contudo os sensores de corrente utilizados não atingiram as expectativas devido a junção de baixa sensibilidade do sensor e da resolução das portas analógicas do Arduino para os valores de correntes utilizadas. Ainda assim, foi possível verificar que a medição de consumo está adequada considerando a corrente medida. Isso foi verificado a partir do comando 'C' no monitor serial, que equivale a exibição dos dados de consumo.

Figura 8: Análise do Consumo.

-----CONSUMO-----	
Tempo Medindo	0:0:44
Numero de Medidas:	2640
Periodo:	1
Frequencia:	60
Voltagem Instantânea:	5.44 V
Corrente Instantânea:	0.64 A
Potência Instantânea:	3.50 W
Potência Consumida:	71.26 Ws
	0.02 Wh
	0.07 kWh
	0.00 kWh
-----CONSUMO-----	
Tempo Medindo	0:0:57
Numero de Medidas:	3420
Periodo:	1
Frequencia:	60
Voltagem Instantânea:	5.50 V
Corrente Instantânea:	0.63 A
Potência Instantânea:	3.49 W
Potência Consumida:	116.86 Ws
	0.03 Wh
	0.12 kWh
	0.00 kWh

Auto-rolagem

Fonte: Autoria própria (2020).

Conclusões

Neste trabalho, foi projetado um sistema onde se podia simular um ambiente de consumo de energia apto a propiciar diversas técnicas e conhecimento da área da engenharia elétrica, envolvendo Sistemas Híbridos, Gestão pelo lado da Demanda e com preparações para desenvolvimento de *Smart Grids*. Além do projeto, a construção do protótipo foi essencial para constatar que o sistema pode ser funcional, desde que sejam feitas as adaptações necessárias. Verificou-se que, de modo geral, o protótipo teve um bom desempenho e atingiu as expectativas de funcionamento do projeto, apresentando problemas pontuais apenas em relação a utilização de equipamentos mais adequados no que se refere a sensibilidade e adequação à maiores sistemas. Dentre as dificuldades encontradas para a realização do trabalho, destaca-se a limitação do protótipo operar apenas em corrente contínua, devido a utilização de sinais luminosos de status de tamanho reduzido e baixo consumo, o que limitou o projeto aos LEDs disponíveis. A sensibilidade do sensor foi outra questão que abriu espaço para possíveis erros no sistema de medições para a tensão utilizada à qual o sistema foi projetado. *Códigos e diagramas de Circuito:*

<https://github.com/vitorsilva-eng/BancadaGerenciamentoInteligente-DeEnergia>

Referências

ANEEL. REN2012482: **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**, DE 17 DE ABRIL DE 2012. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

CRESESB, **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Edição Especial ed., P. -.PRODEEM, Ed., Rio de Janeiro, 2004.

MABUCHI MOTORS CO. LTD. **Japão. Folha de dados do motor FK-180SH.** Disponível em: http://www.amk.sk/obr/mabuchi/fk_180sh.pdf . Acesso em: 10 set. 2017.

ALLEGRO MICROSYSTEMS INC. **Datasheet ACS712.** Disponível em: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-datasheet.ashx> Acesso em: 08 ago. 2017.

JOHNSON ELETRIC (Org.). **Industry DC Motors.** Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/33888/WTE/1N4007.html> Acesso em: 11 set. 2017.

SPARK FUN ELECTRONICS INC. **Datasheet LM7805.** Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>. Acesso em 11 Set. 2017.

BRISTOL WATCH. **Datasheet ULN2003.** Disponível em: <http://www.bristolwatch.com/ele/uln2003a.htm> Acesso em 02/09/2017.

Sistema térmico para análise de modelagem e controle

*Acbal Rucas Andrade Achy
Camilla de Almeida Araújo*

Introdução

Nas instituições de ensino superior, além da assimilação de conhecimentos básicos, é necessário desenvolver habilidades imprescindíveis ao ingresso no mercado de trabalho. Essas, dependem, em grande parte, da capacidade de aliar conhecimentos teóricos e práticos.

Os métodos tradicionais de ensino, presentes na maioria dos cursos de graduação em engenharia, têm se mostrado pouco eficientes em estimular o aluno a aprender. Além disso, práticas pedagógicas fundamentadas em processos repetitivos, expositivos e de memorização corroboram para o agravamento dessa situação (ONGARATTO; SARKIS; RECH, 2012). Assim, a utilização de protótipos, ou simplesmente kits didáticos, mostram-se recomendáveis para fomentar o interesse do aluno pelos conteúdos abordados.

Segundo Paines (2014), os *kits* são alternativas para introduzir e aprender sobre novas tecnologias. Além disso, é um excelente método de potencializar a assimilação de conteúdos através da combinação entre teoria e prática. Apesar dos benefícios provenientes da utilização dos *kits*, há uma série de limitações que dificultam a implantação, tais como:

- Custo – grande parte dos kits disponíveis no mercado são fabricados fora do país e demandam um considerável investimento financeiro;
- Manutenção – os protótipos necessitam de manutenções constantes e, às vezes, por falta de informações suficientes devem ser

transferidos ao fabricante;

- Portabilidade – nem sempre os kits são portáteis e podem ser deslocados com facilidade.

Diante de tais limitações, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver e implementar um *kit* didático portátil e de fácil manutenção para estudo de modelagem e técnicas de controle em sistemas térmicos de aquecimento. Para tal, serão utilizados, dentre outras coisas, a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino® e o software Matlab®.

De forma geral, o *kit* envolverá a modelagem e controle de temperatura de uma barra metálica, utilizando o controle proporcional, proporcional-integrativo e o proporcional-integral-derivativo como técnicas de sistemas de controle. O interesse em validar o *kit* didático desenvolvido com esta técnica de controlador clássico reside no fato delas estarem presentes em mais de 90% dos controladores típicos de plantas industriais.

Materiais e métodos

Visando obter embasamento suficiente para o desenvolvimento do *kit* didático torna-se necessário compreender alguns conceitos básicos, que serão abordados ao longo desta seção.

Atuadores

De acordo com Thomazini e Albuquerque (2011), atuadores são dispositivos que recebem sinais de um controlador e modificam a variável controlada de um sistema. Um dos exemplos de atuadores são os relés, dispositivos de manobra muito utilizados para acionar circuitos elétricos e equipamentos. Os relés de estado sólido (RES), por exemplo, são dispositivos bastante utilizados no processo de chaveamento de cargas indutivas e resistivas.

Em situações nas quais se deseja fazer controle de cargas de potências maiores, o relé, como driver de potência, é uma solução de engenharia viável, pois este dispositivo tem a capacidade de fornecer as tensões e correntes necessárias aos atuadores.

Sensores e condicionamento de sinais

Sensores são componentes sensíveis a alguma forma de energia e que fornecem informações sobre uma grandeza física a ser mensurada. Apesar da enorme variedade existente, é possível subdividi-los basicamente em duas categorias: analógicos e digitais. Estes últimos, fornecem um sinal de saída na forma de pulsos binários (0 ou 1) (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). Os sensores analógicos, no entanto, fornecem uma saída analógica, isto é, mesmo limitado em uma certa faixa o sinal pode assumir infinitos valores intermediários (PATSKO, 2006).

Em geral, os sensores produzem sinais de baixa amplitude e com uma alta relação de sinal/ruído, fazendo com que sua saída oscile muito em torno da medida realizada. Tal situação, por sua vez, ratifica a necessidade de se estabelecer um procedimento capaz de adequar o sinal à entrada de um sistema de processamento de dados, isto é, um circuito de condicionamento.

O circuito de condicionamento de sinal pode realizar diversas funções, entre as quais estão: filtragem, amplificação e multiplexação (BELFORT, 2007). Assim, na escolha de uma ou mais funções é possível obter melhorias tanto no que se refere a desempenho quanto em relação à exatidão dos dados obtidos pelos sensores.

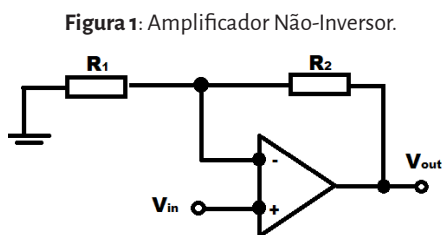
Um dos elementos bastante comuns no projeto de circuitos condicionadores é o amplificador operacional (AmpOp). Este é um componente que realiza operações especiais de processamento de sinais e que apresenta pelo menos a seguinte pinagem típica:

- V_+ e V_- , utilizados para alimentação, em geral simétrica, do amplificador;
- Duas entradas de sinais, sendo uma inversora e outra não inversora;
- Uma saída (V_0), cujo valor é múltiplo da diferença entre as duas entradas. Matematicamente: $V_0 = A[V_+ - V_-]$, onde A corresponde ao ganho de tensão do amplificador, ou seja, o fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada resultando na saída do dispositivo. Assim, tem-se:

$$A = \frac{V_0}{V_{in}}. \quad (1)$$

- Dois terminais para o balanceamento interno do amplificador, pois há uma diferença de tensão entre transistores, chamada tensão *offset*. Devido a esta, a saída de um amplificador pode ser diferente de zero mesmo quando ambas as entradas estão aterradas.

Uma das topologias mais empregadas na amplificação de sinais, cujo ganho transcende uma unidade, é o amplificador não-inversor (Figura 1). Neste, o sinal de saída não está defasado em relação ao sinal de entrada.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para um amplificador não-inversor a tensão de saída é calculada por:

$$V_0 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_{in}. \quad (2)$$

Filtros analógicos de sinais

Ruídos são perturbações inconvenientes somadas ao sinal de estudo. Um modo de lidar com esse problema é através da utilização de filtros, circuitos capazes de permitir a passagem de sinais de certas faixas de frequência e, ao mesmo tempo, atenuar a passagem de outros.

A tipificação de um filtro é feita através de sua função de transferência $H(s)$, ou seja, o quociente entre as transformadas de Laplace da saída, $V_s(s)$, e da entrada, $V_e(s)$. (NILSSON; RIEDEL, 2009). De maneira matemática, expressa-se por:

$$H(s) = \frac{V_s(s)}{V_e(s)}. \quad (3)$$

As regiões de passagem e rejeição, por sua vez, serão determinadas pelo cálculo da frequência de corte (ω_c). Esta, é definida como sendo o valor em que a amplitude da função de transferência é equivalente a $\frac{1}{\sqrt{2}} H_{MAX}$, onde H_{MAX} refere-se a amplitude máxima.

Segundo Dorf e Svodoba (2012), em um filtro ideal a frequência de corte faz com que o sinal seja dividido perfeitamente entre a banda de passagem e a de atenuação. Na prática, os filtros na saída de um filtro real há resíduos de sinais da faixa de rejeição.

Os filtros podem ainda ser subdivididos de acordo com o tipo do circuito de seleção de frequências, isto é, idealmente: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita-faixa. Assim, eles permitem a passagem abaixo, acima, dentro ou fora da região delimitada pelas ω_c .

Filtro Sallen-Key

Sallen-Key (Figura 2) é uma topologia utilizada para implementação de filtros ativos de segunda ordem. Define-se por filtros ativos aque-

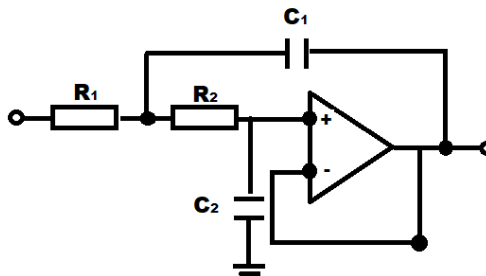
les que são constituídos de elementos passivos, tais como resistores e capacitores, associados a componentes ativos (AmpOps, por exemplo).

O termo segunda ordem, por sua vez, é utilizado para designar filtros cuja função de transferência possui denominador composto por polinômio de grau 2. Segundo Dorf e Svodoba (2012), esse tipo de filtro é importante, pois constitui uma boa aproximação dos filtros ideais.

A frequência de corte do filtro abaixo é dada por:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (4)$$

Figura 2: Filtro sellen-key passa-baixa.



Fonte: Autoria própria (2020).

Plataforma de prototipagem Arduino®

Arduino® é uma plataforma de prototipagem eletrônica constituída de uma placa com um microcontrolador e uma interface integrada de desenvolvimento com uma linguagem baseada em C/C++ (MCROBERTS, 2011). Alguns dos pinos das placas Arduino® apresentam funções específicas, entre as quais está a *pulse with modulation* (PWM).

PWM é uma técnica usada na produção de sinais analógicos a partir de um ambiente digital. É possível variar o valor médio de uma onda qua-

drada através do controle do tempo em que o sinal fica em nível lógico alto, isto é, o *duty cycle* (varia de 0% a 100%). Assim, a tensão de saída ($V_{saída}$) pode ser escrita em função da de entrada ($V_{entrada}$) como vista em:

$$V_{saída} = (duty\ cylce)V_{entrada}. \quad (5)$$

Portas ADC do Arduino®

As portas analógicas (ADC), presentes no Arduino®, são pinos de interfaceamento utilizados para receber dados provenientes de grandezas analógicas. O microcontrolador presente na placa, no entanto, trabalha internamente com dados digitais e, portanto, cria-se a necessidade de uma etapa que adeque o sinal de entrada ao ambiente de processamento da placa.

A técnica utilizada pelo Arduino® para a leitura de um sinal analógico é a conversão analógica digital (A/D), na qual um sinal contínuo no tempo é discretizado dentro de um número finito de valores. A quantificação de um sinal analógico, por sua vez, é feita de acordo com a resolução do conversor:

$$resolução = \frac{V_{ref}}{2^n - 1}, \quad (6)$$

onde V_{ref} e n correspondem a tensão de referência e ao número de bits do conversor.

Segundo McRoberts (2011), para um Arduino® o número de bits do conversor é 10 e a tensão de referência é 5V. Dessa forma, substituindo os valores em (5) tem-se que a resolução equivale a $4,88mV$. De maneira mais específica, “o pino analógico pode ler voltagens, entre 0 e 5 volts, usando valores inteiros entre 0 (0V) e 1.023 (5V)” (MCROBERTS, 2011, p.

76). Nesse contexto, dado um sinal de entrada analógico, V_e , o valor binário retornado pela conversão será o inteiro mais próximo da divisão $\frac{V_e}{\text{resolução}}$.

Controle de sistemas

Controlar um processo significa exercer algum tipo de atuação sobre o mesmo de tal forma que ele opere dentro de limites desejáveis. O controle pode ser feito de forma manual (malha aberta) através da intervenção humana, por exemplo, ou automática (malha fechada).

O controle em malha aberta baseia-se na aplicação de um sinal pré-determinado à planta e, assim, espera-se que ao final do processo a variável controlada apresente um dado comportamento. No que se diz respeito ao controle em malha fechada, caso haja um desvio entre a saída da planta e um determinado valor de referência o controlador gera um sinal de entrada a fim de atenuar ou eliminar a discrepância.

A utilização do controle em malha fechada permite que a variável de um processo esteja dentro de uma faixa operacional ótima, mesmo na presença de fatores externos e não-linearidades que tentam desviá-la desta condição.

Neste contexto, os sistemas com atrasos de transporte são bastante comuns em diversas aplicações de controle. Define-se atraso de transporte como sendo o intervalo de tempo para que uma excitação na entrada do sistema seja efetivamente manifestada na saída. Estes atrasos podem ser provocados por diversos fatores, tais como deslocamento de energia, tempo de processamento, dispositivos presentes no conjunto e pela própria dinâmica do processo.

Modelagem

Um dos passos mais importantes no projeto de controle é a obtenção do modelo da dinâmica do processo, uma abstração matemática utilizada para aproximar um processo real. Uma das maneiras de se obter um modelo é através da identificação do processo, isto é, a construção baseia-se em dados experimentais observados na planta. Segundo Campos e Teixeira (2006), esses modelos são tipificados como “caixa preta”, pois só se está interessado nas relações entre as entradas e as saídas do sistema e não nos seus mecanismos internos.

A vantagem do método de identificação do processo é que este é rápido e prático, além de exigir pouco ou nenhum conhecimento prévio do processo. Entretanto, uma das desvantagens apresentadas se refere ao fato de que o modelo, assim obtido, tem uma validade apenas em torno do ponto de operação do sistema.

Desenvolvimento

Estrutura Mecânica

O projeto e o desenvolvimento da estrutura física da planta foram necessários a fim de alocar, adequadamente, o relé de estado sólido, o circuito de condicionamento de sinal e a barra. Na fase inicial das atividades, optou-se como estrutura de acomodação uma placa de mármore, pela capacidade de isolar e suportar as temperaturas de operação do sistema.

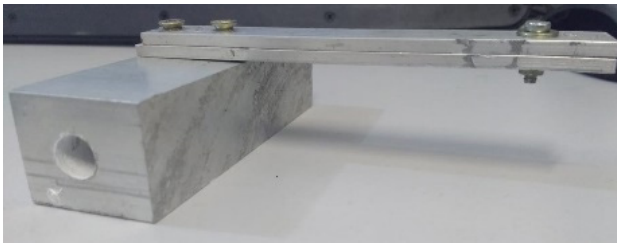
Plataforma de aquecimento

O objeto utilizado para aquecimento, e posterior controle de temperatura, foi uma barra de alumínio com aproximadamente 30,00 mm de largura, 25,00 mm de altura e 100,00 mm de comprimento. Foi feito um furo

central de 6,40 mm de diâmetro e 90,00 mm de profundidade a fim de que nele pudesse ser introduzido um resistor de aquecimento de 220 V e 150 W.

Compõem ainda a estrutura de aquecimento duas placas de alumínio. Ambas foram sobrepostas e conectadas a barra com o auxílio de dois parafusos. Além disso, produziu-se em um dos extremos do comprimento das duas placas uma cavidade para alocação de um sensor de temperatura (Figura 3).

Figura 3: Vista lateral da estrutura de aquecimento.



Fonte: Autoria própria (2020).

Circuito eletrônico

Sensor de temperatura

A determinação da temperatura da barra aquecida é feita através de um sensor LM-35 (figura 4), acomodado na extremidade livre entre as duas placas. O LM-35 fornece um sinal de tensão analógico proporcional à temperatura, 10mV para cada °C. Ele é capaz, ainda, de operar em uma escala de -55°C até 150°C.

Figura 4: Sensor de temperatura LM35.



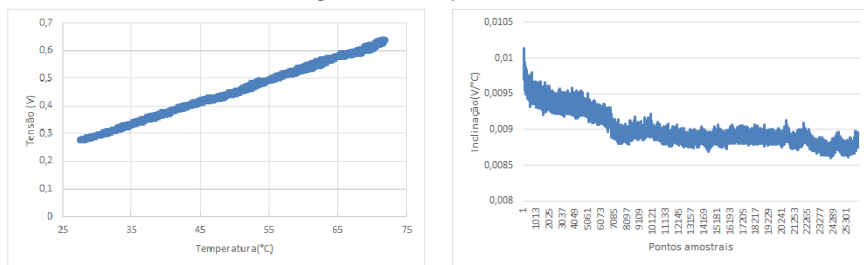
Fonte: Edwin Robotics (2019)

Calibração do sensor LM-35

Visando calibrar o sensor LM-35, utilizou-se um termopar para comparar as medições. Assim, a planta foi aquecida de 27,5°C a 71,75°C e cerca de 26.000 pontos amostrais foram obtidos. A saída do sensor, em volts, em função da temperatura detectada pelo termopar, em °C, está apresentada no gráfico de dispersão da Figura 5 (a).

Ao calcular a inclinação da reta para cada ponto amostral é possível plotar um novo gráfico, conforme mostra a Figura 5 (b). Posteriormente, ao obter a média destes valores conclui-se que o sensor LM-35 apresenta uma variação aproximada de 9mV/C. Por fim, ao comparar o valor obtido a partir da calibração, 9mV/C, com o fornecido pelo fabricante através da folha de dados do componente, 10mV/C, observa-se que o primeiro apresenta um erro médio de 1mV/C.

Figura 5: Calibração do sensor.



a) Gráfico da tensão de saída do LM-35 em função da temperatura detectada pelo termopar.

b) Gráfico de dispersão para inclinação calculada em termos de cada ponto experimental.

Fonte: Autoria própria (2019).

Circuito de condicionamento de sinal

O circuito de condicionamento do sinal proveniente do sensor é composto por duas etapas: amplificação e filtragem. Para o processo de

amplificação é utilizada a topologia não-inversora. Os valores dos resistores, por sua vez, são dimensionados de tal forma que o ganho do AmpOp seja equivalente ao resultado da divisão entre V_s e V_e , ou seja:

- V_s : corresponde a tensão de saída máxima admissível após o processo de amplificação, ou seja, a amplitude de leitura de uma porta analógica do Arduino® (5V);
- V_e : equivale ao máximo de tensão que o sensor 01 pode fornecer ($10\text{mV}^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot 150^{\circ}\text{C} = 1500\text{mV}$);
- Matematicamente, tem-se: $A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{5}{1500 \times 10^{-3}} = 3,33$.

Na prática, no entanto, o ganho utilizado foi um pouco maior devido aos valores das resistências escolhidas. Uma vez que a faixa de operação da planta compreende intervalos de temperatura relativamente baixas, o aumento do ganho não compromete o funcionamento do sistema. Assim, com base na equação (3), obtém-se o ganho do circuito.

$$A = 1 + \frac{5600}{2200} = 3,54.$$

A segunda parte do circuito de condicionamento corresponde ao processo de filtragem. Assim, produziu-se um filtro *sallen-key* passa-baixa, com frequência de corte igual a 1 Hz (escolhida de modo a não interferir na dinâmica da planta e filtrar os ruídos de alta frequência). Portanto, para dimensionamento dos resistores e capacitores envolvidos na construção do filtro, baseou-se em:

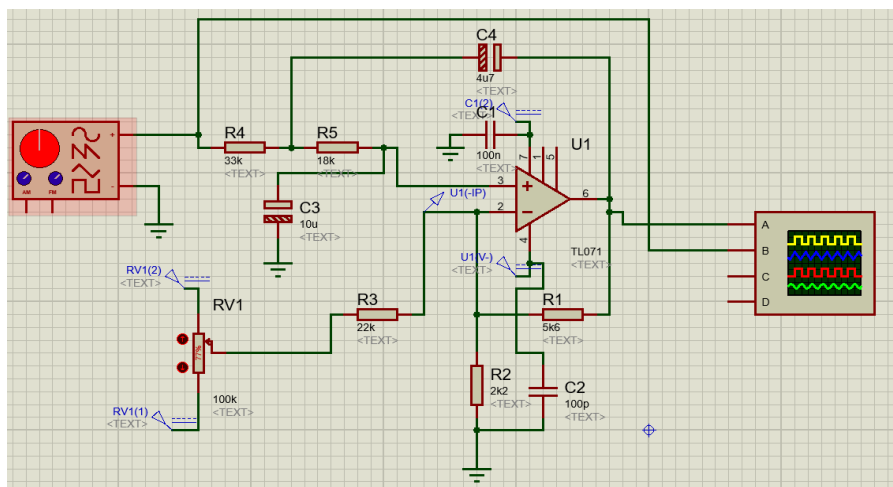
$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (7)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{18k * 33k * 4\mu 7 * 10\mu}} = 1Hz. \quad (8)$$

Na Figura 6 apresenta-se o diagrama do circuito projetado e simulado na versão educacional do software ISIS Proteus®. Para as duas etapas do circuito de condicionamento de sinal é utilizado o amplificador TLO81. Este, pertence a uma família de AmpOp com tecnologia composta por transistor de efeito de campo (JFET). Além disso, o TLO81 apresenta um baixo consumo de energia, alta impedância de entrada e proteção contra curto-circuito na saída.

Na prática, o circuito foi implementado em uma placa de circuito impresso perfurada. Além disso, para alimentação do amplificador e do sensor montou-se uma fonte simétrica com saída estabilizada em ± 12 volts.

Figura 6: Circuito de condicionamento de sinal.



Fonte: Autoria própria (2019).

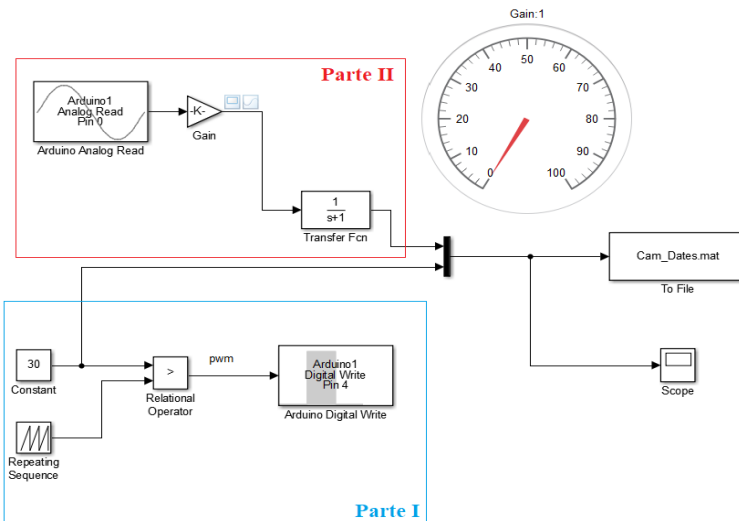
Sistema de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados utilizada para o desenvolvimento do projeto foi um Arduino® MEGA 2560 REV3. Este possui as seguintes especificações técnicas: microcontrolador ATmega2560, tensão operacional de 5V, 16 pinos de entrada analógica, 54 pinos digitais (dos quais 15 fornecem saída PWM) e resolução de 10 bits.

Interface homem máquina - IHM

O processamento das variáveis de entrada, o acionamento da carga e a análise do fluxo de informações são feitos através de duas ferramentas que trabalham de forma conjunta: o Matlab® e o Simulink®. Com base na Figura 7, observa-se que é possível dividir o diagrama em duas partes fundamentais:

Figura 7: Diagrama em blocos (Simulink®).

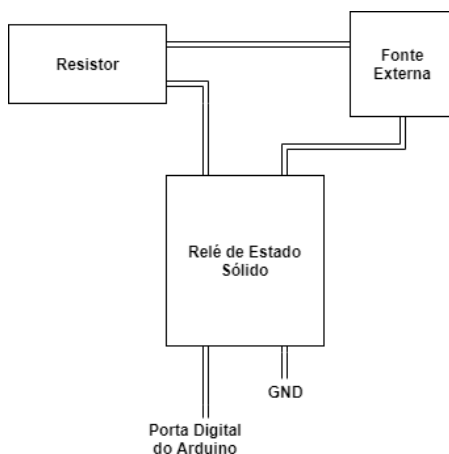


Fonte: Autoria própria (2019).

Parte I

Esta seção é responsável pela variação da temperatura da estrutura de aquecimento. Entre o Arduino® e a estrutura a ser aquecida há um relé de estado sólido cujo circuito de saída, inicialmente em corte, é composto por um resistor e uma fonte externa, (Figura 8).

Figura 8: Representação do relé e do seu circuito de saída.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Neste contexto, o acionamento do relé é feito através de um sinal PWM produzido pelos blocos destacados na parte I do diagrama. Este sinal é fornecido como saída em uma porta digital do Arduino® e então enviado para o relé. Assim, a cada ciclo ativo do sinal o circuito do relé é fechado e uma corrente passa a circular no resistor. Este, por sua vez, é alocado dentro da barra de alumínio e, portanto, quando em operação dissipa calor e aquece o material.

O relé utilizado no desenvolvimento do projeto foi um Relé de Estado Sólido SSR-40 DA Fotek (Figura 9). As especificações técnicas do dispositivo são: tensão de entrada/controle de 3-32 VDC, tensão de funcionamento de 24-380VAC, corrente máxima suportada de 40 A, tempo de chaveamento menor que 10ms e temperatura de operação entre -20 °C e 80 °C.

Figura 9: Relé de Estado Sólido SSR-40 DA Fotek.

Fonte: Autoria própria (2019).

Parte II

Esta seção é responsável por receber e exibir o sinal proveniente do circuito de condicionamento. De forma mais específica, a saída do sensor 01 após passar pelo processo de amplificação e filtragem é encaminhada para um pino analógico do Arduino®. Na placa, o sinal é processado e encaminhado para dois blocos personalizáveis do Simulink®:

- *Gain*: é responsável por manipular o sinal de tensão, de tal forma que o mesmo seja exibido como uma temperatura como são mostradas em:

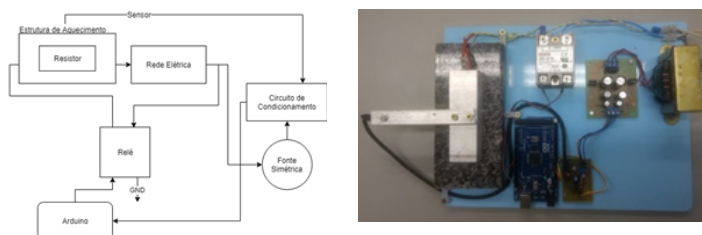
$$Temperatura = (sinal\ de\ tensão) \cdot \frac{resolução}{escala\ do\ sensor \cdot ganho} \quad (8)$$

$$Temperatura = (sinal\ de\ tensão) \cdot \frac{4,88 \times 10^{-3}}{9 \times 10^{-3} \cdot 3,54} \quad (9)$$

- Transfer F_{cn} : corresponde a um filtro de primeira ordem. Apesar do processo de filtragem verifica-se ainda uma certa quantidade de ruídos no sinal de tensão que é enviado para a placa. A provável fonte desses sinais indesejáveis é apontada como sendo o próprio circuito do protótipo.

Por fim, o sinal é exibido na forma de temperatura em um osciloscópio presente na biblioteca do Simulink®. Um diagrama esquemático completo do kit é apresentado na figura 10 (a). Além disso, a versão final do protótipo é esboçada na Figura 10 (b).

Figura 10: Kit didático.



Fonte: Autoria própria (2019).

Resultados e discussões

Modelagem

A primeira etapa para a modelagem da planta térmica consiste em definir sua região de trabalho. Assim, visando explorar a atuação do *kit* em temperaturas próximas às condições ambientais optou-se por uma variação de *duty cycle* do PWM do Arduino® de 20% a 25%.

De maneira mais específica, excitou-se a planta com um sinal de 20% do *duty cycle* do sinal PWM até a mesma estabilizar em uma determinada temperatura, cerca de 46,39°C. Logo após, modificou-se o degrau para 25% a fim de atingir um novo equilíbrio, em média 46,39°C.

Uma vez definida a região de operação, tornou-se possível esboçar a curva média de resposta da planta. Para isto, utilizou-se um algoritmo computacional, baseado no método dos mínimos quadrados, para obtenção de um modelo de segunda ordem com zero capaz de representar a dinâmica do processo. A resposta do sistema resultante da modelagem é da forma apresentada na equação 11, em que K é o ganho, a o zero e b e c os pólos do sistema.

$$H(s) = K \frac{s - a}{(s + b)(s + c)}. \quad (9)$$

Ao aplicar a transformada inversa de Laplace em (9) obtêm-se, no domínio do tempo:

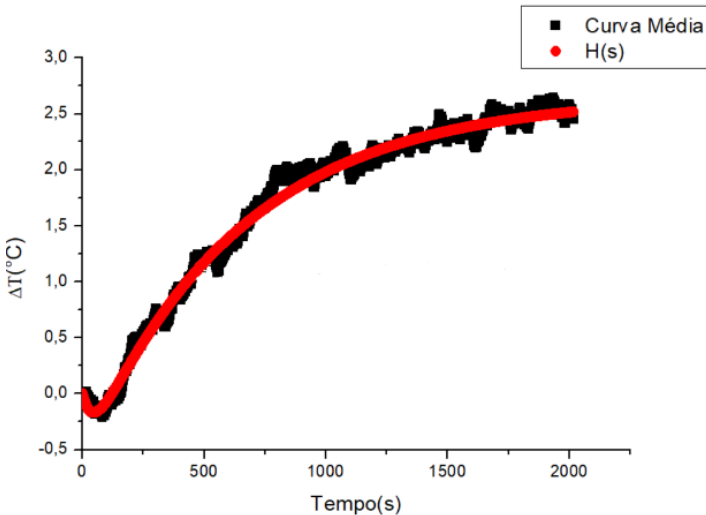
$$h(t) = a_1 e^{-bt} + a_2 e^{-ct}. \quad (10)$$

Em relação ao processamento dos dados, a função de transferência obtida é apresentada por:

$$H(s) = \frac{0,001774s + 1,941 \times 10^{-5}}{s^2 + 0,0248s + 3,66 \times 10^{-5}}. \quad (11)$$

Além disso, o esboço de $H(s)$ e da curva média de reação da planta, em função do tempo são apresentadas na Figura 11.

Figura 11: Gráfico da curva média e da resposta $H(s)$ do sistema para a região de operação.



Fonte: Autorial Própria (2019).

Ações básicas de controle

Uma vez concluída a identificação do sistema passa-se para a etapa do projeto de controle. Projetou-se, para efeito de comparação e análise

os controladores: proporcional (P), proporcional e integral (PI) e proporcional, integral e derivativo (PID).

Nas ações de controle, de uma forma geral, a variável controlada (medida na saída do processo) é frequentemente comparada com o *setpoint* e, assim, um erro (e) é calculado. Em função deste, um sinal de controle é gerado a fim de que o sistema elimine ou reduza o desvio.

Sintonia do controlador

A estabilidade e o formato da resposta da planta dependem da sintonia do controlador. Em outros termos, é imprescindível ajustar parâmetros específicos da malha de controle de modo que se obtenha um bom desempenho de acordo com os critérios pré-estabelecidos no projeto. Entre estes, o principal é a sua estabilidade.

Além da estabilidade do processo, as especificações básicas para o sistema a serem atendidas são: sistema com um sobressinal menor do que 20%, erro de posição zero para entrada do tipo degrau, tempo de resposta de 1/2 do tempo em malha aberta e não saturação do atuador. Estes critérios foram definidos pelo projetista do sistema levando em consideração a segurança do operador e a não danificação da planta em estudo.

O método de sintonia adotado neste trabalho baseia-se em um dos critérios mais conhecidos: o método heurístico de *Ziegler-Nichols* (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006). Segundo este, seja um processo modelado em malha aberta por uma função de transferência de primeira ordem juntamente com um parâmetro adicional. A função de transferência é dada por:

$$H(s) = e^{\theta s} \frac{K}{\tau s + 1} \quad (12)$$

Onde K , θ e τ correspondem a:

- Ganho (K): equivale ao quociente entre as variações da variável de controle (C) e da manipulada (M);
- Tempo morto (θ): corresponde ao tempo necessário para que o sistema comece a reagir a uma mudança na variável manipulada;
- Constante de tempo (τ): refere-se ao tempo, descontado o tempo morto, que a variável de controle necessita para atingir 63% da variação total até o novo regime permanente;

Neste contexto, é possível definir completamente os parâmetros do controlador PID através das relações mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols.

Controlador	K_P	T_I	T_D
P	$\tau/(K \times \theta)$	-	-
PI	$0,9\tau/(K \times \theta)$	$3,3 \times \theta$	-
PID	$1,2\tau/(K \times \theta)$	$2 \times \theta$	$0,5 \times \theta$

Fonte: Aatoria Própria (2019).

Aproximação do modelo

Visando aplicar o método de *Ziegler-Nichols* na sintonização da malha de controle da planta térmica aqui apresentada, por um modelo de primeira ordem com tempo morto aproximou-se a função de transferência a partir de:

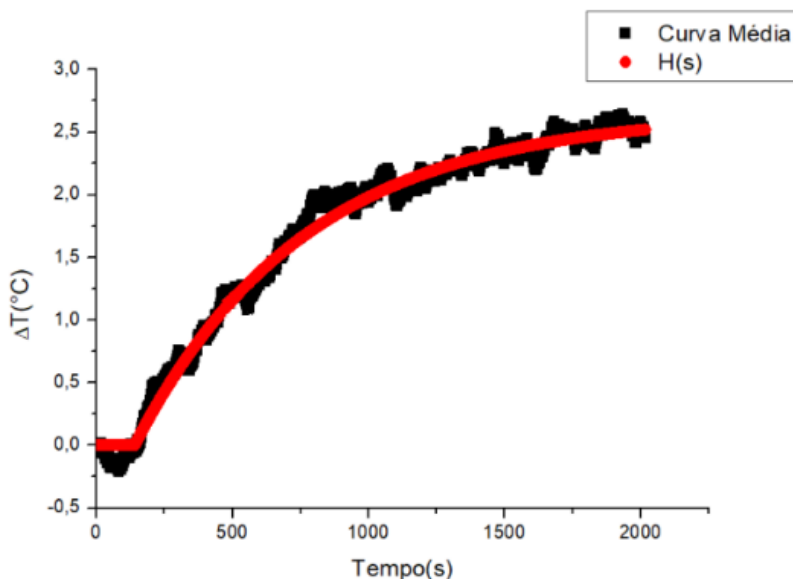
$$G(s) = e^{-140s} \frac{0,53}{625s + 1} \quad (13)$$

Para tal, utilizou-se um algoritmo computacional.

A resposta do sistema, com base no modelo descrito acima, é representada na Figura 12 juntamente com a curva média de reação. Com

base nos parâmetros extraídos da modelagem, torna-se possível reescrever a tabela 1 em termos de valores numéricos (Tabela 2). Vale ressaltar que na definição do parâmetro T_D do controlador PID foi utilizado 0,15, ao invés de 0,5. Essa mudança deveu-se ao fato de que, na simulação, o valor fornecido pelo método comprometeu a estabilidade do sistema.

Figura 12: Aproximação de primeira ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 2 - Sintonia pelo método de Ziegler-Nichols (valores).

Controlador	K_P	T_I	T_D
P	8,42	-	-
PI	7,57	466,20	-
PID	10,10	280,00	21,00

Fonte: Autoria Própria (2019).

Controladores aplicados na planta térmica

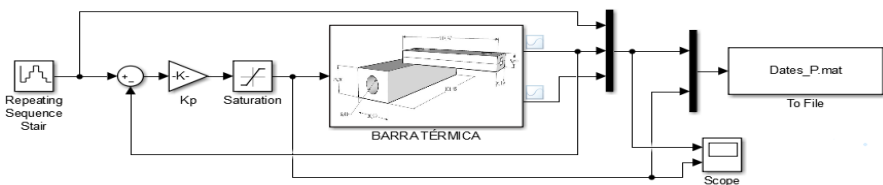
Controlador Proporcional (P)

Neste tipo de controlador o sinal de controle gerado, $u(t)$, apresenta uma relação de proporcionalidade com o erro calculado matematicamente por:

$$u(t) = K_p e(t). \quad (14)$$

Onde K_p refere-se a sensibilidade proporcional ou ganho e $e(t)$ a diferença entre o *setpoint* e a variável controlada. Assim, visando analisar a aplicação do controlador proporcional na planta térmica, construiu-se um diagrama em blocos no *simulink*, conforme a Figura 13.

Figura 13: Estrutura do controlador proporcional.

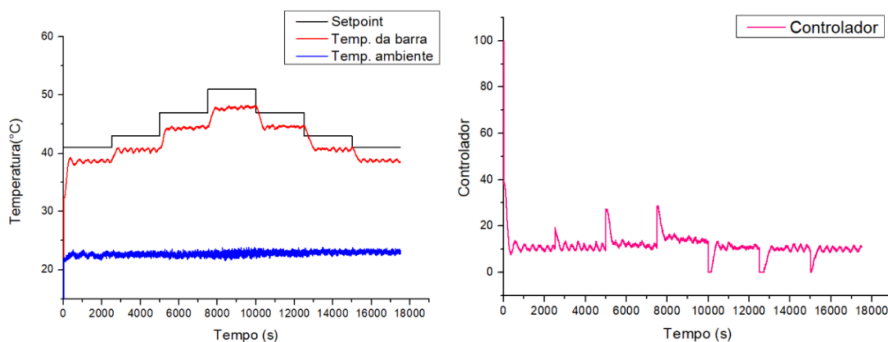


Fonte: Autoria própria (2019).

O resultado da simulação, que foi realizada para um degrau escalonado positivo e negativo, é mostrado abaixo. Nos gráficos, são apresentados além do *setpoint* e da temperatura controlada da barra o monitoramento da temperatura ambiente e o esforço do controlador.

Com base na Figura 14, observa-se que o controlador proporcional não é capaz de eliminar totalmente o desvio existente entre o *setpoint* e a temperatura controlada. Nesta situação, analisa-se que o esforço do controlador permanece aproximadamente inalterado.

Figura 14- Controlador proporcional e esforço do controlador P.



Fonte: Autoria própria (2019).

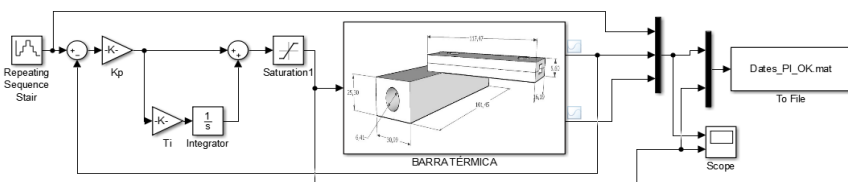
Controlador Proporcional e Integral (PI)

No controlador proporcional e integral clássico o sinal de controle gerado, $u(t)$, é proporcional ao erro e a integral do erro. Além disso, o parâmetro K_p também afeta o termo integral de acordo com:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_I} \int e(t) dt, \tag{15}$$

onde T_I corresponde ao ganho integral do controlador.

Figura 15 – Estrutura do controlador PI.

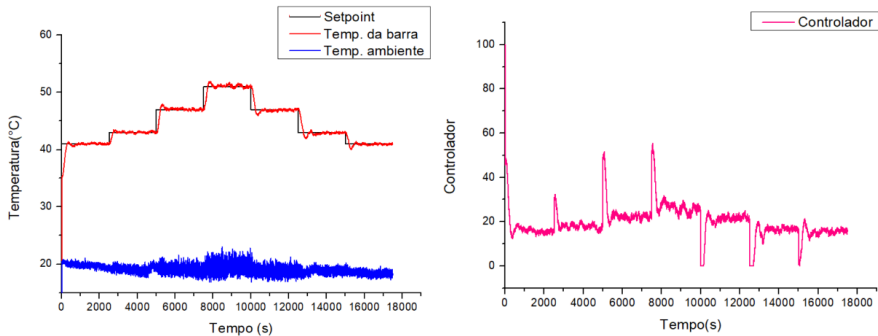


Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com as Figuras 15 e 16, observa-se que o controlador PI consegue eliminar quase que totalmente o erro em regime permanente entre o *setpoint* e a temperatura controlada da barra. Além disso, é pos-

sível verificar uma maior ação do controlador durante a mudança do *setpoint*. Isto, por sua vez, se deve ao fato de que o termo integral tende a saturar a saída do controlador a fim de eliminar o erro.

Figura 16- Controlador proporcional e integral e esforço do controlador PI.



Fonte:Autoria própria (2019).

Controlador Proporcional, Integral e Derivativo

No controlador proporcional, integral e derivativo (PID) paralelo clássico $u(t)$ é proporcional ao erro, a integral e a taxa de variação do mesmo. Além disso, o K_p afeta tanto o termo integral quanto o derivativo, como mostra em:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + K_p T_D \frac{de(t)}{dt} . \quad (16)$$

Onde T_D corresponde ao ganho derivativo do sistema. No domínio s , por sua vez, a função de transferência do controlador PID equivale a:

$$G(s) = K_p + \frac{K_p}{T_I s} + K_p T_D s . \quad (17)$$

No que se diz respeito a ação derivativa, observa-se que ela amplifica as componentes de alta frequência dos sinais devido a sensibilidade

de da derivada. Assim, na presença de ruídos o sistema sobrecarrega e o controle se torna altamente problemático. Uma estratégia utilizada em muitos processos é o uso de um filtro imediatamente antes da ação derivativa conforme:

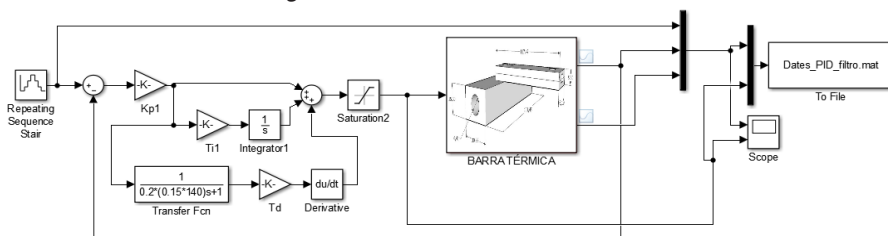
$$F(s) = \frac{1}{aT_D s + 1}, \quad (18)$$

onde a é um termo pequeno, em torno de $1/8$. Portanto, a equação (18) pode ser reescrita:

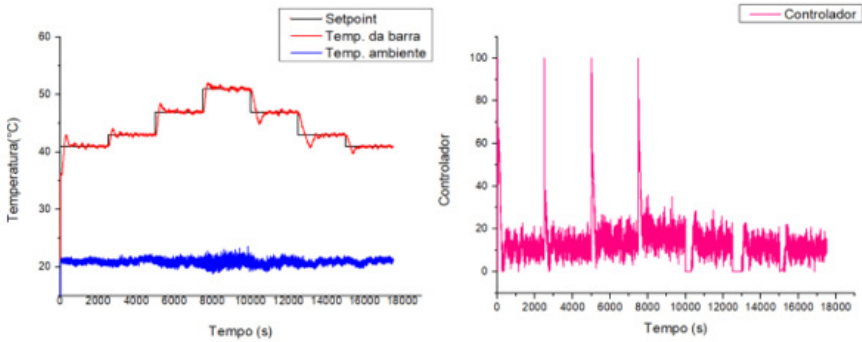
$$G(s) = K_p + \frac{K_p}{T_I s} + \frac{K_p T_D s}{a T_D s + 1}. \quad (19)$$

A estrutura do controlador PID, para $a = 0,2$, bem como o resultado da simulação estão apresentados abaixo. Com base na Figura 18, observa-se que o PID é mais ágil quando há variação no *setpoint*. Além disso, pela comparação entre as Figuras 16 e 18 é possível analisar que a ação derivativa empregada não foi suficiente estabilizar a variável controlada.

Figura 17 – Estrutura do controlador PID.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 18- Controlador proporcional, integral e derivativos e esforço do controlador PID.

Fonte: Autoria própria (2019).

Análise de desempenho

O desempenho de um controlador pode ser analisado através da capacidade que o mesmo possui em manter a variável controlada próxima ao valor de referência (ACHY, 2008). Os controladores desenvolvidos serão avaliados em malha fechada com base nos critérios: IAE, ITAE e a métrica utilizada em (GOODHART; BURNHAM; JAMES, 1991), IG. Assim, um controlador será ótimo quando os parâmetros do sistema amenizam esses índices.

A integral do módulo do erro (IAE), como o próprio nome sugere, é definida por:

$$IAE = \int |e(t)| dt, \quad (20)$$

em que $e(t)$ corresponde a diferença entre o *setpoint* e variável controlada, ao longo do tempo. De forma análoga, a integral do módulo do erro com ponderação no tempo (ITAE) equivale a:

$$ITAE = \int e(t) dt. \quad (21)$$

O índice IG, por sua vez, baseia-se no esforço de controle médio, ϵ_1 , na variância do sinal de controle, ϵ_2 , e na média do erro quadrático, ϵ_3 . Assim, tem-se, finalmente:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k), \quad (22)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u(k) - \epsilon_1)^2, \quad (23)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (r(k) - y(k))^2. \quad (24)$$

Portanto:

$$IG = \alpha_1 \epsilon_1 + \alpha_2 \epsilon_2 + \alpha_3 \epsilon_3, \quad (25)$$

onde u , r e y correspondem ao sinal de controle, à referência e a saída do sistema, respectivamente. Além disso, os termos α referem-se à ponderações para cada equação e são definidos com base no critério de importância escolhido pelo projetista. Os índices calculados para cada controlador estão resumidos na Tabela 3, juntamente com outros parâmetros:

- *Overshoot* – corresponde ao valor máximo alcançado pela curva de resposta em relação ao valor em regime permanente. É medida em termos de um desvio relativo percentual;
- Tempo de resposta (Tr) – equivale ao tempo gasto pelo sistema para ir de 0% a 100% do valor em regime permanente;
- Variância do sinal de controle (σ) – uma medida de dispersão que mostra quão distantes os valores estão da média.

Vale ressaltar, por sua vez, que os valores de α_1 , α_2 e α_3 são: 0,2, 0,3 e 0,5, respectivamente. Em outras palavras, optou-se por dar maior peso

ao cálculo do desvio.

Tabela 3 – Índices de desempenho.

Controlador	IAE	ITAE	<i>Overshoot</i> *	T_r (s)	σ	IG
P	332410	37103×10^3	0	328,2	19,2	11,8
PI	47167	51356×10^3	2	278,0	50,8	19,6
PID	75971	64938×10^3	5	196,6	55,7	19,7
Malha aberta	-	-	-	2640,0	-	-

*cálculo aproximado

Fonte: Autoria própria(2019).

Os resultados obtidos na aplicação dos controladores foram satisfatórios. Com base na Tabela 3 observa-se que o controlador proporcional-integral foi o que apresentou o melhor desempenho, nos índices IAE e ITAE. Além disso, verificou-se um sobressinal de apenas 2%.

O controlador PID, embora tenha se utilizado de um filtro na ação derivativa para evitar a ação muito agressiva do derivador devido a saída ruidosa do sistema, não foi suficiente para reduzir as oscilações em torno do *setpoint* quando comparado ao controlador PI. Entretanto, ainda assim, o PID apresentou o segundo melhor desempenho (IAE e ITAE), com um *overshoot* equivalente a 5% e um tempo de resposta menor que o do PI.

No que se diz respeito ao índice IG, observa-se que o controlador P forneceu o menor valor e isto se justifica pelo sinal de controle menos agressivo, porém não é aconselhável a sua utilização pois o mesmo não atingiu o objetivo de controle de rastrear o *setpoint*.

Conclusões

Considerando a importância da utilização de protótipos no processo de aprendizagem desenvolveu-se, neste trabalho, um *kit* para estudo

de modelagem e da aplicação de técnicas de controle. Assim, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre temas correlatos ao trabalho proposto, bem como a idealização e montagem do protótipo. Além disso, desenvolveu-se um circuito de condicionamento de sinal dos sensores e testes de verificação do funcionamento *kit*.

A modelagem do fenômeno em estudo baseou-se no método de identificação de processo, do tipo “caixa preta”, e a sintonia da malha de controle fundamentou-se no método heurístico de *Ziegler-Nichols*. Além disso, com base nos testes feitos em laboratório e no cálculo de índices de desempenho verificou-se que, para o estudo em questão, o controlador proporcional-integrativo paralelo clássico foi o que apresentou a melhor performance.

A implementação dos controladores e a modelagem feita teve o principal objetivo de realizar um estudo introdutório do *kit*, atentando-se apenas para a realização do estudo de casos e não na aplicação das melhores técnicas. Assim, busca-se estimular o estudante a implementar outros controladores, métodos de sintonia e modelagem.

Referências

ACHY, A. R. A. **Avaliação de Técnicas de Controle Aplicado a um Kit Didático Multivariável de Controle de Nível**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal da Bahia, 2008.

BELFORT, D. R. **Circuito de Condicionamento de Sinais Analógicos Programável para Sistemas Integrados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, 2007.

CAMPOS, M. C. M. M. d.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Blucher, 2006.

DORF, R. C.; SVODOBA, J. A. **Introdução aos circuitos elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

EDWIN ROBOTICS. Disponível em: <https://shop.edwinrobotics.com/sensors/196-lm35-temperature-sensor.html>. Acesso em: 11 de junho de 2019.

GOODHART, S.; BURNHAM, K.; JAMES, D. **A bilinear self-tuning controller for industrial heating plant**. In: IET. International Conference on Control 1991. Control'91. [S.l.], 1991.

MCRBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2011.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

OKAWA ELECTRIC DESIGN. 2019. Disponível em: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htmf>. Acesso em: 16 de junho de 2019.

ONGARATTO, R. S.; SARKIS, J. R.; RECH, R. Construção de uma torre de resfriamento de bancada para o ensino de operações unitárias. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 29, n. 2, p. 27–34, 2012.

PAINES, P. d. A. **Desenvolvimento de Kit Didático de Geração de Energia Solar**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

PATSKO, L. F. **Aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. Maxwell Bohr Instrumentação Eletrônica, p. 3–7, 2006.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.

WIKIPEDIA. 2019. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.

Desenvolvimento de sistema didático de automação e controle

Breno Prazeres Barbosa
Gildeberto de Souza Cardoso
Teófilo Paiva Guimarães Mendes

Introdução

O controle automático possui inúmeras aplicações, desde indústrias petroquímicas a sistemas de veículos espaciais. Em quaisquer operações industriais que envolvam controle de temperatura, pressão, vazão, entre outras, podem ser aplicadas técnicas de controle automático (OGATA e YANG, 2011). A vasta utilização de malhas de controle de processos se dá, essencialmente, pelos ganhos resultantes, seja em estabilidade, economia de matéria prima, segurança, etc. Portanto, há uma relação entre resultados econômicos e sintonia adequada dos sistemas de controle (GOMES, QUEIROZ, *et al.*, 2011). No entanto, nem todos os ambientes industriais possuem as malhas de controle operando de modo adequado. Segundo Gomes *et al.* (2011), em um grande número de situações, o repositório de conhecimentos teóricos não corresponde à sua utilização prática pelos operadores e engenheiros industriais, de modo que ainda aplicam-se procedimentos inapropriados de sintonia. Uma das possíveis motivações deste desvio está relacionada com o fato de a engenharia ser, antes do foco na componente científica, uma profissão prática, que exige sobretudo a absorção de conhecimento empírico, adquirido essencialmente em laboratório (FEISEL e ROSA, 2005).

Li (2018) ressalta que há dificuldade na formação de engenheiros devido à falta de práticas em ambientes reais, potencializada pela falta de

oportunidades de estágio. Para compensar tal problema, é fundamental a criação de novas ferramentas e tecnologias para ensino de engenharia.

A atividade laboratorial, desde que corretamente alinhada aos objetivos educacionais pretendidos na formação profissional propiciada pelo curso, é fundamental para o desenvolvimento de competências, como entender e utilizar modelos conceituais; coletar, analisar e interpretar dados; executar projetos sob demanda; aprender com falhas e erros; desenvolver a criatividade; comunicar, de forma oral e por escrito, os resultados e conclusões obtidos e trabalhar em equipe (FEISEL e PETERSON, 2002).

De acordo com Gomes *et al.* (2011), por vezes é necessário recorrer a alternativas ou atividades complementares às laboratoriais, visto que há entraves na sua utilização intensiva, relacionados, entre outros fatores, com custos elevados na aquisição de equipamentos.

Uma alternativa é a utilização de módulos educacionais de baixo custo, sejam eles desenvolvidos na forma de bancadas didáticas ou simulações em *softwares*. Os ambientes de aprendizagem simulados oferecem várias vantagens sobre os físicos, incluindo mais segurança, o que permite que os alunos pratiquem em seu próprio ritmo, em seu próprio horário e até o ponto de proficiência (ALFRED, NEYENS e GRAMOPADHYE, 2018). Segundo Britto, Toledo e Alayón (2018) podem ser adicionadas mais algumas vantagens dos laboratórios virtuais: boa relação custo/eficiência, ausência de limitação de espaço ou tempo, etc. Principalmente nos casos em que a instituição de ensino possua poucas (e não suficientes) plantas industriais reais, pode-se melhorar o ensino/aprendizagem prático de automação e controle através da experimentação com plantas industriais simuladas.

É fundamental que o ambiente simulado de estudos seja tão parecido com o real quanto possível. Neste sentido, Gomes *et al.* (2011) ressalta que é fundamental que os estudantes de engenharia tenham contato

com sistemas supervisórios, devido à sua utilização em quase todos os sistemas industriais. No entanto, as ferramentas mais comuns na indústria possuem custos associados que podem inviabilizar sua aquisição. Por este motivo, o supervisório do presente trabalho foi desenvolvido utilizando-se a ferramenta *InduSoft Web Studio 7.0*, visto que há disponibilidade de licença estudantil gratuita (INDUSOFT, 2019).

Portanto, propõe-se uma malha de controle didática constituída da seguinte forma:

- Planta de tanques acoplados simulada em Python, permitindo que sejam alterados parâmetros físicos, além de possibilitar a implementação futura de novos e mais complexos sistemas de controle;
- Sistema de controle PID embarcado em Arduino, possibilitando que uma futura alteração de planta simulada para planta real seja realizada com alterações em poucas linhas de código;
- Supervisório desenvolvido utilizando *InduSoft*, que permitirá a implementação de um controle parametrizável, de modo que o estudante poderá inserir as informações necessárias e realizar testes de controladores em diversos cenários. Também serão disponibilizados exemplos de projeto de controladores, incluindo os parâmetros, etapas do projeto e medidas de desempenho.

Materiais e métodos

Inicialmente, foi desenvolvido o algoritmo em Python para simulação da planta utilizando o método de Euler para aproximação da equação diferencial. Foi também utilizado um arquivo XML (*Extensible Markup Language*) de configuração, para alterações dos parâmetros físicos da planta, além da geração de um arquivo CSV (*Comma Separated Values*) para registro das medidas, a fim de facilitar análises numéricas e gráficas.

Optou-se pela comunicação serial entre Arduino e simulador, utilizando uma das portas auxiliares disponíveis no Arduino Mega. Esta porta é baseada no controle de acesso mestre-escravo, de forma que o programa em Python envia as medidas de nível apenas quando solicitado pelo Arduino, sendo o envio do valor de tensão aplicada sobre a bomba realizado sempre que o Arduino desejar.

Validada a comunicação, foi realizada a implementação de um controlador PID no Arduino, tendo a ação de controle realizada a partir de interrupções no sistema em um período pré-definido. Foram realizados testes preliminares do funcionamento do PID a partir da comunicação com a planta simulada.

O InduSoft permite a comunicação via protocolo Modbus serial RS-232, portanto, foi necessário buscar uma biblioteca para Arduino que permitisse tal comunicação. Foi definido que a atualização dos registradores do Arduino seria realizada utilizando interrupções com período parametrizável.

O passo seguinte foi a definição das telas do supervisor, sempre tendo em vista um balanço entre semelhança com supervisórios industriais, com a presença de alarmes com reconhecimento, e a abordagem didática do projeto, com a presença de exemplos e uma tela específica para modelagem matemática.

Finalizados os componentes do sistema Arduino, supervisor e simulador em Python, foram realizados testes de integração dessas partes do sistema. Nesta etapa os períodos das interrupções, bem como *delays* definidos para evitar conflitos, foram ajustados a fim de melhorar o desempenho do algoritmo.

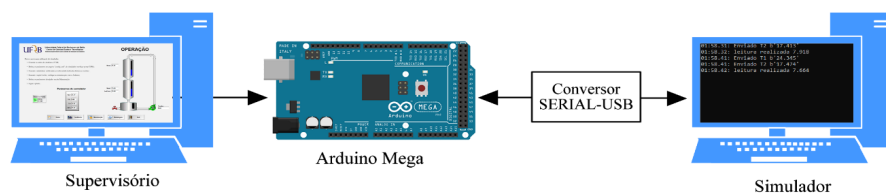
Estando todo o sistema funcionando adequadamente em conjunto, foram realizados projetos de controladores PID para os dois tanques, objetivando servir de exemplos no supervisor para fins didáticos. Nesta etapa foi utilizado o Matlab para solução da EDO (Equação Diferencial Or-

dinária) do sistema, buscando a validação do projeto do PID, bem como do próprio sistema operando em conjunto.

Ferramenta didática

A ferramenta didática proposta consiste em uma malha de controle didática contendo sistema de automação real, com supervisor e controle PID, e uma planta simulada de tanques acoplados. Um diagrama da ferramenta está representado na Figura 1. Em seguida serão apresentados os componentes do sistema.

Figura 1 - Diagrama da solução proposta.



Fonte: Autoria própria (2020).

Simulador

O simulador foi desenvolvido utilizando a linguagem Python, por ser de código aberto, robusta e permitir que implementações de melhorias sejam feitas de modo pouco custoso. Para facilitar a utilização do *software*, foi gerado um executável para sistemas operacionais Windows, utilizando o pacote *cx-Freeze* (PYPI, 2019).

A planta simulada é baseada na bancada didática de tanques acoplados da Quanser, cujo diagrama (a) e fotografia (b) estão mostrados na Figura 2. A escolha deste sistema se dá pela existência de uma bancada desta na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Entretanto, é comum a ocorrência de problemas técnicos, de modo que a virtualização deste siste-

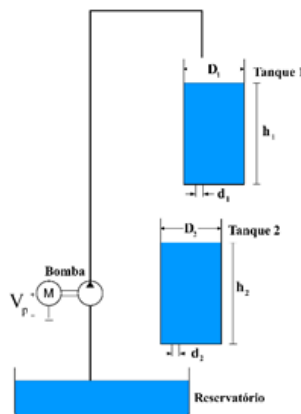
ma seria vantajosa para os discentes. Outra vantagem seria que, havendo disponibilidade da bancada física, tanto supervisor quanto código do Arduino poderia ser aproveitados para atividades práticas de controle, sendo necessário apenas ajustes na integração do Arduino com o sistema físico.

Entre o simulador e o Arduino foi configurada uma comunicação serial do tipo mestre-escravo, com a utilização de um FTDI (conversor USB-serial). O simulador recebe dois tipos de mensagem: solicitação das medições de níveis, e valor de tensão a ser aplicado na bomba. Este último é exibido no CMD (*Prompt* de Comando do Windows), bem como os níveis dos tanques enviados ao Arduino, ao lado do respectivo *timestamp* (marca temporal).

A partir das equações diferenciais do sistema, foi utilizado o Método de Euler (ou Euler-Cauchy ou ponto-inclinação) descrito por Chapra e Canale (2016). Neste método, o valor do nível e a inclinação da curva (derivada do nível) avaliados no instante atual são utilizados para extrapolar um valor futuro de nível, T segundos após, ou seja, em tempo discreto tem-se:

$$h_i[n + 1] = h_i[n] + T\dot{h}_i[n]. \quad (1)$$

Figura 2 – (a) Diagrama da planta de tanques acoplados e (b) fotografia real da bancada.



Fonte: Autoria própria (2020).

É importante ressaltar que esta extrapolação se aproxima do valor real conforme T diminui. A cada iteração do sistema, os níveis calculados dos tanques, a tensão aplicada e o respectivo *timestamp* são escritos no arquivo “Dados.csv”, gerado pelo *software* desenvolvido.

O comportamento da planta de tanques acoplados depende de alguns parâmetros, tais como os diâmetros dos orifícios de saída e dos tanques. A fim de aumentar a flexibilidade do sistema, é utilizado um arquivo de configuração em XML denominado “Config.xml”. Outros parâmetros podem ser ajustados neste arquivo, estando todos eles detalhados Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros ajustáveis do simulador.

Parâmetro	Descrição	Unidade
DTUBO1	Diâmetro do tubo de saída do tanque 1.	cm
DTUBO2	Diâmetro do tubo de saída do tanque 2.	cm
DTANQUE	Diâmetro da seção transversal dos tanques.	cm
KPUMP	Constante da bomba.	$\frac{cm^2}{V.s}$
SAMPLERATE	Frequência de amostragem do simulador.	s
MAX_ROWS	Máximo de linhas que serão escritas no arquivo "Dados.csv".	Linhas
PORTA	Seleciona a porta COM de comunicação com o Arduino.	Não se aplica
T_SIM_MAX	Tempo máximo de simulação.	s
DESVIO_PADRAO_RUIDO	Desvio padrão do ruído nas medições de níveis.	cm

Fonte: Autoria própria (2020).

Note que para a utilização do simulador deve-se, portanto, ajustar as configurações no arquivo “Config.xml”, atentando-se para a seleção da porta COM utilizada pelo conversor USB-serial.

Arduino

Na malha de controle proposta, quando comparada a uma existente em ambiente industrial, o Arduino está substituindo o CLP (Controlador Lógico Programável). Entre suas principais funções estão a aquisição de dados da planta, comunicação com supervisório, controle PID, disparo de alarmes e intertravamento.

A comunicação entre Arduino e supervisório é realizada através do protocolo Modbus. Essencialmente, no Arduino será configurado um banco de registradores, do qual serão solicitadas as leituras pelo supervisório, visto que o protocolo Modbus utiliza como mecanismo de controle de acesso o mestre-escravo. Esses registradores seguem os modelos de dados especificados pelo protocolo Modbus, permitindo a troca de valores digitais, podendo incluir os provenientes dos conversores analógico-digital do Arduino, ou valores binários (MODBUS ORGANIZATION, 2012).

Foi configurado no Arduino um registrador para seleção do tanque cujo nível será controlado. Esta chave, bem como os parâmetros do controlador k_p , T_i e T_d , (constantes dos controladores proporcional, integral e derivativo, respectivamente) recebem valores do supervisório. A partir destes valores, é calculada a saída de tensão u para a bomba aplicando-se controle o PID. A equação (2) mostra como o PID foi implementado no Arduino.

$$u[n] = k_p \left(e[n] + \frac{T_d}{T} (e[n] - e[n-1]) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i] \right), \quad (2)$$

sendo $e[n]$ a diferença entre o nível do tanque selecionado e o *setpoint* na n -ésima iteração do controlador e T o período de amostragem, parametrizável no Arduino. Importante ressaltar que foi implementado um in-

tegrador anti-*windup*, que apenas acumula o erro quando o atuador não está saturado (FADALI e VISIOLI, 2012). Também se aplicou um saturador, mantendo a tensão da bomba u entre 0 e 12 volts.

O intertravamento foi configurado através de uma *flag* que desliga a planta quando o nível de um dos tanques, 1 ou 2, ultrapassar o limite superior de, respectivamente, 29 cm ou 28 cm. Após ação do intertravamento, a planta só será religada quando houver desligamento manual no supervísório.

Também foram configurados três alertas no Arduino, sendo eles o LAH001, LAH002 e EAH001, todos nomeados com base na norma ISA 5.1 (ISA, 2009). Os alertas LAH001 e LAH002 indicam nível alto nos tanques 1 e 2, respectivamente, sendo disparados quando o nível ultrapassa 27 cm. O EAH001 é um alarme de tensão alta na bomba, sendo ativado quando a tensão máxima de 12V é aplicada na bomba por um período ajustável no Arduino T_MAX. Todos os alarmes são desativados quando a situação é normalizada, ficando registradas suas ocorrências na tela de alarmes do supervísório, exigindo reconhecimento.

Supervísório

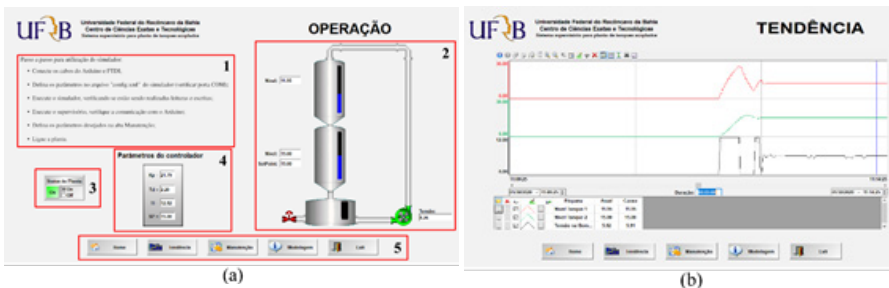
O supervísório é responsável pela interface com o usuário, possibilitando a visualização do estado da planta, bem como a realização de ajustes nos parâmetros do controlador, através de uma comunicação Modbus. Também é responsável pela exibição de alarmes, gráficos de tendência (RIBEIRO, 1999). Deste modo, foram projetadas as telas "Operação", "Tendência", "Manutenção" e "Modelagem".

Tela Operação – A tela inicial do supervísório é a "Operação". A Figura 3-a mostra esta tela, destacando seus componentes (referenciados pelos índices), sendo eles: (1) passo a passo para utilização da solução pro-

posta neste trabalho, integrando Arduino, supervisor e planta simulada de modo correto; (2) sinótico da planta de tanques acoplados; (3) botão para ligar/desligar a planta, o retângulo verde escrito "on" indica o status da planta lido do Arduino, enquanto a seleção ao lado indica o comando dado a partir do supervisor; (4) exibição dos parâmetros do controlador, sem a possibilidade de alterá-los nesta tela; (5) menu de navegação presente em todas as telas do supervisor.

Tela Tendência – No controle de processos contínuos é fundamental a visão do comportamento das variáveis ao longo do tempo. É neste contexto que se costuma adicionar em supervisórios telas de tendência. Neste supervisor foi adicionada a tela chamada "Tendência", mostrada na Figura 3-b, a fim de mostrar a visão gráfica dos níveis dos tanques, bem como da tensão na bomba. Como são apenas três variáveis, duas controladas e uma manipulada, foi possível manter as três num mesmo gráfico de tendência.

Figura 3 – (a) Tela Operação e (b) Tela Tendência do supervisor.




Fonte: Autoria própria (2020).

Tela Modelagem – Por se tratar de um supervisor desenvolvido para fins didáticos, foi adicionada uma tela de modelagem, na qual são descritas a modelagem matemática da planta, a linearização em torno do ponto de operação e como o PID está implementado no Arduino. Esta tela está mostrada na Figura 4. Também foi adicionada uma tabela con-

tendo os valores utilizados no projeto dos exemplos de controladores presentes no supervisório.

Figura 4 - Tela Modelagem do supervisório.



Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Sistema supervisório para planta de tanques acoplados

Modelagem matemática da planta

Pod-se escrever as equações diferenciais de primeira ordem que descrevem os níveis do líquido nos tanques como:

$$\dot{h}_1(t) = \frac{K_1}{A} V_1(t) - \frac{\alpha_1}{A} \sqrt{2gh_1(t)}$$

$$\dot{h}_2(t) = \frac{\alpha_1}{A} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{\alpha_2}{A} \sqrt{2gh_2(t)}$$

PID implementado no Arduino

No arduino o PID foi implementado, basicamente, a equação abaixo.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{T_i}{T} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d}{T} (e(t) - e(t-1)) \right)$$

A exceção fica por conta do integrador anti-windup, que apenas acumula o erro quando o atuador não está saturado. O código no arduino é o seguinte:

```

u = zp*(e + (1-i_0_1)*I2 + gdnz_01000*/721);
if (i>0 sa u=I2);
soma_error+=e;
                    
```

EQUAÇÕES

Linearização do nível em torno de 15 cm

Pod-se escrever as funções de transferência como

$$G_1(s) = \frac{H_1(s)}{u(s)} = \frac{\beta_1}{s - \alpha_1}$$

$$G_2(s) = \frac{H_2(s)}{u(s)} = \frac{\beta_2 \beta_1}{(s - \alpha_1)(s - \alpha_2)}$$

nas quais

$$\alpha_1 = -\frac{\alpha_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{100}}} \quad \beta_1 = \frac{K_1}{A_1}$$

$$\alpha_2 = -\frac{\alpha_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{200}}} \quad \beta_2 = \frac{\alpha_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{100}}}$$

Utilizando as informações da tabela abaixo, pode-se obter as funções de transferência do sistema, resultando em

Descrição	Símbolo	Valor
Diâmetro dos tanques	D_1, D_2	4.440 cm
Diâmetro do orifício de saída do tanque 1	d_1	0.4762 cm
Diâmetro do orifício de saída do tanque 2	d_2	0.4760 cm
Coeficiente da bomba	K_1	3.3 $\frac{cm^3}{cm \cdot s}$
Aceleração da gravidade	g	981 $\frac{cm}{s^2}$

$$G_1(s) = \frac{0.21396}{s + 0.06564}$$

$$G_2(s) = \frac{0.011306}{(s + 0.06564)(s + 0.02861)}$$

Home

Incêndia

Manutenção

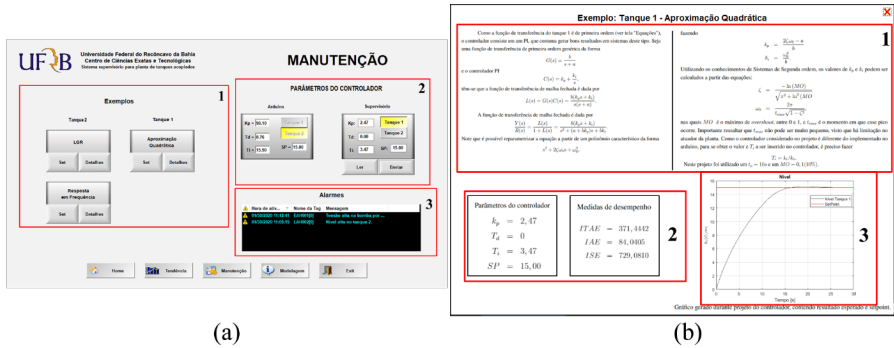
Modelagem

Exit

Fonte: Autoria própria (2020).

Tela Manutenção – Foi adicionada ao supervisório uma tela para manutenção da planta. A Figura 5-a mostra esta tela destacando suas 3 principais áreas (referenciadas pelos índices), são elas: (1) exemplos de controladores para os tanques 1 e 2, sendo que para escolher um exemplo o usuário deverá clicar em "set", e, caso queira, pode clicar em "detalhes" para ver o projeto do controlador em um *popup*, conforme mostrado na Figura 5-b (2) parâmetros do controlador, possuindo uma coluna contendo os ativos no Arduino e os do supervisório, podendo ser lidos os valores do Arduino ou enviados os do supervisório; (3) histórico de alarmes, de modo que enquanto um alarme estiver ativo aparecerá em vermelho, quando for normalizado aparece azul, sendo necessário o reconhecimento (com duplo clique) para que a ocorrência não seja mais exibida. A ação de intertravamento também é exibida nesta tela.

Figura 5 - (a) Tela Manutenção do supervisório e (b) *popup* detalhando exemplo.



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2020).

Projeto de controladores PID

Modelagem matemática e linearização dos tanques

A utilização de modelos matemáticos são fundamentais na realização do estudo de sistemas de controle. Estes modelos são definidos como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema de modo tão preciso quanto desejado (OGATA e YANG, 2011). Uma das técnicas mais comuns, e a utilizada neste trabalho, é a descrição do modelo do sistema por equações diferenciais. Se estas equações puderem ser linearizadas, pode-se utilizar a transformada de Laplace para simplificação dos métodos de projeto dos controladores (DORF e BISHOP, 2001).

A partir das leis físicas envolvidas no processo, linearização por série de Taylor e aplicação da transformada de Laplace, considerando um determinado ponto de operação, obtém-se as seguintes funções de transferência:

$$G_1(s) = \frac{H_1(s)}{u(s)} = \frac{\beta_1}{s - \alpha_1}, \quad (3)$$

$$G_2(s) = \frac{H_2(s)}{u(s)} = \frac{\beta_1\beta_2}{(s - \alpha_1)(s - \alpha_2)}. \quad (4)$$

Sendo os coeficientes calculados a partir de:

$$\alpha_1 = -\frac{a_1}{A} \sqrt{\frac{g}{2L_{1ss}}}, \quad \beta_1 = \frac{K_p}{A}, \quad (5)$$

$$\alpha_2 = -\frac{a_2}{A} \sqrt{\frac{g}{2L_{2ss}}}, \quad \beta_2 = \frac{a_1}{A} \sqrt{\frac{g}{2L_{1ss}}}. \quad (6)$$

Na qual, a_1 e a_2 são as áreas dos orifícios de saída dos tanques, A é a área da seção dos tanques (considerados cilíndricos e de mesmas dimensões), L_{1ss} e L_{2ss} são os níveis nas condições normais de operação (ou de equilíbrio), g é a aceleração da gravidade, e K_p é a constante da bomba que varia a depender do estado da bomba, mas pode ser considerada para fins de cálculos como $3,3 \text{ cm}^3/(V \cdot s)$ (QUANSER, 2019).

Projeto tanque 2

Nesta seção serão apresentados os projetos dos controladores desenvolvidos para o tanque dois.

Lugar Geométrico das Raízes

Conforme visto na modelagem matemática, o tanque dois apresenta uma função de transferência com dois polos e nenhum zero. Sistemas com estas características são ditos de segunda ordem, sendo a forma padrão da função de transferência dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (7)$$

Na qual ζ é o coeficiente de amortecimento e ω_n é a frequência natural não amortecida. Os valores de ζ e ω_n podem alterar inclusive a for-

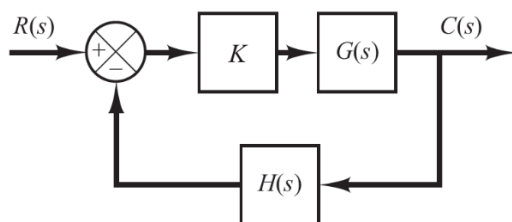
ma da resposta, podendo variar desde um comportamento semelhante a um sistema de primeira ordem a uma oscilação amortecida (NISE e DA SILVA, 2012). Os sistemas que apresentam as melhores respostas transitórias são os ditos subamortecidos, nos quais $0 < \zeta < 1$. De modo a analisar a resposta destes sistemas definem-se, entre outras, as seguintes especificações:

- Máximo de sobressinal (ou máximo de *overshoot*), M_p : valor pelo qual a forma de onda ultrapassa o valor final no instante de pico, expressa em um valor percentual do valor final;
- Tempo de acomodação, t_a : tempo necessário para que as oscilações amortecidas transitórias permaneçam dentro de uma faixa de $\pm 2\%$.

A resposta transitória de um sistema está intimamente relacionada com a localização dos seus polos de malha fechada, que são, basicamente, as raízes da equação característica. Caso o ganho de malha do sistema seja ajustável, é possível deslocar os polos no plano s a partir de alterações no ganho. Neste cenário se apresenta o Lugar Geométrico das Raízes (LGR), que consiste numa representação gráfica que nos dá uma descrição qualitativa do desempenho do sistema de controle. Para um sistema tal qual o representado na Figura 6, as condições de módulo e de ângulo do lugar geométrico das raízes são, respectivamente dadas por:

$$|KG(s)H(s)| = 1, \quad (8)$$

$$\angle(KG(s)H(s)) = (2k + 1)180^\circ. \quad (9)$$

Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema realimentado.

Fonte: Ogata e Yang (2011)

Estas condições serão utilizadas para o projeto do controlador do tanque 2 via LGR, baseado em Nise e Silva (2012), sendo considerados os seguintes critérios:

$$M_p = 20\%, \quad (10)$$

$$t_{a(2\%)} = 10 \text{ s} \quad (11)$$

para fins de projeto, a equação (7) foi reescrita da forma:

$$G(s) = \frac{K}{(s - p_1)(s - p_2)}. \quad (12)$$

em sistemas de segunda ordem, pode-se determinar o ângulo da assíntota do lugar das raízes partir do M_p fazendo:

$$\zeta = \frac{-\ln(MO)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(MO)}}, \quad (13)$$

$$\theta = 180^\circ - \arccos(\zeta). \quad (14)$$

calculando a frequência natural amortecida através de

$$\omega_d = \frac{4}{\zeta t_a}. \quad (15)$$

é possível determinar a localização desejada para o polo compensado a

partir de:

$$\alpha = \frac{\omega_d}{\tan(\theta)}, \quad (16)$$

$$s_{1,2} = \alpha \pm j\omega_d. \quad (17)$$

a fim de alocar os polos de malha fechada em $s_{1,2}$, primeiramente será definido um PI como:

$$C_{PI}(s) = \frac{s - p_2}{s}, \quad (18)$$

de modo que um polo da planta seja cancelado e o do integrador se torne dominante.

Calculando o ângulo formado entre $s_{1,2}$, e os polos, da planta e do integrador, pode-se determinar a posição do zero do PD a partir da contribuição angular necessária para que a condição angular seja satisfeita, ou seja:

$$\gamma = \angle(s_1 - p_1) + \angle s_1 - 180^\circ, \quad (19)$$

$$z_{pd} = -\left(\frac{\omega_d}{\tan(\gamma)} + \alpha\right). \quad (20)$$

satisfeita a condição angular, é preciso atender à condição de módulo, fazendo:

$$K_p = \frac{|s_1 - p_1||s_1|}{|s_1 - z_{pd}|K}. \quad (21)$$

determinados os parâmetros, pode-se então definir o controlador PID como:

$$C_{PID}(s) = \frac{K_p(s - p_2)(s - z_{pd})}{s}. \quad (22)$$

manipulando as equações para obtenção das constantes equivalentes para o PID implementado no Arduino, resulta em:

$$K_p = K_p(-p_1 - z_{pd}), \quad (23)$$

$$T_d = \frac{1}{-p_1 - z_{pd}}, \quad (24)$$

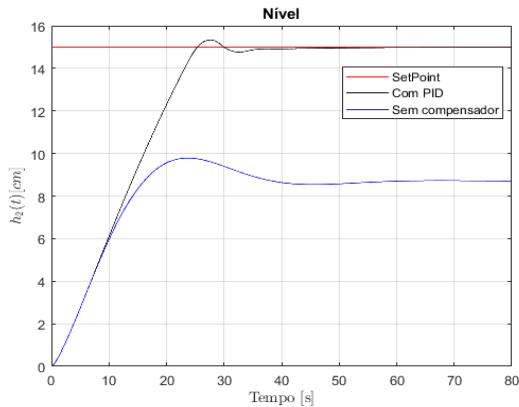
$$T_i = \frac{-p_1 - z_{pd}}{p_1 z_{pd}}. \quad (25)$$

note que com a adição do zero do PD o sistema deixa de ser de segunda ordem, portanto, ainda que os polos de malha fechada estejam em $s_{1,2}$, as equações (13) e (15) não são mais precisas. Ainda assim, ambas podem ser consideradas como uma boa aproximação, visto que os polos serão dominantes por conta da proximidade da origem, de modo que quanto maior o valor absoluto do zero do PD, melhor mais próximo será o comportamento do sistema de um de segunda ordem. A Tabela 2 mostra os parâmetros do controlador projetado. A resposta ao degrau do sistema compensado e sem compensador está mostrada na Figura 7. As medidas de desempenho obtidas para todos os projetos que serão apresentados neste trabalho foram: integral do erro quadrático ISE (*Integral Squared Error*), integral absoluta do erro IAE (*Integral Absolute Error*) e integral do erro absoluto vezes o tempo ITAE (*Integral Time Absolute Error*).

Tabela 2 - Parâmetros do controlador PID do tanque 2 projetado via LGR.

Parâmetro	Valor
k_p	58,62 <i>V/cm</i>
T_d	0,9 <i>s</i>
T_i	16,20 <i>s</i>
SP	15,00 <i>cm</i>

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 - Resposta ao degrau projeto de controlador PID para o tanque 2 via LGR.

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 – Medidas de desempenho do controlador PID do tanque 2 projetado via LGR.

Parâmetro	Valor
<i>ITAE</i>	1654,89 s. cm
<i>IAE</i>	189,41 cm
<i>ISE</i>	1889,21 cm ²

Fonte: Autoria própria (2020).

Resposta em Frequência

Nos sistemas lineares em regime permanente, entradas senoidais geram resposta de mesma frequência, mas diferente fase e magnitude, sendo estas funções da frequência. O método de resposta em frequência apresenta, na maioria dos casos, um quadro qualitativo da resposta transitória. As curvas de logaritmo da magnitude e de fase, em função da frequência $\log(\omega)$ são chamadas de diagramas de Bode.

Uma informação importante que pode ser extraída do diagrama de Bode é a margem de fase, que consiste no atraso de fase adicional, na frequência de cruzamento de ganho (0 dB), necessário para que o sistema

atinga o limiar de estabilidade, ou seja, -180° . Quanto menor a margem de fase, mais oscilatório é o sistema, sendo que o sistema é dito instável quando este valor for negativo.

Outra medida importante é a margem de ganho, que é a variação no ganho (em decibéis) requerida para tornar o sistema instável quando houver cruzamento de fase (em -180°), ou seja, ganho necessário para tornar a magnitude igual a 0 dB (ganho unitário). Uma margem de ganho positiva indica que o sistema é estável, enquanto uma negativa faz o sistema se tornar instável.

A frequência ω_b , na qual a resposta em frequência de malha fechada é de 3dB abaixo do seu valor na frequência ω é denominada frequência de corte, delimitando a chamada banda passante. Esta, por sua vez, está intimamente relacionada com a velocidade de resposta do sistema, de modo que quanto maior a banda passante, mais rápida a resposta.

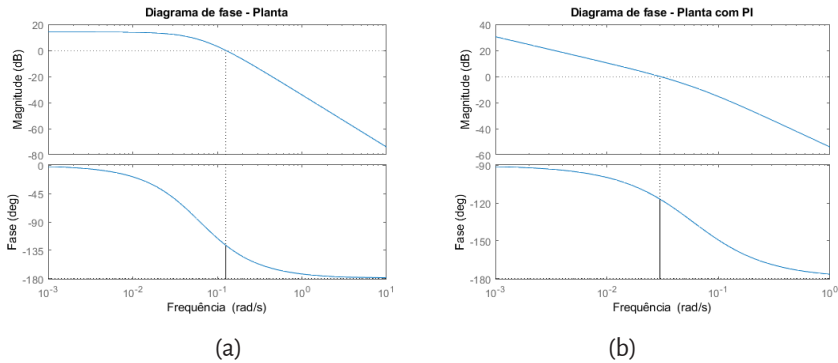
Diferentemente do projeto anterior, este não foi desenvolvido de forma analítica. Com base no conhecimento da relação entre o diagrama de Bode e a resposta ao degrau do sistema, os zeros do PID foram alocados a fim de melhorar o desempenho do sistema em malha fechada, através do aumento da margem de fase e da banda de passagem. Neste projeto foram considerados os critérios $M_p = 0,3$ (30%) e $t_{a(2\%)} = 30s$.

Inicialmente foi realizada uma análise da resposta em frequência da planta não compensada, estando o resultado gráfico mostrado na Figura 8-a.

Quanto mais próxima a fase de -180° no cruzamento de ganho (0 dB de magnitude), mais instável é o sistema. Na resposta em frequência da planta, o que faz a fase tender para -180° é a presença de dois polos (por estarem próximos não é possível distingui-los no gráfico). Portanto, de modo a fazer com que o erro de estado estacionário seja reduzido a

zero e tendo em vista a contribuição do integrador com -90° , foi alocado o zero do PI sobre um polo da planta. A resposta em frequência da planta com PI está mostrada na Figura 8-b.

Figura 8 – (a) Resposta em frequência da planta não compensada e (b) com PI.



Fonte: Autoria própria (2020).

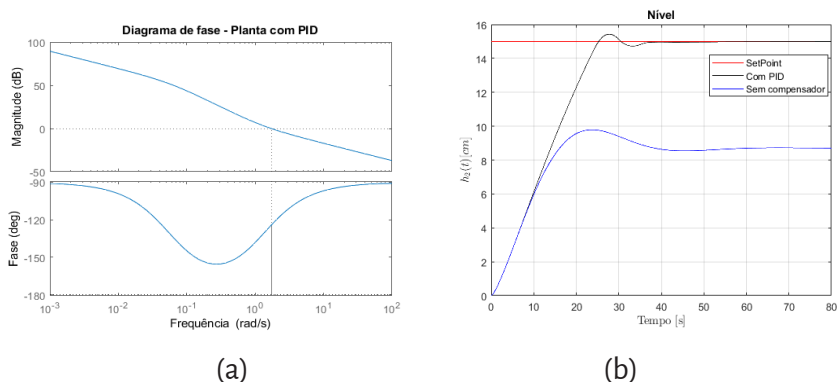
O PD contribui com o aumento da margem de fase, gerando uma inclinação de 20dB/década ao longo de uma década antes e uma após o seu zero, estabilizando em $+90^\circ$. Por este motivo, o zero do PD foi alocado uma década após o cruzamento de zero. Importante ressaltar que como a RF da planta já decresce 40 dB/década , o sistema com PD continua atenuando a influência dos ruídos de alta frequência.

Por fim, o ganho proporcional foi calculado de modo a deslocar o cruzamento de ganho para frequências maiores, aumentando a banda de passagem e consequentemente melhorando a velocidade da resposta do sistema. Os parâmetros calculados estão mostrados na Tabela 4. A resposta em frequência do sistema compensado está mostrada na Figura 9-a, enquanto as respostas ao degrau do sistema com e sem compensação estão traçadas na Figura 9-b. As medidas de desempenho do controlador estão exibidas na Tabela 5.

Tabela 4 - Parâmetros do controlador PID do tanque 2 projetado via RF.

Parâmetro	Valor
k_p	92,10 V/cm
T_d	0,76 s
T_i	15,90 s
SP	15,00 cm

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 9 - (a) Resposta em frequência da planta e (b) resposta ao degrau do tanque 2 com controlador PID projetado via resposta em frequência.

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5 – Medidas de desempenho do controlador PID do tanque 2 projetado via LGR.

Parâmetro	Valor
$ITAE$	1647,18 $s \cdot cm$
IAE	189,48 cm
ISE	1889,45 cm^2

Fonte: Autoria própria (2020).

Projeto tanque 1

Nesta seção será descrito o projeto de controlador desenvolvido para o tanque 1. Conforme visto na modelagem, a função de transferência do tanque 1 é de primeira ordem, de modo que o controlador projetado

consiste em um PI, que costuma gerar bons resultados em sistemas deste tipo. Seja uma função de transferência de primeira ordem genérica da forma:

$$G(s) = \frac{b}{(s + a)}, \quad (25)$$

e o controlador PI,

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}, \quad (26)$$

têm-se que a função de transferência de malha aberta é dada por:

$$L(s) = G(s)C(s) = \frac{b(k_p s + k_i)}{s(s + a)}. \quad (27)$$

a função de transferência de malha fechada é dada por:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = \frac{b(k_p s + k_i)}{s^2 + (a + bk_p)s + bk_i}. \quad (28)$$

note que é possível re-parametrizar a equação a partir de um polinômio característico da forma:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2, \quad (29)$$

fazendo,

$$k_p = \frac{2\zeta\omega_n - a}{b}, \quad (30)$$

$$k_i = \frac{\omega_n^2}{b}. \quad (31)$$

utilizando os conhecimentos de sistemas de segunda ordem, os valores de k_p e k_i podem ser calculados a partir das equações:

$$\zeta = \frac{-\ln(M_p)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p)}}, \quad (32)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{t_p \sqrt{1 - \zeta^2}}, \quad (33)$$

nas quais t_p é o tempo de pico. Importante ressaltar que t_p não pode ser muito pequeno, visto que há limitação no atuador da planta.

Como o controlador considerado no projeto é diferente do implementado no Arduino, para se obter o valor e T_i a ser inserido no controlador, é preciso fazer.

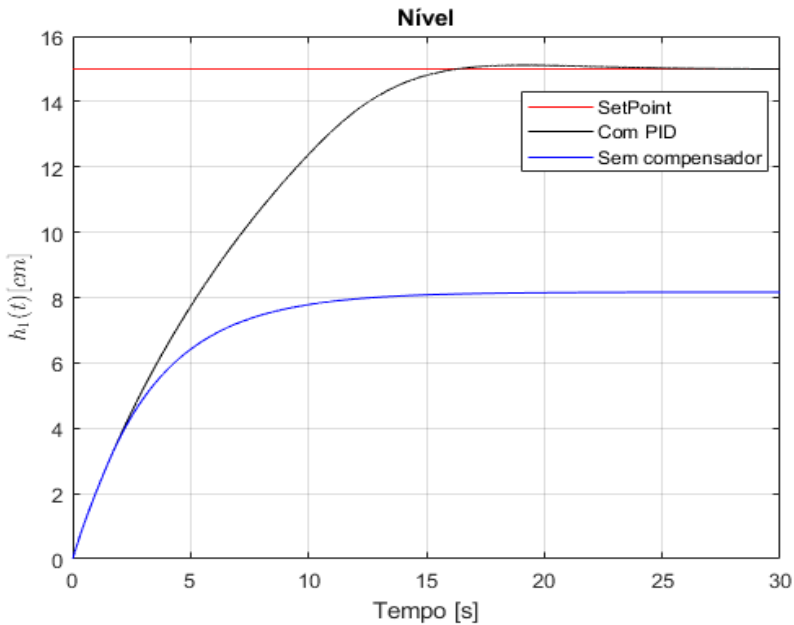
$$T_i = \frac{k_i}{k_p}. \quad (34)$$

Neste projeto foi utilizado $t_p = 10s$ e $M_p = 0,1$ (10%). Note que ainda que o denominador da equação (28) possua características de um sistema de segunda ordem, o numerador possui um zero, de modo que as equações (32) e (33) fornecem apenas uma aproximação para o comportamento do sistema em malha fechada. A formulação matemática deste projeto foi baseada em (ÅSTRÖM, 2002). A Tabela 6 traz os parâmetros do projeto. A resposta ao degrau do sistema compensado e sem compensador está mostrada na Figura 10. As medidas de desempenho do controlador estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6 - Parâmetros do controlador PID do tanque 2 projetado via LGR.

Parâmetro	Valor
k_p	2,47 V/cm
T_d	0 s
T_i	3,47 s
SP	15,00 cm

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 10 - Resposta ao degrau projeto de controlador PID para o tanque 1.

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 7 – Medidas de desempenho do controlador PID do tanque 2 projetado via LGR.

Parâmetro	Valor
<i>ITAE</i>	371,44 s. cm
<i>IAE</i>	84,04 cm
<i>ISE</i>	729,08 cm ²

Fonte: Autoria própria (2020).

Resultados e discussões

A implementação da simulação de tanques acoplados em Python foi realizada com êxito. A utilização do método de Euler aliada a uma frequência de execução elevada resultou em uma boa aproximação para o comportamento da planta. A possibilidade de ajustar os parâmetros da

simulação, inclusive os físicos, permite que diversas simulações sejam executadas. As interfaces com o usuário se mostraram bastante satisfatórias, principalmente o arquivo csv gerado, permitindo uma análise gráfica mais aprofundada com relação à tela de tendência do supervisório.

A comunicação do Arduino com a planta simulada em Python demonstrou ser bastante eficiente. Algumas definições como o não envio de valores de tensão repetidos, por parte do Arduino, e o envio dos níveis apenas quando solicitado, por parte do simulador, garantem que somente informações relevantes serão trocadas entre o simulador e o Arduino.

O controlador PID embarcado no Arduino se comportou tal qual esperado, quando comparado seus resultados com os obtidos a partir de simulações realizadas no Matlab. Evidentemente os resultados não seriam iguais, visto que no Arduino a ação de controle é executada em uma frequência menor, cerca de 10 ações por segundo. Da forma como foi implementada a leitura dos sensores e escrita nos atuadores, uma eventual troca de planta simulada para planta real se apresenta como uma atividade pouco custosa e como uma sequência natural do presente trabalho.

A troca de informações entre Arduino e supervisório, através do protocolo MODBUS, após estabelecida, não apresentou falhas. O período de atualização escolhido, 0,5 segundo, gerou resultados adequados, permitindo a visualização sem onerar demais o Arduino.

A organização das telas do supervisório também atendeu as expectativas. Combinando aspectos operacionais de sistemas reais, tais como alarmes e painel sinótico, com elementos didáticos, tais como exemplos de controladores e modelagem matemática, o supervisório se apresenta como uma boa ferramenta de aprendizado.

Para baixar os sistemas desenvolvidos acesse: encurtador.com.br/ipE17.

Conclusões

O sistema proposto no presente trabalho se comportou tal como esperado, de modo que se apresenta como uma solução viável para aprendizado de sistemas de controle PID. A possibilidade de alterar parâmetros, tanto do simulador quanto do controlador, permitem ao usuário testar uma quantidade grande de combinações. O fato de a planta de tanques acoplados possuir sistemas de primeira e segunda ordem, também pode ser bem trabalhada, do ponto de vista didático.

Com estes sistemas os estudantes poderão testar diversos controladores antes de implementá-los em uma planta física. Tal opção é mais segura, visto que não haverá riscos físicos associados ao uso da planta real, além de maior disponibilidade, já que os testes não estarão restritos a algum espaço físico, podendo ser realizados em suas casas, por exemplo.

Existem duas sequências naturais para este projeto. Na linha de ambientes virtuais, pode-se implementar o controlador PID em Python se comunicando diretamente com o supervisório, removendo a necessidade da utilização do Arduino, além de poder se desenvolver simuladores de outras plantas, como sistemas térmicos, por exemplo, de modo a atuar em conjunto com outras telas no supervisório, constituindo assim um sistema de aprendizado mais complexo. Outra vertente seria a troca do simulador pela planta real, que essencialmente consistiria numa integração do Arduino com a bancada didática, visto que o funcionamento do controlador e do supervisório independem de como as leituras são obtidas e de como a ação do atuador é executada.

Uma possibilidade ainda não explorada é a realização de práticas de automação com este sistema. Poderiam ser explorados alguns aspectos técnicos como configuração de comunicação Modbus, programação do Arduino com linguagem estruturada, visto que é uma das linguagens aceitas

em CLPs industriais. Outra atividade que pode ser desenvolvida é a obtenção de dados da planta via supervisorio para modelagem (via *software*) e projeto dos sistemas de controle, tal como é realizado em indústrias com sistemas complexos cuja modelagem matemática é impraticável.

Referências

- ALFRED, M.; NEYENS, D. M.; GRAMOPADHYE, A. K. Comparing learning outcomes in physical and simulated learning environments. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 68, p. 110–117, 2018.
- APKARIAN, J.; LACHERAY, H.; ABDOSSALAMI, A. **Coupled Tanks Workbook, student version**. Quanser Inc. [S.l.]. 2013.
- ÅSTRÖM, K. J. Control system design lecture notes for me 155a. **Department of Mechanical and Environmental Engineering University of California Santa Barbara**, v. 333, 2002.
- BRITO, J. J.; TOLEDO, P.; ALAYÓN, S. **Virtual laboratory for automation combining inventor 3D models and Simulink control models**: Virtual laboratory for automation. 2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). [S.l.]: [s.n.], 2018.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia-7ª edição**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**, 8ª edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2001.
- FADALI, M. S.; VISIOLI, A. **Digital control engineering: analysis and design**. [S.l.]: Academic Press, 2012.
- FEISEL, L. D.; PETERSON, G. D. **A colloquy on learning objectives for engineering education laboratories**. Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition. [S.l.]: [s.n.], p. 16–19, 2002.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **Journal of Engineering Education**, v. 94, p. 121–130, 2005.

GOMES, F. J. et al. Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em FOSS, para educação em engenharia de controle de processos Industriais. **Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Cobenge. Blumenau, FURB. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

INDUSOFT. Indusoft Web Studio Software. <https://www.indusoft.com/br/>, 2019. Acesso em: 10 Agosto 2019.

ISA. **Instrumentation Symbols and Identification Standard**. ANSI/ISA-5.1-2009, I. S. A. [S.l.]. 2009.

LI, S. Innovations in Chinese engineering education with digital technologies: A brief review of recent advances. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 26, p. 1081–1088, 2018.

MODBUS ORGANIZATION, I. **Modbus Application Protocol V1.1b3**. Modbus Organization, Inc. [S.l.]. 2012.

NISE, N. S.; DA SILVA, F. R. **Engenharia de sistemas de controle**. [S.l.]: LTC, v. 6, 2012.

OGATA, K.; YANG, Y. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, v. 5, 2011.

PYPI. cx-Freeze, 2019. ISSN <https://pypi.org/project/cx-Freeze/>. Acesso em: 2 Setembro 2019.

QUANSER. **Coupled Tanks Product Info Sheet**. [S.l.]. 2019.

RIBEIRO, M. A. Automação industrial. **Apostila para curso de treinamento**, 1999.

Sobre os autores

Acbal Rucas Andrade Achy

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFBA (2009), mestrado e doutorado em Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (2011/2018). Atualmente é professor efetivo da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB-CETEC. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação eletrônica e Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: Energias limpas, com foco em Energia Solar Térmica e fotovoltaica, Integração de Manufatura, Desenvolvimento de Produtos e Controle & Automação.

E-mail: acbal@ufrb.edu.br

Alfredo Plinio de Araújo Neto

Possui graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas pela UFRB (2019). Atualmente é graduando em engenharia elétrica na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, UFRB-CETEC. Em constante aprendizado na busca pela excelência de desempenho no ramo da engenharia elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Geração distribuída, com foco em energia solar fotovoltaica e proteção de sistemas elétricos de potência. Com carreira em desenvolvimento na área de projetos, possui competências para atuar na área de planejamento e elaboração de projetos de diferentes áreas técnicas, incluindo eficiência energética, energia solar fotovoltaica, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, projetos elétricos de nível residencial, comercial e predial.

E-mail: eng.alfredoplinio@gmail.com

Breno Prazeres Barbosa

Possui graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas (2017) e em Engenharia Elétrica (2020) com ênfase em automação e controle, ambas pela UFRB. Foi estagiário na Chemtech – A Siemens Business em 2019, atuando na área de TI Industrial. Atualmente, é mestrando no Programa de Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e

pesquisador colaborador da UFRB. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em historiadores industriais, sistemas supervisórios e processamento digital de sinais.

E-mail: brenoprazeres@hotmail.com

Camilla de Almeida Araújo

Possui graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2019) e atualmente é estudante de Engenharia Elétrica na mesma instituição. Foi monitora de Geometria analítica na UFRB-CETEC e bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), na área de pesquisa operacional com o projeto: problemas de corte, empacotamento e dimensionamento de lotes.

E-mail: camyaalmeida@hotmail.com

Fellipe Meira Souza e Souza

Graduado em Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas e em Bacharelado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Foi professor da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, atuando em regime de contrato temporário. Pertenceu a área de Sistemas Elétricos e Computacionais da instituição, onde lecionou as disciplinas Eletricidade e Eletrônica Analógica para alunos de graduação em Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas, Bacharelado em Engenharia Elétrica e Bacharelado em Engenharia da Computação durante o ano de 2019.

E-mail: fmeira76@gmail.com

Fillipe de Almeida Andrade

Possui graduação de Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2019). Atualmente é graduando do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

E-mail: lipe97.fa@gmail.com

Gildeberto de Souza Cardoso

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (2004) e mestrado em Engenharia Mecatrônica pela Universidade

Federal da Bahia (2008). Atualmente é professor assistente da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: controle não-linear e linearização por realimentação.

E-mail: gildeberto@ufrb.edu.br

Huilman Sanca Sanca

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (2017), Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia - UFBA (2013), Graduado em Engenharia Mecânica Elétrica pela Universidade Nacional do Altiplano - UNA (2008). Atualmente é professor efetivo do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB. Tem experiência na área da Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração, Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente em: Transitórios eletromagnéticos, proteção de sistemas elétricos, geração distribuída, smart grid, estabilidade de tensão, inteligência artificial aplicada a sistemas de energia elétrica, qualidade da energia e reconfiguração ótima de redes de distribuição, instalações elétricas e projetos em meia e baixa tensão.

E-mail: huilman.sanca@ufrb.edu.br

Joaquim Jorge Martins Galo

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (1997) e Doutorado em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, defesa: 24/09/2014, homologação: 14/11/2014, tema: "Método para Implantação de Redes Inteligentes Através da Criação de um Índice de Prioridade Aplicando Técnica Delfhi, Método Estatístico e Sistema Fuzzy". Tem experiência na área de Engenharia Elétrica: Automação, Transmissão Distribuição de Energia Elétrica, atuando principalmente nas seguintes áreas: Sistema elétrico, Automação de sistemas Elétricos, Eficiência energética, Gerenciamento pelo Lado da Demanda e Ambiente Smart Grid (Redes Inteligentes), também na atua a mais de 25 anos na área de Educação como professor universitário e coordenador de cursos de Engenharia.

E-mail: joaquimgalo@ufrb.edu.br

Luiza Rocha Gumes

Possui bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2019) e é graduanda em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Realizou intercâmbio para a Irlanda com foco no aprendizado da língua Inglesa (2020). Atuou como membro voluntária do Ramo Estudantil IEEE UFRB (2017), da Engenhe Júnior (2017-2018) e do Crea Júnior Bahia (2017-2019). E-mail: luizagumes2@gmail.com

Maurício Andrade Marinho

Possui graduação em Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2017) além de graduação em Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (2019). Possui experiência de estágio na área de Tecnologia da Informação na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, realizando atividades com linguagem Java para desenvolvimento WEB. É integrante do grupo de estudos em análise de faltas em sistemas elétricos de energia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Atualmente realiza atividades autônomas em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas Elétricos de Potência. E-mail: engmauricio.marinho@gmail.com

Railana Araujo da Silveira

Possui graduação em Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia- UFRB (2019), graduanda em Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia- UFRB (2019 – atualmente). Atualmente atuo na Engenhe Jr., uma Empresa Júnior vinculada a UFRB, possuindo experiências em Gerência de Equipe de Projetos Elétricos e projetista nas áreas de Instalações Elétricas, Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas e Sistema de Geração Fotovoltaica. E-mail: rsilveira21.ra@gmail.com

Teófilo Paiva Guimarães Mendes

Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Bahia (2005) e mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2008). Possui experiência de 8

anos em projetos de engenharia de automação e controle nas fases conceitual, básico, detalhamento e montagem. Possui experiência de 2 anos em projetos de configuração de sistemas de automação, incluindo uma experiência de consultoria internacional na Alemanha. Acumulou conhecimentos em processos industriais de plantas petroquímicas de Olefinas, Poliolefinas, Vinílicos, Utilidades Termoelétricas, Tratamento de Água e de Tancagem, bem como seus sistemas de controle e automação típicos. Atuou principalmente em plantas industriais de refinarias da Petrobras e petroquímicas da Braskem. Participou de projetos com equipes organizadas tanto de modo projetizado, atuando ao mesmo tempo como líder técnico e gerencial, como modo matricial, atuando como responsável técnico de automação em diferentes projetos. Atualmente é Professor do Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em automação e controle da UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, e dedica-se principalmente as atividades de extensão da Empresa Junior Multidisciplinar e Ramo Estudantil do IEEE.

E-mail: teopgmendes@ufrb.edu.br

Vitor Oliveira e Silva

Bacharel em Ciências exatas e tecnológicas (2017) e Engenheiro Eletricista (2019), ambas graduações pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Atualmente é Gerente de Solução na LEDAX Energia Inteligente com experiência no setor Fotovoltaico. Perito e Assistente Técnico Judicial especializado em consumo de Energia e Sistemas Fotovoltaico.

E-mail: vitor.oliveiradm@gmail.com

Esta obra reúne trabalhos científicos originados a partir de estudos e desenvolvimento das monografias e pesquisas realizadas por estudantes do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da UFRB, tendo como orientadores os docentes do CETEC - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. A organização desta coleção focou-se em três grandes áreas atuais da engenharia elétrica. A primeira foi em Sistemas Elétricos de Potências, que compreende trabalho na área de geração, transmissão, distribuição e uso eficiente da energia elétrica. A segunda área temática organiza trabalhos em energia fotovoltaica, com estudos, projeto e dimensionamento de sistemas de fornecimento de energia conectados ou não a rede de distribuição elétrica. E por fim, a última área abordada pela coletânea foi (Controle & Automação) traz os relatos e experiências de desenvolvimento em sistemas didáticos de controle em malha fechada e no gerenciamento inteligente de energia.

ISBN: 978-65-88622-81-0

