

Organizadores:

Eduardo Mendonça Pinheiro

Patrício Moreira de Araújo Filho

Glauber Tulio Fonseca Coelho



ENG^{i.i.}ENHARIA

a era da produção inteligente

2021


Pascal
Editora

7^o
Volume

EDUARDO MENDONÇA PINHEIRO
PATRÍCIO MOREIRA DE ARAÚJO FILHO
GLAUBER TULIO FONSECA COELHO
(Organizadores)

ENGENHARIA 4.0

a era da produção inteligente

VOLUME 7

EDITORA PASCAL
2021

2021 - Copyright© da Editora Pascal

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Patrício Moreira de Araújo Filho

Conselho Editorial

Prof. Dr. Will Ribamar Mendes Almeida

Prof. Dr. Saulo José Figueredo Mendes

Prof. Dr. Glauber Túlio Fonseca Coelho

Prof. Dr. Raimundo Luna Neres

Prof. Dr. Fabio Antonio da Silva Arruda

Prof. Dr. Ernane Rosa Martins

Prof. MSc. Paulo Américo Lira de Freitas

Prof. MSc. Carlos César Correia Aranha Junior

Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57prod

Engenharia 4.0: a era da produção inteligente. / Eduardo Mendonça Pinheiro, Patrício Moreira de Araújo Filho e Glauber Tulio Fonseca Coelho, (Orgs.). — São Luís: Editora Pascal, 2021.

238 f.; il. – (Engenharia 4.0; v. 7)

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-86707-59-5

D.O.I.: 10.29327/540341

1. Engenharia. 2. Gestão inteligente. 3. Miscelânea. I. Pinheiro, Eduardo Mendonça. II. Araújo Filho, Patrício Moreira de. III. Coelho, Glauber Tulio Fonseca.

CDU: 089.3

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2021

www.editorapascal.com.br

contato@editorapascal.com.br

APRESENTAÇÃO

Esta edição da série “Engenharia 4.0: a era da produção inteligente” é o resultado da seleção de vários artigos científicos publicados sobre a temática central da obra. A equipe editorial buscou oportunizar aos acadêmicos, professores e profissionais da atuantes da área, espaço de discussão a respeito da produção inteligente e sua nova fronteira. Vale dizer que esta série pode ter números adicionais no futuro, devido à grande repercussão, interesse de vários pesquisadores e difusão deste novo conhecimento.

O presente volume é composto por 14 capítulos que foram apresentados em eventos regionais, nacionais e internacionais e aqui estão agrupados segundo temática para facilitar a leitura quanto aos interesses difundidos em cada artigo, transformado em capítulo de livro e direcionados a discentes, docentes, pesquisadores e profissionais de Engenharia e áreas afins.

Os Organizadores ressaltam que as temáticas ilustradas nos capítulos desta série científica confirmam o valor da Engenharia 4.0 no contexto empresarial, científico e seus utilitários, mas principalmente vem reforçar a importância do tema de vanguarda e sua aplicabilidade, contribuindo para que as empresas e centros de pesquisa possam identificar projetos com o potencial de desenvolvimento de novas tecnologias e inovação para o futuro da indústria.

Os Organizadores

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 8

OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE: UM ESTUDO PARA PILARES DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

Saymon Henrique Santos Santana

Kyria Maria Alves da Silva

Maykon Willian Soares Souza

Wilson Kataoka Oyama Filho

Ayssi do Carmo Oliveira

Lygia Maria Policarpio Ferreira

CAPÍTULO 2..... 20

GERAÇÃO E APLICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO DE BORRA DE CAFÉ DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA UFPE

Aurian Moura de Lira

Rayana Luiza Silva

Fábio Estelita Silveira Ferreira

João Antônio Lima Pacheco

Ana Paula Lima Pacheco

CAPÍTULO 3..... 30

SOLUÇÃO DESCENTRALIZADA PARA O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTIÁREA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO

Elizete de Andrade Amorim

José Roberto Sanches Mantovani

Carlos Roberto Mendonça da Rocha

CAPÍTULO 4..... 50

USING PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT DATA IN LOAD DISTRIBUTION OPTIMIZATION PROBLEMS

Leonardo Ramos Rodrigues

Vandilberto Pereira Pinto

CAPÍTULO 5..... 66

ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E FILTROS PASSIVOS EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O ALGORITMO GENÉTICO CHU-BEASLEY

Lucas Oliveira Lima

Marcelo Semensato

CAPÍTULO 6 84

MANOVACUOMETRO ELETRÔNICO UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS

Charles Rech
Felipe da Silva Morais
Carlos Eduardo de Souza
Cristiano Frandalozo Maidana
Pericles Nicolau Balafa
Simone Ferigolo Venturini

CAPÍTULO 7 100

MICROINVERSOR SOLAR MICROCONTROLADO COM CONEXÃO EM CASCATA DE UM CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO E UM INVERSOR COM FILTRO LCL

Moacyr Aureliano Gomes de Brito
Caio Guilherme da Silva Moraes
Ruben Barros Godoy
Luigi Galotto Junior

CAPÍTULO 8 118

MODIFICAÇÃO HIDROTÉRMICA DE ZEÓLITAS NATURAIS E SUA APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DE DICLOFENACO

Henrique Straioto
Paula Valéria Viotti
Wardleison Martins Moreira
Rosangela Bergamasco
Marcelo Fernandes Vieira

CAPÍTULO 9 127

INSTRUMENTAÇÃO DE BANCADA DIDÁTICA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Alexandre Alves Dalmolim
Périson Pavei Uggioni
Douglas Lucas dos Reis
Diego Tiburcio Fabre

CAPÍTULO 10 144

EXTRATO AQUOSO DE *Ilex paraguariensis*: INCLUSÃO FITOTERÁPICA ANTIOXIDANTE PARA O SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE

Kátia Gualberto Corrêa
Wilson José Gonçalves

CAPÍTULO 11..... 157

UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITA NATURAL E MODIFICADA VISANDO A ADSORÇÃO DE DIURON

Henrique Straioto
Alexandre Amado de Moura
Paula Valéria Viotti
Wardleison Martins Moreira
Marcelo Fernandes Vieira
Rosangela Bergamasco

CAPÍTULO 12 167

LOGÍSTICA 4.0 COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA TECNOLÓGICA NA GESTÃO EMPRESARIAL

Jaciara Mendonça Mariano

CAPÍTULO 13..... 184

PROJETO DE UM CONTROLADOR PID EM SISTEMAS INDUSTRIAIS COM APLICAÇÃO EM VIRADORES DE VAGÕES

José Pinheiro de Moura
João Viana da Fonseca Neto
Bruno França Coelho

CAPÍTULO 14..... 204

PROJETO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY EM SISTEMAS INDUSTRIAIS APLICADO EM RETOMADORAS DE GRANÉIS SÓLIDOS NO SETOR DE MINERAÇÃO

José Pinheiro de Moura
João Viana da Fonseca Neto

AUTORES 226

ORGANIZADORES 237

CAPÍTULO 1

OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURAS COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE: UM ESTUDO PARA PILARES DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

OPTIMIZATION OF STRUCTURES WITH TWO DEGREES OF FREEDOM: A
STUDY FOR PILLARS OF SELF-HEALING CONCRETE

Saymon Henrique Santos Santana

Kyria Maria Alves da Silva

Maykon Willian Soares Souza

Wilson Kataoka Oyama Filho

Aysson do Carmo Oliveira

Lygia Maria Policarpio Ferreira

Resumo

Este trabalho visa o estudo das frequências naturais de vibração de uma estrutura com dois pavimentos, sob a perspectiva de um sistema discreto com dois graus de liberdade. O estudo das frequências naturais estende-se a estruturas compostas por uma classe especial de concretos denominados autocicatrizantes. Aliado a modelagem matemática da dinâmica da estrutura, o estudo aqui desenvolvido permitiu determinar, por meio do método dos gradientes conjugados, os intervalos de valores dos parâmetros físicos e geométricos dos pilares de sustentação da estrutura que promovem frequências de vibração em conformidade com a norma reguladora NBR 6118.

Palavras chave: Vibrações, Otimização, Concreto Autocicatrizante.

Abstract

This work aims to study the natural frequencies of vibration of a structure with two floors, under the perspective of a discrete system with two degrees of freedom. The study of natural frequencies extends to structures composed of a special class of concretes called self-healing. The study developed here allowed to determine, by the Conjugated Gradients Method, the ranges of values of the physical and geometric parameters of the structure's supporting pillars that promote vibration frequencies according to the regulatory standard NBR 6118.

Key-words: Vibrations, Optimization, Self-healing Concrete.



1. INTRODUÇÃO

No contexto da análise de estruturas em Engenharia Civil, o estudo da resposta das estruturas às diversas solicitações às quais estão sujeitas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de novos materiais. Nas últimas décadas, parte da comunidade científica tem dedicado esforços ao desenvolvimento de concretos mais leves e com maior resistência a compressão (ROSSIGNOLO *et al.* 2013). Os avanços nessas propriedades podem promover a implementação de estruturas mais baratas e mais seguras, evitando o aumento nos custos de implementação e manutenção e, por conseguinte, o surgimento de patologias ou mesmo o colapso de estruturas.

Nesta perspectiva, este trabalho é dedicado a um estudo das vibrações axiais em estruturas com 2 graus de liberdade, em particular, à procura de configurações que otimizem as frequências naturais de vibração do sistema, de modo a atender às recomendações da norma regulatória. As vibrações podem ser entendidas como um movimento oscilatório em torno de um ponto de equilíbrio. O conhecimento preciso das frequências naturais permite que oscilações com amplitudes não toleradas sejam evitadas. O estudo desenvolvido aqui traz em adição a extensão desta análise para estruturas cujos pilares são constituídos de concretos denominados autocicatrizantes.

As seções seguintes versam sobre a caracterização dos concretos autocicatrizantes, sobre o modelo matemático adotado para obtenção equações para as frequências fundamentais da estrutura. As seções finais são dedicadas aos resultados obtidos com o método de busca adotado para determinar valores ótimos locais para as frequências de oscilações.

1.1. Desenvolvimento de Concretos Autocicatrizantes

O concreto autocicatrizante é classificado em duas categorias distintas: a cura autógena e cura autonômica. A cura considerada autógena é uma propriedade natural do concreto, como descrito por Qureshi *et. al* (2016), materiais cimentícios de baixas idades podem curar naturalmente devido à hidratação de particulado de cimento não hidratados soltos na matriz. Por sua vez, a cura autonômica se configura como mecanismo desenvolvido para esta finalidade, gerado pela inserção de novos materiais, com qualidades autocicatrizantes, na matriz cimentícia do concreto.

A Figura 1, apresenta as vantagens da utilização de materiais autocicatrizantes na dosagem do concreto:



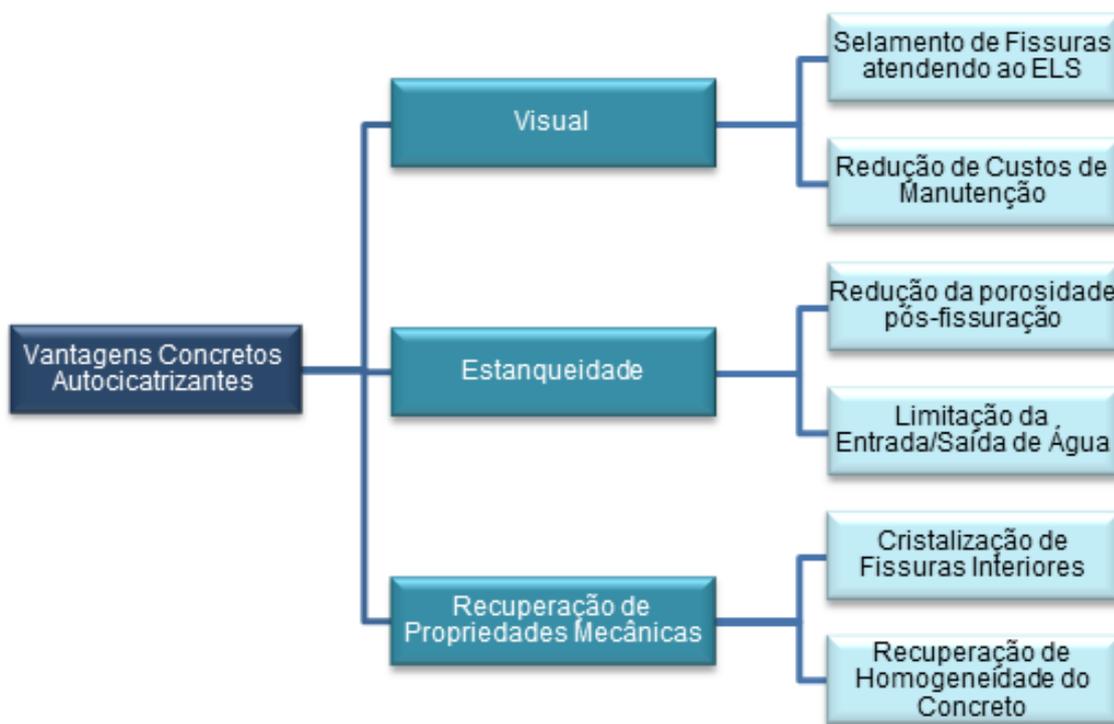


Figura 1 - Vantagens do Concreto Autocicatrizante
 Fonte: Autor (2021)

No que se refere a manutenção do ativo e análise visual, as estruturas autocicatrizantes permitem a diminuição de fissuras expostas e consequente gastos com reparos das estruturas. No estudo de Silva (2020) e Wang *et. al.* (2018) observou-se que, a partir dos aditivos presentes na matriz, houve o selamento das fissuras por meio da precipitação de carbonatação de cálcio na abertura.

Por outro lado, discutindo o contexto de estanqueidade, é fato que os concretos autocicatrizantes possuem vantagens no que tange a aspectos relacionados à impermeabilização, durabilidade e maleabilidade do material. Takagi *et. al.* (2014) afirma que ao utilizar a adição de Cat-X para autocicatrização cristalina dos concretos, é possível observar sua função como redutor de permeabilidade, fechando espaços vazios no interior do concreto. Estudos como os anteriormente citados trazem uma ideia preliminar sobre a importância da utilização de aditivos autocicatrizantes na composição estrutural do concreto.

2. MODELO MATEMÁTICO

Quando o interesse é o estudo de vibrações horizontais, uma estrutura composta por dois pavimentos pode ser analisada sob a perspectiva de um sistema com Dois Graus de Liberdade (2GDL). Além de ser um modelo recorrente na Engenharia Civil, devido principalmente ao amplo lastro de aplicações, esta ótica permite a determinação, de modo mais simples, dos parâmetros responsáveis por fenômenos como batimentos e ressonâncias.

A figura 2a apresenta uma estrutura com dois pavimentos, cada um sustentado por quatro pilares de seção transversal retangular (Figura 2b). Esta estrutura pode ser analisada sob a perspectiva de um sistema massa-mola acoplado, amortecido e forçado, con-

forme ilustra a Figura 2c.

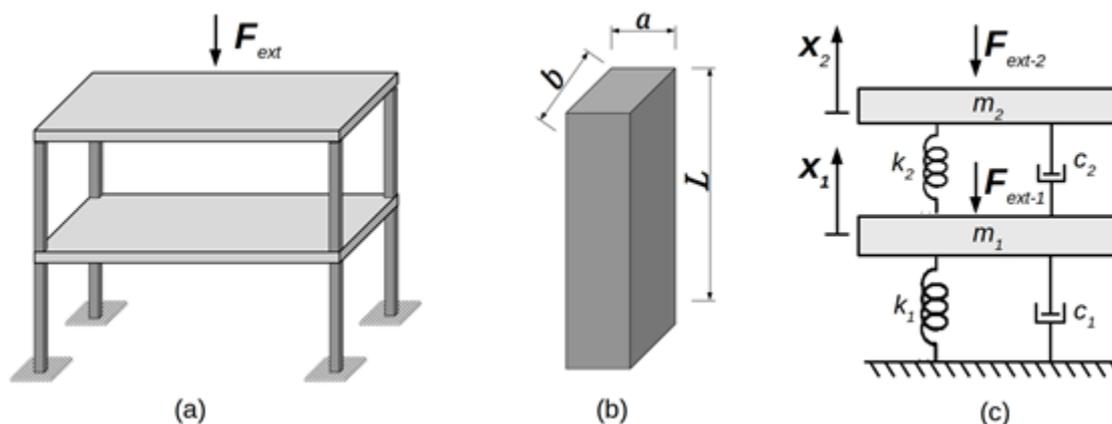


Figura 2: Representação de uma estrutura com dois pavimento sujeita a ações de forças externas em (a). Em (b): dimensões do pilar de seção transversal retangular. Em (c): modelo matemático adotado para a descrição da dinâmica do sistema.

Fonte: Autor (2021)

Nestas condições, a dinâmica desse sistema pode ser expressa, para os pavimentos 1 e 2, respectivamente por

$$m_1 \ddot{\vec{x}}_1(t) + (c_1 + c_2) \dot{\vec{x}}_1(t) - c_2 \dot{\vec{x}}_2(t) + (k_1 + k_2) \vec{x}_1(t) - k_2 \vec{x}_2(t) = \vec{F}_1(t) \quad 2.1$$

e

$$m_2 \ddot{\vec{x}}_2(t) + c_2 \dot{\vec{x}}_2(t) - c_2 \dot{\vec{x}}_1(t) + k_2 \vec{x}_2(t) - k_1 \vec{x}_1(t) = \vec{F}_2(t) \quad 2.2$$

Onde $\vec{x}_i(t)$ é o vetor posição do pavimento $i = 1, 2$ cujas massas são m_i . Os termos c_i e k_i são, respectivamente, o coeficiente de amortecimento, e a rigidez elástica do sistema. As ações externas são dadas por $\vec{F}_i(t)$ em cada um dos pavimentos.

Para a situação não-forçada e sem amortecimento, pode-se supor que os pavimentos executarão um movimento oscilatório que pode ser descrito por

$$x_i(t) = X_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad 2.3$$

De modo que as equações (2.1) e (2.2) podem ser reescritas na seguinte forma matricial

$$\begin{bmatrix} -m_1 \omega_1^2 k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -m_2 \omega_2^2 + K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ X_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.4$$

Para que a equação 2.4 seja válida para qualquer instante de tempo, e que, concomitantemente não se tenha apenas a solução trivial (nula), é necessário que o determinante da primeira matriz da equação seja nulo.

Numa situação, onde os pavimentos possuem a mesma frequência angular de oscilação (ω) a equação característica para esta estrutura fica:

| | |
|---|-----|
| $m_1 m_2 \omega^4 - (m_1 k_2 m_2 k_2 + m_2 k_2) \omega^2 + k_1 k_2 = 0$ | 2.5 |
|---|-----|

Se considerarmos que os pilares de sustentação são compostos pelos mesmos materiais e que possuem as mesmas dimensões, num cenário onde os pavimentos possuem a mesma massa m , tem-se quatro soluções para as frequências angulares ω_j , com $j = 1, \dots, 4$.

| | |
|---|-----|
| $\omega_1 = -\omega_2 = \frac{\sqrt{2mk(3 + \sqrt{5})}}{m}$ | 2.6 |
|---|-----|

e

| | |
|---|-----|
| $\omega_3 = -\omega_4 = \frac{\sqrt{-2mk(-3 + \sqrt{5})}}{m}$ | 2.7 |
|---|-----|

O interesse deste trabalho é investigar as frequências de oscilação no sentido axial dos pilares, devido às compressões decorrentes das diversas solicitações. Nesta perspectiva, a rigidez elástica pode ser escrita em termos das dimensões dos pilares e de sua caracterização composicional.

Uma vez que $k = \frac{nmabE}{L}$, onde a , b e L são as dimensões informadas na Figura 2, n é o número de pilares que sustentam os pavimentos e E é o módulo de elasticidade do material que compõe o pilar, as frequências de oscilação podem ser escritas sob a forma

| | |
|--|-----|
| $f_1 = -f_2 = \frac{\sqrt{\frac{nmabE}{L}(3 + \sqrt{5})}}{2\pi m}$ | 2.8 |
|--|-----|

e

| | |
|--|-----|
| $f_3 = -f_4 = \frac{\sqrt{\frac{-nmabE}{L}(-3 + \sqrt{5})}}{2\pi m}$ | 2.9 |
|--|-----|

É possível utilizar as equações 2.8 e 2.9 para obter os valores de parâmetros característicos da estrutura que otimizem os valores de Módulo de Elasticidade. Em particular, o interesse deste trabalho é determinar quais materiais podem atender às recomendações da NBR-6118 (2014) no que tange à análise das frequências críticas de vibrações, em regime linear, para estruturas usuais, quando solicitadas devido a ação de pessoas, conforme mostra a Tabela 01.

| CASO | f_{crit} (Hz) |
|--|-----------------|
| Ginásio de esportes e academias de ginástica | 8,0 |
| Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas | 7,0 |
| Passarelas de pedestres ou ciclistas | 4,5 |
| Escritórios | 4,0 |
| Salas de concerto com cadeiras fixas | 3,5 |

Tabela 1 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.
 FONTE ABNT-NBR 6118 (2014)

3. MÉTODO DOS GRADIENTES CONJUGADOS E ÓTIMOS LOCAIS PARA OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE

A fim de determinar os valores ótimos locais, esta investigação fez uso do Método dos Gradientes Conjugados (HESTENES, 1952) sujeito a restrições. Neste caso, a partir das equações 2.8 e 2.9, o Módulo de Elasticidade foi escrito em termos das variáveis m , n , a , b , L e f . Para as frequências, a NBR-6118 recomenda que o comportamento satisfatório da estrutura é assegurado quando a frequência se afasta o máximo possível da frequência crítica, em particular $f > 1,2f_{crit}$. Deste modo, as restrições no espaço de busca são dispostas na Tabela 2.

| Grandeza | Restrição |
|----------|-----------------|
| f | 10-100 Hz |
| a | 15 cm a 60 cm |
| b | 15 cm a 60 cm |
| L | 2,80 m a 3,60 m |
| m | 5 ton a 30 ton |
| n | 4 ou 8 |

Tabela 2 - Intervalos restritivos para a busca nos parâmetros característicos da estrutura.
 Fonte: Autor (2021)

As Figuras 3(a-d) trazem valores mínimos e máximos para o Módulo de Elasticidade juntamente com os valores ótimos locais a^* , b^* e L^* das dimensões dos pilares, para diferentes combinações de m , n e f , contidas no espaço de busca da Tabela 2.

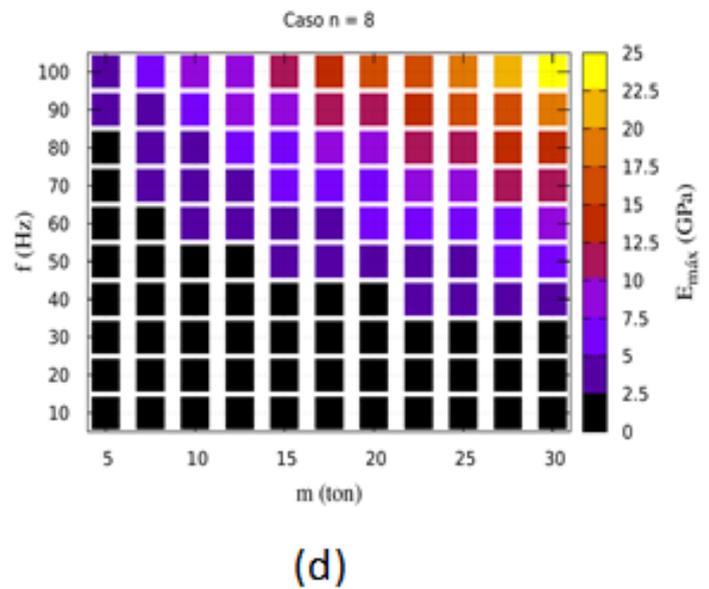
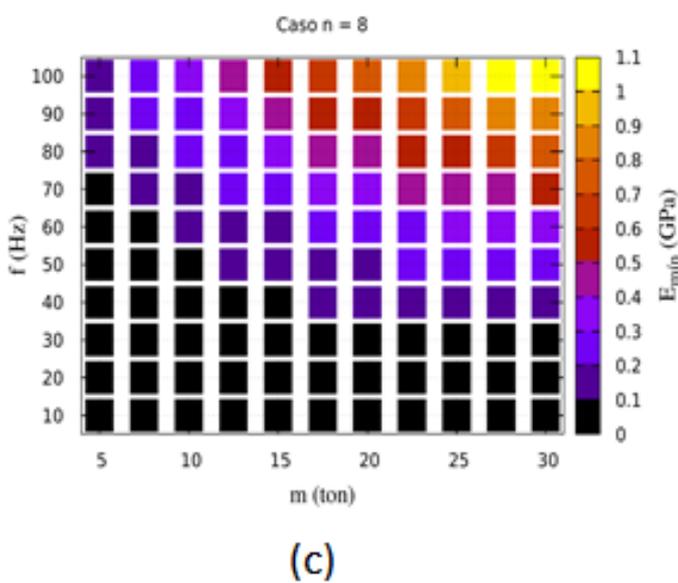
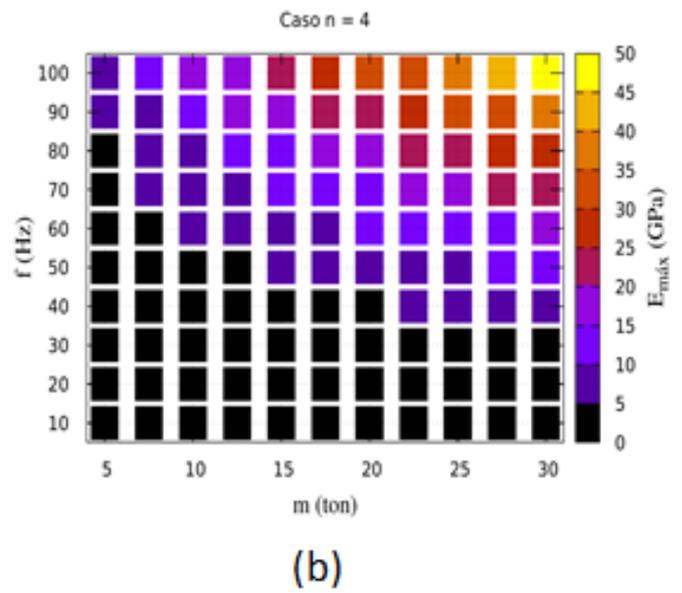
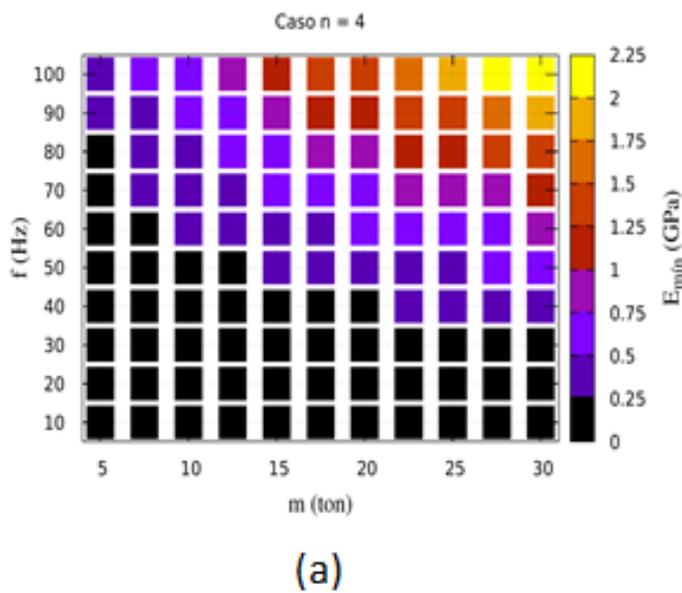


Figura 3 - Mínimos e Máximos para o Módulo de Elasticidade em diferentes configurações da estrutura e em função da frequência de vibração. Mínimo e máximo de E para $n=4$, respectivamente em (a) e (b). Mínimo e máximo de E para $n=8$, respectivamente em (c) e (d).
Fonte: Autor (2021)

Para os resultados apresentados na Figura 3, as dimensões ótimas dos pilares foram tais que: $a = b = 0,15\text{m}$ e $L = 2.80\text{m}$ nos casos de maximização de E, e $a = b = 0,60\text{m}$ e $L = 3,60\text{m}$ para os casos de minimização de E.

4. DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

Os corpos de prova utilizados para avaliar a influência da presença de aditivo autocicatrizante na rigidez do material foram fabricados pelo Método ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland – baseado no American Concrete Institute – ACI, adaptado às condições ambientais brasileiras, sendo recomendado para concretos de consistência plástica. O referido método leva em consideração a quantidade de água de amassamento em função da dimensão máxima característica do agregado, a quantidade de ar incorporado, e os valores médios de resistência para as diferentes relações de água/cimento.

No desenvolvimento dos traços de concreto utilizou-se: Cimento Portland (CPII-E e CPV), agregados (miúdos e graúdos), água e o aditivo cristalizante. O CPII-E possui escória de alto forno em sua composição, além de ampla utilização em obras. O CPV, conhecido pela sigla ARI, é caracterizado principalmente pelas concentrações de material carbonático e pela alta resistência inicial.

Os traços formulados são apresentados na Tabela 01. Para as condições A e B estudadas, o aditivo cristalizante (o Sika WT-200P) se mantém constante, variando-se apenas o tipo de cimento empregado. As condições C e D são traços de referência, sem a presença de aditivo, e necessários para análise de fatores de influência.

| DEFINIÇÃO DE TRAÇOS | | | | | | | Densidade média (kg/m ³) | Módulo médio de Elasticidade (GPa) |
|---------------------|---------|---------|-------|-------|------|--------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| CÓDIGO | CIMENTO | CIMENTO | AREIA | BRITA | ÁGUA | ADITIVO | | |
| A | CPII-E | 1 | 1,5 | 2,3 | 0,45 | 1,5% Cimento | 2218,34 | 29365,27 |
| B | CPV | 1 | 1,7 | 2,7 | 0,45 | 1,5% Cimento | 2337,79 | 39994,84 |
| C | CPII-E | 1 | 1,5 | 2,3 | 0,45 | 0% | 2351,95 | 35386,93 |
| D | CPV | 1 | 1,7 | 2,7 | 0,45 | 0% | 2329,72 | 38296,98 |

Tabela 3 - Especificação do traço dos concretos fabricados.

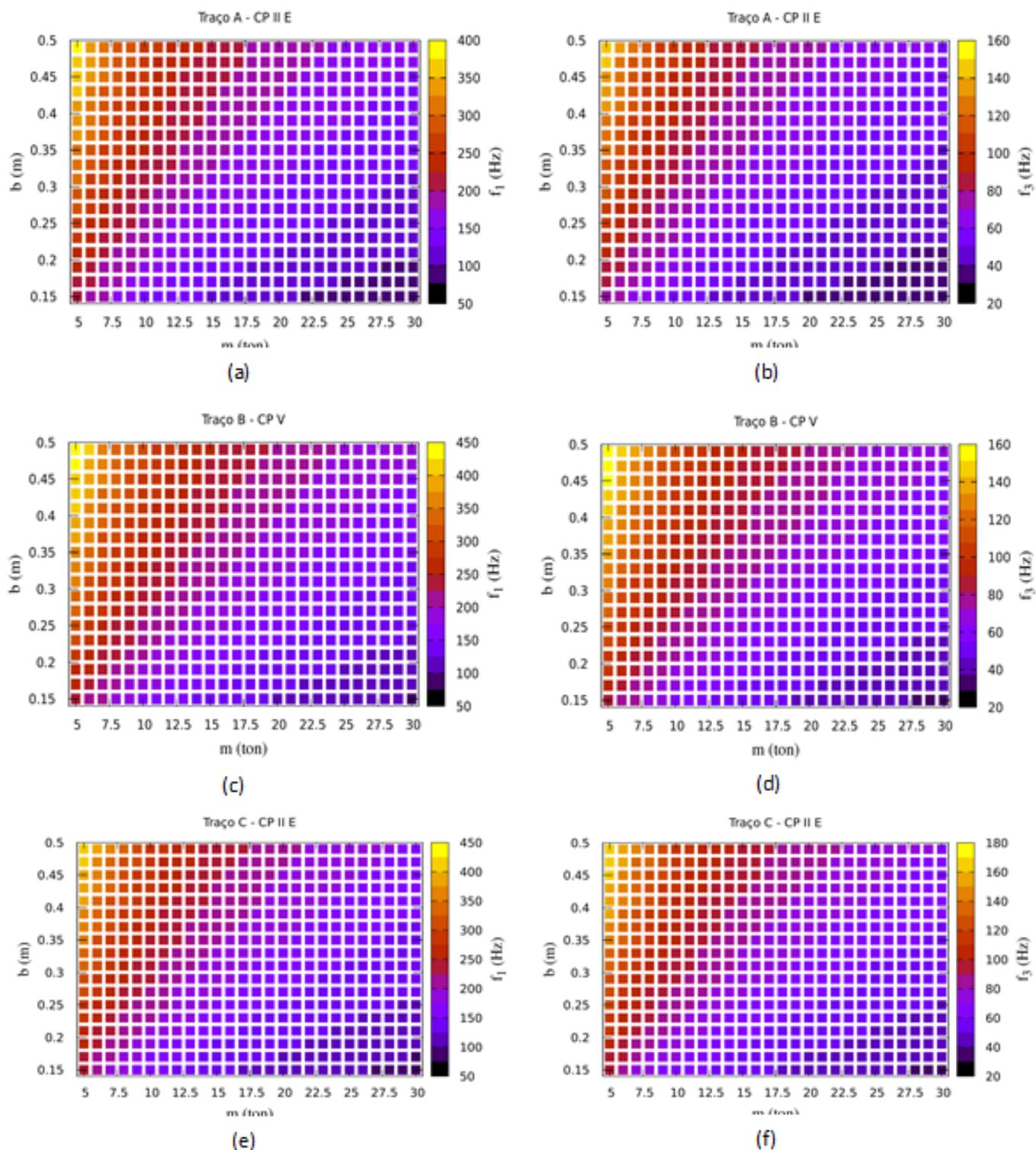
Fonte: Autor (2021)

O Módulo de Elasticidade foi obtido por conversão de dados a partir das informações de ensaio de ultrassonografia do concreto, em conformidade com a ASTM C 597:2016 - Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Essa norma permite a conversão de dados de velocidade de passagem do pulso ultrassônico, aliado a densidade, em módulo elástico. Para fins de cálculo, o Coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.



5. FREQUÊNCIAS NATURAIS PARA PILARES DE CONCRETOS AUTOCICATRIZANTES

Nesta etapa, as equações desenvolvidas para as frequências foram analisadas para estruturas cujos pilares são compostos por concretos autocicatrizantes. A Figura 4 traz os intervalos de frequências $f_1 = |f_2|$ e $f_3 = |f_4|$, para diferentes configurações de estruturas compostas pelos concretos descritos na Tabela 3. Para esta análise considerou-se $a = 0,15\text{m}$, $L = 3,2\text{m}$ e $n = 4$.



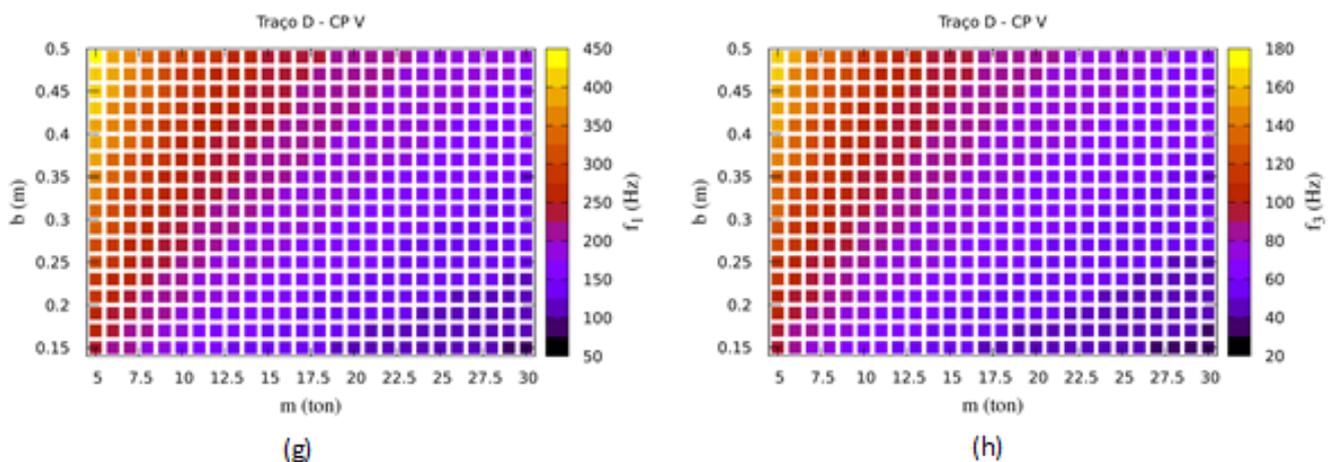


Figura 4 - Frequências Naturais de Vibração (f_1 e f_3) para estruturas com 2GDL compostas por concretos autocicatrizantes.
 Fonte Autor (2021)

Conforme pode-se observar na Figura 4, as frequências naturais de oscilação para pilares compostos por concretos autocicatrizantes, mantêm-se, para as configurações geométricas mostradas, de acordo com a recomendação da norma. Este resultado reforça a ideia de que esta classe de concretos pode ser usada para a concepção de estruturas com múltiplos graus de liberdade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou de uma modelagem matemática e computacional da dinâmica básica de uma estrutura com dois pavimentos. Através de um sistema massa-mola acoplado com 2GDL foi possível determinar as frequências naturais em termos dos parâmetros geométricos e físicos dos pilares que sustentam a estrutura.

Uma vez que concretos com maiores (menores) módulos de elasticidade são mais (menos) rígidos e normalmente são mais (menos) caros. Os resultados obtidos na primeira etapa, através do Método de busca dos Gradientes Conjugados, podem servir como uma primeira aproximação no processo de tomada de decisão relativa ao material a ser adotado para a composição dos pilares neste tipo de estrutura.

A análise realizada para os concretos autocicatrizantes também permitiu a determinação das frequências de vibração para diferentes configurações de estrutura. Em ambas as análises, os resultados atendem às recomendações da norma NBR-6118.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (2014).

ASTM C597 - Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, 2016.

QURESHI, T. S.; KANELLOPOULOS, Antonis; AL-TABBAA, Abir. **Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 629-643, 2016.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. (2003). Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 77-82, 2003.

Silva, Kyria Maria Alves da. **Análise de concretos autocicatrizantes ativados por agentes cristalino**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia Civil, Curso de Engenharia Civil, Marabá, 2020

TAKAGI, Emilio Minoru et al. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. **Concreto & Construções**, v. 41, n. 73, p. 75-79, 2014.

WANG, Xianfeng et al. A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 216-229, 2018.

WHITE, Scott R. et al. Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, v. 409, n. 6822, p. 794, 2001.



CAPÍTULO 2

GERAÇÃO E APLICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO DE BORRA DE CAFÉ DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA UFPE

PRODUCTION AND APPLICATION OF COFFEE GROUNDS' SOLID
RESIDUE FROM UFPE'S CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT

Aurian Moura de Lira

Rayana Luiza Silva

Fábio Estelita Silveira Ferreira

João Antônio Lima Pacheco

Ana Paula Lima Pacheco

Resumo

O descarte inadequado de resíduos sólidos é um sério problema ambiental e urbano, com consequências graves para o meio ambiente e para a sociedade. O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e durante seu processamento industrial é produzida uma quantidade significativa de resíduos, dentre os quais se destaca a borra de café, que também é gerada durante o preparo da bebida a partir do grão tostado e moído. A borra de café é um resíduo normalmente descartado, sendo pouco reaproveitado. No entanto, possui potencial para ser utilizado em diversas aplicações. Neste trabalho foi realizado um levantamento da quantidade de borra de café gerada no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (DEQ-UFPE). A borra de café foi coletada por uma semana em diferentes setores do DEQ onde a bebida é preparada com frequência. Após 7 dias, a quantidade de borra coletada foi de 10,17Kg (~530Kg/ano). Como sugestão de aplicação, parte da borra de café gerada no DEQ foi utilizada como esfoliante para um sabão artesanal preparado com óleo de fritura e garrafa PET. Os sabões preparados apresentaram boa consistência, pH adequado e boa capacidade de produção de espuma. Sendo assim, foi sugerida uma alternativa sustentável para a borra de café, o óleo de frituras e as garrafas PET.

Palavras-chave: Sustentável, Óleo, PET, Esfoliante, Sabão.

Abstract

The inadequate discard of solid residue is a serious urban and environmental problem, with disastrous consequences for the environment and for the society. Coffee is one of the world's most consumed beverages and during its industrial processing, a significant number of residues is produced, among which the coffee ground stands out and is also produced during the brewing of the beverage from the toasted and ground coffee beans. The coffee ground is a normally discarded residue, hardly being reused. Nevertheless, it has shown some potential for being used in various uses. In this research, a survey was made about the amount of coffee grounds produced in the Federal University of Pernambuco's Chemical Engineering Department (DEQ-UFPE). The coffee grounds were collected for a week from different sectors of the department where the beverage is frequently made. After 7 days, the amount of coffee grounds collected was 10.17Kg (~530Kg/year). As a use suggestion, the coffee ground collected in the department was used as an exfoliating agent for a handmade soap prepared with frying oil and PET bottles. The soap made showed a good consistency, adequate pH and a good foam production. Therefore, a sustainable alternative was suggested for the coffee grounds, as well for the frying oil and PET bottles.

Key-words: Sustainable, Oil, PET, Exfoliating, Soap.



1. INTRODUÇÃO

Durante a história da humanidade, o ser humano sempre realizou atividades geradoras de resíduos. No entanto, com a revolução industrial, o aumento da população e a mudança nos hábitos de consumo, houve um aumento significativo na produção de lixo nos centros urbanos. O lixo gerado costuma ser descartado de forma inadequada, o que contribui para a poluição ambiental e proliferação de doenças, afetando a qualidade de vida da população e contribuindo com alterações ambientais significativas, como o aquecimento global. A crescente quantidade de lixo produzida e o descarte inadequado do lixo tornaram-se sérios problemas urbanos e ambientais. É preciso buscar alternativas sustentáveis para a destinação dos resíduos, visando a diminuição dos impactos ambientais causados pelo lixo descartado da forma incorreta (DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2015; GARCIA *et al*, 2015; CONCEIÇÃO; JÚNIOR, 2020).

O café é, atualmente, a segunda maior commodities global. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de café, tendo produzido, no ano-safra 2017/18, 51 milhões de sacas. Aproximadamente 90 % do café consumido se torna resíduo sólido, sendo grande parte em forma de borra (MAGNAGO *et al*, 2019).

A borra de café pode ser reaproveitada de diferentes maneiras, porém é frequentemente descartada, podendo causar impactos ambientais. Este trabalho teve como objetivo fazer um levantamento da quantidade de borra de café gerada no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco e a produção de um sabão artesanal com borra de café, óleo de fritura e garrafa PET como alternativa para destinar corretamente esta borra de café.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A problemática dos resíduos sólidos no Brasil

A industrialização, o crescimento demográfico e a urbanização impulsionaram a geração de resíduos sólidos no Brasil. O aumento da população urbana no Brasil foi influenciado por fatores como: a não distribuição de terras agropecuárias, a heterogeneidade da mecanização agrícola, o êxodo rural e o aumento da industrialização no país, principalmente a partir da década de 1950. O inchaço das cidades e o descaso com o saneamento básico, principalmente com a gestão de resíduos, resultaram em uma urbanização caótica (SILVA *et al*, 2020). O Brasil, como país em desenvolvimento, precisa investir na gestão de resíduos sólidos, possibilitando a criação de estratégias que permitam o progresso do fortalecimento da infraestrutura do país (DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2015)

A lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define diretrizes e objetivos, buscando estimular a prevenção e redução na geração de resíduos (CREUTZBERG; FERRARI, ENGELAGE, 2019). Mesmo possuindo uma das legislações mais modernas do mundo quanto à gestão de resíduos sólidos, o



Brasil ainda enfrenta sérios problemas devido ao descarte inadequado desses resíduos. O PNRS estabeleceu como uma das metas a extinção dos lixões até ano de 2014, o que infelizmente não aconteceu, assim como outras ações de aprimoramento na gestão de resíduos não foram executadas (TEODÓSIO; DIAS; SANTOS, 2016).

Apesar dos problemas citados, resíduos sólidos que possuem valor econômico reconhecido, como plástico, metal, vidro e papel, recebem o mínimo de atenção quanto às questões ambientais, sociais e econômicas relacionadas enquanto milhões de toneladas de resíduos orgânicos são descartadas de forma inadequada todos os dias, pela falta de conhecimento sobre seu potencial econômico, ambiental e social (ZAGO; BARROS, 2019). A borra de café é um exemplo de resíduo sólido orgânico comumente descartado devido à falta de conhecimento sobre seu potencial.

2.2 Café: a importância da bebida e o sabão artesanal esfoliante como alternativa para reaproveitamento da borra de café

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, possuindo um parque cafeeiro de 2,2 milhões de hectares, que se encontram espalhados por 15 estados, sendo que Minas Gerais e Espírito Santo são responsáveis por 75 % da produção no país (DURÁN *et al*, 2017). O café é a segunda bebida mais consumida no país, atrás apenas da água. O consumo brasileiro per capita anual é de 6,12 Kg de café verde em grão, o equivalente a 4,9 Kg de café torrado e moído ou 81 litros de bebida por ano (SANTOS *et al*, 2020).

No processo de produção, o café é torrado e moído e em seguida é realizada uma extração onde a parte solúvel segue para a produção do café solúvel e a parte insolúvel constitui a borra de café, que é produzida em quantidades consideravelmente significativas, sendo que para cada tonelada de café verde são obtidos aproximadamente 480 Kg de borra (GARCIA; BIANCHI, 2015). O termo borra de café se refere tanto aos resíduos produzidos na indústria do café solúvel quanto aos resíduos gerados durante o preparo da bebida nas cafeterias e residências (SANTOS *et al*, 2020).

A borra de café possui partículas finas, alto teor de umidade, acidez e carga orgânica, com presença de polissacarídeos, proteínas, carboidratos, cafeína, aminoácidos e polifenóis, além de minerais. Extratos de borra de café apresentam atividade antirradiar, antioxidante e antitumoral, cujas propriedades podem ser atribuídas à presença de compostos fenólicos, como os clorogênicos, embora estejam em menor quantidade que na polpa e na casca. Devido à presença de bioativos na borra de café, há interesse em sua aplicação para obter extratos ricos que podem ser utilizados como material de partida para o desenvolvimento de novos produtos (PUERTAS-MEJIA; VILLEGAS-GUZMAN; ALBERTO ROJANO, 2013).

Apesar de ser frequentemente descartada, a borra de café pode ser utilizada em diversas aplicações, como: adubo para plantações; fonte de energia na própria indústria de café, sendo utilizada nas caldeiras; extração de óleos vegetais com solventes, e fabricação de biscoitos na indústria alimentícia. Devido a suas propriedades esfoliantes, a borra de café também tem sido utilizada na indústria de cosméticos (CABRAL, MORIS, 2010).



No contexto apresentado, a produção de sabão esfoliante artesanal com óleo de fritura, borra de café e garrafa PET apresenta-se como uma alternativa viável para a reutilização da borra de café, além de possibilitar o reuso de garrafas PET e apresentar-se como uma destinação sustentável para o óleo utilizado em frituras, que costuma ser descartado de forma inadequada, poluindo as águas e o solo.

3. METODOLOGIA

3.1 Levantamento da produção de borra de café no DEQ-UFPE

Para realizar uma estimativa da quantidade de borra de café gerada no Departamento de Engenharia Química da UFPE (DEQ-UFPE), inicialmente foram verificados os locais onde a bebida foi produzida pela filtração do pó de café. Os pontos onde a bebida foi produzida a partir do café solúvel foram descartados da coleta, pois nesses casos não há a geração de borra. Foram identificados sete pontos para coleta da borra. Estipulou-se período de uma semana para coleta da borra, em sacos plásticos, e posterior pesagem. A partir dos valores obtidos foi possível realizar uma estimativa da produção de borra de café mensal e anual no DEQ.

3.2 Produção do sabão artesanal esfoliante com borra de café

O sabão foi preparado seguindo a metodologia de Pacheco e colaboradores (2019), onde em uma garrafa PET adicionou-se 100 mL de óleo pré-aquecido. Em um recipiente de vidro, adicionou-se 26 mL de água morna e 10g de soda cáustica. Metade da solução de soda foi transferida para dentro da garrafa com o óleo. Agitou-se vigorosamente por 3 minutos e acrescentou-se a outra metade da solução de soda, mais 5 mL de etanol (álcool de uso doméstico), 20 mL de vinagre e, em seguida, borra de café nas seguintes quantidades: 1 g, 3 g, 5 g, 10 g, 20 g, e 30 g. Após a adição da borra de café agitou-se vigorosamente por mais cinco minutos. Um padrão de sabão, sem adição de borra, também foi preparado seguindo a mesma metodologia para fins de comparação. Os sabões foram deixados em repouso por uma semana, para solidificar, sendo retirados da garrafa para avaliação da consistência, do pH e da capacidade de produção espuma.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Levantamento da produção de borra de café no DEQ-UFPE

As amostras de borra de café foram recolhidas em diferentes pontos do DEQ-UFPE, que foram detectados como locais com produção de borra de café como resíduo. Em todos os locais escolhidos para a coleta da borra de café, ela era descartada como resíduo orgânico, sem nenhum reaproveitamento. Após o mapeamento dos locais, foram distribuídas sacolas plásticas para recolhimento da borra de café, como mostra a figura 1.





Figura 1 - Identificação do local, para recolhimento da borra de café, nos pontos de coleta
Fonte: Os autores

Após 7 dias, a massa de borra de café, obtida em cada ponto de coleta, foi pesada e seus valores encontram-se na tabela 1, a seguir.

Considerando que para um período de 7 dias a massa de café obtida foi igual a 10,17 kg, foi possível fazer uma estimativa da quantidade de borra de café gerada durante os períodos de um mês e um ano sendo os valores obtidos iguais a, respectivamente, 43,59 kg e 523 kg. É preciso salientar que por se tratar de uma estimativa, os valores aqui apresentados podem sofrer variações, principalmente durante períodos como feriados prolongados e férias dos estudantes. Um estudo mais detalhado e prolongado seria necessário para a obtenção de dados mais precisos.

| Ponto de coleta | Massa (g) |
|-----------------|-----------------|
| 1 | 637,17 |
| 2 | 370,08 |
| 3 | 4301 |
| 4 | 495,36 |
| 5 | 614,38 |
| 6 | 3048,55 |
| 7 | 703,98 |
| TOTAL | 10170,52 |

Tabela 1- Resultado das pesagens de borra de café coletada
Fonte: Os autores

A partir dos dados obtidos é possível observar que a quantidade de massa de borra de café produzida no DEQ-UFPE é bastante expressiva. Considerando que toda a borra é descartada junto ao lixo orgânico se torna relevante pensar em alternativas para o re-

aproveitamento da borra de café, principalmente devido ao seu potencial já apresentado neste trabalho. Nesse contexto, apresentamos a produção de sabão esfoliante com borra de café para reaproveitamento do resíduo, considerando a propriedade esfoliante apresentada pelos grãos da borra de café. Entretanto, é importante ressaltar que a quantidade de borra de café utilizada para a produção do sabão esfoliante não é suficiente para utilizar toda quantidade de borra de café que foi recolhida. Dessa forma, se torna necessário pensar em alternativas, como a compostagem, para o reaproveitamento da borra de café.

4.2 Produção do sabão artesanal esfoliante com borra de café

Os sabões esfoliantes foram preparados com amostras da borra de café coletada no DEQ-UFPE. Na figura 2 podemos observar a produção do sabão, nas garrafas PET, na etapa de endurecimento deles. Da esquerda para direita, podemos ver o sabão padrão sem borra de café e com as massas de borra de 1g, 3g, 5g, 10g, 20g e 30g respectivamente.



Figura 2 - Sabão, nas garrafas PET, da esquerda para direita, sabão padrão sem borra de café e com borra de 1g, 3g, 5g, 10g, 20g e 30g, respectivamente
Fonte: Os autores

Além das garrafas PET, também foram confeccionados sabões em formatos de unicórnio. Foi utilizada glicerina, para untar as formas de unicórnio e facilitar o desmoldar na retirada dos sabões. O formato diferenciado valorizou o produto, tornando-o mais atrativo. Na figura 3 é possível observar os sabões produzidos nas garrafas PET e nas formas de unicórnio já endurecidos e desmoldados.



Figura 3 - Sabões produzidos nas garrafas PET e nas formas de unicórnio já endurecidos e desenformados
Fonte: Os autores

Na figura 3, os sabões foram ordenados pela quantidade de café acrescentada, de forma que a quantidade de café aumenta da esquerda para a direita. Dessa forma, é possível observar que os sabões com maior quantidade de borra de café apresentaram coloração mais escura. Nos testes realizados, no laboratório, observou-se que o acréscimo da borra interferiu no aroma dos sabões, tornando-o mais agradável.

O pH dos sabões ficou na faixa de 8 e 9 (Figura 4) e o sabão com maior quantidade de borra de café apresentou o menor pH (8) devido ao equilíbrio com o pH 5 medido da borra de café.

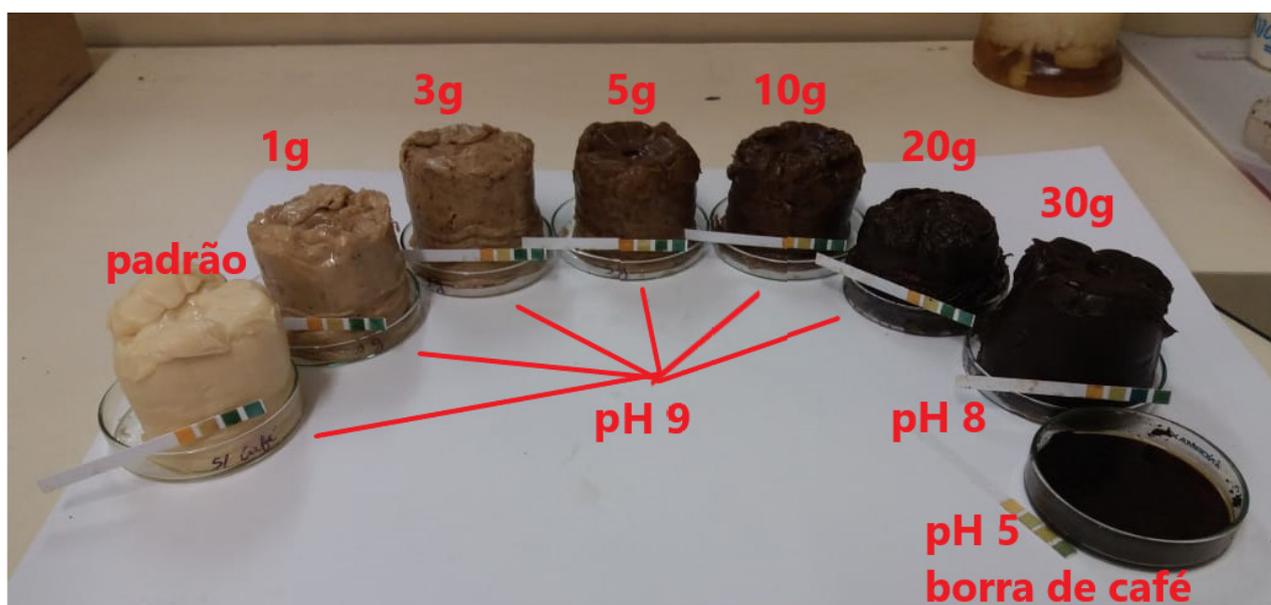


Figura 4 - pH dos sabões sem borra de café (padrão) e esfoliantes com borra de café nas massas de 1g, 3g, 5g, 10g, 20g e 30g
Fonte: Os Autores

A figura 5 mostra o teste da espuma onde foi possível observar que os sabões apresentaram boa capacidade para produzir espuma. De acordo com o valor do pH, os sabões

produzidos se enquadram nas exigências da ANVISA para uso doméstico (RDC Nº 59, 2010). No entanto, para que o sabão possa ser utilizado para fins cosméticos, são necessários outros testes para garantir a segurança do produto.



Figura 5 - Capacidade de produção de espumas: (A) padrão sem borra de café; (B) 1g, (C) 3g, (D) 5g, (E) 10g, (F) 20g e (G) 30g de borra de café
Fonte: Os autores

5. CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, observou-se que a quantidade de borra de café produzida no DEQ-UFPE é bastante expressiva, porém o resíduo é descartado junto com os outros resíduos orgânicos, não sendo reaproveitado. Devido às propriedades da borra de café o seu reaproveitamento é viável, sendo relevante pensar em alternativas mais sustentáveis para a destinação desse resíduo. Os sabões artesanais esfoliantes, apresentaram aroma agradável, boa consistência, adequado valor de pH, sendo uma alternativa viável e sustentável para a reutilização da borra. No entanto, a quantidade de borra utilizada no sabão ainda é pequena em relação à massa total produzida, sendo necessário propor novas alternativas para destinação adequada da borra.

Referências

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em 12/06/2020.

BRASIL. **Resolução RDC/ANVISA n. 59, de 17 de dezembro de 2010**. Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=113534/>>. Acesso em: 20 mai. 2021.

CABRAL, M. S.; MORIS, V. A. S. **Reaproveitamento da borra de café como medida de minimização da geração de resíduos**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos, Brasil, 12 de outubro de 2010.

CREUTZBERG, R.; FERRARI, M. J.; ENGELAGE, E. Análise de Custos e do Impacto Ambiental no Descarte de Resíduos Sólidos. **ABCustos**, São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, v. 14, n. 1, p. 01-28, 2019.

- CONCEIÇÃO, M. M. M.; JÚNIOR, A. P. Plano de gerenciamento de resíduos sólidos em uma instituição de ensino superior. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 77-91, 2020.
- GARCIA, L. R. P.; BIANCHI, V. L. D.; Capacidade antioxidante em resíduos da indústria cafeeira. **Brazilian Journal of food Technology**, v. 18, n. 4, p. 307 – 313, 2015. -
- GARCIA, M. B. DOS S.; NETO, J. L.; MENDES, J. G.; XERFAN, F. M. DE F.; DE VASCONCELOS, C. A. B.; FRIEDE, R. R. Resíduos sólidos: responsabilidade compartilhada. **Semioses**, v.9, n.2, 2015.
- DEUS, R. M.; BATTISTELLE, R. A. G.; SILVA, G. H. R. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n.4, 2015.
- DOS SANTOS, S. T. O.; JÚNIOR, C. M. V.; DA SILVA, A. N.; JÚNIOR, A. F. DO N.; DRUMMOND, A. R. F.; DA SILVA, S. P. R. Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 48662-48670, jul. 2020.
- DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 107 – 134, 2017.
- MAGNAGO, R. F.; GARCIA, G. D.; MARQUES, D. V.; PEDROSO, I. D.; HERMANN, K. A. C.; PEREIRA, N. R. L.; MAZON, S. P.; COSTA, S. C. Combustível sólido a partir de biomassa residual de borra de café, casca de arroz e casca de batata. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 43 – 53, 2019
- PACHECO, J. A. L.; GONÇALVES, J. B.; CRUZ, K. G. S.; PACHECO, A. P. L. **Reciclagem de óleo de cozinha usado para a produção de sabão: foco na educação ambiental**. EPERSOL: eixo temático – Educação ambiental e boas práticas, 2019.
- PUERTAS-MEJIA, M. A; VILLEGAS-GUZMAN, P; ALBERTO ROJANO, B. Borra de café colombiano (Coffea arabica) como fuente potencial de sustancias con capacidad antirradicales libres in vitro. **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v.18, n.3, p.469-478, 2013.
- SANTOS, R. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de um sabonete contendo borra de café**. Dissertação de mestrado. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2016.
- SILVA, M. M. N.; CARVALHO, C. C. A.; LIMA, O. de F.; ALVES, L. DA S. F. Análise da gestão de resíduos sólidos na região Nordeste do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, 2020.
- TEODOSIO, A. S. S.; DIAS, S. F. L. G.; DOS SANTOS, M. C. Procrastinação da política nacional de resíduos sólidos: catadores, governos e empresas na governança urbana. **Ciência e cultura**, v.68, n.4, 2016.
- ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. DE U. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.24, n.2, p. 219 – 228, 2019.

CAPÍTULO 3

SOLUÇÃO DESCENTRALIZADA PARA O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO MULTIÁREA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO EVOLUTIVO MULTI OBJETIVO

DECENTRALIZED SOLUTION FOR THE MULTI-AREA OPTIMAL
POWER FLOW PROBLEM USING MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY
ALGORITHM

Elizete de Andrade Amorim

José Roberto Sanches Mantovani

Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Resumo

Neste trabalho é proposta uma solução descentralizada para o problema de Fluxo de Potência Ótimo multiárea (FPOM). A solução é determinada analisando cada área de um sistema de potência interconectado de maneira independente, buscando preservar a autonomia de cada área, contribuindo assim para o aumento da competitividade. Neste contexto, o problema de Fluxo de Potência Ótimo é convertido em subproblemas equivalentes, e controlados através dos fluxos de potência aparente entre as linhas que interligam as áreas do sistema multiárea. O problema de FPOM considera a minimização de três funções objetivos conflitantes, que estão relacionadas com o custo da geração, emissão de gases poluentes e com as perdas elétricas. Os subproblemas equivalentes são resolvidos com a aplicação de um algoritmo evolutivo multiobjetivo desenvolvido considerando a teoria de Pareto. Para contornar os problemas de infactibilidades que podem ocorrer após a execução dos operadores genéticos, as restrições de desigualdades são tratadas como funções objetivos que devem ser minimizadas. Os resultados obtidos, que são apresentados neste trabalho, demonstram a eficiência e robustez do modelo descentralizado implementado e da técnica de solução aplicada no processo de busca da solução do problema.

Palavras chave: Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo, Despacho Econômico Ambiental, Fluxo de Potência Ótimo, Nondominated *Sorting Genetic Algorithm II*, Sistema de Potência Interconectado Multiárea.

Abstract

In this work a decentralized solution of Multi-Area Optimal Power Flow (MOPF) problem is presented. The solution is determined by analyzing each area of an interconnected power system in an independent manner, seeking to preserve the operational autonomy of each area, thus contributing to increased competitiveness. The Optimal Power Flow problem is converted into equivalent and controlled sub problems through the control of apparent power flow between the interconnecting lines of the multi-area system. The MPOF problem considers the minimization of three conflicting objective functions, which are related to the cost of generation, emission of polluting gases and electrical losses. The equivalent sub problems are solved with a multi-objective evolutionary algorithm considering the Pareto theory. To circumvent the problems of infeasibility that may occur after the execution of genetic operators, inequality constraints are treated as objective functions that must be minimized. The results obtained demonstrate the efficiency and robustness of the implemented decentralized model and the solution technique used.

Key-words: Multi-objective Evolutionary Algorithm, Environmental/Economic Power Dispatch, Optimal Power Flow, Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, Multi-area Interconnected Power System.



1. INTRODUÇÃO

Na operação do sistema de energia a eficiência econômica pode ser obtida através do problema de despacho econômico (DE). O DE um caso particular do problema de FPO, que consiste em minimizar o custo total da geração, enquanto restrições de igualdade e de desigualdade são satisfeitas (CHOWDHURY e RAHMAN, 1990). Quando se tem por objetivo do problema, além da minimização do custo de geração, a minimização de poluentes na atmosfera, trata-se de um problema de despacho econômico e ambiental (DEA) (ABIDO, 2006; DHILLON et al., 1998; HAZRA e SINHA, 2011; RADOSAVLJEVIC, 2016; VENKATESH e KWANG, 2008). Essa abordagem é importante porque apresenta um maior comprometimento ecológico.

Em um sistema de potência de grande porte, geralmente, os geradores estão distribuídos em várias áreas conectadas fisicamente por linhas de interconexão e frequentemente operados por operadores independentes do sistema (OISs). Um OIS possui todas as informações de sua área de controle, mas não pode ter informações de outras áreas, como por exemplo, as condições de operação.

O despacho econômico multiárea (DEM) é uma extensão do problema de DE, e consiste em minimizar o custo total de combustível em todas as áreas, enquanto satisfaz as equações de balanço de potências ativa e reativa, os limites de geração e os limites dos fluxos de potência nas linhas de interconexão entre as áreas ou subsistemas.

O problema de FPOM de sistemas interconectados de grande porte pode ser decomposto em subproblemas, que são resolvidos de maneira coordenada. Desta forma, o controle dos subsistemas pode ser compartilhado pelos centros de controles das empresas que fazem parte do sistema interligado, e cada uma dessas empresas é responsável pela operação de sua área ou subsistema. A coordenação é necessária porque as configurações escolhidas por uma empresa possivelmente influenciam o estado de todo o sistema e, portanto, das áreas.

Diversas técnicas de decomposição têm sido propostas para a decomposição do problema de FPOM. Os autores do trabalho apresentado em (ZHAO and ABUR, 2004) propõem um método de decomposição baseado nos fatores de distribuição de transferência de potência, para determinar a máxima transferência de potência entre as áreas e resolver o problema de FPOM linear de forma descentralizada. Desta forma, a máxima transferência de potência do sistema integrado é calculada, mas as áreas não compartilham suas informações operacionais.

Entre os métodos de decomposição dual, a abordagem mais clássica é baseada na técnica de relaxação do lagrangiano (CONEJO e AGUADO, 1998; AGUADO et.al. 1999; NOGALES et al. 1999). Outras abordagens para a decomposição do problema de FPOM são baseadas no princípio do problema auxiliar (PPA). O PPA permite determinar a solução do problema original, através da solução de uma sequência de problemas auxiliares (COHEN, 1980). Os autores dos trabalhos apresentados em (KIM e BALDICK, 1997) e (BALDICK et al., 1999) utilizam o PPA com o objetivo de paralelizar a solução do problema de FPOM. Para a solução do problema de FPOM descentralizado, geralmente têm-se



utilizado as técnicas de programação clássicas, tais como, o método de pontos interiores (LU, et al., 2018; AGUADO et al., 1999) e programação quadrática (BAKIRTZIS e BISKI, 2003).

Neste trabalho, o problema de DEA considerando múltiplas áreas interconectadas é resolvido de forma descentralizada. Para a solução descentralizada, o problema é dividido em subproblemas associados a cada área. Os subproblemas menores são resolvidos de forma coordenada, utilizando os dados de rede de suas áreas e informações das barras de fronteiras associadas às linhas de interconexões.

Para solução do problema descentralizado, é utilizada uma adaptação do algoritmo NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*), proposto em (DEB et al., 2002). No entanto, quando o problema de otimização é restrito, os operadores originais dos algoritmos evolutivos (AEs) não garantem a obtenção de soluções viáveis. De acordo com (LENIVE, 1997) a solução de problemas desta classe limita o uso dos AEs em sua forma original, principalmente pelo fato de não existir a garantia de que a factibilidade seja mantida após a recombinação ou a mutação.

Para contornar este problema, considera-se que as restrições de desigualdade violadas, sejam tratadas como funções objetivo do problema que devem ser minimizadas (AMORIM et al., 2010), atendendo as restrições físicas e operacionais do problema, sem comprometer a qualidade das soluções encontradas.

A eficiência e a robustez, da metodologia e da técnica de solução propostas, são demonstradas através de resultados obtidos com o sistema teste IEEE-354 barras.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de FPOM proposto consiste no despacho econômico e ambiental de energia elétrica, isto é, consiste em minimizar duas funções objetivo conflitantes, o custo de combustível e a emissão de gases poluentes na atmosfera, enquanto satisfaz o conjunto de restrições físicas e operacionais. No entanto, a otimização da potência reativa do sistema de potência influencia diretamente a estabilidade do sistema e na qualidade da energia, requerendo a minimização das perdas de potência ativa do sistema. Desta forma, é possível melhorar o desempenho do sistema através do despacho de potência ativa.

2.1. Modelo centralizado

2.1.1 Funções objetivo

a) Minimização do custo da geração

O custo total de combustível incluindo o efeito de válvula é descrito matematicamente através da equação (1):



$$F_1 = \sum_{i=1}^{N_G} \left[a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + \left| e_i \times \text{sen} \left(f_i \times (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}) \right) \right| \right] \quad (1)$$

Sendo:

F_1 : Custo total de combustível da i -ésima unidade geradora;

P_{Gi} : Potência ativa gerada pela i -ésima unidade;

a_i, b_i, c_i : Coeficientes de custo do i -ésimo gerador térmico;

e_i, f_i : Coeficientes de custo para o efeito do ponto de carregamento de válvula;

N_G : Número de geradores térmicos.

b) Minimização das emissões de gases poluentes

A geração de energia elétrica, a partir de fontes de energia térmicas convencionais, emite gases poluentes ao meio ambiente. Quanto maior a potência gerada através de geradores térmicos, maior será a emissão de Óxidos de Enxofre (SO_x) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x). A equação 2 permite quantificar a emissão de poluentes em toneladas por hora (t/h):

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_G} \left[0,01 \times (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \omega_i e^{(\mu_i P_{Gi})} \right] \quad (2)$$

Sendo:

F_2 : Custo total de emissão de gases poluentes;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \omega_i, \mu_i$: Coeficientes de todas as emissões correspondente ao i -ésimo gerador térmico.

c) Minimização das perdas de potência ativa

As perdas de potência ativa na rede de transmissão são calculadas de acordo com (3):

$$F_3 = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_L} G_{ij} \left(V_i^2 + V_j^2 - 2|V_i||V_j|\cos(\delta_{ij}) \right) \quad (3)$$



Sendo:

δ_{ij} : Diferença angular entre as barras i e j ;

G_{ij} : Condutância da linha conectada entre as barras i e j ;

V_i, V_j : Magnitudes das tensões nas barras i e j .

2.1.2. Restrições de igualdade

As restrições de igualdade representam as restrições de balanço de potência ativa e reativa nas barras do sistema, dadas em (4) e (5), respectivamente. Essas restrições são resolvidas através do método de Newton Raphson (Monticelli, 1983), para gerar uma solução para o problema de fluxo de carga.

$$P_{Gi} - P_{Ci} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Ci} - V_i \sum_{j=1}^{NB} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0 \quad (5)$$

Sendo:

NB : Número de barras do sistema;

P_{Ci}, Q_{Ci} : Potências ativa e reativa consumida na barra i , respectivamente;

B_{ij} : Susceptância da linha de transmissão ou transformador entre as barras i e j .

2.1.3. Restrições de desigualdade

Estas restrições representam os limites operacionais dos equipamentos, componentes do sistema de energia e restrições de segurança em linhas e barras de cargas.

a) Restrições físicas e operacionais

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (6)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (7)$$

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max}, \quad i = 1, \dots, N_G \quad (8)$$

$$T_i \in D_{T_i}, \quad i = 1, \dots, N_T \quad (9)$$

$$B_i \in D_{B_i}, \quad i = 1, \dots, N_{sh} \quad (10)$$

As equações (6) - (7) representam os limites da geração de potências ativa (P_{Gi}) e reativa (Q_{Gi}), respectivamente. Os limites de tensão nas barras de geração (V_{Gi}) são definidos na equação (8). As equações (9) e (10) representam os valores discretos para os *taps* dos transformadores (T_i) e bancos de capacitores/reatores *shunt* (B_i). Nessas equações, os conjuntos de valores discretos para as variáveis T_i e B_i são representados por D_{T_i} e D_{B_i} , respectivamente. Além disso, N_T representa o número de transformadores com controle automático de *taps* e N_{sh} define o número de barras com bancos de capacitores/reatores *shunt*.

b) Restrições de segurança

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max}, \quad i = 1, \dots, N_L \quad (11)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{max}, \quad ij = 1, \dots, N_l \quad (12)$$

As equações (11) e (12) representam os limites de tensão nas barras de carga (V_{Li}) e da capacidade de potência aparente das linhas de transmissão (S_{ij}). Nessas equações, N_L e N_l representam os números de barras de carga e de linhas de transmissão.

O conjunto de variáveis de controle do problema (1)-(12) é determinado através do algoritmo de otimização, e formado por quatro subconjuntos de variáveis. A seguir apresentam-se as variáveis de controle do problema (1)-(12):

- Potência ativa gerada, exceto para a barra de referência;
- Magnitude de tensão nas barras de geração;
- *Taps* dos transformadores nas linhas do sistema;
- Banco de capacitores/reatores *shunt*.

A potencia ativa gerada e as magnitudes de tensão nas barras de geração são tratadas como variáveis contínuas, enquanto os *taps* do transformadores e os bancos de capacitores/reatores *shunt* são modelados como variáveis discretas. Para cada uma dessas variáveis, o algoritmo de otimização seleciona um valor factível que deve estar entre os limites inferior e superior preestabelecidos.



Os conjuntos de variáveis de estado para o problema (1)-(12) são apresentados a seguir:

- Potência ativa gerada na barra de referência;
- Magnitude de tensão nas barras de carga;
- Potencia reativa gerada;
- Fluxo de potência aparente.

O tratamento das restrições de desigualdade para estas variáveis é discutido na seção 3.

2.2. Modelo descentralizado

Na Figura 1 apresenta-se um sistema de potência com duas áreas interconectadas para ilustrar o princípio da decomposição. As barras i e j são denominadas barras de fronteiras e as linhas entre estas barras são as linhas de interconexão (AMORIM, 2006).

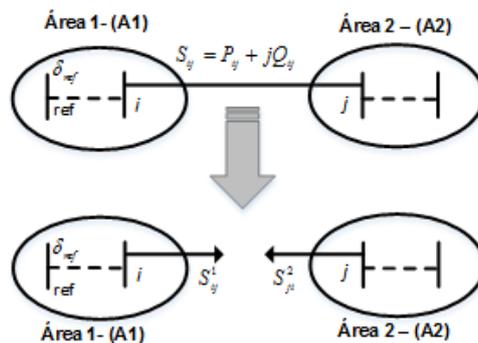


Figura 1: Princípio da Decomposição

O FPO regional é obtido convertendo-se o problema (1)-(12) em um problema equivalente, através da adição de $2 \times N_{ties}$ novas variáveis, isto é, para cada linha de interligação ij ($i \in A1$ e $j \in A2$), adicionam-se duas novas variáveis S_{ij}^1 e S_{ji}^2 que representam os fluxos da linha de interligação da área A1 para a área A2 e, da área A2 para a área A1, como mostrado na Figura 1. N_{ties} representa o número de linhas de interligação. O problema equivalente para a área a , $a \in \{A1, A2\}$ é dado por:

$$\text{Min } F_i^a(x^a, u^a), \quad i = 1, \dots, N_{obj} \quad (13)$$

Sujeito a:

$$g(x^a, u^a) = 0 \quad (14)$$

$$h(x^a, u^a) \leq 0 \quad (15)$$

$$x_{min}^a \leq x^a \leq x_{max}^a \quad (16)$$

$$u_{Cmin}^a \leq u_C^a \leq u_{Cmax}^a \quad (17)$$

$$u_D^a \in D^a \quad u_D^a \in D^a \quad (18)$$

$$S_{Fik} - S_{Fjk} = 0, \quad i \in a, \quad k \in k_a \quad (19)$$

Sendo:

x^a : Vetor das variáveis de estado da área a ;

$u^a = [u_C^a \quad u_D^a]$: Vetor que contém as variáveis de controle contínuas (u_C^a) e as variáveis de controle discretas (u_D^a) da área a ;

D^a : Região de factibilidade das variáveis de controle discretas da área a ;

$F_i^a(x^a, u^a)$: Funções objetivo da área a ;

$g(x^a, u^a)$: Equações de balanço de potências ativa e reativa para a área a ;

$h(x^a, u^a)$: Conjunto de restrições de desigualdade;

x_{min}^a, x_{max}^a : Vetores dos limites inferior e superior de x^a , respectivamente;

u_{Cmin}^a, u_{Cmax}^a : Vetores dos limites inferior e superior de u_C^a , respectivamente;

k_a : Conjunto das barras de fronteira pertencente as áreas vizinhas da área a ;

S_{Fik} : Fluxo potência aparente entre as áreas.

A equação (19) representa a condição de que as variáveis das barras de fronteira das duas áreas tenham os mesmos valores. Esta característica permite resolver o problema de despacho econômico e ambiental para uma determinada área, sem interferir nas variáveis de controle das áreas que não estão sendo otimizadas. O fluxo potência aparente entre as áreas é determinado através da equação (20).

$$S_{Fik} = P_{Fik} + j Q_{Fik} \quad i \in a, \quad k \in k_a \quad (20)$$

A principal característica do método é que, globalmente, apenas exige a troca de informações das variáveis de fronteira, já que os intercâmbios entre as áreas são controlados através dos fluxos de potências aparente das linhas de interligações. Além disso, não necessita alterações no modelo original da rede.



A área que contém a barra de folga do sistema de potência é denominada área de referência. Para resolver o problema de FPO multiárea para as demais áreas do sistema de potência, faz-se necessário determinar uma barra de geração que deverá exercer a função de uma barra de folga na área que está sendo otimizada.

3. ANÁLISE DAS RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE

A presença de restrições de igualdade e desigualdade introduz uma complexidade adicional para resolver problemas de otimização, através de algoritmos evolutivos, porque divide o espaço de soluções em duas classes: soluções factíveis (que atendem a todas as restrições simultaneamente) e soluções infactíveis (que violam uma ou mais restrições).

Para atender as restrições físicas e operacionais, sem comprometer a qualidade das soluções encontradas propõe-se considerar o conjunto de restrições de desigualdade como funções objetivo do problema original. Desta forma, além de minimizar as funções objetivo do modelo satisfazendo as restrições de igualdade, as infactibilidades nas restrições de desigualdade também são minimizadas. As funções objetivo referentes as restrições de desigualdade violadas para cada área a , são dadas por:

a) Minimização da infactibilidade na geração de potência ativa na barra de referência

$$F_4^a = \Delta P_{Gref}^a, \Delta P_{Gref}^a = \begin{cases} P_{Gref} - P_{Gref}^{max}, & P_{Gref} > P_{Gref}^{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (21)$$

Sendo:

P_{Gref}, P_{Gref}^{max} : Potência ativa gerada e a capacidade máxima de geração na barra de referência.

b) Minimização da infactibilidade na geração de potência reativa

$$F_5^a = \sum_{i \in a}^{N_G} \Delta Q_{Gi}^a, \Delta Q_{Gi}^a = \begin{cases} Q_{Gi}^{min} - Q_{Gi}, & Q_{Gi} < Q_{Gi}^{min} \\ Q_{Gi} - Q_{Gi}^{max}, & Q_{Gi} > Q_{Gi}^{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (22)$$

c) Minimização da ineficiência na magnitude de tensão nas barras de carga

$$F_6^a = \sum_{i \in \alpha} \sum_{l=1}^{N_L} \Delta V_{Li}^a, \Delta V_{Li}^a = \begin{cases} V_{Li}^{min} - V_{Li}, & V_{Li} < V_{Li}^{min} \\ V_{Li} - V_{Li}^{max}, & V_{Li} > V_{Li}^{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (23)$$

d) Minimização da ineficiência na capacidade de potência aparente das linhas de transmissão

$$F_7^a = \sum_{ij \in \alpha} \sum_{ij=1}^{N_l} \Delta S_{ij}^a, \Delta S_{ij}^a = \begin{cases} S_{ij} - S_{ij}^{max}, & S_{ij} > S_{ij}^{max} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (24)$$

e) Minimização da ineficiência na capacidade de potência aparente entre as áreas

$$F_8^a = \sum_{\substack{ik=1 \\ i \in \alpha \\ k \in k_\alpha}}^{N_F} \Delta S_{Fik}, \Delta S_{Fik} = \begin{cases} |S_{Fik} - \Delta S_{Fki}|, & |S_{Fik} - \Delta S_{Fki}| \neq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (25)$$

Sendo N_F o conjunto das barras de fronteira.

4. ALGORITMO EVOLUTIVO MULTIOBJETIVO

A solução dos problemas regionais de FPOM é baseada no algoritmo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II). O NSGA-II (DEB, et al., 2002) é um algoritmo elitista que permite explorar apenas um subconjunto do espaço de busca no âmbito da otimização combinatória multiobjetivo, para determinar uma fronteira de Pareto mais próxima da ótima. Este algoritmo é amplamente utilizado em problemas restritos e complexos com variáveis reais e inteiras.

O algoritmo evolutivo multiobjetivo (AEMO) implementado para a solução do problema de FPOM utiliza os operadores de seleção por torneio, recombinação e mutação para criar novas populações capazes de gerar soluções melhores a cada geração. Para obter um melhor desempenho, o algoritmo implementado combina algumas estratégias, tais como, codificação das variáveis de controle em base real, desacoplamento implícito das variáveis de controle, taxas de recombinação e mutação adaptativas, seleção da melhor solução compromisso baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*. Estas estratégias são detalhadas a seguir:



4.1. População inicial

Os indivíduos (cromossomos) que compõem a população são formados por quatro subconjuntos de variáveis de controle do problema (potência ativa gerada por todos os geradores, exceto para a barra de referência, tensões nas barras com geradores conectados, incluindo a barra de referência, *taps* dos transformadores e banco de capacitores/reatores *shunt*).

A potência ativa gerada e as tensões são tratadas como variáveis reais e contínuas. Assim, os seus valores são gerados de forma aleatoriamente controlada e devem estar dentro dos limites mínimo e máximo do vetor de decisão. O j -ésimo componente do i -ésimo vetor de decisão é obtido através da Equação (26).

$$x_{ij}^0 = x_{min,j} + rand_{ij} [0,1](x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (26)$$

na qual $rand_{ij} [0,1]$ é um número aleatório uniformemente distribuídos entre 0 e 1. O sobrescrito '0' representa a inicialização. Se N_p é o tamanho da população e d é a dimensão do vetor de decisão das variáveis contínuas, então $i = 1, \dots, N_p$ e $j = (2N_c) + 1$.

Os *taps* dos transformadores e bancos de capacitores/reatores *shunt* são representados por valores discretos, de acordo com (27).

$$x_{Dij}^0 = x_{Dmin,j} + n_j(\Delta x_{Dj}), i = 1, \dots, N_p \quad (27)$$

Sendo j e $x_{Dmin,j}$ a dimensão de cada subconjunto e o limite inferior das variáveis discretas, respectivamente. Δx_{Dj} representa o tamanho do passo de discretização e n_j um número pseudoaleatório tal que $0 \leq n_j \leq K_j$ e $K_j = int\left(\frac{x_{Dmax,j} - x_{Dmin,j}}{\Delta x_{Dj}}\right)$. $x_{Dmax,j}$ representa o limite superior das variáveis discretas.

4.2. Desacoplamento implícito das variáveis de controle

As violações das restrições de desigualdades são tratadas como funções objetivo do problema e, ao atualizar um determinado conjunto de variáveis de controle através de recombinação ou mutação, um objetivo é melhorado em detrimento de outros. Desta forma, após sortear os indivíduos para executar a recombinação ou mutação, deve-se verificar qual dos objetivos está sendo contemplado e efetuar a recombinação ou mutação considerando apenas o(s) subconjunto(s) de variáveis de controle que interferem diretamente neste objetivo.

4.3. Taxas de recombinação e mutação adaptativa

Para preservar a diversidade da população em algoritmos evolutivos multiobjetivos, geralmente, utiliza-se a técnica de *niching* (MATHFOUND, 2000) que consiste na divisão da população em espécies para reduzir a competição por recursos e criar subpopulações estáveis, cada uma delas concentradas em um nicho do espaço de busca.

O esquema de *niching* utiliza um mecanismo de *sharing* que trabalha alterando a função de avaliação de cada elemento da população, de acordo com o número de indivíduos semelhantes a ele na população (Mathfound, 2000). Porém, ao contrário do esperado, seus resultados não melhoraram significativamente a diversidade das soluções não-dominadas encontradas. Neste trabalho, para preservar a diversidade na população, além do mecanismo de *sharing* utilizam-se as taxas de recombinação (P_r) e mutação (P_m) atualizadas de forma adaptativa, de acordo com (28) e (29), respectivamente:

$$P_r = [P_r^{max} - ig(P_r^{max} - P_r^{min})]/nmax \quad (28)$$

$$P_m = [P_m^{min} + ig(P_m^{max} - P_m^{min})]/nmax \quad (29)$$

Sendo:

P_r^{min}, P_r^{max} : Limites inferior e superior da taxa de recombinação;

P_m^{min}, P_m^{max} : Limites inferior e superior da taxa de mutação.

4.4. Melhor solução compromisso

Para determinar uma solução particular, após a convergência do AEMO aplica-se um mecanismo de decisão, baseado na teoria dos conjuntos *fuzzy* aos indivíduos pertencentes a primeira fronteira de Pareto da última geração.

Os conjuntos *fuzzy* são definidos através de funções de pertinência μ_i que representam o grau de pertinência de uma solução no conjunto *fuzzy* (DHILLON et al., 2002). Os valores das funções de pertinência indicam o grau de satisfação das funções objetivos do problema. A função de pertinência utilizada é definida como em (30).

$$\Delta V_{Li}^a = \begin{cases} 1, & f_i(x) \leq f_i^{min}(x) \\ 0, & f_i(x) \geq f_i^{max}(x) \\ \frac{f_i^{max}(x) - f_i(x)}{f_i^{max}(x) - f_i^{min}(x)}, & f_i^{min}(x) < f_i(x) < f_i^{max}(x) \end{cases}, i = 1, \dots, N_{obj} \quad (30)$$

Sendo $f_i^{min}(x)$ e $f_i^{max}(x)$ são os valores mínimos e máximos da i -ésima função obje-



tivo.

Seja N_{dom} o número de soluções não-dominadas da primeira fronteira de Pareto, então, para cada solução não-dominada $k, k \in N_{dom}$, a função de pertinência é normalizada como em (31) e a melhor solução compromisso é dada por (32).

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^{N_{dom}} \sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k} \quad (31)$$

$$\gamma = \max\{\mu^k\} \quad (32)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A implementação computacional da metodologia proposta foi testada no sistema IEEE-354 barras (AGUADO e QUINTANA, 2001). Este sistema é composto por 3 áreas interconectadas e, os seus dados de barras, linhas e geradores, são obtidos triplicando o sistema teste IEEE-118 barras, como apresentado no *software* MATPOWER (ZIMMERMAN et al., 2011). Os detalhes dos coeficientes de custo e de emissão para os geradores são encontrados em (HAZRA e SINHA, 2010).

Em todas as simulações, foram executadas 1000 gerações com uma população com 800 indivíduos, cada caso foi executado 5 vezes e o melhor resultado encontrado é apresentado. Os limites inferior e superior da taxa de recombinação são 0,6 e 0,9, respectivamente. Para a taxa de mutação os limites inferior e superior adotados são respectivamente iguais à 0,02 e 0,08.

Na modelagem das variáveis de controle discretas o tamanho do passo entre dois valores consecutivos são 0,01 p.u. para os transformadores com controle automático de *taps* e 0,125 p.u. para os capacitores/reatores *shunts*. Os limites mínimo e máximo para os transformadores com controle automático de *taps* são 0,90 p.u. e 1,10 p.u. Para os capacitores/reatores *shunt* os limites mínimo e máximo são obtidos por (33).

$$\begin{cases} \text{Se } B_i < 0, \text{ então } B_i^{min} = B_i \text{ e } B_i^{max} = 0 \\ \text{Se } B_i > 0, \text{ então } B_i^{max} = B_i \text{ e } B_i^{min} = 0' \end{cases} \quad i = 1, \dots, N_{sh} \quad (33)$$

Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 2 a 5. Nestas figuras, a i -ésima área do sistema é representada por $A_i, i = 1, \dots, 3$, o fluxo de carga convencional é designado por FC e FPO- A_i refere-se ao subproblema de despacho econômico e ambiental da área i , que está sendo analisada. Os resultados de simulações com o FC são apresentados para fins de comparação.

Na Figura 2 apresentam-se os custos total de combustível consumido pelos gera-

dores na geração da potência ativa, para as três áreas interconectadas, quando apenas uma delas é otimizada. Além disso, apresenta-se os custos total de combustível que seria necessário na simulação com o FC.

Analisando-se a Figura 2 verifica-se que a metodologia proposta foi capaz de reduzir os custos total de combustível em todas as áreas que foram otimizadas. Além disso, os custos totais de combustíveis das áreas vizinhas permaneceram inalterados quando comparados com os resultados do FC. Em todos os casos, ao utilizar o modelo de despacho econômico regional, houve uma redução de 2% a 3% nos custos totais de combustível quando comparado com a solução fornecida pelo FC.

Na Figura 3 apresentam-se as quantidades de emissão de gases poluentes obtidas através da solução do problema de despacho econômico e ambiental regional e do FC convencional.

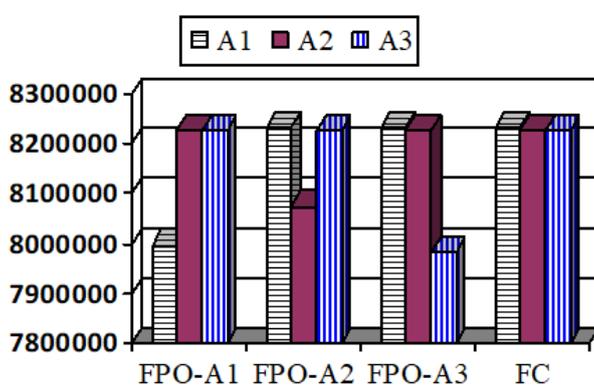


Figura 2 – Custos da geração (R\$/Mwh)

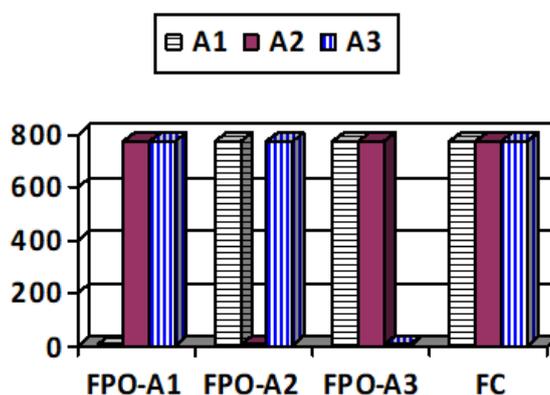


Figura 3 – Custo de emissão de gases poluentes (ton/h)

Analisando os resultados ilustrados na Figura 3, é possível verificar que a metodologia proposta foi capaz de reduzir a emissão de gases poluentes na área simulada sem comprometer as demais áreas interconectadas. Em todos os casos, a redução na emissão de gases poluentes, na área otimizada, é de aproximadamente 98%. Esse resultado mostra que a metodologia é capaz de atender as necessidades do setor de energia elétrica, que tem sofrido enorme pressão para reduzir as emissões de gases poluentes devido ao aquecimento global. Considerando que as emissões dos geradores continuam as mesmas os resultados obtidos mostram que é possível reduzir as emissões de poluentes apenas fazendo o redespacho dos geradores existentes no sistema.

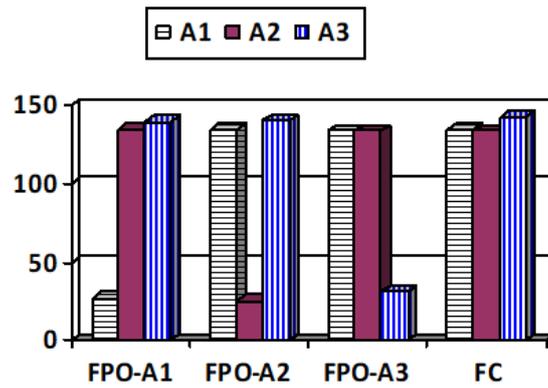


Figura 4 - Perdas (Mw/h)

Os resultados numéricos para as perdas de potência ativa são apresentados na Figura 4, evidenciando o potencial da metodologia e da técnica de solução na redução das perdas. Em todas as áreas otimizadas houve uma redução de aproximadamente 80%. Novamente é possível verificar que o redespacho das unidades geradoras pode levar à redução significativa das perdas no sistema de transmissão.

Na Fig. 5 pode-se observar os resultados numéricos referente às violações na geração de potência reativa. Analisando-se os resultados para o FC conclui-se que este sistema necessita de suporte de potência reativa, mas independente da característica deste sistema teste, o modelo de despacho econômico e ambiental multiárea foi capaz de reduzir as infactibilidades na geração de potência reativa em 100%, sem comprometer o estado de operação das áreas vizinhas.

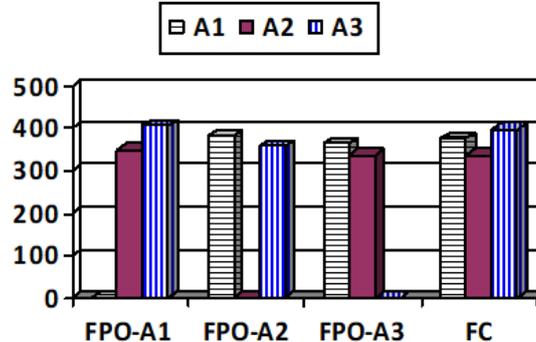


Figura 5 - Infactibilidade na geração de potência reativa (MVar)

As restrições referentes às magnitudes das tensões em todas as barras, fluxo de potência aparente nas linhas de transmissões e a capacidade de geração de potência ativa, foram devidamente atendidas em todas as simulações realizadas.

Nas Tabelas 1 e 2, apresentam-se os valores das variáveis de controle associadas aos transformadores com controle automático de *taps* e bancos de capacitores/reatores *shunt*, respectivamente.

| Barras | | FC | FPO Multiárea | | |
|--------|------|------|---------------|------|------|
| De | Para | | A1 | A2 | A3 |
| 38 | 37 | 1,11 | 1,02 | 0,97 | 0,99 |
| 63 | 59 | 1,11 | 1,02 | 1,00 | 0,93 |
| 64 | 61 | 0,91 | 1,00 | 1,01 | 1,00 |
| 65 | 66 | 1,01 | 1,00 | 0,94 | 0,97 |
| 68 | 69 | 0,91 | 1,09 | 1,02 | 1,03 |
| 81 | 80 | 1,11 | 1,07 | 1,01 | 1,03 |
| 8 | 5 | 1,07 | 1,01 | 1,03 | 1,02 |
| 26 | 25 | 1,11 | 1,00 | 1,00 | 0,94 |
| 30 | 17 | 1,11 | 1,08 | 1,10 | 0,93 |

Tabela 1 – Taps dos transformadores (p.u.).

O ajuste ótimo destes equipamentos contribui para a compensação de potência reativa e minimização das perdas do sistema de potência.

| Barras | FC | FPO Multiárea | | |
|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | | A1 | A2 | A3 |
| 5 | -0,400 | -0,375 | -0,400 | -0,125 |
| 34 | 0,140 | 0,125 | 0,000 | 0,125 |
| 37 | -0,250 | -0,125 | -0,250 | -0,250 |
| 44 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| 45 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| 46 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| 48 | 0,150 | 0,000 | 0,000 | 0,150 |
| 74 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| 79 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 |
| 82 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 |
| 83 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 |
| 105 | 0,200 | 0,000 | 0,200 | 0,200 |
| 107 | 0,060 | 0,000 | 0,060 | 0,000 |
| 110 | 0,060 | 0,060 | 0,000 | 0,060 |

Tabela 2 – Capacitores/reatores shunt (p.u.).

Conforme apresentado na equação (19), a condição necessária para que uma determinada área seja otimizada, sem interferir nas demais, é que as injeções líquidas de potências ativa e reativa, que entra e que sai da área otimizada, sejam iguais. Para validar o modelo de decomposição proposto, na Tabela 3, apresentam-se as injeções de potências ativa e reativa entre as áreas interconectadas. Estes resultados referem-se às simulações com a área A2, mas em todas as simulações a soma das injeções líquidas de potências ativa e reativa tendem a zero.

| Área | | Potência ativa (MW) | | Potência Reativa (MVar) | |
|----------|----------|---------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| <i>i</i> | <i>j</i> | P_{Fik} | P_{Fki} | Q_{Fik} | Q_{Fki} |
| 1 | 2 | -21,951 | 21,951 | -19,561 | 19,561 |
| 1 | 3 | 25,468 | -25,468 | -54,046 | 54,046 |
| 2 | 3 | -20,827 | 20,827 | -10,548 | 10,548 |

Tabela 3 – Injeções líquidas de potências ativa e reativa entre as áreas do sistema de potência multiárea.

Os resultados apresentados na Tabela 4 foram obtidos simulando o problema de FPOM, através dos modelos centralizado (FPOMC) e descentralizado (FPOMD). No modelo descentralizado, os subproblemas regionais foram individualmente analisados, e após a convergência do algoritmo, os valores obtidos para as variáveis de controle são atualizados e uma nova área é escolhida para ser otimizada. O processo é repetido até que todas as áreas do sistema de potência interconectado sejam analisadas.

Na Tabela 4, F1, F2, F3 e F5 são as funções referentes ao custo total de combustível, emissão de gases poluentes, perdas de potência ativa na rede de transmissão e infactibilidade na potência reativa gerada.

Comparando os resultados obtidos para os modelos de FPOMC e FPOMD verifica-se que os resultados são similares.

| Modelo | Áreas | F1 | F2 | F3 | F5 |
|--------|-------|------------|------|-------|-------|
| FPOMC | A1 | 8112399,65 | 4,34 | 33,39 | 10,99 |
| | A2 | 7979268,63 | 5,18 | 27,69 | 68,49 |
| | A3 | 8055131,86 | 4,87 | 34,70 | 26,41 |
| FPOMD | A1 | 8107437,58 | 3,94 | 21,73 | 13,61 |
| | A2 | 8148049,15 | 4,26 | 29,71 | 10,47 |
| | A3 | 7939642,19 | 4,82 | 28,88 | 15,88 |

Tabela 4 - Melhor solução compromisso para FPOMC e para o FPOMD.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o problema de despacho econômico e ambiental foi abordado como um problema de otimização multiobjetivo, e resolvido através de um algoritmo evolutivo baseado na teoria de Pareto. O problema foi decomposto em subproblemas regionais e controlados através dos fluxos de potências aparente nas linhas de interconexões. Os resultados obtidos com o sistema teste IEEE-354 barras demonstram a viabilidade do modelo e da técnica de solução. Em todos os casos analisados, o algoritmo implementado convergiu para soluções otimizadas de boa qualidade e demonstrou-se robusto para resolver os problemas de cada área. Além disso, os resultados computacionais mostram que o AEMO apresentou um excelente desempenho em termos de qualidade de soluções e tempo de execução quando comparado com a solução do FPO multiárea original, isto é, antes da decomposição em subproblemas regionais.

Referências

- ABIDO, M. A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem, **IEEE Trans. On Evolutionary Computation**, vol. 16, no. 3, pp.315-329, 2006.
- AGUADO, J. A. and QUINTANA, V. H. Inter-utilities power-exchange coordination: A market-oriented approach. **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 16, pp.513-519, 2001.
- AGUADO, J. A.; QUINTANA, V. H. and CONEJO, A. J. Optimal Power Flows of Interconnected Power Systems. **In Proc. IEEE PES Summer Meeting**, vol. 2, pp. 814-819, 1999.
- AMORIM, E. A. **Fluxo de potência ótimo em sistemas multimercados através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo**. 159f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, 2006. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100376>. Acesso em: 23 Jun. 2021.
- AMORIM, E. A.; HASHIMOTO, S. H. M.; LIMA, F. G. and MANTOVANI, J. R. S. Multi Objective Evolutionary Algorithm Applied to the Optimal Power Flow Problem. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 8, no. 3, pp. 236-244, 2010.
- BAKIRTZIS, A. and BISKAS, P. A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems. **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 18, no. 3, pp. 1007–1013, 2003.
- BALDICK, R.; KIM, B. H., CHASE, C. and LUO, Y. A fast distributed implementation of optimal power flow. **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 14, no. 3, pp.858-863, 1999.
- CHOWDHURY, B. H. and RAHMAN, S. A review of recent advances in economic dispatch. **IEEE Trans. Power Syst.**, vol. 5, no. 4, pp.1248-1259, 1990.
- COHEN, G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems. **Journal of Optimization Theory and Applications**, vol. 32, no. 3, pp. 277–305, 1980.
- CONEJO, A. J. and AGUADO, J. A. Multi-area Decentralized DC Optimal Power Flow. **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 13, no. 4, pp. 1272-1278, 1998.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., & MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 6(2), 182-197, 2002.
- DHILLON, J. S., PARTI, S. C. and KOTHARI, D. P. Stochastic economic emission load dispatch. **Electric Power Syst. Res.**, vol. 26, pp. 186–197, 1993.
- DHILLON, J. S., PARTI, S. C. and KOTHARI, D. P. Fuzzy decision making in stochastic multiobjective short-term hydrothermal scheduling. **IEE Proc.-C**, 149, vol.2, pp. 191–200, 2002.
- HAZRA, J. and SINHA, A. K. (2010). A multi-objective optimal power flow using particle swarm optimization. **Euro. Trans. Electr. Power**, 2010.
- KIM, B. H. and BALDICK, R. Coarse-Grained Distributed Optimal Power Flow. **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 12, no. 2, pp. 932-939, 1997.
- LENIVE, D. Genetic algorithms: a practitioner’s view. **Journal on Computing**, vol. 9, no. 3, pp. 256-259. 1997.
- LU, W.; LIU, M.; LIN, S. and LI, L. Fully Decentralized Optimal Power Flow of Multi-Area Interconnected Power Systems Based on Distributed Interior Point Method. **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 33, no. 1, pp. 901-91, 2018.
- MATHFOUND, S. W. Niching methods, In: Back, T.; Fogel, D.B.; Michalewicz (Eds.), **Evolutionary Computation**, vol. 2, pp 87-92, Institute of Physics Publishing, 2000.
- MONTICELLI, A. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. **Edgard Blucher**, Rio de Janeiro, 1983.
- NOGALES, F. J.; PIETRO, F. J. and CONEJO, A. J. Multi-area AC Optimal Power Flow: A New decomposition approach. **Proc. Power Syst. Comput. Conf. Trondheim**, Norway, pp. 1201-1206, 1999.
- RADOSAVLJEVIC, J. A Solution to the Economic and Emission Dispatch using Hybrid PSOGSA Algorithm. **Applied Artificial Intelligence**, vol. 30, no. 5, pp. 445-474, 2016.



VENKATESH, P. and LEE, K.Y. Multi-objective Evolutionary Programming for Economic Dispatch Problem. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, 2008.

ZHAO, L. and ABUR, A. Two-layer Multi-Area Total Transfer Capability Computation. **IREP Symposium**, Cortina D'Ampezzo, Italy, August 23-27, 2004.

ZIMMERMAN, R.D., MURILLO-SÁNCHEZ, C.E., THOMAS, R.J. **Matpower** (Available at.), 2011. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.



CAPÍTULO 4

USING PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT DATA IN LOAD DISTRIBUTION OPTIMIZATION PROBLEMS

Leonardo Ramos Rodrigues

Vandilberto Pereira Pinto

Abstract

The use of Remaining Useful Life (RUL) predictions as a decision support tool has increased in recent years. The RUL predictions can be obtained from Prognostics and Health Management (PHM) systems that monitor the health status and estimate the failure instant of components and systems. An example of a decision-making problem that can benefit from RUL predictions is the load distribution problem, which is a common problem that appears in many industrial applications. It consists in defining how to distribute a task among a set of components. In this paper, a model to solve load distribution optimization problems is proposed. The proposed model considers the RUL prediction of each component in its formulation. Also, the proposed model assumes that the predicted RUL of each component is a function of the load assigned to that component. Thus, it is possible to distribute the load to avoid multiple components failing in a short interval. An approach based on the MMKP (Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem) is adopted. The proposed model finds a load distribution that minimizes the operational cost subject to a maintenance personnel capacity constraint, i.e. there is a maximum number of components that can be simultaneously on repair. A numerical case study considering a gas compressor station is presented to illustrate the application of the proposed model.

Key-words: Prognostics; Health Management; Optimization; Load Distribution; Maintenance

1. INTRODUCTION

A decision-making problem that appears in many industrial applications is the load distribution problem, which consists in defining how to distribute a specific task among a set of components (MOHAMMAD *et al.*, 2013). Most models available in the literature to solve the load distribution problem based on a cost criterion only. In these models, the goal is to minimize total power consumption (PAPARELLA *et al.*, 2013), fuel consumption (KUMAR & CORTINOVIS, 2017), or the number of components that must be turned on to accomplish the desired task (MOHAMMAD *et al.*, 2013).

Maintenance activities may have a huge impact on operational costs and system availability. Therefore, a load distribution model should consider how a load distribution solution affects maintenance activities. For this purpose, Prognostics and Health Management (PHM) systems must provide a Remaining Useful Life (RUL) prediction for each component based on the load assigned to that component. A reliability approach has been proposed to compute the degradation rate of each component based on the load distribution solution (MOHAMMAD *et al.*, 2013).

Each possible solution for a load distribution problem has an associated set of RUL predictions that depends on the load assigned to each component. If these predictions are not considered, the solution may cause multiple failure events in a short interval, and the demand for the maintenance personnel may exceed its capacity. Also, if multiple components are failed, the remaining components may not be able to execute the task

accordingly.

In this paper, a load distribution model based on RUL predictions is proposed. The proposed model uses RUL predictions based on the load assigned to each component. An approach based on the MMKP (Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem) is adopted. The proposed model finds a load distribution to minimize total power consumption subject to a maintenance personnel constraint that limits the number of components that can be simultaneously failed due to the capacity of maintenance personnel. A numerical case study considering a gas compressor station is presented to illustrate the application of the proposed model. The results show that, with a small increase in power consumption, the proposed model finds a solution that results in a failure distribution that does not violate the maintenance capacity constraint.

The remaining sections of this paper are organized as follows. Section 2 describes the load distribution problem. Section 3 provides a basic theoretical background on Prognostics and Health Management (PHM) techniques and the Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem (MMKP). The proposed model is presented in section 4. Section 5 shows a case study considering a gas compressor station to illustrate the application of the proposed model. Concluding remarks are presented in section 6.

2. PROBLEM DESCRIPTION

Consider a system composed of n components connected in parallel that are used to execute a task. A maintenance team with a limited repair capacity is responsible for executing the maintenance interventions required by the set of components. It is desired that the number of failed components at any time does not exceed the maintenance team capacity, denoted by k .

A PHM system provides a Remaining Useful Life (RUL) prediction for each component C_i , with $i = \{1, \dots, n\}$. The RUL prediction for each component C_i , denoted by RUL_i , is a function of the load L_i assigned to the component. The power consumption of each component C_i , denoted by $P_C^{(i)}$, can also be expressed as a function of load L_i .

Figure 1 shows the estimated maintenance demand obtained with two different load distribution solutions. A system with 3 components is considered. The maintenance capacity k is 1. In Figure 1(a), the load distribution caused components C_2 and C_3 to have the same RUL predictions. In this case, maintenance demand would exceed the maintenance capacity.



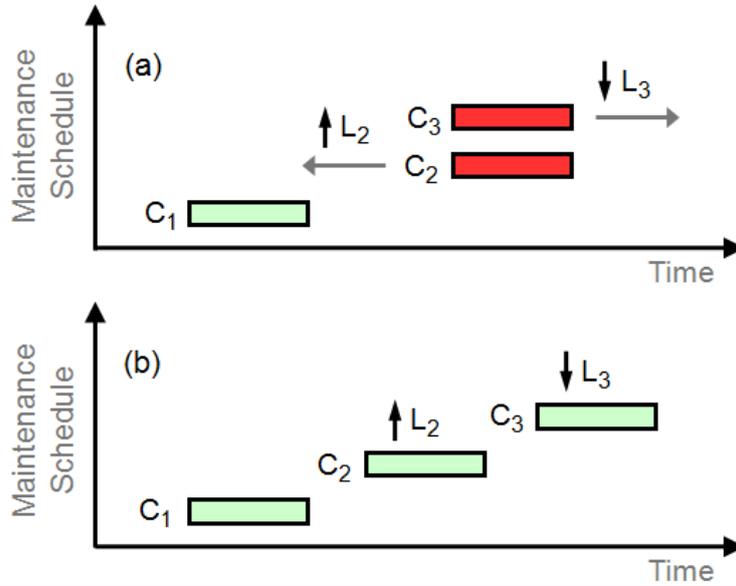


Figure 1 - Impact of load distribution on maintenance demand. (a) Load distribution that causes a simultaneous failure of components C_2 and C_3 . (b) New load distribution in which only one component needs a maintenance intervention at a time

Figure 1(b) shows the estimated maintenance demand obtained with another load distribution. In this new solution, a higher load L_2 is assigned to component C_2 , which reduces its predicted RUL. A lower load L_3 is assigned to component C_3 , which increases its predicted RUL. In the constrained load distribution problem addressed in this paper, the solution used in Figure 1(a) is unfeasible because it violates the maintenance capacity constraint. Thus, the problem addressed in this paper consists in finding a load distribution that minimizes power consumption subject to a maintenance capacity constraint. Formally, the optimization problem can be defined according to Equations (1) to (4).

$$\min J = \sum_{i=1}^n P_C^{(i)} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n L_i \geq L_T \quad (2)$$

$$L_i \in \{L_b^{(i)}, L_b^{(i)}\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$m(t) \leq k, \forall t \in \{t_0, \dots, t_H\} \quad (4)$$

where $m(t)$ is the expected number of failed components in time t , t_H is the maintenance planning horizon, L_T is the total load, and $L_b^{(i)}$ and $L_b^{(i)}$ are the minimum and the maximum load that can be assigned to each component C_i , respectively.

3. THEORETICAL BACKGROUND

3.1. Prognostics and Health Management

Prognostics and Health Management (PHM) techniques are algorithms and methods used to assess the health status and the degradation level of a monitored system. PHM techniques are also used to estimate the Remaining Useful Life (RUL) of monitored systems (GOEBEL *et al.*, 2017), (RODRIGUES, 2018), (EL MEJDOUBI *et al.*, 2018). The health status is assessed based on a set of sensor measurements that describes the operational behavior of the component. Low degradation levels are associated with new components, while high degradation levels are associated with degraded components. A failure event occurs as soon as the maximum allowed degradation value is reached. By extrapolating the degradation level evolution curve, the RUL prediction is obtained (ELEFTHEROGLOU *et al.*, 2019).

Due to measurement uncertainties, RUL predictions are commonly given as a probability distribution. Different distributions can be used to represent RUL probabilities such as Gaussian (CELAYA *et al.*, 2012), (BOSKOSKI & JURICIC, 2013), or Weibull (CASSITY *et al.*, 2012), (LOUEN *et al.*, 2013).

Figure 2 illustrates the RUL prediction process. Each symbol (+) in Figure 2 represents the degradation index computed at a certain time. The current time is denoted by t_0 . The failure threshold represents the maximum allowed value for the degradation index. i.e. a failure event occurs whenever the degradation level reaches the threshold value. The predicted RUL distribution is obtained by estimating when the degradation index will reach the failure threshold. The expected value for the failure instant is denoted by t_f . The difference $t_f - t_0$ is the predicted RUL.

The literature on PHM techniques contains algorithms for monitoring the health status and predicting the RUL of a wide variety of components such as engines (BABBAR *et al.*, 2009), hydraulic pumps (GOMES *et al.*, 2012), and batteries (PENNA *et al.*, 2012). In the last decade, the use of RUL predictions obtained from PHM systems as a decision support tool has been investigated by many researchers. Solutions that incorporate RUL predictions have been proposed for different optimization problems such as preventive maintenance scheduling (GEBRAEEL, 2010), spare parts inventory management (LIN *et al.*, 2017), and resource assignment optimization problems (RODRIGUES *et al.*, 2018).

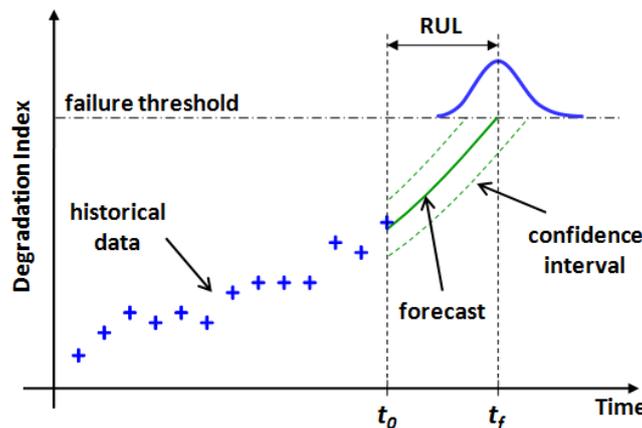


Figure 2 - RUL prediction process

3.2. Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem

The Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem (MMKP) is a generalization of the well-studied single knapsack problem (MOSER *et al.* 1997). In the MMKP, a group of items is divided into n distinct classes $\{K_1, \dots, K_n\}$. Each class K_i contains m_i items. The j -th item in class K_i has a non-negative value v_j and a weight vector $W_j = (w_j^1, \dots, w_j^u)$. Each element w_j^z of vector W_j , with $z = \{1, \dots, u\}$, is also a non-negative value. The capacity of the knapsack is defined by the capacity vector $C = \{c_1, \dots, c_u\}$. The goal of the MMKP is to choose exactly one item from each class to maximize the total value of the selected items, subject to the knapsack capacity constraints. The MMKP can be formally defined according to Equations (5) to (8).

$$\max J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} v_j x_j \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} w_j^z x_j \leq c_z, \quad \forall z \in \{1, \dots, u\} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_j = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m_i\} \quad (8)$$

where x_j , with $i = \{1, \dots, n\}$ and $j = \{1, \dots, m_i\}$, are binary decision variables that assume value 1 if the j -th item of class K_i is selected and zero otherwise.

Different algorithms to solve the MMKP have been proposed. Any algorithm can be used in our proposed model. When computational time is restricted, an approximated algorithm can be used. Approximated algorithms provide fast response, however, optimality is not guaranteed (AKBAR *et al.*, 2006). In this paper, we use an exact algorithm to solve the MMKP (SBIHI, 2007).

4. PROPOSED MODEL

In this section, the proposed model to solve the constrained version of the load distribution problem is presented. Figure 3 shows a block diagram describing the proposed solution.

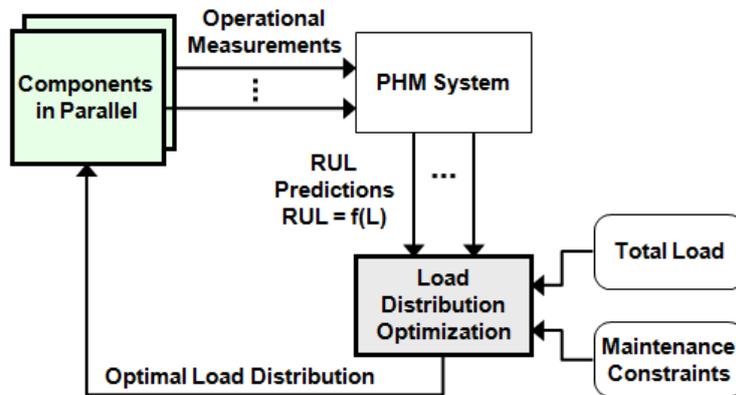


Figure 3 - Block diagram of the proposed model

As mentioned earlier, the RUL prediction for each component C_i is a function of load L_i . An approach based on the MMKP is used to model the constrained load distribution optimization problem. This approach transforms the problem into a combinatorial optimization problem that has a known procedure to find the optimal solution.

In the proposed model, each component C_i corresponds to a class of the MMKP, and each possible load that can be assigned to component C_i corresponds to an item belonging to class K_i . The cost of operating component C_i with load L_i is associated with the value of the item, and the RUL predictions are associated with the capacity of the knapsack in the MMKP.

Operational measurements are collected from each monitored component and sent to the PHM system. The PHM system computes the predicted RUL for the components as a function of the load assigned to them. The load distribution optimization block in Figure 3 receives the RUL predictions from the PHM system. It also receives the total load that must be distributed among the components and the maintenance personnel constraint. Based on these data, the set of candidate solutions is created and the MMKP is solved to define the best load distribution.

Although the optimal solution for the MMKP can be found, the quality of the final solution depends on the set of items generated in the load distribution optimization block. Some components and systems have a limited number of discrete operation modes such as an EAF (Electric Arc Furnace) in a steel plant (DALLE AVE *et al.*, 2019), or a processor in a computational system (KONG *et al.*, 2010). For these components, it is possible to list all possible operation modes (and the corresponding loads) during the candidate solution generation process for the MMKP. Other components and systems, however, allow their load to vary continuously within a range. For these components, it is impossible to list all possible operation modes. In order to generate the list of items (candidate loads) for the MMKP, it is necessary to choose a set of possible loads. The higher the number of candidate loads, the higher the probability of finding better solutions. However, the com-

putational time required to solve the MMPK increases with the number of items. The set of items must cover the whole range of load values that can be assigned to the component.

5. CASE STUDY

This section presents a numerical case study to illustrate the application of the proposed model in a gas compressor station.

5.1. System Description

The gas compressor station considered in this example consists of a suction tank and a set of variable speed compressors in parallel. Figure 4 shows a schematic of a gas compressor station with two compressors (ZAGOROWSKA *et al.*, 2018).

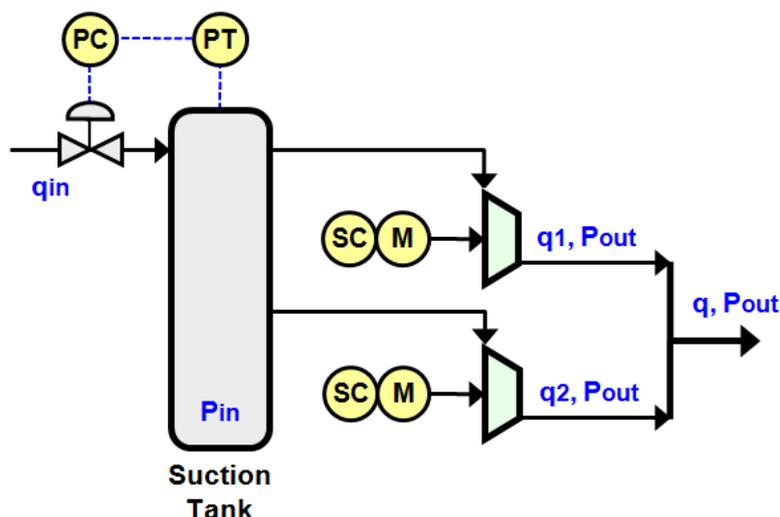


Figure 4 - Schematic of a gas compressor station with two compressors

The pressure in the suction tank, P_{in} , is controlled by the inlet valve and it is assumed to be constant. A detailed description of the dynamic behavior of the system can be found in the literature (PAPARELLA *et al.*, 2013), (CORTINOVIS *et al.*, 2016). The station must provide a mass flow rate q at pressure P_{out} . The goal is to assign a mass flow rate to each compressor to provide the desired output with minimum power consumption. A PHM system monitors the health status of compressors and provides a RUL prediction for each compressor as a function of the mass flow rate assigned to it.

Let q_i be the mass flow rate assigned to the i -th compressor. The power consumption of the i -th compressor, denoted by $P_C^{(i)}$, is computed according to Equation (9).

$$P_C^{(i)} = \frac{k \cdot q_i}{\eta_i} \quad (9)$$

where k is a compressor coefficient, and η_i is the compressor efficiency that can be approximated by Equation (10) (CORTINOVIS *et al.*, 2016).

$$\eta_i(q, \rho) = \alpha_1 q^2 + \alpha_2 \rho^2 + \alpha_3 q \rho + \alpha_4 q + \alpha_5 \rho + \alpha_6 \quad (10)$$

where ρ is the pressure ratio P_{out} / P_{in} , and α_1 to α_6 are model coefficients.

5.2. Simulation Data

In this case study, a gas compressor station with seven compressors in parallel is considered. Table 1 shows the parameters used in the simulations.

| Parameter | Description | Value |
|------------|---------------------------|--------|
| q | Total flow rate [kg/s] | 1.1 |
| k | Model coefficient | 30 |
| α_1 | Model coefficient | -0.05 |
| α_2 | Model coefficient | -0.2 |
| α_3 | Model coefficient | 0.168 |
| α_4 | Model coefficient | -0.166 |
| α_5 | Model coefficient | 0.58 |
| α_6 | Model coefficient | 0.18 |
| ρ | Pressure ratio | 2.5 |

Table 1 – Simulation data

Figure 5 presents the efficiency map of each compressor that shows the compressor efficiency η as a function of pressure ratio ρ and mass flow rate q . The maximum mass flow rate of each compressor is 0.2 kg/s. Also, Figure 5 shows the operating envelope of the compressors that limits the range of operating conditions. The operating envelope is limited by the surge line (SL), which defines the minimum flow that avoids instability for a specific pressure ratio. The operating envelope is also limited by the choking line (CL), which is related to the maximum allowed flow. Finally, the operating envelope is limited by two lines that are associated with the maximum and minimum angular speed ω_{max} and ω_{min} .

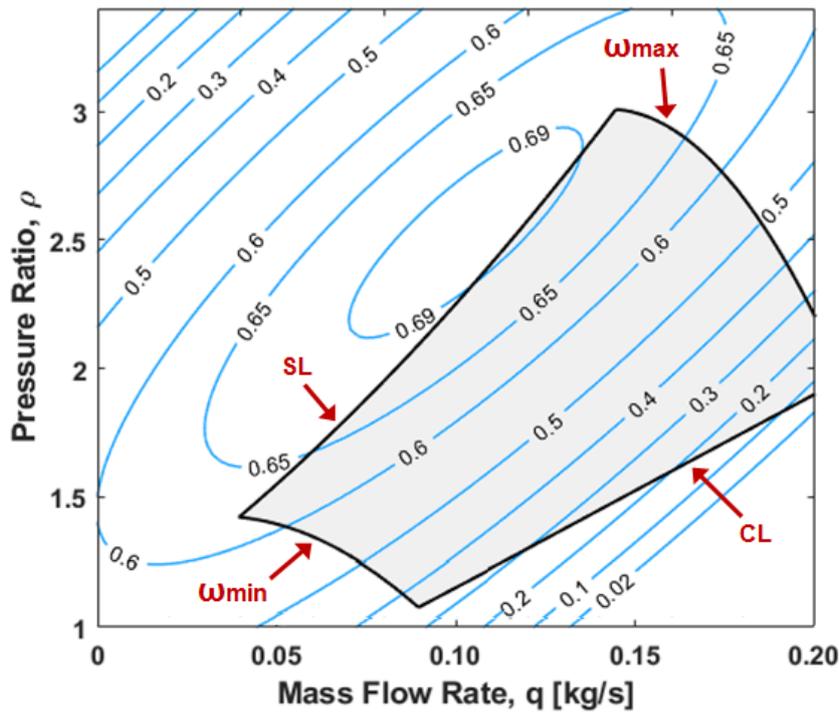


Figure 5 - Compressor efficiency map

In this case study, the lines that limit the operating envelope are approximated by Equations (11) to (14).

$$S = 0.5 q^2 + 9.4 q + 1.0 \quad (11)$$

$$C = 7.0 q + 0.0 \quad (12)$$

$$\omega_{\max} = -242.0 q^2 + 0.0 q - 1.0 \quad (13)$$

$$\omega_{\min} = -112.0 q^2 + 7.0 q + 1.0 \quad (14)$$

The PHM system updates the RUL prediction of each compressor at the end of each operation cycle. We assume that the increment in the degradation level of each compressor in each operation cycle is a random variable that follows a Gamma distribution with scale parameter θ and shape parameter β . Gamma distributions have been adopted in many works to model degradation processes (VAN *et al.*, 2012), (SCHIRRU *et al.*, 2010), (RODRIGUES, 2018). Table 2 shows the scale and the shape parameters used to model the degradation increment of each compressor. Table 3 shows the current degradation level of each compressor, which were arbitrarily chosen for this example. A failure threshold $F = 100$ is considered, i.e. a compressor fails whenever its degradation level reaches the failure threshold. A safety level $S = 5\%$ is adopted, i.e. the RUL prediction corresponds to the operation cycle in which the failure probability is equal to or higher than S .

| Parameter | Description | Value |
|-----------|-----------------|-------|
| θ | Scale parameter | 1.0 |
| β | Shape parameter | 4.0 |

Table 2 – Compressor degradation parameters

| Compressor | Degradation |
|------------|-------------|
| 1 | 54.32 |
| 2 | 25.08 |
| 3 | 80.83 |
| 4 | 27.84 |
| 5 | 52.61 |
| 6 | 50.01 |
| 7 | 65.79 |

Table 3 – Compressor degradation levels

According to Table 1, the compressors must operate at a pressure ratio of 2.5 and provide a total mass flow rate of 1.1 kg/s. Finally, it is assumed that the duration of a maintenance intervention in each compressor is two operation cycles.

A stress effect approach is used to model the influence of load distribution in RUL predictions. A stress model that includes the effect of the mass flow rate q assigned to each compressor in the scale parameter θ is adopted (DUAN & WANG, 2019). The variable scale parameter is computed according to Equation (15).

$$\theta(q_i) = \theta_{ref} \cdot \exp \left[\gamma \cdot \left(1 - \frac{q_i}{q_{nom}} \right) \right] \quad (15)$$

where θ_{ref} is the scale parameter of the gamma distribution for nominal load (see Table 2), and γ is a model coefficient. In this paper, a $\gamma = -1.3$ is used.

5.3 Cost Minimization without Considering RUL Predictions

As mentioned earlier, in this load distribution optimization problem, each compressor represents a class of the MMKP, each candidate operation point (q, ρ) represents one item, and each future operation cycle t represents one dimension of the capacity vector C . Therefore, the goal is to find the mass flow rate (item) that will be assigned to each compressor (class) to minimize total power consumption, subject to the maintenance capability constraint.

For comparison purposes, we first solve the load optimization problem without considering the maintenance capability constraint. This result shows the minimum power consumption that can be obtained to meet the gas compressor station output requirements. For each compressor, 13 candidate values for q were used. It can be seen from Figure 5 that, for a pressure ratio of 2.5, the range of values that q can assume is limited by the surge line (\mathcal{L}) and the maximum speed line (ω_{\max}). Based on Equations (11) and (13), the range of q is [0.115,0.188].

Table 4 shows the mass flow rate assigned to each compressor and corresponding power consumption. It can be seen that the desired mass flow rate is obtained with a total power consumption of 275.13 kW.

| Compressor | q_i [kg/s] | $P_C^{(i)}$ [kW] |
|------------|--------------|------------------|
| 1 | 0.152 | 36,93 |
| 2 | 0.158 | 39.70 |
| 3 | 0.158 | 39.70 |
| 4 | 0.158 | 39.70 |
| 5 | 0.158 | 39.70 |
| 6 | 0.158 | 39.70 |
| 7 | 0.158 | 39.70 |

Table 4 - Load distribution without considering RUL predictions

Figure 6 shows the expected number of compressors needing a repair intervention in each operation cycle for the solution obtained without considering RUL predictions in the optimization model. It can be seen that in some operation cycles the maintenance personnel capacity would be exceeded. Also, it can be noticed that compressors 1, 5, and 6 would be simultaneously out of service during operational cycle 18. In this situation, the remaining compressors could not provide the desired mass flow rate.

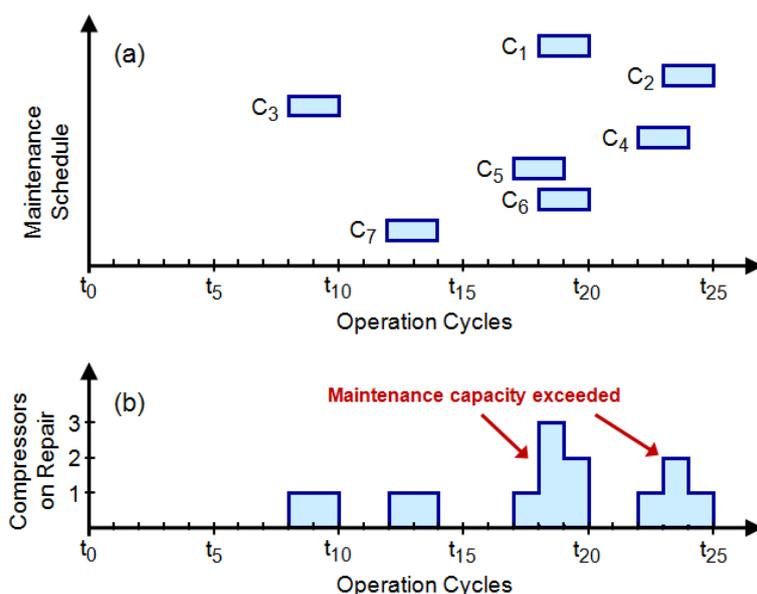


Figure 6 - RUL predictions for each compressor for the load distribution obtained without considering RUL predictions in the optimization model; (a) Expected maintenance interval for each compressor; (b) Number of compressors needing a repair intervention in each operation cycle exceeds maintenance personnel capacity

5.4 Cost Minimization Considering RUL Predictions

Now, the proposed MMKP approach is used to solve the same load distribution problem. However, in this new experiment, the expected number of compressors needing a repair intervention is limited to one. Table 5 shows the mass flow rate assigned to each compressor and corresponding power consumption. It can be seen that the desired mass flow rate is obtained with a total power consumption of 276.53 kW.

| Compressor | q_i [kg/s] | $P_C^{(i)}$ [kW] |
|------------|--------------|------------------|
| 1 | 0.164 | 42.84 |
| 2 | 0.152 | 36.93 |
| 3 | 0.158 | 39.70 |
| 4 | 0.164 | 42.84 |
| 5 | 0.152 | 36.93 |
| 6 | 0.146 | 34.45 |
| 7 | 0.164 | 42.84 |

Table 4 - Load distribution considering RUL predictions

Figure 7 shows the expected number of compressors needing a repair intervention in each operation cycle for the solution obtained with the proposed model that takes RUL predictions into account. When compared with the previous solution, the solution obtained with the proposed model presented a small increase of 0.508% in power consumption. However, the maintenance personnel capacity is not violated.

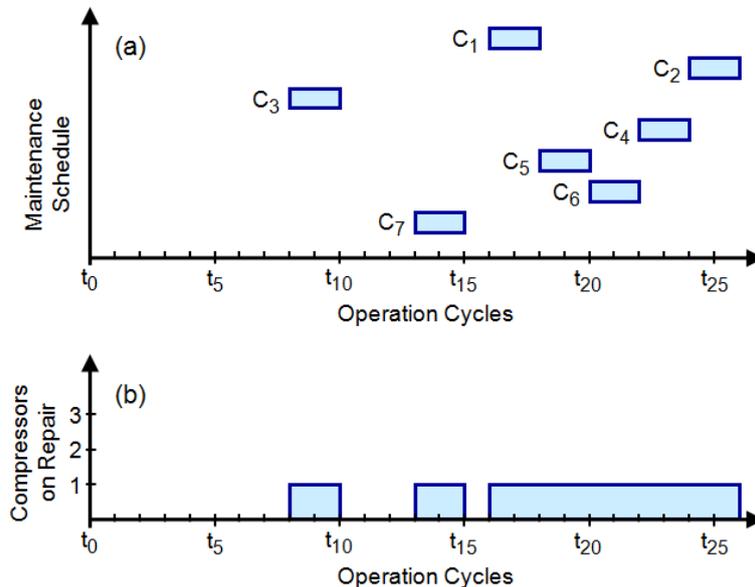


Figure 7 - RUL predictions for each compressor for the load distribution obtained with the proposed model; (a) Expected maintenance interval for each compressor; (b) Number of compressors needing a repair intervention in each operation cycle does not violate the maintenance personnel capacity constraint

6. CONCLUSIONS

In this paper, we presented a model to solve the load distribution optimization problem that takes into account the RUL predictions obtained from a PHM system to limit the number of components that will be simultaneously on repair. The proposed model uses an approach based on the MMKP (Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem) to find a solution with minimum cost that does not violate the maintenance personnel repair capacity.

A case study considering a gas compressor station with seven compressors was used to illustrate the application of the proposed model. The results show that the use of RUL predictions to define the load distribution allows the proposed model to find solutions that do not violate the maintenance personnel capacity constraint. Although a small increase in power consumption is observed, the proposed model distributes the repair demand and avoids the situation in which multiple components are failed and the remaining components do not provide the desired mass flow rate.

Future works may extend the scope of this paper by investigating the impact of uncertainties in maintenance duration and RUL predictions. Another opportunity for future research is to investigate the use of approximated algorithms to solve the MMKP.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the support of the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development - CNPq (grant 423023/2018-7), and FUNCAP (grant BP4-0172-00277.01.00/20).

References

- AKBAR, M.M.; RAHMAN, M.S.; KAYKOBAD, M.; MANNING, E.; SHOJA, G. Solving the Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem by Constructing Convex Hulls. **Computers & Operations Research**, v.33, n.5, p. 1259-1273, 2006.
- BABBAR, A.; ORTIZ, E.M.; SYRMOS, V.L.; ARITA, M.M. Advanced Diagnostics and Prognostics for Engine Health Monitoring. **In Proceedings of the 2009 IEEE Aerospace Conference**, 3518-3527, Big Sky, 2009.
- BOSKOSKI, P.; JURICIC, D. Modeling Localized Bearing Faults Using Inverse Gaussian Mixtures. **In Proceedings of the 2013 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**, 107-113, New Orleans, 2013.
- CASSITY, J.; AVEN, C.; PARKER, D. Applying Weibull Distribution and Discriminant Function Techniques to Predict Damaged Cup Anemometers in the 2011 PHM Competition. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v.3, p.1-7, 2012.
- CELAYA, J.R.; SAXENA, A.; GOEBEL, K. Uncertainty Representation and Interpretation in Model-based Prognostics Algorithms Based on Kalman Filter Estimation. **In Proceedings of the 2012 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**, p.427-436, Minneapolis, 2012.
- CORTINOVIS, A.; MERCANGÖZ, M.; ZOVADELLI, M.; PARESCHI, D.; MARCO, A.D.; BITTANTI, S. Online Per-



- formance Tracking and Load Sharing Optimization for Parallel Operation of Gas Compressors. **Computers & Chemical Engineering**, v.88, p.145-156, 2016.
- DALLE AVE, G.; HERNANDEZ, J.; HARJUNKOSKI, I.; ONOFRI, L.; ENGELL, S. Demand Side Management Scheduling Formulation for a Steel Plant Considering Electrode Degradation. **IFAC - Papers Online**, v.52, n.1, p.691-696, 2019.
- DUAN, F.; WANG, G. Optimal Design for Constant-stress Accelerated Degradation Test Based on Gamma Process. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v.48, n.9, p.2229-2253, 2019.
- EL MEJDOUBI, A.; CHAOUI, H.; SABOR, J.; GUALOUS, H. Remaining Useful Life Prognosis of Supercapacitors under Temperature and Voltage Aging Conditions. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v.65, n.5, p.4357-4367, 2018.
- ELEFTHEROGLOU, N.; MANSOURI, S.S.; LOUTAS, T.; KARVELIS, P.; GEORGOULAS, G.; NIKOLAKOPOULOS, G.; ZAROUCAS, D. Intelligent Data-driven Prognostic Methodologies for the Real-time Remaining Useful Life until the End-of-Discharge Estimation of the Lithium-polymer Batteries of Unmanned Aerial Vehicles with Uncertainty Quantification. **Applied Energy**, v.254, p.113677, 2019.
- GEBRAEEL, N. Prognostics-based Identification of the Top k Units in a Fleet. **IEEE Transactions on Automation and Science Engineering**, v.7, p.37-48, 2010.
- GOEBEL, K.; DAIGLE, M.; ABHINAV, S.; SANKARARAMAN, S.; ROYCHOUDHURY, I.; CELAYA, J. **Prognostics: The Science of Making Predictions**. CreateSpace, NewYork, 1 edition, 2007.
- GOMES, J.P.P.; LEÃO, B.P.; VIANNA, W.O.L.; GALVÃO, R.K.H.; YONEYAMA, T. Failure Prognostics of a Hydraulic Pump Using Kalman Filter. **In Proceedings of the 2012 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**, p.464-468, Minneapolis, 2012.
- KONG, F.; WANG, Y.; DENG, Q.; YI, W. Minimizing Multi-resource Energy for Real-time Systems with Discrete Operation Modes. **In 2010 22nd Euromicro Conference on Real-Time Systems**, p.113-122, 2010.
- KUMAR, S.; CORTINOVIS, A. Load Sharing Optimization for Parallel and Serial Compressor Stations. **In 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)**, p.499-504, 2017.
- LIN, X.; BASTEN, R.J.I.; KRANENBURG, A.A.; VAN HOUTUM, G.J. Condition Based Spare Parts Supply. **Reliability Engineering & System Safety**, v.168, p.240-248, 2017.
- LOUEN, C.; DING, S.X.; KANDLER, C. A New Framework for Remaining Useful Life Estimation Using Support Vector Machine Classifier. **In Proceedings of the 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems**, p.228-233, Nice, 2013.
- MOHAMMAD, R.; KALAM, A.; AMARI, S.V. Reliability of Load-sharing Systems Subject to Proportional Hazards Model. **In Proceedings of the 2013 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**, p.1-5, Orlando, 2013.
- MOSER, M.; JOKANOVIĆ, D.P.; SHIRATORI, N. An Algorithm for the Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem. **IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences**, v.80, p.582-589, 1997.
- PAPARELLA, F.; DOMÍNGUEZ, L.; CORTINOVIS, A.; MERCANGÖZ, M.; PARESCHI, D.; BITTANTI, S. Load Sharing Optimization of Parallel Compressors. **In 2013 European Control Conference (ECC)**, p.4059-4064, Zurich, 2013.
- PENNA, J.A.M.; NASCIMENTO JR., C.L.; RODRIGUES, L.R. Health Monitoring and Remaining Useful Life Estimation of Lithium-ion Aerospace Batteries. **In Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference**, Big Sky, 2012.
- RODRIGUES, L.R. Remaining Useful Life Prediction for Multiple-component Systems Based on a System-level Performance Indicator. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v.23, n.1, p.141-150, 2018.
- RODRIGUES, L.R.; GOMES, J.P.P.; ALCÂNTARA, J.F.L. Embedding Remaining Useful Life Predictions into a Modified Receding Horizon Task Assignment Algorithm to Solve Task Allocation Problems. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v.90, n.1, p.133-145, 2018.
- SBIHI, A. A Best First Search Exact Algorithm for the Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem.



Journal of Combinatorial Optimization, v.13, p.337-351, 2007.

SCHIRRU, A.; PAMPURI, S.; NICOLAO, G.D. Particle Filtering of Hidden Gamma Processes for Robust Predictive Maintenance in Semiconductor Manufacturing. **In 2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering**, p.51-56, 2010.

VAN, P.D.; VOISIN, A.; LEVRAT, E.; IUNG, B. Condition-based Maintenance with both Perfect and Imperfect Maintenance Actions. **In Proceedings of the 2012 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society**, p.256-264, Minneapolis, 2012.

ZAGOROWSKA, M.; THORNHILL, N.; HAUGEN, T.; SKOURUP, C. Load-sharing Strategy Taking Account of Compressor Degradation. **In 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)**, p.489-495, Copenhagen, 2018.



CAPÍTULO 5

ALOCAÇÃO DE CAPACITORES E FILTROS PASSIVOS EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O ALGORITMO GENÉTICO CHU- BEASLEY

CAPACITORS AND PASSIVE FILTERS ALLOCATION IN POWER
DISTRIBUTION NETWORK USING THE CHU-BEASLEY GENETIC
ALGORITHM

Lucas Oliveira Lima

Marcelo Semensato

Resumo

A proposta deste artigo é a alocação de banco de capacitores e filtros passivos em rede de distribuição de energia elétrica de 34 barras para compensar a potência reativa da rede elétrica e filtrar as componentes harmônicas. Para a simulação foi utilizado o software OpenDSS integrado ao Matlab. O objetivo é minimizar a soma dos custos das perdas elétricas, dos capacitores e dos indutores, atendendo as restrições operacionais da rede de energia elétrica. São alocados três geradores fotovoltaicos na rede elétrica. Os geradores possuem inversores de frequência que injetam harmônicas na rede elétrica. Os filtros passivos são alocados na rede para filtrar as harmônicas nocivas, garantir uma operação segura da rede elétrica e reduzir as perdas elétricas. Outra restrição que as harmônicas podem infringir na rede é o limite de distorção harmônica total recomendada na IEEE STD 519-2014. A meta-heurística utilizada para buscar a melhor solução para o problema é o algoritmo genético Chu-Beasley. Os estudos desta pesquisa ajudarão as concessionárias de energia elétrica na redução das perdas elétricas, elevação da tensão nas barras e evitar ressonância harmônica na rede.

Palavras-chaves: Alocação de capacitores e filtros passivos; Algoritmo genético Chu-Beasley; Componentes harmônicas; Compensação dos reativos; Rede de distribuição de energia elétrica.

Abstract

The proposal of this paper is the allocation of capacitor banks and passive filters in a 34 bus power distribution network to compensate the reactive power of the power network and filter the harmonic components. For the simulation was used the OpenDSS software integrated with Matlab. The objective is to minimize the sum of the costs of the power losses, of the capacitors and of the inductors, attending the operational restrictions of the power network. Three photovoltaic generators are allocated in the power network. The generators have frequency inverters that inject harmonics into the power network. Passive filters are allocated in the network to filter the harmful harmonics, ensure safe operation of the power network and to reduce power losses. Another restriction that harmonics can infringe in the network is the limit of total harmonic distortion recommended in IEEE STD 519-2014. The meta-heuristic used to find the best solution to the problem is the Chu-Beasley genetic algorithm. The studies of this research will help electrical energy concessionaires to reduce power losses, increase the voltage in the bus and avoid harmonic resonance in the network.

Key-words: Allocation of capacitors and passive filters; Chu-Beasley genetic algorithm; Harmonic components; Reactive compensation; Electrical distribution network.



1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica apresentam cargas indutivas que causam a redução do fator de potência do sistema, como consequência, há perdas de energia elétrica nos condutores e quedas de tensões nas barras da rede elétrica. Dependendo da quantidade de cargas reativas no sistema, as tensões podem encontrar-se fora do intervalo permitido pela ANEEL (ANEEL, 2017). A alocação de bancos de capacitores na rede de distribuição permite compensar a potência reativa indutiva, reduzindo as perdas elétricas e elevando as tensões na rede de energia. O fator de potência da subestação de energia deve estar acima de 0,92 de acordo com a ANEEL (ANEEL, 2017).

A rede de energia usada nas simulações se encontra na Figura 6. (Apêndice A) conforme Prado (PRADO, 2013). A rede elétrica é trifásica, simétrica e equilibrada de 34 barras. Três Geradores Distribuídos (GD) são alocados nessa rede. Os GD descentralizam a geração radial que depende da subestação de energia elétrica, além de aumentar a confiabilidade da rede e reduzir as perdas elétricas.

Os três geradores fotovoltaicos injetam correntes harmônicas no sistema de energia. As harmônicas mais significativas injetadas pelos inversores de frequência são a terceira, quinta e sétima harmônicas (BALDA, 2003). Essas componentes harmônicas podem causar distorções harmônicas acima da recomendada pela norma (IEEE STD 519-2014, 2014). Essa norma recomenda um limite máximo de distorção harmônica total da tensão (DHT_V) de 5% no ponto de acoplamento comum. A alocação de filtros passivos é necessária para filtrar as harmônicas na rede. Na frequência fundamental o filtro é visto como carga capacitiva, sendo útil na compensação do fator de potência.

O objetivo da pesquisa é minimizar a soma dos custos das perdas de energia elétrica nos condutores, os custos dos bancos de capacitores e dos indutores na rede de distribuição utilizando o software OpenDSS (DUGAN, 2013) integrado ao Matlab e implementando o algoritmo genético Chu-Beasley (AGCB) (SEMENSATO, 2018) para a otimização do problema. A simulação deve atender as restrições operacionais da rede de distribuição como: nível de tensão nas barras, fator de potência na subestação de energia e distorção harmônica total. Artigos na literatura sobre alocação de filtros passivos e bancos de capacitores não utilizam o AGCB na otimização (SILVA, 2017; GHIASI, 2008 e PAMPLONA, 2003).

Na seção 2 é desenvolvida a formulação matemática do problema, na seção 3 é apresentado o algoritmo genético Chu-Beasley para a otimização do problema, na seção 4 são apresentados os resultados obtidos, e a seção 5 é a conclusão sobre a pesquisa.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Os dados da rede elétrica de 34 barras (PRADO, 2013) são armazenados no banco de dados que é utilizado para a simulação. São armazenados os valores das resistências e reatâncias das linhas, e os valores das potências ativas e reativas das cargas elétricas.



O programa do fluxo de potência da rede elétrica é desenvolvido no ambiente OpenDSS e o algoritmo de otimização AGCB é desenvolvido no MatLab. Nos estudos de fluxo de potência, as cargas são modeladas como impedância e geradores distribuídos são tratados como fontes de injeção de corrente. Os elementos passivos são incluídos como admitâncias na matriz de admitâncias da rede elétrica que é resolvida diretamente. A busca do AGCB é pela melhor alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos na rede, ou seja, aquela que minimize a função objetivo. A factibilidade é dada com base nas restrições operacionais da rede.

2.1 Função Objetivo

A função objetivo do problema em (1) é a soma dos custos das perdas de energia nos condutores da rede de energia elétrica, dos custos dos bancos de capacitores e dos indutores. Os custos são avaliados durante o período de dez anos, que é o tempo de vida útil estimado de bancos de capacitores, seguindo a tensão máxima de 1,05 p.u (TEIXEIRA, 2016). O preço da energia elétrica e a demanda de energia da rede elétrica nesse período são considerados constantes. As perdas nos condutores são consideradas para a componente fundamental e para as componentes harmônicas.

$$fo = Pat * C + Q * BC + E * I \quad (1)$$

Pat = Soma das perdas de energia elétrica nas linhas ocasionadas pelas correntes elétricas da componente fundamental (*Pf*) e das componentes harmônicas (*Phar*) no período de dez anos (MWh).

C = Custo de energia elétrica: R\$ 270/MWh (CCEE, 2020).

BC = Soma das potências dos bancos de capacitores (kVAr) alocados na rede elétrica.

Q = Custo da potência do banco de capacitor: R\$ 21,165/kVAr.

I = Soma dos indutores (mH) na rede elétrica.

E = Custo dos indutores: R\$ 49,80/mH.

Na Tabela 1 é mostrado os bancos de capacitores, em kVAr, que são utilizados na simulação, tanto como compensador reativo quanto para filtros passivos. Os indutores dos filtros passivos são calculados por fase segundo (MELO, 2020). Os filtros podem ser sintonizados para duas frequências harmônicas (quinta e sétima).

| | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|
| 75 | 150 | 300 | 450 | 600 |
|----|-----|-----|-----|-----|

Tabela 1 - Valores das potências dos bancos de capacitores trifásicos, em kVAr

Fonte: Próprio autor



2.2 Restrição do nível de tensão elétrica

A restrição de tensão (V_f) em cada barra, calculada para frequência fundamental, é indicada em (2), em p.u.

$$0,95 \leq V_f \leq 1,05 \quad (2)$$

2.3 Restrição da distorção harmônica total

A restrição da distorção harmônica total da tensão (DHT_V) nas barras da rede é indicada em (3) (ANEEL, 2017).

$$DHT_V \leq 5\% \quad (3)$$

2.4 Restrição do fator de potência da subestação

A restrição do fator de potência (fp) na subestação, calculada para a frequência fundamental, é indicada em (4).

$$fp \geq 0,92 \quad (4)$$

3. ALGORITMO GENÉTICO CHU-BEASLEY

O algoritmo genético de Chu-Beasley foi utilizado para a otimização, pois o mesmo apresenta características tais como identificar o valor da função objetivo que quantifica a factibilidade e a infactibilidade dos indivíduos da população. Neste artigo, o AGCB busca as melhores soluções para minimizar a função objetivo em (1) e atender as restrições operacionais em (2), (3), e (4). O algoritmo foi implementado no software MatLab em integração com o OpenDSS.

Os indivíduos da população são codificados em um vetor de 21 colunas, correspondente a sete barras alocadas, que contém o número da barra de alocação (a), o valor da potência do banco de capacitor (b) e a harmônica a ser filtrada (c) para cada uma das sete barras alocadas. Na Tabela 2 é apresentado um indivíduo como exemplo. O índice "1" na coluna da harmônica filtrada (c) significa que o capacitor é alocado sem indutor, ou seja, não é sintonizado.

| a | b | c | a | b | c | ... | b | c |
|----|-----|---|----|----|---|-----|-----|---|
| 10 | 600 | 5 | 15 | 75 | 7 | ... | 450 | 1 |

Tabela 2 - Exemplo de um indivíduo

Fonte: Próprio autor



É utilizado a estratégia de substituir na população apenas um elemento em cada iteração e de evitar adicionar na população topologias já armazenadas, isto é, a população não deve ser homogênea. A solução é obtida após um número pré-estabelecido de iterações. Segue abaixo os passos da implementação do AGCB e na Figura 7 (Apêndice B) é mostrado o fluxograma do AGCB.

1. Geração da população inicial aleatoriamente;
2. Calculado o custo em reais e a factibilidade dos indivíduos;
3. Dois indivíduos diferentes entre si são selecionados aleatoriamente, aquele que apresentar melhor aptidão é escolhido;
4. Outros dois indivíduos diferentes tanto entre si quanto aos do passo 3 são selecionados aleatoriamente, aquele que apresentar melhor aptidão é escolhido;
5. É feita a recombinação em um ponto dos indivíduos escolhidos nos passos 3 e 4, aquele que apresentar melhor aptidão é escolhido para a mutação de ponto único;
6. O indivíduo depois da mutação é comparado com o indivíduo da população original que apresentar a pior aptidão. Caso o indivíduo depois da mutação tenha melhor aptidão, é realizada a substituição na população, caso contrário, será descartado;
7. Os passos 3, 4, 5 e 6 são repetidos até um número pré-estabelecido de iterações. Ao atingir esse número é escolhido o melhor indivíduo da população como sendo a solução.

4. RESULTADOS

A simulação foi realizada em um computador com Intel Core i5 processor, 12 GB RAM, Windows 10: 64 bits. O tempo de simulação média é de 8 minutos.

Nesse sistema a potência de base utilizada foi de 1 MVA e a tensão de base é igual a 11 kV. A tensão na subestação é simétrica e vale 1 p.u.

São utilizadas aproximadamente 20% do total de barras, ou seja, os bancos de capacitores e filtros passivos são alocados em no máximo sete barras. A população do AGCB é de 50 indivíduos e o número de iterações é 250, valores esses obtidos por meio de testes durante as simulações.

Os três geradores distribuídos são alocados nas barras 12, 25 e 30 da rede elétrica de média tensão (PRADO, 2013). Os valores das correntes de cada gerador fotovoltaico para a fundamental e harmônicas são descritos na Tabela 3. Sendo os três geradores fotovoltaicos iguais entre si. Descartou-se a terceira harmônica na simulação dentre as três mais significativas, pois na rede equilibrada em questão não é considerado o retorno à terra.



| | CASO | | | | |
|---------------|------|----|----|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 60 Hz | 20 | 20 | 20 | 0 | 60 |
| 300 Hz | 12 | 12 | 12 | 0 | 42 |
| 420 Hz | 8 | 8 | 8 | 0 | 24 |

Tabela 3 - Valores por fase da corrente fundamental e das correntes harmônicas, em Ampères, para cada GD

Fonte: Próprio autor

São simulados cinco casos, sendo que apenas no caso 4 os três geradores fotovoltaicos não estão alocados na rede.

- Caso 1: A rede elétrica com a demanda original;
- Caso 2: As cargas elétricas são acrescidas de 10 %;
- Caso 3: As cargas elétricas são acrescidas de 20 %;
- Caso 4: As cargas com demanda original, porém, sem os geradores fotovoltaicos alocados na rede;
- Caso 5: As cargas com demanda original, porém com aumento da corrente fundamental e das harmônicas dos três geradores fotovoltaicos.

A localização das barras, os valores dos bancos de capacitores e dos indutores obtidos como solução pelo AGCB nos cinco casos simulados encontra-se na Tabela 9 (Apêndice C).

É mostrado o comparativo antes e depois da alocação dos filtros passivos e bancos de capacitores (Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8), quantificando os custos (fo) em reais, as perdas de potência ativa (Pat) no período de dez anos, o DHT_V referente a barra com o maior índice e o fp na subestação de energia elétrica.

4.1 Resultados do caso 1

No caso 1, após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos é possível obter uma resposta melhor em relação aos níveis de tensão, aos custos e que atende às restrições operacionais. Além da redução das perdas ativas na frequência fundamental de 42,86 % depois da alocação, verifica-se a redução das perdas nas componentes harmônicas de 79,49 %, diminuindo o DHT_V na rede, o que evidencia a atuação dos filtros passivos sintonizados, conforme Tabela 4.



| | Antes | Depois |
|----------------------------|--------------|--------------|
| Custos (R\$) | 2.457.232,20 | 1.422.932,28 |
| Redução (%) | - | 42,09 |
| <i>Pat</i> (MWh) | 9100,86 | 5030,20 |
| Redução (%) | - | 44,73 |
| <i>Pf</i> (MWh) | 8636,59 | 4934,97 |
| Redução (%) | - | 42,86 |
| <i>Phar</i> (MWh) | 464,27 | 95,23 |
| Redução (%) | - | 79,49 |
| <i>DHT_v</i> (%) | 1,71 | 0,24 |
| <i>fp</i> | 0,779 | 0,988 |

Tabela 4 - Resultados antes e depois da alocação de bancos de capacitores e filtros passivos para o caso 1
Fonte: Próprio autor

Os níveis de tensão são mostrados na Figura 1, em que se compara a solução antes e depois da alocação.

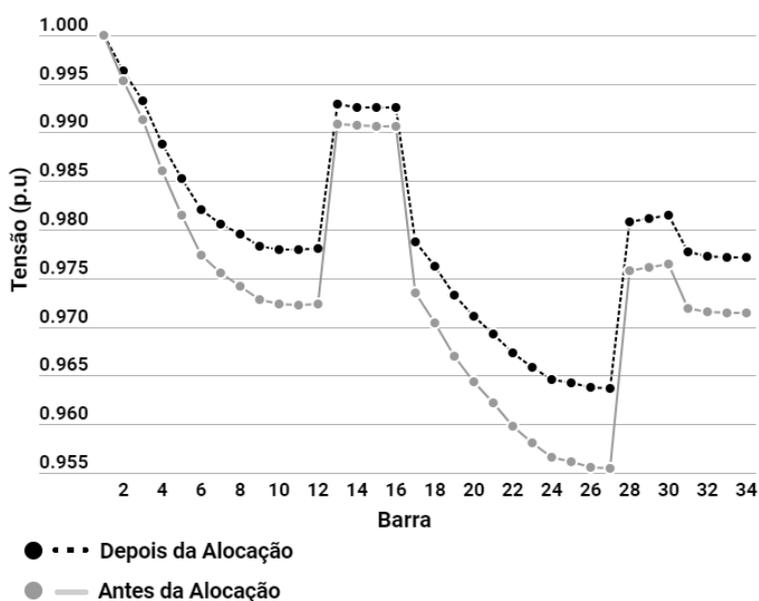


Figura 1 - Comparação da tensão antes da alocação e depois da alocação para o caso 1
Fonte: Próprio autor

4.2 Resultados do Caso 2

No caso 2, após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos é possível obter uma resposta melhor em relação aos níveis de tensão, aos custos e que atende às restrições operacionais. Os custos e as quedas de tensões nas linhas antes da alocação são maiores ao comparar com o caso 1 devido ao aumento das cargas. Após a alocação, os

custos tiveram uma redução igual a 40,15 %. A atuação dos filtros passivos sintonizados é comprovada pela redução das perdas de potência ativa pelas frequências harmônicas de 80,24 %, diminuindo o DHT_V na rede, de acordo com a Tabela 5.

| | Antes | Depois |
|--------------|--------------|--------------|
| Custos (R\$) | 3.088.396,89 | 1.848.556,50 |
| Redução (%) | - | 40,15 |
| Pat (MWh) | 11438,51 | 6536,11 |
| Redução (%) | - | 42,86 |
| Pf (MWh) | 10974,24 | 6444,36 |
| Redução (%) | - | 41,28 |
| $Phar$ (MWh) | 464,27 | 91,76 |
| Redução (%) | - | 80,24 |
| DHT_V (%) | 1,72 | 0,27 |
| fp | 0,789 | 0,998 |

Tabela 5 - Resultados antes e depois da alocação de bancos de capacitores e filtros passivos para o caso 2
Fonte: Próprio autor

Os níveis de tensão são mostrados na Figura 2, em que se compara a solução antes e depois da alocação. Para essa condição de carga existem limites de tensão violados, que foram corrigidos após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos na rede.

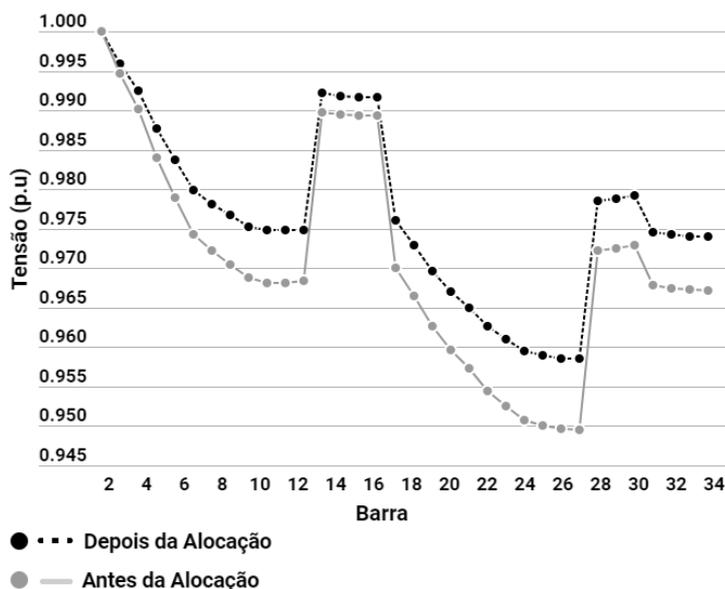


Figura 2 - Comparação da tensão antes da alocação e depois da alocação para o caso 2
Fonte: Próprio autor

4.3 Resultados do Caso 3

No caso 3, após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos é possível obter uma resposta melhor em relação aos níveis de tensão, aos custos e que atende às restrições operacionais. Em comparação com os casos 1 e 2, os custos e as quedas de tensões nas linhas antes da alocação são maiores devido ao aumento das cargas. Os filtros passivos sintonizados atuam de forma a reduzir o DHT_V, DHT_V na rede (menor que 0,26 %) além de reduzir as perdas ativas na frequência fundamental (39,70 %) como é mostrado na Tabela 6. Este caso obteve a maior redução das perdas harmônicas (81,93 %) em relação aos casos anteriores. O fator de potência na subestação aumentou para um valor permitido por norma, igualmente aos casos anteriores, depois da alocação.

| | Antes | Depois |
|-----------------|--------------|--------------|
| Custos (R\$) | 3.771.332,73 | 2.310.135,94 |
| Redução (%) | - | 38,74 |
| P_{at} (MWh) | 13967,90 | 8227,14 |
| Redução (%) | - | 41,10 |
| P_f (MWh) | 13503,63 | 8143,25 |
| Redução (%) | - | 39,70 |
| P_{har} (MWh) | 464,27 | 83,90 |
| Redução (%) | - | 81,93 |
| DHT_V (%) | 1,73 | 0,25 |
| fp | 0,796 | 0,991 |

Tabela 6 - Resultados antes e depois da alocação de bancos de capacitores e filtros passivos para o caso 3
Fonte: Próprio autor

Os níveis de tensão são mostrados na Figura 3, em que se compara a solução antes e depois da alocação. Com o aumento das cargas é possível encontrar limites de tensões violados que foram corrigidos após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos na rede.

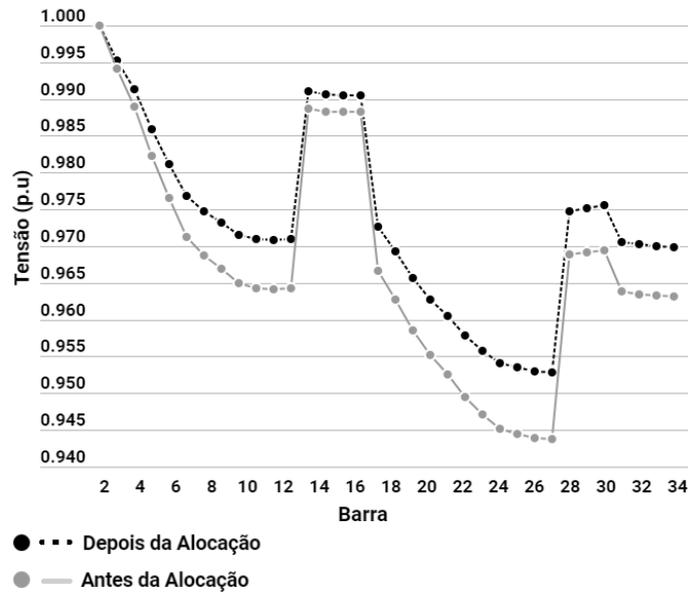


Figura 3 - Comparação da tensão antes da alocação e depois da alocação para o caso 3
 Fonte: Próprio autor

4.4 Resultados do Caso 4

No caso 4 após a alocação dos bancos de capacitores é possível obter uma resposta melhor em relação aos níveis de tensão, aos custos e que atende às restrições operacionais. A redução dos custos atingiu 25,85 %, de acordo com a Tabela 7. As perdas elétricas na frequência fundamental antes da alocação foram maiores que o caso 1, devido a retirada dos geradores da rede. O fator de potência na subestação antes da alocação é maior em relação aos casos anteriores devido ao maior fluxo de potência ativa na subestação.

| | Antes | Depois |
|-----------------|--------------|--------------|
| Custos (R\$) | 3.649.252,23 | 2.705.952,33 |
| Redução (%) | - | 25,85 |
| <i>Pf</i> (MWh) | 13515,75 | 9786,88 |
| Redução (%) | - | 27,59 |
| <i>fp</i> | 0,855 | 0,991 |

Tabela 7 - Resultados antes e depois da alocação de bancos de capacitores e filtros passivos para o caso 4
 Fonte: Próprio autor

Os níveis de tensão são mostrados na Figura 4, em que se compara a solução antes e depois da alocação. Nesse caso havia níveis de tensão que ultrapassavam os limites permitidos, e, com a alocação dos bancos de capacitores, os mesmos foram corrigidos.

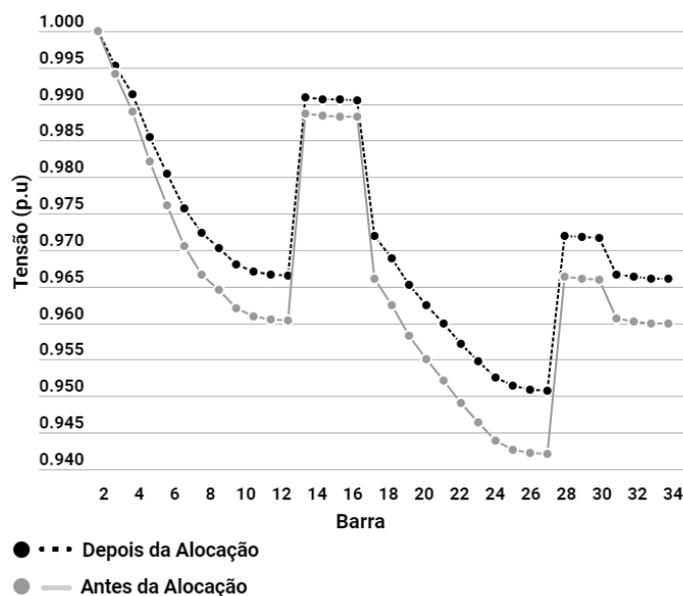


Figura 4 - Comparação da tensão antes da alocação e depois da alocação para o caso 4
 Fonte: Próprio autor

4.5 Resultados do Caso 5

No caso 5 após a alocação dos bancos de capacitores e filtros passivos é possível obter uma resposta melhor em relação aos níveis de tensão, aos custos e que atende às restrições operacionais. Esse caso foi sugerido para superar o limite da restrição do DHT_V , por isso aumentou-se o valor das correntes das frequências harmônicas e a potência na fundamental dos três geradores fotovoltaicos, de acordo com a Tabela 3. A redução das perdas harmônicas neste caso foi de 96,68 %, sendo a maior redução dentre os casos, devido a atuação dos filtros sintonizados que reduz consideravelmente as harmônicas na rede. A redução das perdas da componente fundamental foi de 69,02 % devido aos reativos excedentes dos filtros passivos na frequência fundamental. O fator de potência na subestação, antes da alocação, é o menor valor em relação aos casos anteriores, pois o fluxo de potência ativa é menor na subestação pela presença de geradores distribuídos de potência maior ao longo da rede, sendo que o fluxo de potência reativa permanece unilateral. Neste caso houve a maior redução de custos, de 79,73 %, comparada com os casos anteriores, conforme Tabela 8.

| | Antes | Depois |
|----------------------------|--------------|------------|
| Custos (R\$) | 2.635.805,34 | 534.191,67 |
| Redução (%) | - | 79,73 |
| <i>Pat</i> (MWh) | 9762,24 | 1678,72 |
| Redução (%) | - | 82,80 |
| <i>Pf</i> (MWh) | 4898,17 | 1517,32 |
| Redução (%) | - | 69,02 |
| <i>Phar</i> (MWh) | 4864,07 | 161,40 |
| Redução (%) | - | 96,68 |
| <i>DHT_v</i> (%) | 5,28 | 0,44 |
| <i>fp</i> | 0,407 | 0,944 |

Tabela 8 - Resultados antes e depois da alocação de bancos de capacitores e filtros passivos para o caso 5
Fonte: Próprio autor

Os níveis de tensão são mostrados na Figura 5, em que se compara a solução antes e depois da alocação.

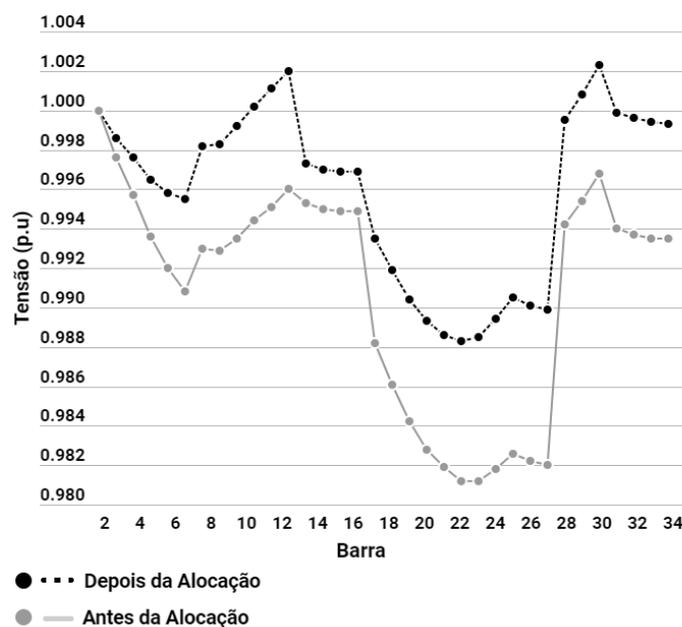


Figura 5 - Comparação da tensão antes da alocação e depois da alocação para o caso 5
Fonte: Próprio autor

5. CONCLUSÕES

Os resultados comprovam que houve uma redução significativa dos custos bem como uma diminuição das perdas elétricas tanto pela componente fundamental quanto pelas componentes harmônicas, e por consequência um acréscimo de tensão nas barras do sistema, para cada um dos cinco casos apresentados. Nota-se uma redução expressiva do DHT_v na rede elétrica, principalmente no caso 5, pela atuação dos filtros passivos sintonizados. A compensação da potência reativa na subestação evita que excedentes reativos vão para a rede de transmissão de energia elétrica. A resposta do AGCB é rápida, com 250 iterações. Os resultados podem contribuir para a compreensão da técnica de algoritmos genéticos especializados aplicados à alocação de filtros passivos em redes de distribuição, a mesma técnica pode ser usada para sistemas maiores e mais complexos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Goiás, campus Jataí, por disponibilizar a estrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ANEEL (2017). Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Modulo 8, 88 p.
- BALDA, J. C. A., and OLIVA, A. R. (2003). PV dispersed generator: A power quality analysis within the IEEE 519. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 525–530.
- CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. (2019). Acesso em outubro de 2019. Disponível em: http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/inicio?_afLoop=12401559701787&_adf.ctrlState=7v-jblyixt_1
- DUGAN, R. C., and MONTENEGRO, D. (2019). Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Electric Power Research Institute. 214 p.
- GHIASI, M., RASHTCHI, V., and HOSEINI, S. H. (2008). Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm. *International Conference on Emerging Technologies*. pp 1-5. Rawalpindi, Pakistan, 18-19 October, 2008.
- IEEE STD 519-2014 (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. New York: IEEE, 2014, pp. 17.
- MELO, I. D., PEREIRA, J. L. R., VARIZ, A. M., and RIBEIRO, P. F. (2020). Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement. *Electric Power Systems Research*. Volume 180, March 2020, pp. 12.
- PAMPLONA, F. M. P., e SOUZA, B. A. (2003). Algoritmos genéticos aplicados ao projeto de filtros harmônicos passivos em sistemas elétricos de distribuição. V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. pp 1-6.
- PRADO, I. F. (2013). Alocação de geração distribuída utilizando o algoritmo genético de chu-beasley e índices de sensibilidade. Dissertação (Mestrado em Energia Elétrica) – Universidade Federal do ABC, Santo André. 126 p.

SEMENSATO, M. (2018). "Alocação de capacitores em redes de distribuição desequilibradas para minimizar as perdas de energia elétrica e o desequilíbrio." Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, UNESP, São Paulo. 136 p.

SILVA, M. P. C., LEBORGNE, R. C., and BARROSO, V. (2017). Análise de Alocação de Filtros para Mitigação de Distorção Harmônica em Sistemas Elétricos de Distribuição. The 12th Latin-american congress on electricity generation and transmission, pp 1-7.

TEIXEIRA, M. D., PENICHE, R. A., PAULILLO, G., AOKI, A. R., PEREIRA, O. O., e BIAZON, R. B. (2016). Análise da Vida Útil de Bancos de Capacitores Submetidos a Tensões Não Senoidais. Instituto CTGI: Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, pp.1-6.



APÊNDICE A

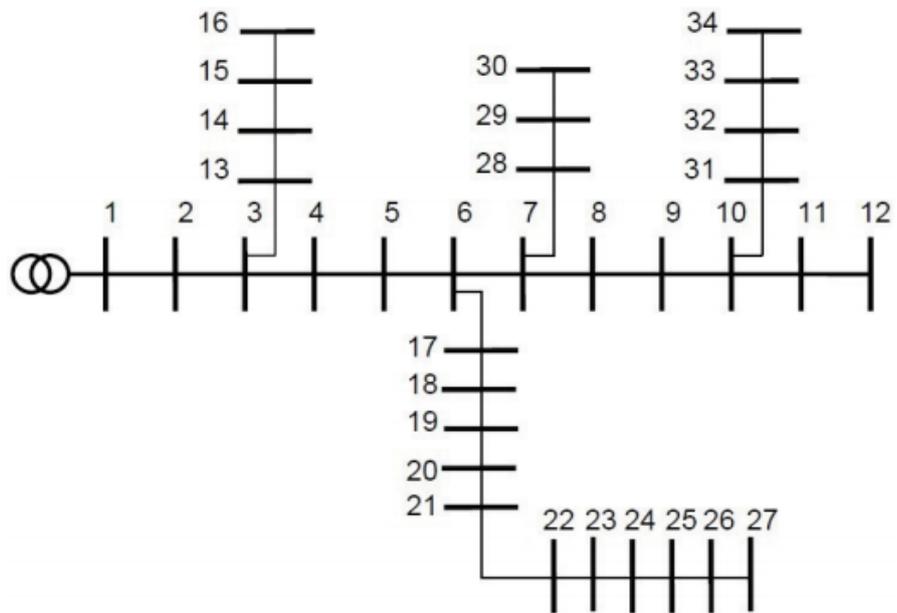


Figura 6 - Rede de distribuição de 34 barras
Fonte: (PRADO, 2013)

APÊNDICE B

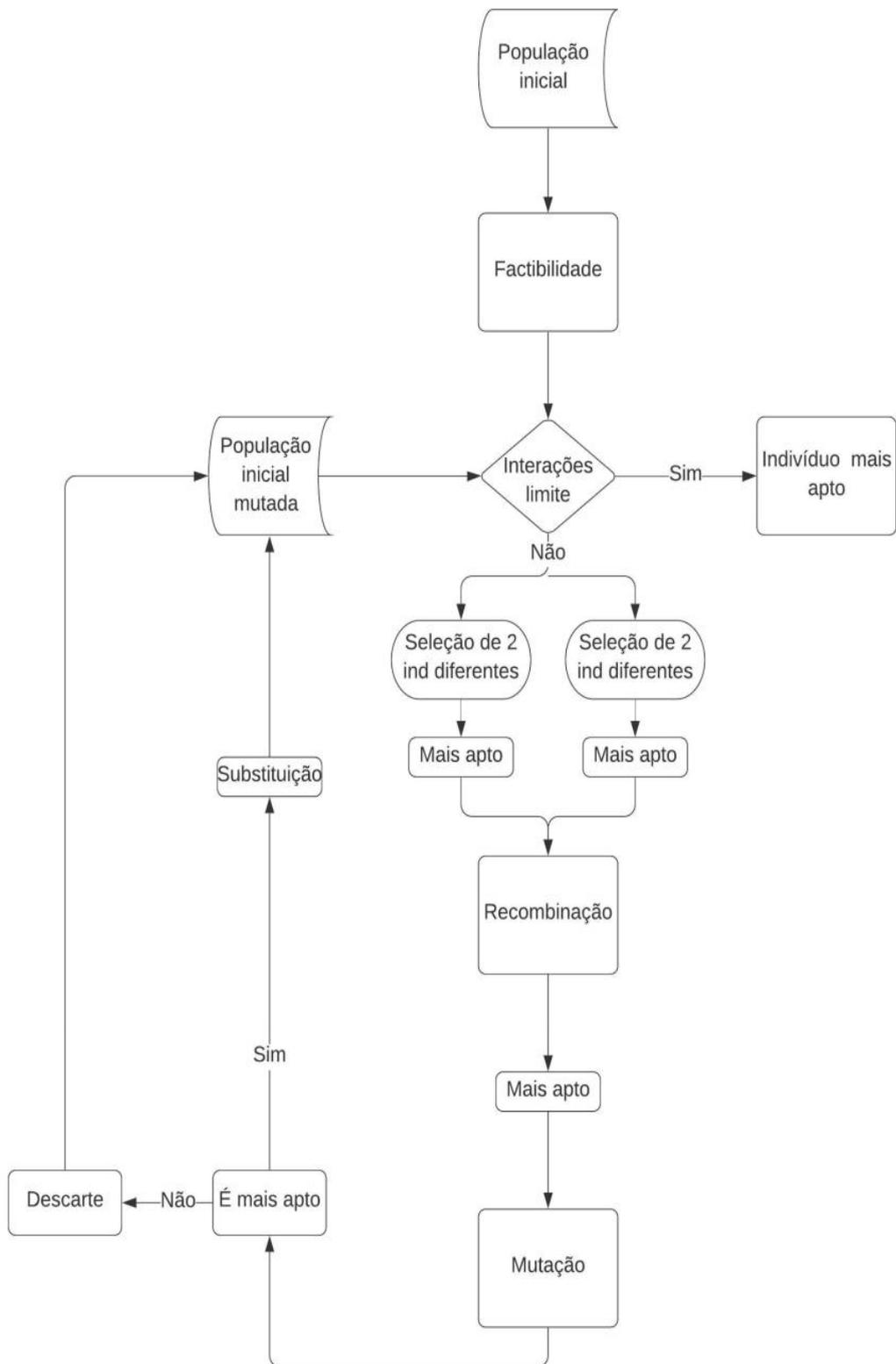


Figura 7 - Fluxograma do AGCB
Fonte: Próprio autor

APÊNDICE C

| | Barra da rede elétrica - Banco de capacitor (kVAr) - Indutor (mH) |
|---------------|---|
| Caso 1 | 31-450-14,556; 08-450-28,53; 18-450-14,556; 25-600-21,397; 22-450-14,556 |
| Caso 2 | 28-600-10,917; 06-450-28,530; 05-450-28,530; 23-600-10,917; 32-450-28,530; 26-450-28,530 |
| Caso 3 | 05-600-21,397; 21-450-14,556; 24-300-21,834; 22-150-43,668; 08-600-10,917; 31-450-28,530; 26-450-28,530 |
| Caso 4 | 25-300-0; 22-450-0; 28-450-0; 23-450-0; 18-600-0; 4-300-0; 11-450-0 |
| Caso 5 | 25-450-14,556; 12-450-28,530; 10-150-43,668; 25-300-42,795; 17-300-21,834; 30-450-28,530; 19-300-21,834 |

Tabela 9 - Localização das barras, valores dos bancos de capacitores e indutores para cada caso simulado
Fonte: Próprio autor

CAPÍTULO 6

MANOVACUOMETRO ELETRÔNICO UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS

ELECTRONIC MANOVACUOMETER USING INTERNET OF THINGS

Charles Rech

Felipe da Silva Morais

Carlos Eduardo de Souza

Cristiano Frandalozo Maidana

Pericles Nicolau Balafa

Simone Ferigolo Venturini

Resumo

Com intuito de promover a utilização da internet das coisas (*Internet of Things* – IoT), foi criado um dispositivo de medição dinâmica da pressão pulmonar com leitura via *smartphone* e armazenamento dos dados nas “nuvens” denominado manovacuômetro digital. O *hardware* é constituído de módulos eletrônicos encontrados facilmente no mercado e o *software* foi desenvolvido em plataforma livre, buscando minimizar custos. O aplicativo desenvolvido para trabalhar em conjunto com o manovacuômetro traz múltiplas funcionalidades. Primeiramente, permite a realização de cadastro de usuários para que seja possível gerar uma rastreabilidade a utilização e visualização dos dados do paciente, garantindo assim, a segurança dos exames realizados, solucionando um dos pontos de dificuldade na aplicação de soluções IoT para a área da saúde. O exame realizado possui gráfico em tempo real e a indicação da pressão máxima obtida durante a medição. A aplicação possui conectividade BLE de fácil acesso possibilitando a realização de exames sem conexão com a internet e a extração desses dados através de um arquivo de texto. Oferece ainda a possibilidade de armazenamento do teste do paciente em um banco de dados na nuvem, desde que haja conexão com a internet. Dessa forma, exames do banco de dados podem ser acessados de forma remota por qualquer usuário autenticado do aplicativo. O conceito do dispositivo de medição de pressão pulmonar, foi criado com tecnologia (disponível no mercado) nacional, contribuindo para o desenvolvimento da área da saúde.

Palavras chave: Medição de pressão pulmonar, internet das coisas, armazenamento em nuvens.

Abstract

With the goal of promoting the use of Internet of Things (IoT), a device was developed for dynamic measurement of lung pressure, using a smartphone for data acquisition and cloud storage. The device is called digital manovacuumeter. The hardware is composed of off-the-shelf electronic modules, and the software was developed in an open platform, aiming cost reduction. The app developed to work along with the manovacuumeter brings multiple functionalities. Primarily, it allows for user registering, making it possible to track the use and to visualize the patient data. This brings safety for the exams, what is one important issue of IoT solutions in the health field. The performed exam generates a real time graph and the indication of the maximum pressure obtained during the measurement. The app has a BLE connection with easy access, allowing the execution of exams without internet connection and the extraction of data through a text file. It offers also the possibility of storing the patient's exams data in a cloud database, what can be accessed remotely by other certified app user. The concept of a device for lung pressure measurement was created with technology available in the national market, contributing to the development of the health field.

Key-words: pulmonary pressure measurement, internet of things, cloud storage



1. INTRODUÇÃO

Realizar medições mecânicas com maior confiabilidade tem sido um desafio tecnológico e de interesse de diversas áreas das atividades humanas, assim como obter dados de baixo custo com alta resolução. Nesse aspecto, dispositivos de medição analógicos passam por um processo de substituição por sistemas de leitura digital associados ao armazenamento em nuvens.

Essas transformações ocorrem principalmente na expansão da chamada Internet das Coisas, ou *Internet of Things (IoT)*, que surge como tendência na tecnologia da informação e se aprimora com o desenvolvimento de áreas como sensoriamento remoto, sistemas embarcados, comunicação e microeletrônica. Com isso, existe um crescimento na quantidade de dispositivos inteligentes capazes de se conectar e trocar informações em uma rede de comunicação.

Dentro das possíveis áreas de aplicações do *IoT*, a saúde apresenta um grande potencial com inúmeras possibilidades de aplicabilidade. A tecnologia *IoT* está intimamente ligada ao armazenamento em nuvem e acesso de informações remotamente, isso aplicado na área da saúde melhora o atendimento médico, o diagnóstico preventivo de doenças e auxilia na tomada de decisão utilizando do prontuário eletrônico alimentado com dados obtidos através das medições dos dispositivos. Há grande expectativa em relação às soluções de *IoT* para o setor de serviços de saúde, seja para incrementar a eficiência operacional das unidades, com melhor controle de recursos, seja para monitorar pacientes, além do apoio ao diagnóstico e referência a distância (BNDES; MCTIC, 2017).

Uma possível aplicação, utilizando meios digitais para leitura de medições mecânicas na área da saúde, é a medição da pressão expiratória máxima (PE_{máx}) e a pressão inspiratória máxima (PI_{máx}) para avaliar a força gerada pelo conjunto dos músculos inspiratórios e expiratórios. Estes dados possibilitam que seja diagnosticada a fraqueza dos músculos envolvidos na respiração, a insuficiência respiratória devido a falência/fadiga muscular respiratória e ainda auxilia na elaboração de protocolos terapêuticos, tais como avaliar o comportamento das forças respiratórias antes e após treinamentos bem como avaliar pacientes críticos sob ventilação mecânica invasiva entre outros (SODRÉ, 2017).

A obtenção das pressões respiratórias estáticas máximas é realizada através da manovacuometria, um teste amplamente utilizado em procedimentos médicos e fisioterápicos, e consiste na mensuração das pressões respiratórias estáticas máximas por meio de um dispositivo clássico e confiável, denominado manovacômetro, cujo teste feito é não invasivo e rápido (SANTOS, 2017). Normalmente estas medidas são realizadas por meio de equipamentos analógicos que permitem apenas uma mensuração pontual, sem caracterizar toda a curva de pressão. Em contrapartida, os equipamentos eletrônicos propiciam a aquisição de toda a curva de pressão exercida pelo indivíduo durante o teste, podendo ser avaliada posteriormente por pessoas especializadas da área. (MONTEMEZZO, 2010). Urge, portanto, a necessidade de utilização de equipamentos eletrônicos na avaliação da capacidade pulmonar.

O objetivo deste trabalho é, por conseguinte, apresentar o desenvolvimento de um



manovacuômetro eletrônico digital capaz de realizar medições com grande confiabilidade na medição e custo reduzido, comparados aos manovacuômetros analógicos; desenvolver interface em *software* de código aberto para dispositivos móveis de fácil utilização; e disponibilizar as medições realizadas em tempo real para acesso remoto através do armazenamento em nuvem gerando um histórico eletrônico do paciente

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas diferentes áreas das atividades humanas é necessário coletar dados físicos para comparação com padrões aceitáveis e pré-estabelecidos por normas técnicas. Dessa forma, medições são processos de fundamental importância para observar, avaliar e controlar investigações científicas e tecnológicas.

As medições são efetuadas utilizando instrumentos dimensionados e construídos para uma tarefa específica. Tais instrumentos possuem uma cadeia de medição que é definida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012) sendo uma série de elementos de um sistema de medição que constitui um único caminho para o sinal, do sensor até o elemento de saída, como na visto na Figura 1.

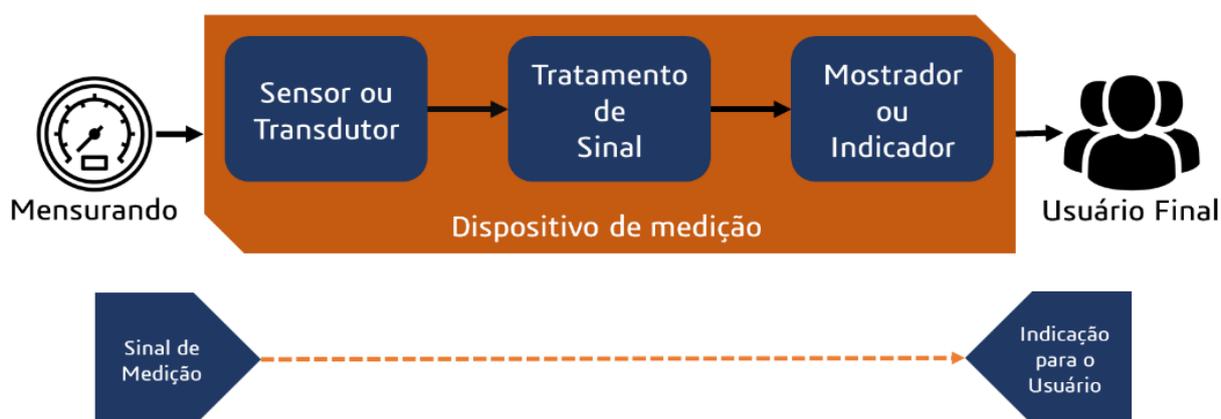


Figura 1 – Cadeia de medição típica.
Fonte: Autores (2021).

O termo sensor é utilizado para denominar dispositivos que reagem à alguma forma de energia e a resposta dessa reação pode ser relacionada com grandezas físicas que necessitam ser mensuradas. Se o comportamento da variável física for conhecido, seu desempenho poderá ser monitorado e avaliado por meio de métodos adequados de detecção, condicionamento de sinal e terminação. Os transdutores por sua vez, são dispositivos completos que contemplam o sensor e eventuais circuitos utilizados para preparar o sinal antes de ser utilizado em dispositivos de controle.

A medição de pressão dinâmica é praticada em uma ampla gama de aplicações que vão desde, por exemplo, a avaliação do desempenho da lâmina em uma turbina a gás até o diagnóstico de doenças cardiovasculares. No entanto, a maioria das aplicações se enquadra amplamente no domínio da engenharia mecânica. Essas medições são feitas usando um sensor de pressão, do qual muitos tipos diferentes estão em uso. O tempo

constante de um segundo é arbitrário, mas serve para distinguir entre medições estáticas ou pressões constantes e eventos dinâmicos (CLARK, 1989).

Os transdutores de pressão piezoelétricos baseiam-se na propriedade do cristal de quartzo, que se deforma elasticamente, produzindo um potencial elétrico em seus terminais através de certo plano cristalográfico (Figura 2). A tensão medida é muito pequena (por exemplo, 1 mV por kg/), por isso o elemento piezoelétrico é sempre conectado a um amplificador (THOMAZINI & ALBUQUERQUE, 2020) para que o sinal medido possa ser processado adequadamente, e então interpretado.

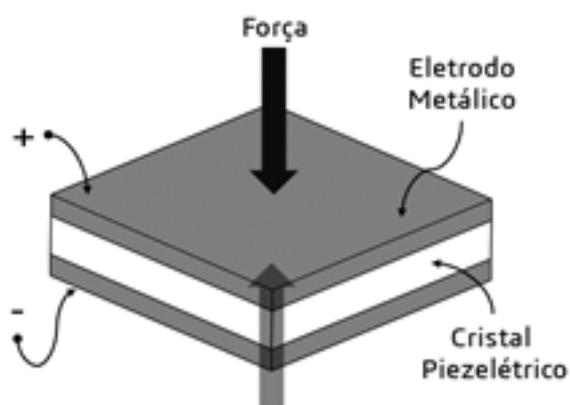


Figura 2 – Esquema de funcionamento de um sensor piezoelétrico.
Fonte: Adaptado de THOMAZINI & ALBUQUERQUE (2020).

3. METODOLOGIA

Na Figura 3 é mostrado um desenho esquemático das etapas necessárias para a confecção da malha de medição do manovacuômetro digital. Além disso, são descritos quais os métodos e materiais utilizados durante as etapas de produção do sistema de medição.

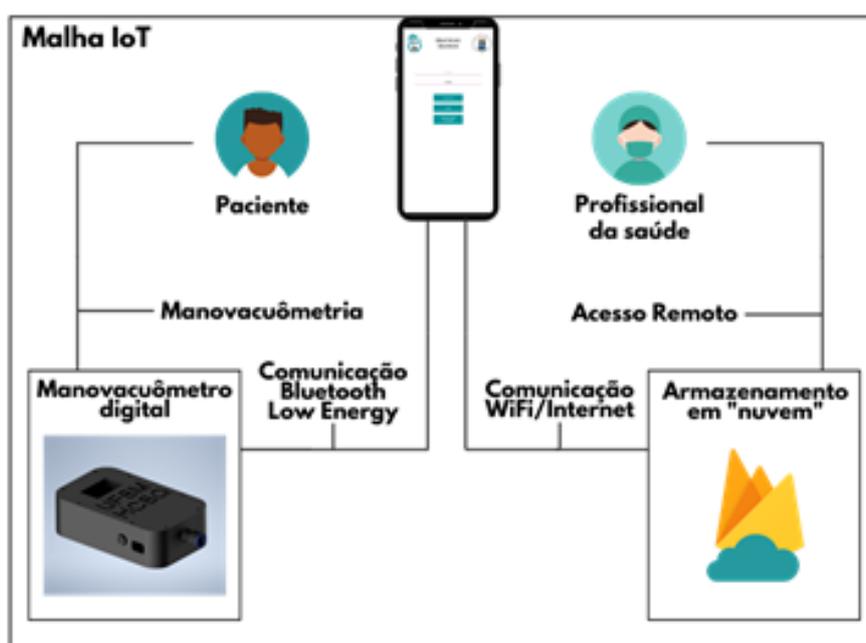


Figura 3 - Malha IoT.
Fonte: Autores (2021).

O foco do medidor proposto é realizar a medição de pressão pulmonar inspiratória em pacientes submetidos a ventilação mecânica. Além disso, disponibilizar um aplicativo gratuito que possibilita a visualização da curva de pressão em relação ao tempo durante o exame e que permita salvar os dados do teste localmente ou em um banco de dados.

Em geral, um medidor “inteligente” pode apresentar algumas características, dentre elas cabe ressaltar: medição de pressão pulmonar inspiratória e expiratória; informar a pressão máxima ao final do teste; construir a curva de pressão em tempo real; possuir comunicação sem fio; interatividade com um banco de dados (“nuvem”); aplicação interativa para visualização e manipulação de dados.

A avaliação dos pacientes, antes de iniciar o processo de desmame da ventilação mecânica, é importante, contribuindo para evitar a fadiga muscular respiratória e estabelecer estratégias mais apropriadas de liberação do suporte ventilatório. A forma mais usual de avaliar a função muscular respiratória de pacientes críticos é a medição da pressão inspiratória máxima (CLANTO; DIAZ, 1995).

Wescott e Bendixin (1962) verificaram que uma pressão inspiratória máxima entre -20 e -30 cmH_2O , obtida de pacientes que sofreram bloqueio neuromuscular, era suficiente para considerar a transferência do paciente à sala de recuperação pós-anestésica. De acordo com Sodré (2017), para pacientes submetidos a ventilação mecânica em treinamento muscular respiratório é necessário sustentar P_{Imax} de -46 cmH_2O para sucesso no desmame. Dessa forma é utilizado um sensor com faixa operacional de $\pm 50,98$ cmH_2O para atender a aplicação em unidades de tratamento intensivo. Devido ao baixo custo e alta confiabilidade dos sensores piezoresistivos, a faixa de operação pode ser alterada facilmente com a substituição do sensor utilizado no sistema de medição, sem a necessidade de mudanças nas conexões, apenas a alteração da equação de calibração. Assim, o manovac metro proposto torna-se versátil e eficiente para diferentes aplica es médicas.

Para a confec o do sistema de medi o foi selecionado um sensor de pressão piezoresistivo XGZP6847005KPGPN (Figura 4) que possui um circuito integrado de aplica o específica responsável por condicionar o sinal analógico de saída (CFSensor, 2019). O módulo sensor de pressão XGZP6847 satisfaz a repetibilidade, linearidade, estabilidade e sensibilidade de modo que podem ser aplicados diretamente em equipamentos médicos segundo a fabricante.

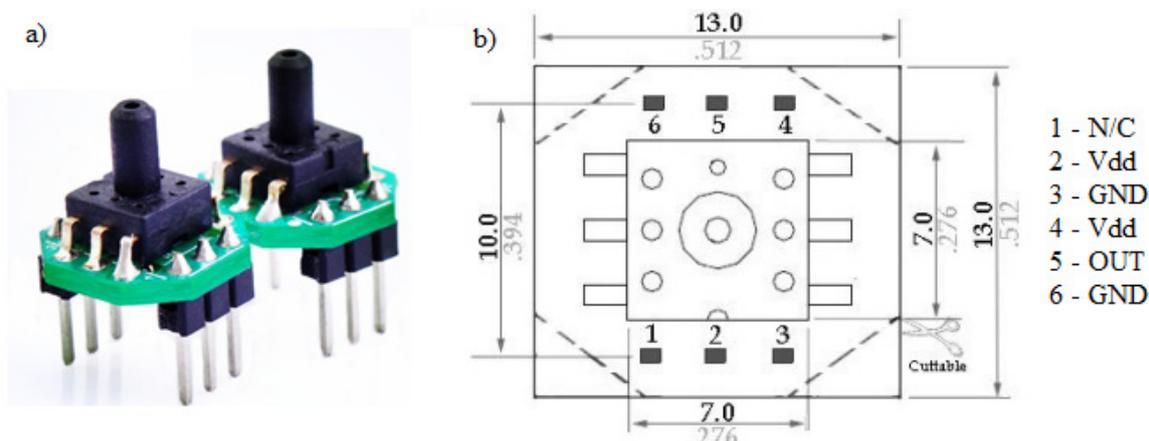


Figura 4 – a) Módulo sensor de pressão XGZP6847005KPGPN, em b) pino para conexão elétrica. Fonte: CFSensor (2019).

Quando fornecido 5 V em corrente contínua (CC) ao pino *Vdd* do sensor, o pino apresenta uma saída analógica variável, dependente da pressão, de 0,5 V até 4,5 V que representa uma escala de -5 kPa até 5 kPa ($\pm 50,98 \text{ cmH}_2\text{O}$). É possível observar a relação linear entre a tensão de saída pela pressão aplicada ao sensor através da curva de calibração fornecida pelo fabricante (CFSensor, 2019).

Devido a necessidade de uma alta resolução dos dados obtidos, é utilizado o conversor analógico digital ADS1115, mostrado na Figura 5. É um componente indicado para circuitos em que o microcontrolador não possui um conversor A/D embutido, ou quando se quer um conversor de alta resolução no projeto. O ADS1115 fornece resolução de 16 bits, em comparação aos 12 bits dos conversores do microcontrolador ESP32, a 860 amostras por segundo com comunicação *I2C* (*Inter-Integrated Circuit*).



Figura 5 – Conversor analógico/digital ADS1115 16 bits com amplificador de ganho programável.
Fonte: Texas Instruments (2019).

O conversor funciona com tensão de alimentação entre 2 e 5,5 V (CC), e a tensão máxima nas entradas analógicas é igual à de alimentação. Os pinos analógicos podem ser programados como 4 pinos independentes ou dois canais diferenciais. Inclui também um amplificador de ganho programável para leitura de sinais analógicos muito baixos, que nesse caso não é necessário pois o sensor já possui um condicionador de sinal integrado. Com este dispositivo é possível obter uma resolução na medição do sinal analógico de tensão elétrica de 0,1875 mV, equivalente a intervalos de pressão na ordem de 0,00478 cmH_2O (Texas Instruments, 2009).

Para desenvolver e expandir na área da internet das coisas são necessárias soluções poderosas, de baixo custo e baixo consumo de energia para os dispositivos. Para tanto, o dispositivo chamado *ESP32* foi lançado no mercado pela *Espressif Systems* em setembro de 2016 para substituir o microcontrolador anterior, o *ESP8266*. Projetado para dispositivos móveis, eletrônicos vestíveis e aplicativos *IoT*, o *ESP32* atinge um consumo de energia ultrabaixo com uma combinação de diferentes tipos de *softwares* proprietários, como o *Arduino IDE*, bem difundido em projetos eletrônicos. O *ESP32* pode funcionar como um sistema independente completo ou como um dispositivo escravo para um *MCU* (*Multi-point Control Unit*) *host*, reduzindo a sobrecarga da pilha de comunicação no processador do aplicativo principal. O *ESP32* pode fazer interface com outros sistemas por fornecer funcionalidade *Wi-Fi* e *Bluetooth* por meio de suas interfaces *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), *UART* (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) e *I2C* (*Espressif Systems*, 2018). Nesse estudo é utilizado um kit de desenvolvimento *LILYGO® TTGO T-Display* que contém o microcontrolador *ESP32* e um tela *OLED* para apresentação de dados e gráficos. A placa *TTGO T-Display* com chip *ESP32* para desenvolvimento de projetos possui funcionalidades totalmente voltadas para o desenvolvimento de projetos *IoT*. Por isso, foi o

microcontrolador escolhido para suprir a necessidade do medidor de pressão.

Uma das funcionalidades da placa de desenvolvimento utilizada é a compatibilidade com alimentação através de baterias de lítio (3,7 V). Porém, devido a necessidade de alimentar o sensor de pressão com tensão de 5 V, para evitar ajustes na curva de pressão, se faz necessário a utilização de três componentes adicionais: um carregador de bateria, um regulador de tensão ajustável e um regulador de tensão fixo. Para controlar a alimentação é utilizado uma chave de seis posições que permite separar a unidade de alimentação da unidade de sensoriamento, exemplificado na Figura 6. Dessa forma, quando o dispositivo estiver desligado e for necessário alterar a programação, a placa de desenvolvimento pode funcionar de forma independente, não criando um retorno de tensão para os dispositivos de alimentação.

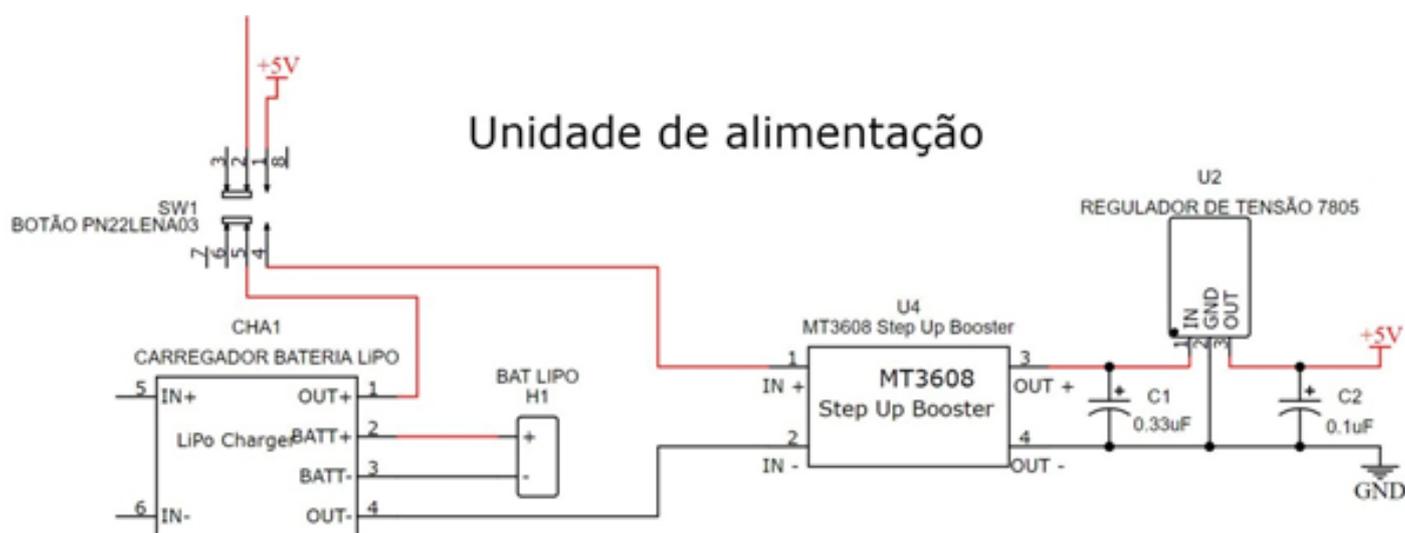


Figura 6 - Esquema elétrico da unidade de alimentação.
Fonte: Autores (2021).

Foi utilizado no dispositivo um módulo carregador de baterias de lítio que possui como principal componente o circuito integrado TP4056, sua configuração é apresentada na Figura 7. Possui dois LEDs indicadores de carga, conexão através de uma entrada micro USB e entrada para baterias de 3,7 V. Além disso, conta com um circuito de proteção da bateria com tensão de corte na saída de 4.2V. A corrente de carregamento pode ser ajustada utilizando resistores, caso seja necessário.

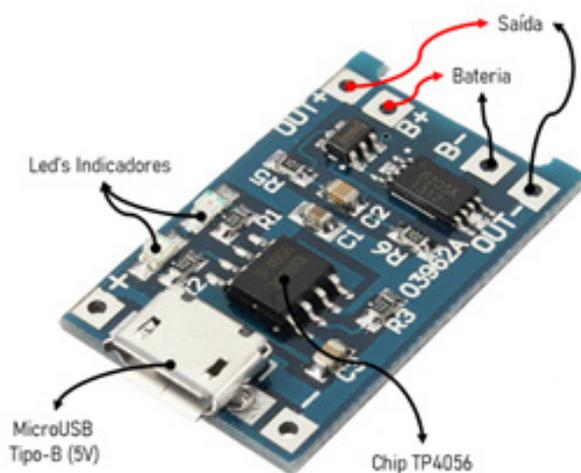


Figura 7 - Conexões do carregador TP4056.

O Regulador de Tensão L7805CV é capaz de regular a tensão de saída em seu terminal, conferindo maior funcionalidade durante a criação de projetos eletrônicos, principalmente no caso de placas de circuito impresso. O terminal de entrada do Regulador de Tensão pode receber tensão de 7 V a 20 V, entretanto, disponibiliza em seu terminal de saída 5 V estabilizado com corrente máxima de 1 A. Segundo a fabricante, é necessário a utilização de dois capacitores, um na entrada e outro na saída, para evitar ruídos e garantir a estabilização da tensão, conforme a Figura 8.

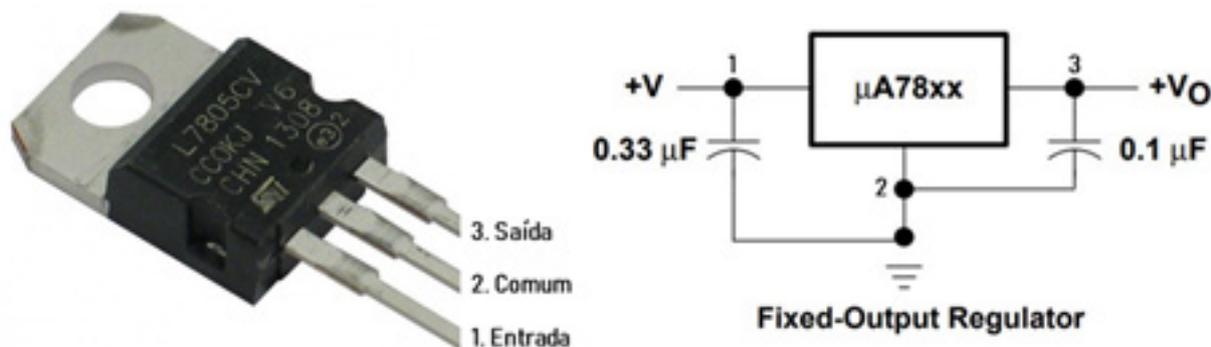


Figura 8 - Pinos do regulador de tensão 7805 e ligação recomendada pelo fabricante
Fonte: Adaptado de ST Eletronics (2018).

O MT3608 é um regulador de tensão ajustável que utiliza o regulador MT3608 (Figura 09) e um resistor variável para realizar o ajuste da tensão de saída. É ideal para projetos que necessitam de diferentes tensões de alimentação para os componentes. Trabalha com tensão de entrada de 2 V a 24 V elevando a tensão para 2,5 V até 28 V com corrente máxima de 2 A.

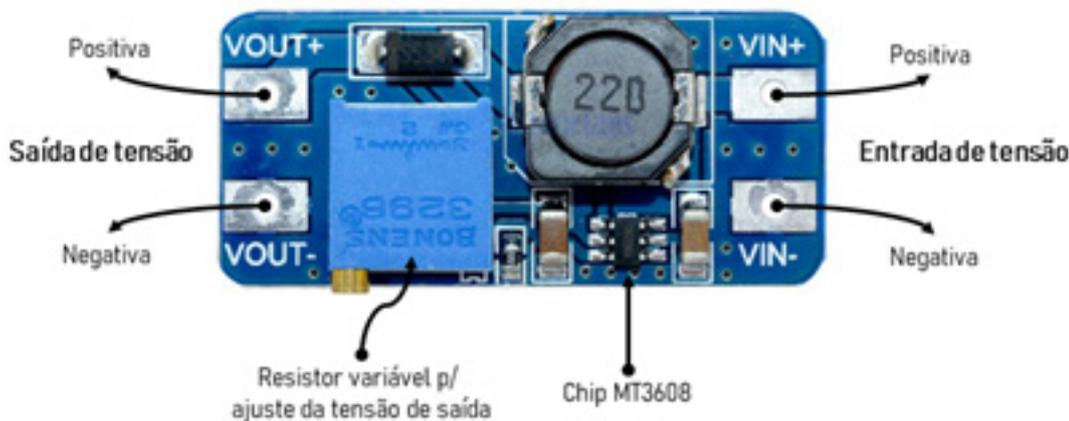


Figura 9 - Aspectos principais do regulador ajustável de tensão MT3608
Fonte: Autores (2021).

O principal recurso da placa *TTGO* é a sua comunicação *Bluetooth*. O sistema *BLE* (*Bluetooth Low Energy*) foi criado com o objetivo de transmitir pacotes de dados muito pequenos por vez, enquanto consome significativamente menos energia que os dispositivos tradicionais. Introduzir tecnologia de baixa energia permite novos dispositivos *Bluetooth* inteligentes que podem operar por meses ou até anos com pequenas baterias de célula tipo moeda. O *BLE* define duas funções de dispositivo na camada de ligação para uma conexão criada: o mestre e o escravo. Um mestre pode gerenciar múltiplas conexões simultâneas com escravos diferentes, enquanto cada escravo pode somente ser conectado a um mestre. Assim, a rede composta por um mestre e seus escravos, é chamada *piconet*, e segue uma topologia em estrela. Atualmente, um dispositivo *BLE* pode pertencer apenas a uma *piconet* (GOMEZ, 2012). Neste projeto o manovacuômetro funciona como mestre e os dispositivos conectados a ele através da interface para dispositivos móveis

como escravos.

Verifica-se, que os dispositivos escravos solicitam serviços ao mestre. Desta forma, ao utilizar o aplicativo em dispositivos móveis, através da comunicação *BLE*, são requisitados dados de medição pulmonar ao manovacuômetro. Quando obedecidas as condições de programação os dados são enviados e armazenados no banco de dados. Para suprir essa cadeia de medição são utilizadas duas plataformas: uma para a criação do aplicativo, o *Kodular*, e outra para criar o banco de dados, o *Firebase*.

O *Kodular* é um *software web* de código aberto para criação de aplicativos *mobile*, desenvolvido baseado na interface *App Inventor* criado pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). A programação é baseada no *drag-and-drop* (clicar e soltar) e possui recursos interativos que possibilitam criar diferentes aplicações em um tempo significativamente menor do que em ambientes de programação tradicionais. A interface realiza a integração do ambiente de *layout*, onde se encontram componentes como botões; e o ambiente de blocos, em que são definidas funções e ações para os componentes.

A programação funciona através da ligação de blocos lógicos. Cada bloco possui uma função e podem ser conectados arrastando e soltando objetos. Além das funcionalidades disponíveis de forma nativa, é possível adicionar bibliotecas externas com diversas funcionalidades. Para o projeto é utilizado a biblioteca externa referente ao *BLE*, sendo possível, desta forma, adicionar blocos de programação que permitem criar uma interface de comunicação entre o manovacuômetro e o dispositivo móvel. Além disso, foi utilizado uma biblioteca de banco de dados local (*Tiny DB*) que permite a cada usuário ter uma ficha de pacientes independente da nuvem.

A comunicação com o banco de dados é realizada através de duas bibliotecas nativas do *Kodular*: *Firebase Authentication* e *Firebase Database*. O primeiro é utilizado para que seja possível ter o histórico e controle das pessoas que acessam a aplicação e, ainda, autorizar que apenas usuários autenticados possam gravar informações no banco de dados. Já a segunda, é necessária para configurar quais dados serão armazenados, em que formato e quando a operação será realizada.

O *Firebase* é uma plataforma do Google que contém várias ferramentas e uma excelente infraestrutura para ajudar desenvolvedores *web* e *mobile* a criar aplicações de alta qualidade e performance. Podendo ser integrado em várias partes da aplicação, esta ferramenta conta com diversos produtos, dentre eles o *Real Time Database*.

O *Firebase Realtime Database* é uma tecnologia muito utilizada para manter estados em tempo real, fornecendo esse sincronismo sem custos (Plano *Spark* – 1 GB de armazenamento) para todos os clientes conectados. Seu armazenamento funciona em forma de árvores ou documento *JSON* (*JavaScript Object Notation*), assim utilizando uma biblioteca cliente é possível subscrever para qualquer caminho da árvore para receber e enviar notificações das mudanças nos dados. Para utilizar o *Firebase* em uma aplicação são necessários alguns passos, sendo esses listados a seguir: criação de um conta de e-mail; criar um novo projeto; na aba *Realtime Database*, é necessário obter duas informações para adicionar ao aplicativo no *Kodular*, são elas: Chave API Web e *Firebase URL*; registrar o aplicativo no *Firebase* para obter o SDK (Kit de desenvolvimento de software). Para isso, é utilizado o *Package Name* que pode ser obtido nas propriedades da primeira tela da



aplicação; Por fim, é necessário adicionar ao *Kodular* um arquivo *JSON* gerado na etapa anterior.

4. RESULTADOS

Na Figura 10 é mostrado o manovacuometro em que foi utilizada uma mangueira pneumática (com diâmetro externo de 8 mm, interno de 5,5 mm e comprimento de 15 mm) e uma linha de pressão de silicone (com diâmetro externo de 6 mm, interno de 2,5 mm e comprimento de 45 mm) unidas através de um adesivo de silicone acético, com o objetivo de evitar o vazamento de ar. Para a fixação foi utilizado dois parafusos e dos quatro insertos.

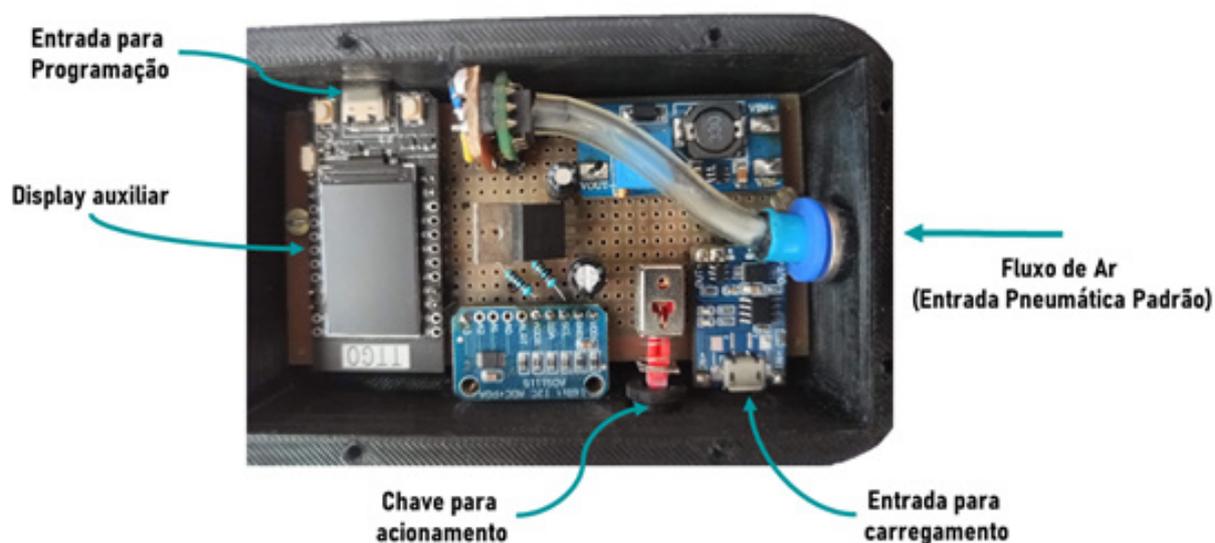


Figura 10 - Arranjo final do dispositivo medidor.
Fonte: Autores (2021).

Foi realizado uma análise de custos considerando o manovacuoômetro proposto e os demais manovacuoômetros apresentados durante o estudo. Para isso, os componentes do dispositivo medidor são listados na Tabela 1 com seus respectivos custos de aquisição. Também é listado o custo com o processo de produção incluindo a impressão da caixa do medidor, conector pneumático e parafusos. Os instrumentos auxiliares para a construção como ferro de solda, estanho e fios não foram incluídos.

| Descrição | Descritivo | Valor | Custo (R\$) |
|-----------|---|--------------------|-------------|
| R1 | Resistor Pull-up SCL | 1k Ω /0,25W | 0,15 |
| R2 | Resistor Pull-up SDA | 1k Ω /0,25W | 0,15 |
| C1 | Capacitor filtro de entrada | 0,33 μ F/50V | 0,35 |
| C2 | Capacitor filtro de saída | 0,1 μ F/50V | 0,39 |
| U2 | Regulado fixo de tensão | LM780 5C | 1,42 |
| U1 | Microcontrolador | T-Display ESP32 | 40,56 |
| U4 | Regulador de tensão ajustável | MT3608 | 8,00 |
| CHA1 | Capacitor da bateria LiPo | TP4056 | 9,20 |
| H1 | Bateria LiPo | 3,7 V | 35,00 |
| SW1 | Chave 6 pinos | PN22LENA03 | 2,38 |
| U6 | Sensor de pressão | XGZP6847 | 57,53 |
| U5 | Conversor analógico-digital | ADS115 | 31,90 |
| Caixa | Impressão + Conector pneumático + Parafusos | - | 11,72 |

Tabela 1 – Lista de componentes utilizados e custos.
Fonte: Autores (2020).

Como mostrado no Quadro 1, o custo do manovacuômetro proposto foi de R\$ 198,75. Sendo o sensor de pressão o componente de maior valor para aquisição. Apesar desse custo maior, o sensor tem a vantagem de não alterar seu valor para diferentes faixas operacionais, ou seja, ao existir a necessidade de utilização do medidor em outras aplicações o custo de produção do dispositivo não se altera. Analisando esse custo deve-se acrescentar os acessórios necessários para o teste, que comumente acompanham os manovacuômetros. É utilizado o kit de acessórios da fabricante Murenas, dessa forma o custo final do dispositivo é de R\$ 298,75.

Realizando a comparação com o manovacuômetro analógico de menor custo apresentado anteriormente, o manovacuômetro da fabricante Ventcare, a redução no valor de aquisição é de aproximadamente 79%, um valor significativo de R\$ 1.140,00. Ainda mais pela quantidade de funcionalidades oferecidas além da medição de pressão em si. Essa redução se torna ainda mais importante quando a comparação é realizada com um medidor de características semelhantes, como o manovacuômetro digital da empresa Homed, que também possui aplicativo *Android* para comunicação com o dispositivo e capacidade de gerar relatórios. Nesse caso, a redução é de 94,66%, resultando em uma diferença de R\$ 5291,49. Tais valores para comparação foram utilizados segundo DORMED (2020) e cotados em 12 de janeiro de 2020.

Para atender aos requisitos do estudo de disponibilizar gráficos em tempo real, permitir armazenamento de dados em nuvem e acesso remoto as medições, criou-se um aplicativo de administração e visualização de dados para *smartphones*. Foi utilizado a plataforma online *Kodular* (KODULAR, 2019) para confecção do aplicativo. A aplicação conta com quatro telas de interação e cada uma delas são exploradas nas seções abaixo.

A primeira tela no *smartphone*, a qual o usuário tem acesso, possui quatro botões de ação. O primeiro obtém os dados de *e-mail* e a senha, que o usuário preenche nas caixas de texto acima do botão, e realiza o cadastro no banco de dados do *Firebase*, gerando assim um número de identificação para cada pessoa cadastrada. O segundo realiza o *login*

e permite o acesso as outras telas caso o cadastro já tenha sido realizado com sucesso. Outra opção de acesso é disponibilizada no terceiro botão através de uma conta *Google*, visto que é necessária para a utilização de qualquer dispositivo *Android*, facilitando o acesso. E, por fim, para a realização de testes rápidos, ou seja, sem a necessidade de armazenar os dados ou ter acesso a exames anteriores, o quarto botão permite o acesso como convidado e leva o usuário até a tela de teste.

A tela apresentada na Figura 11 é de extrema importância para o estudo, visto que uma das grandes dificuldades em aplicações voltadas a área da saúde é a segurança dos dados dos pacientes. A partir do cadastro do usuário no *Firebase* é possível saber quando o aplicativo é acessado, quem está usando e a partir de quando começou a utilizar o aplicativo. Além disso, é gerada uma chave única (UID) para cada cadastro que permite ou não acesso ao banco de dados.



Figura 11 - Tela de cadastro.
Fonte: Autores (2020).

As regras de segurança do *Firebase* permitem controlar o acesso aos dados armazenados. Com a sintaxe de regras flexíveis, é possível criar regras que correspondam a qualquer tipo de operação, desde todas as gravações no banco de dados inteiro até operações em um documento específico. Para o aplicativo desenvolvido foi utilizada uma regra que permite que qualquer pessoa leia um conjunto de dados, mas restringe apenas ao proprietário autenticado do conteúdo a capacidade de criar ou modificar dados em um determinado caminho

A próxima tela do aplicativo é apresentada logo após o *login* do usuário, não sendo permitido o acesso a usuários como convidados. E a partir dela é realizado o cadastro da ficha dos pacientes, contendo nome, idade e peso. Esses dados ficam armazenados localmente no *smartphone* através do banco de dados local *Tiny DB*, fornecido pelo *Kodular*. Dessa forma, outros usuários do aplicativo não obtêm acesso as particularidades do paciente, apenas ao gráfico do exame realizado. O acesso a tela de teste só é permitido caso algum paciente esteja cadastrado. Esse setor também permite a exclusão das fichas de pacientes e acesso direto aos exames.

A principal tela é a de teste onde ocorre efetivamente o exame da manovacuometria. O primeiro passo para a realização do exame é a conexão *BLE*. O serviço *BLE* foi configurado com o nome "Medidores" na programação do microcontrolador e assim que aparecerá na caixa de texto com os demais dispositivos *bluetooth* que estiverem ao redor. Ao selecionar o medidor e acionar o botão "conectar", a tentativa de conexão será realizada e, se ocorrer com sucesso, o botão irá alterar sua cor para verde e em caso de negativa para vermelho. Em ambos os casos, aparecerá um alerta sobre a situação da conexão. Após a conexão, o aplicativo pode se desconectar acionando o próprio botão "conectar" ou migrando para outras telas do aplicativo.

Após a conexão o usuário deve selecionar o tipo de exame, medição de pressão expiratória (P_e) ou inspiratória (P_i). Desta forma, é possível iniciar o exame e receber os dados de pressão obtidos pelo manovacuômetro. Ao receber esta informação, a pressão medida passa por um arquivo *Javascript* que realiza a montagem do gráfico em tempo real. A utilização do *Javascript* se faz necessária devido a limitação da plataforma de programação, *Kodular*, em gerar gráficos dinâmicos.

Para finalizar o exame o botão "Parar" deve ser acionado e logo após o valor de pressão máxima será indicado. Com o exame finalizado, o armazenamento de dados pode ser realizado selecionando o paciente já cadastrado anteriormente e acionando o botão "Salvar". Todas essas etapas mencionadas são apresentadas em uma tela (Figura 12), incluindo o gráfico final do exame.



Figura 12 -Tela de medições e suas funcionalidades.
Fonte: Autores (2021).

5. CONCLUSÕES

Com a evolução das medições biomecânicas e da internet das coisas - IoT, é frequente a busca por acompanhar a tecnologia e os benefícios que ela pode proporcionar. Nesse cenário, se destaque o estudo e implementação de dispositivos inteligentes para medir variáveis biomecânicas como pH, pressão, força, batimentos cardíacos, entre outros. Sendo assim, neste trabalho foi desenvolvido um manovacuômetro digital que permite a medição local da pressão nas vias aéreas de pacientes em tempo real, que utiliza a comunicação do tipo sem e interface com dispositivos móveis.

O principal objetivo do estudo foi alcançado, que é a construção de um manovacuômetro eletrônico digital com confiabilidade nos dados de medição comprovada através da aferição do dispositivo junto a um manômetro de coluna. Além disso, o dispositivo possui um custo reduzido, sendo cerca de 79% em relação aos manovacuômetros analógicos comerciais. Seu custo é ainda mais reduzido quando comparado com manovacuômetros digitais que possuem funcionalidades semelhantes, chegando a até 94,66% de redução. Com isso, mesmo aplicando futuras melhorias ao dispositivo proposto é mais viável que os medidores comumente utilizados pois, obteve-se um equipamento com dimensões reduzidas de tamanho quando comparado aos modelos usuais e com alta resolução de medição e baixo custo.

Referências

- BNDES; MCTIC. (2017). Aprofundamento de verticais - Saúde. Disponível em <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/9e481a5b-a851-4895-ba7f-aa960f0b69a6/relatorio-aprofundamento-das-verticais-saude-produto>>. Acesso em setembro 2019.
- CFSensor. XGZP6847 Pressure Sensor Module. Disponível em: <[www.cfsensor.com: http://www.cfsensor.com/editor/attached/le/20170511/20170511101000_9218.pdf](http://www.cfsensor.com/editor/attached/le/20170511/20170511101000_9218.pdf)>. Acesso em setembro 2019.
- CLANTON, T.; DIAZ, P. Clinical Assessment of the Respiratory Muscles. **Physical Therapy**, v.75, p. 983-995, novembro 1995.
- CLARK, C. The Practice of Dynamic Pressure Measurement. **Measurement and Control**, vol. 22, n. 10, p. 298-301, dezembro 1989. Disponível em: <10.1177/002029408902201004> Acesso em setembro 2019.
- DORMED. Dormed Hospitalar. Kit Manovacuômetro Analógico de -120/+120 CMH₂O. 2019. Disponível em: <<https://www.dormed.com.br/kit+manovacuometro+analogico+m120+-+globalmed/t/11>>. Acesso em 09 de novembro de 2019.
- EKMAN, U. et al. **Ubiquitous Computing, complexity and culture**. New York: Routledge. 2016.
- GOMEZ, C. (2012). Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless-Technology. **Sensors**, 11734-11753.
- KODULAR. Understanding Kodular. Disponível em: <<https://docs.kodular.io/guides/>>. Acesso em 20 de novembro de 2019.
- MONTEMEZZO, D. Pressões respiratórias máximas: equipamentos e procedimentos usados - sioterapeutas brasileiros. **Revista Fisioterapia e Pesquisa**, v. 17, n. 2, p. 147-52, 2010.
- RECH, C.; CALDEIRA A. F.; MORAIS F. S.; MIRANDA P. B.; FONTOURA F. F.; LEMES F. V.; Venturini S. F. Manovacuômetro digital para medição de pressão respiratória pulmonar. **Revista Cippus**, v. 8, n. 2, p. 143-153, 2020.



SANTOS, R. M. Manovacuometria realizada por meio de traqueias de diferentes comprimentos. **Revista Fisioterapia e Pesquisa**, v. 24, n. 1, p. 9-14, 2017. doi:10.1590/1809-2950/15614124012017.

SODRÉ, I. **Efeito do treinamento muscular inspiratório sobre a força muscular inspiratória de pacientes com traumatismo raquimedular agudo na unidade de tratamento intensivo** - estudos de casos. 2017. Tese (Trabalho de conclusão de curso em Fisioterapia) - Universidade La Salle, Canoas, 2017.

TEXAS INSTRUMENTS. Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference. 2009. Disponível em: https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_ADC_ads1115.pdf>. Acesso em 28 de setembro de 2019.

THOMAZINI, D.; DE ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. Saraiva Educação SA, 2020.

Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. 94 p.



CAPÍTULO 7

MICROINVERSOR SOLAR MICROCONTROLADO COM CONEXÃO EM CASCATA DE UM CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO E UM INVERSOR COM FILTRO LCL

MICROCONTROLLER-BASED PV MICROINVERTER WITH CASCADED
ASSOCIATION OF A QUADRATIC BOOST AND A VOLTAGE SOURCE
INVERTER WITH LCL FILTER

Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Caio Guilherme da Silva Moraes

Ruben Barros Godoy

Luigi Galotto Junior

Resumo

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma solução de *firmware* simples e confiável, implementada em um microcontrolador de baixo custo com aritmética de ponto fixo e sistema por unidade, para o seguimento do ponto de máxima potência e controle do fluxo de energia em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica em baixa tensão. O sistema é composto por um microinversor monofásico de duplo estágio em cascata, capaz de processar energia proveniente de um módulo solar fotovoltaico de 250 W e injetá-la na rede elétrica em 127 V e 60 Hz. Uma análise completa do sistema, com sua modelagem e projeto dos controladores, é apresentada como detalhes da implementação embarcada digital. Por fim, os resultados experimentais comprovam a ação da estratégia de controle, demonstrando de forma efetiva o seguimento do ponto de máxima potência e o desacoplamento entre os dois estágios de conversão de energia, com injeção de corrente na rede com baixa distorção harmônica total.

Palavras chave: Conexão à rede, microcontrolador, microinversor.

Abstract

This chapter presents a simple and reliable firmware solution, implemented in a low-cost microcontroller with fixed-point arithmetic and per unit scales, for maximum power extraction and power flow control in a grid-tied photovoltaic system. The system consists of a single-phase double-stage microinverter capable of processing energy from a 250 W photovoltaic module and injecting it into a 127 V/60 Hz utility grid. A complete system analysis, with modeling and controllers tuning design, is presented with details of the digital implementation. Finally, the experimental results confirm the accuracy of the control strategy, demonstrating the tracking of the maximum power point and the decoupling between the two conversion stages, with current being injected into the grid with low harmonic content.

Key-words: Microinverter, Grid-tie converters, microcontroller.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo uso de fontes de energias alternativas e renováveis, aliada a políticas governamentais e a redução considerável dos custos de implantação destas fontes, tem motivado a expansão dos sistemas fotovoltaicos (FV) em âmbito mundial, no que ficou conhecido como geração distribuída (GD). A capacidade de energia solar fotovoltaica instalada no mundo aumentou de forma expressiva, saindo de 40 GW em 2010 para mais de 700 GW na atualidade. Adicionalmente, agências internacionais preveem que a energia solar fotovoltaica terá aumento expressivo, contribuindo em mais de 25% da matriz energética mundial em 2050 (IRENA, 2021).

Neste contexto, destacam-se os sistemas FV conectados à rede de distribuição de energia elétrica em aplicações residenciais, que se caracterizam pelas baixas potências de conexão individual. Dentre as diferentes configurações, existe uma forte tendência na utilização dos microinversores (HARB et al., 2013; IKKURTI; SAHA, 2015; ALVES, et al. 2017; GODOY et al., 2017). A principal característica destes equipamentos é a capacidade de aproveitar a energia de um único módulo e processar esta energia de forma adequada à rede elétrica. Os microinversores possuem diversas vantagens sobre as demais configurações, com destaque para a modularidade, reduzido custo inicial de implantação e a possibilidade de maior aproveitamento energético do sistema (IKKURTI; SAHA, 2015). Em contrapartida, devido ao fato da tensão CC de saída de um único módulo fotovoltaico ser significativamente inferior ao valor de pico da tensão da rede elétrica, este tipo de dispositivo deve proporcionar um ganho estático elevado, i.e., da ordem de 10 vezes ou mais (SCHMITZ et al., 2017). Em geral, essa característica não é trivial de ser obtida com os conversores clássicos, os quais possuem ganho de tensão da ordem de 4 a 5 vezes.

Assim, para atender tal requisito, é comum encontrar soluções que utilizam estruturas isoladas devido à possibilidade de aumentar o ganho de tensão por meio do aumento da relação de espiras do transformador de alta frequência (CAO et al., 2012; HASAN et al., 2017). Entretanto, a utilização de conversores não isolados tem se mostrado mais adequada para a maioria dos sistemas fotovoltaicos. Normas europeias e nacionais corroboram para a adoção de estruturas sem isolamento galvânica (BRITO, et al., 2020). Isto porque tais conversores possibilitam a redução de custo e volume, além de apresentarem elevado rendimento. Em vista disso, diversas topologias baseadas no conversor boost foram propostas na literatura (MENESES et al., 2013; ALVES, et al., 2017).

Além do requisito de elevado ganho estático, os microinversores devem contemplar uma série de funcionalidades a fim de atender as exigências estabelecidas por normas e garantir segurança quando em operação. Dentre estas funcionalidades, destacam-se: sincronismo, detecção e proteção de ilhamento e seguimento do ponto de máxima transferência de potência – MPP (do inglês, *Maximum Power Point*) (NETO, 2012). Estas funcionalidades são obtidas usando algoritmos especializados, como os algoritmos de PLL (do inglês, *phase-locked-loop*), de ilhamento e de MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking Algorithms*) (BRITO et al., 2020).

Diante do exposto, este capítulo apresenta a modelagem, o projeto e a implementação de um microinversor monofásico de dois estágios em cascata sem isolamento galvânica.



Visando atender aos requisitos de controle e segurança, sem comprometer o custo final, propõe-se uma solução de *firmware* baseada em rotinas de interrupção com utilização de aritmética de ponto fixo e uso de um único microcontrolador de baixo custo.

2. TOPOLOGIA GERAL DO SISTEMA DE CONVERSÃO

Nos microinversores de dois estágios, o sistema de controle apresenta três objetivos principais destacados como o seguimento do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, o controle da tensão do barramento CC e o controle da corrente injetada na rede de distribuição. A Figura 1 ilustra, em forma de diagrama de blocos, a topologia escolhida juntamente com o sistema de controle.

O algoritmo de MPPT é executado em conjunto com uma malha de controle aplicada ao conversor CC-CC. Neste trabalho, foi utilizado o método de Perturbação e Observação (P&O) por ser de fácil implementação, apresentar elevado fator de rastreamento (FR) e ser independente do tipo e tecnologia do módulo fotovoltaico. O FR computa a porcentagem de energia que pôde ser convertida do módulo em relação à máxima disponível (De BRITO et al., 2013).

A estratégia utilizada para o controle da corrente injetada na rede elétrica é a estratégia clássica, na qual a corrente é controlada de forma instantânea, com imposição da frequência e da fase por meio de um algoritmo de sincronismo p-PLL (BRITO et al., 2020). Assim é possível obter uma referência senoidal unitária e em fase com a tensão da rede elétrica para prover a correta injeção de potência ativa, minimizando a circulação de reativos. Obviamente, em um futuro próximo, serviços ancilares de suporte à rede estarão presentes nos inversores comerciais. Diversas pesquisas neste sentido vêm sendo realizadas para que seja possível melhorar o perfil de tensão do alimentador, com auxílio dos inversores das GDs (ROCHA et al., 2018; FANG et al., 2021).

O controle da tensão do barramento CC é realizado pelo inversor através de uma malha de potência externa à de corrente. Para melhorar a dinâmica do sistema, acrescentou-se uma alimentação direta (*feedforward*) da potência instantânea gerada pelo módulo fotovoltaico na malha de corrente do inversor. Dessa forma, variações da potência disponível no módulo são diretamente repassadas à referência de corrente a ser injetada na rede, melhorando a resposta dinâmica do sistema e mantendo a tensão do barramento CC com menores oscilações de amplitude.

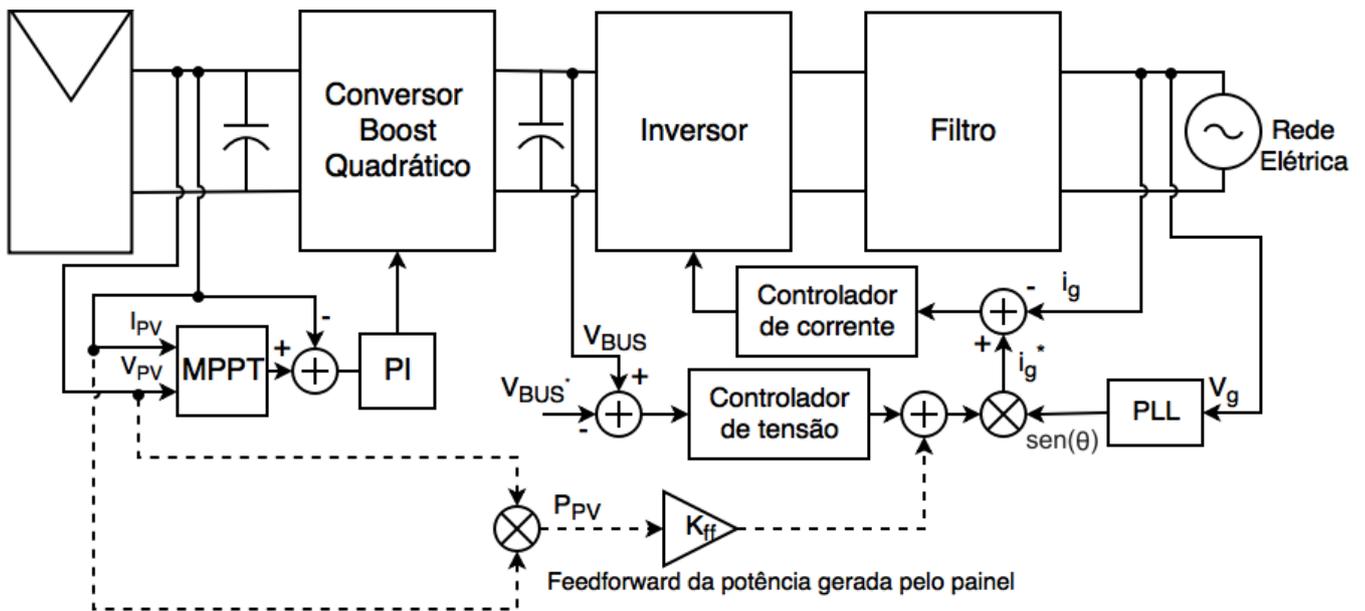


Figura 1 – Diagrama de blocos geral da estrutura de conversão fotovoltaica
Fonte: Autores

2.1 Topologias dos estágios individuais de conversão

Em Moraes, 2017 é apresentado o projeto e a implementação de um microinversor de dois estágios em cascata, de 250 W, para conexão de um único módulo FV à rede elétrica. O primeiro estágio de conversão CC-CC consiste de um conversor boost quadrático, responsável por elevar a tensão do módulo FV para a tensão de barramento CC em 250 V. A Figura 2 ilustra o circuito equivalente, onde V_{FV} representa a tensão de saída do painel e V_{BUS} a tensão neste barramento. O ganho estático resultante G para este conversor, operando no modo de condução contínua (MCC), em função da razão cíclica D é apresentado em (1).

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{BUS}}{V_{FV}} = \frac{1}{(1 - D)^2} \quad (1)$$

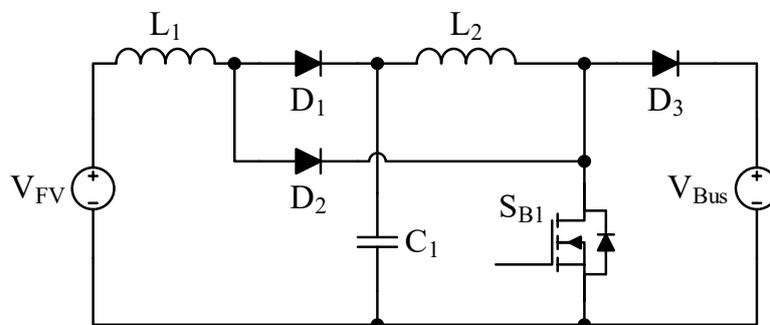


Figura 2 – Topologia do conversor boost quadrático
Fonte: Autores

Para o segundo estágio de conversão de energia, o estágio CC-CA, definiu-se a topologia em ponte completa com modulação por largura de pulso (PWM) de três níveis acoplada a um filtro passa-baixas do tipo LCL, como pode ser verificado na Figura 3. A

principal função do capacitor C_{Bus} é permitir que as diferenças instantâneas entre a potência extraída do módulo e a potência efetivamente injetada na rede elétrica, pelo inversor, sejam compensadas pela variação de tensão no barramento CC. Esse desacoplamento de potência entre os estágios é fundamental para que o módulo possa operar satisfatoriamente no ponto de máxima transferência de potência, sem distorcer a forma de onda de corrente injetada na rede (HU et al., 2013). Já o filtro LCL de saída do estágio CC-CA tem como função atenuar as componentes harmônicas de alta frequência presentes na corrente do inversor, devido ao processo natural de comutação dos interruptores de potência da estrutura (CHA; VU, 2010).

Na Figura 4 é possível observar a associação em cascata dos dois conversores eletrônicos de potência, bem como os blocos de controle e as variáveis adquiridas para realizar o controle. Nesta Figura, $C_{FV}(s)$, $C_V(s)$ e $C_i(s)$ representam os controladores responsáveis por garantir o seguimento do MPP, o controle da tensão no barramento CC e o controle da corrente injetada na rede, respectivamente. Os principais valores dos parâmetros do microinversor estão dispostos na Tabela 1.

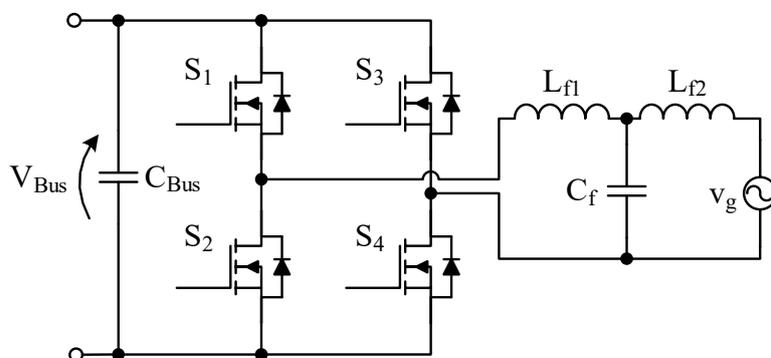


Figura 3 – Topologia do Conversor CC-CA
Fonte: Autores

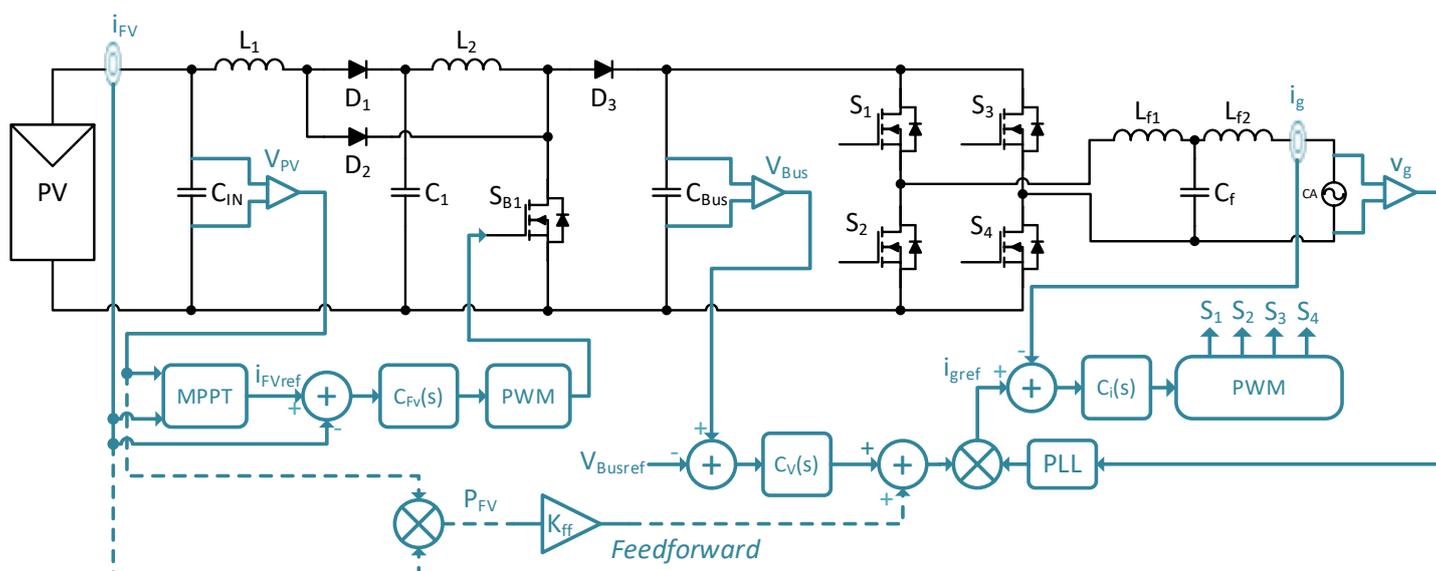


Figura 4 – Sistema completo de conversão de energia com destaque para as malhas de controle
Fonte: Autores

| Componentes | Valor |
|-------------|--------------|
| L_1 | 282 μ H |
| L_2 | 823 μ H |
| C_1 | 27,2 μ F |
| C_{BUS} | 1,1 mF |
| L_{f1} | 4 mH |
| L_{f2} | 4 mH |
| C_f | 330 nF |

Tabela 1 – Principais parâmetros do estágio de potência
 Fonte: Dados da pesquisa dos autores

3. MODELAGEM E OBTENÇÃO DOS CONTROLADORES

A modelagem dos conversores foi feita partindo-se do modelo médio de grandes sinais considerando que os conversores operam no MCC. Os modelos obtidos foram linearizados adicionando-se perturbações de pequenos sinais nas variáveis dinâmicas ($x = X + \hat{x}$), onde X representa o ponto de operação e \hat{x} as pequenas perturbações em torno deste ponto de operação (ERICSKSON; MAKSIMOVIC, 2001). Assim, foi possível determinar as funções de transferência (FTs) desejadas, rejeitando-se as perturbações de ordem superior a um e aplicando a transformada de Laplace. Para todos os casos, os compensadores foram projetados utilizando a análise por resposta em frequência via diagramas de Bode, considerando como parâmetros de projeto a frequência de cruzamento de ganho e a margem de fase especificadas.

3.1 Modelagem do conversor CC-CC

Visto que o conversor boost quadrático apresenta comportamento de fonte de corrente para a entrada, optou-se por realizar o seguimento do ponto de máxima potência utilizando-se a corrente do módulo FV. Salienta-se que outras formas, como a utilização da tensão do módulo ou diretamente a razão cíclica do conversor são possibilidades de uso para o seguimento do MPP. Neste controle, o algoritmo de MPPT fornece uma corrente de referência que é rastreada por um controlador do tipo proporcional-integral (PI), como apresentado na Figura 1. Para obter a FT para o controle do MPPT, o módulo fotovoltaico foi substituído por um modelo linearizado no ponto de máxima potência. Além disso, a tensão de saída foi considerada constante e de valor V_{BUS} . Esta simplificação é válida uma vez que o estágio CC-CA regula esta tensão em torno do valor médio V_{BUS} por intermédio de uma malha de controle. As Figuras 5 e 6 mostram as duas etapas de funcionamento do conversor com seus circuitos resultantes, onde a tensão V_{mod} e a resistência R_{MPP} são calculadas em função da tensão e da corrente no ponto de máxima potência, dadas por V_{MPP} e I_{MPP} , respectivamente, conforme (2) e (3). Alternativas para esta modelagem e circuito equivalente podem ser verificadas em (De BRITO et al., 2019).

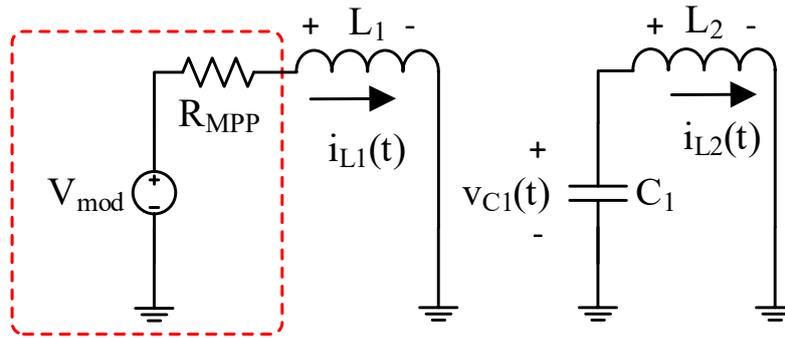


Figura 5 – Circuito equivalente da primeira etapa de funcionamento
Fonte: Autores

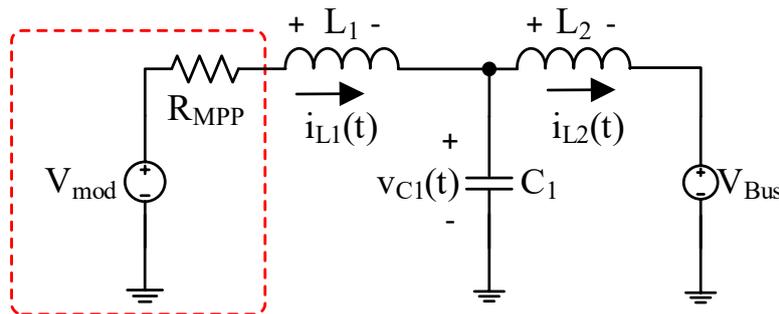


Figura 6 – Circuito equivalente da segunda etapa de funcionamento
Fonte: Autores

$$V_{mod} = 2V_{MPP} \quad (2)$$

$$R_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (3)$$

Utilizando-se dos circuitos equivalentes das Figuras 5 e 6, considerando como variáveis de estado as correntes nos indutores L_1 e L_2 e a tensão no capacitor C_1 e aplicando-se a modelagem de pequenos sinais descrita à priori, obtém-se a função de transferência que relaciona as variações de pequenos sinais da corrente de entrada $\hat{i}_{L1}(s)$ em função da razão cíclica $\hat{d}(s)$ dada por (4). Esta equação é utilizada para a sintonia do controlador do MPPT.

$$\frac{\hat{i}_{L1}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{C_1 L_2 V_{C1} s^2 + (1-D) I_{L1} L_2 s + V_{C1} + (1-D) V_o}{C_1 L_1 L_2 s^3 + C_1 L_2 R_{MPP} s^2 + (L_2 (1-D)^2 + L_1) s + R_{MPP}} \quad (4)$$

Este tipo de aplicação não requer um controlador de rápida resposta dinâmica uma vez que a irradiância solar não varia de forma abrupta (a menos de sombreamentos com passagem de nuvens). Desta forma, o sistema foi compensado com uma frequência de cruzamento de ganho de 53 Hz e margem de fase de 89°, garantindo estabilidade e velocidade suficiente a aplicação. Adicionalmente, no circuito de aquisição da corrente do módulo FV inseriu-se um filtro passa-baixas de segunda ordem com frequência de corte em 200 Hz e fator de qualidade de 0,866. A resposta em frequência do sistema compensado pode ser visualizada na Figura 7.

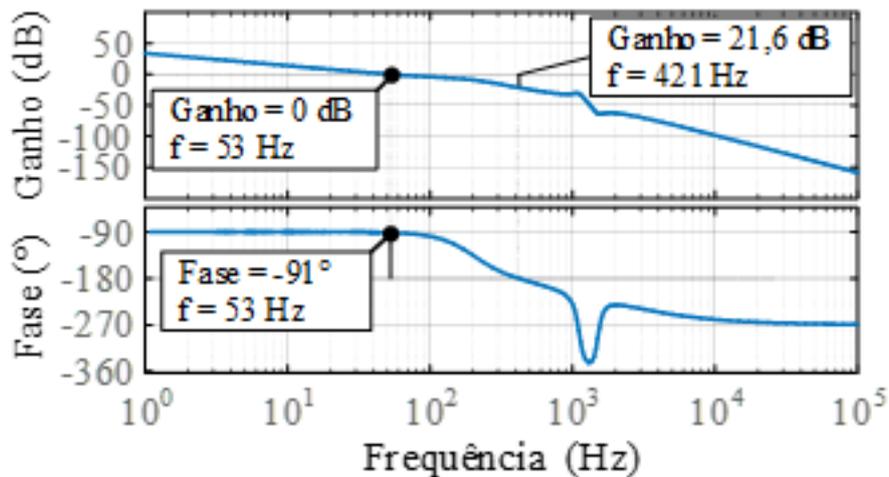


Figura 7 – Diagrama de Bode do sistema compensado
Fonte: Autores

3.2 Modelagem do conversor CC-CA

A dinâmica do estágio inversor para o controle da corrente injetada na rede elétrica é imposta pelo filtro de saída. Neste trabalho, a influência do capacitor C_f foi desprezada, visto que este foi projetado para suprimir apenas as oscilações de alta frequência do chaveamento. Em outras palavras, o valor da reatância capacitiva resultante é muito menor do que a reatância indutiva apresentada pelos indutores L_{f1} e L_{f2} . Nesse contexto, não é necessária a utilização de técnicas de amortecimento ativo ou passivo para o controle da corrente injetada na rede (BAO et al., 2014). Salienta-se que, com os valores de capacitância e de indutância utilizados, o modelo do filtro LCL se assemelha ao do filtro L para frequências abaixo da metade da frequência de ressonância (TEODORESCU et al., 2011). Assim, o circuito equivalente do inversor para conexão à rede pode ser simplificado tal como apresentado na Figura 8.

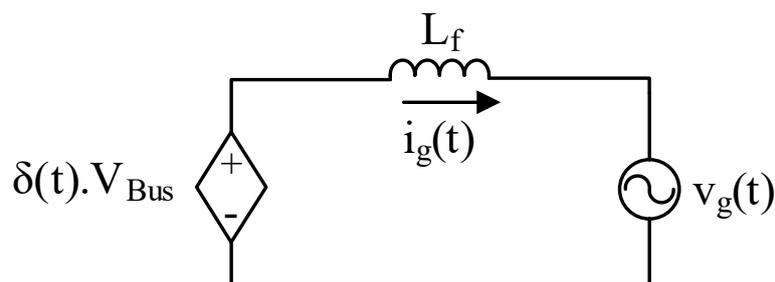


Figura 8 – Circuito equivalente para conexão à rede
Fonte: Autores

Na Figura 8, $\delta(t)$ representa o índice de modulação em amplitude do inversor, V_{Bus} é a tensão média do barramento CC, $v_g(t)$ a tensão da rede elétrica e $L_f = L_{f1} + L_{f2}$. O objetivo é o de controlar a corrente injetada na rede $i_g(t)$ a partir da variação do índice de modulação em amplitude. Assim, considerando a tensão $v_g(t)$ constante em um período de chaveamento e, após linearização, obtém-se a função de transferência que relaciona as variações de pequenos sinais da corrente injetada na rede em relação ao índice de modulação, segundo (5).

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_g(s)}{\hat{\delta}(s)} = \frac{V_{Bus}}{sL_f} \quad (5)$$

A estratégia de controle é definida de acordo com o diagrama de blocos da Figura 9, onde K_{PWM} representa o ganho do modulador, K_{ig} o ganho do sensor da realimentação e $C_i(s)$ o compensador de corrente. Para o controle desta malha, optou-se pelo uso de um controlador do tipo PI, que foi projetado para atender a uma frequência de cruzamento de ganho em 2 kHz e uma margem de fase de 60°, como se verifica pela resposta em frequência do sistema compensado, representada na Figura 10.

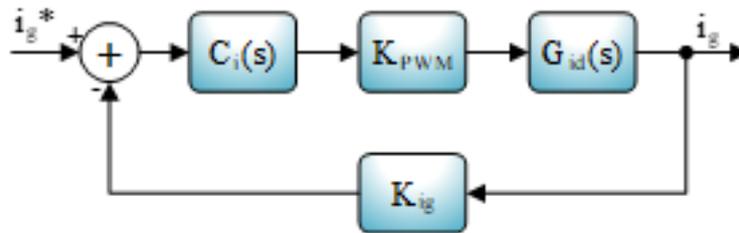


Figura 9 – Diagrama de blocos da malha de controle de corrente
Fonte: Autores

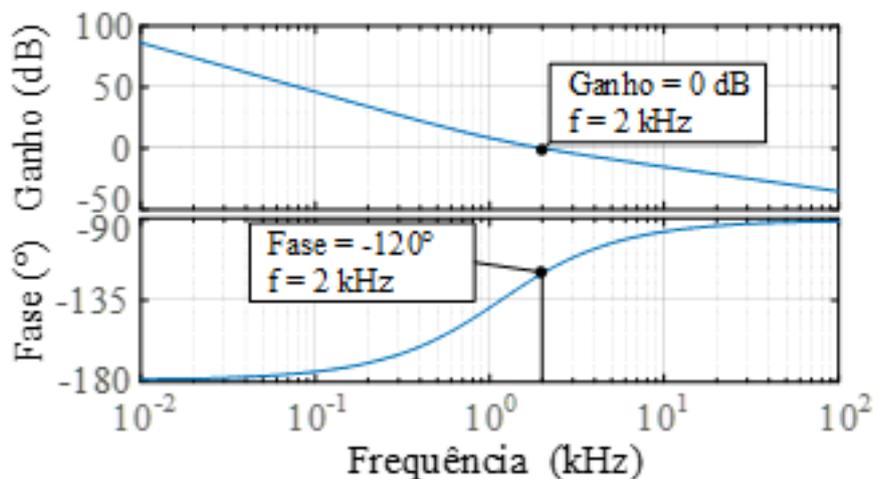


Figura 10 – Diagrama de Bode do sistema compensado para o controle da corrente
Fonte: Autores

Uma malha externa é adicionada ao controle da corrente para que a tensão do barramento CC oscile em torno do valor médio especificado em projeto, indicando o valor de pico da corrente que deve ser injetada na rede para manter este valor constante. Esta malha é denominada de malha de potência e pode ser visualizada com maiores detalhes na Figura 11. A função de transferência de interesse deve relacionar a tensão do barramento CC com a corrente injetada na rede elétrica. Isto é obtido a partir do balanço de potência no ponto de desacoplamento (ZAKZOUK et al., 2017). Esta função de transferência pode ser verificada em (6), válida para pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Nesta equação, V_{peak} representa o valor de pico da tensão da rede e η o rendimento esperado do estágio CC-CA.

$$G_{vi}(s) = \frac{\hat{v}_{Bus}(s)}{\hat{i}_p(s)} = -\frac{V_{peak}}{2\eta s C_{Bus} V_{Bus}} \quad (6)$$

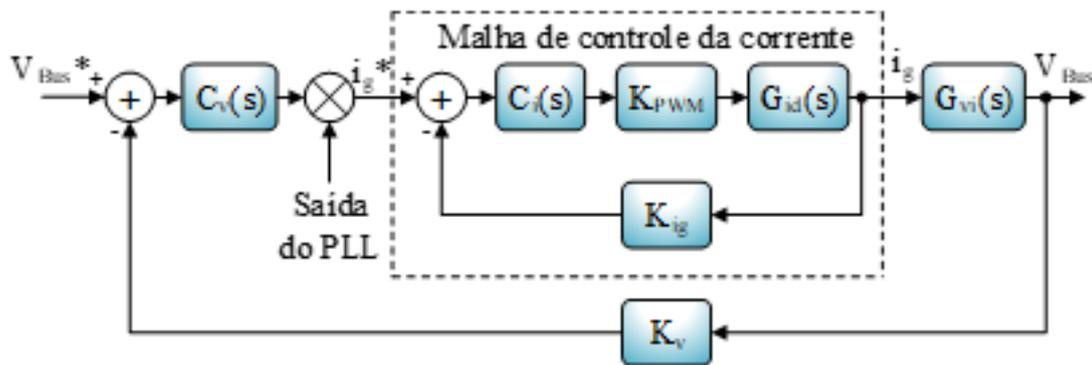


Figura 11 – Diagrama de blocos para o controle do estágio CC-CA
Fonte: Autores

Para o controle da malha de tensão também se adotou um controlador do tipo PI. De modo a reduzir a influência da oscilação de 120 Hz presente no barramento CC (devido à potência pulsante monofásica), este controlador foi projetado para uma frequência de cruzamento de ganho reduzida. Por este motivo existe um desacoplamento dinâmico entre as malhas, de tal forma que a malha de corrente se resume a um simples ganho do ponto de vista da malha mais lenta (COELHO et al., 2011). Isso fica evidente na Figura 12, onde K_v representa o ganho do senhor de tensão. O diagrama de Bode do sistema após a compensação pode ser visto na Figura 13. De acordo com as especificações de projeto, obteve-se uma frequência de cruzamento de ganho de 1 Hz e uma margem de fase de 60° . A velocidade desta malha de controle pode ser mais elevada se for adicionado um filtro Notch sintonizado em 120 Hz para a supressão do *ripple* de tensão na composição da corrente de referência. Detalhes de implementação de filtros do tipo Notch podem ser verificados em Ellis, 2012.

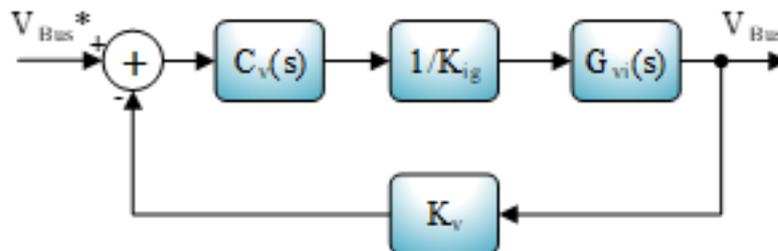


Figura 12 – Diagrama de blocos simplificado para o controle da malha de potência
Fonte: Autores

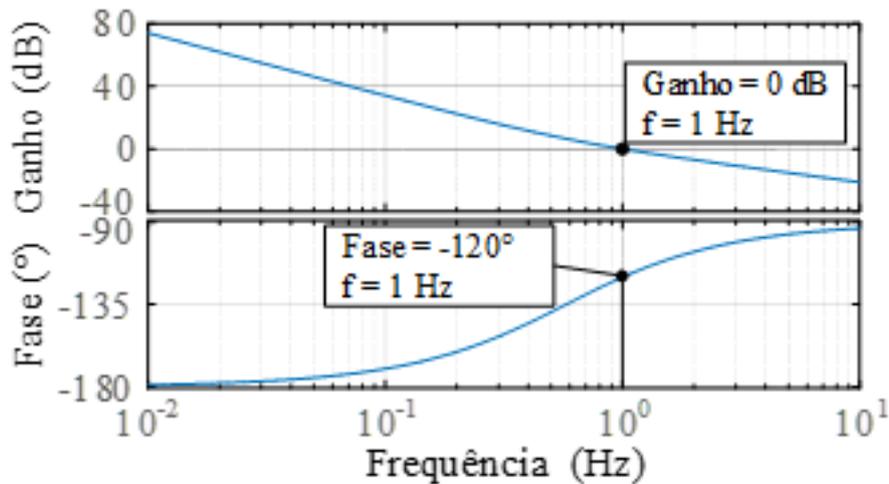


Figura 13 – Diagrama de Bode do sistema compensado – malha de potência
Fonte: Autores

Por fim, o ganho K_{ff} inserido na malha *feedforward*, é obtido considerando-se, por simplificação, o conversor como ideal (CUNHA, 2016). Dessa forma, pode-se afirmar que a potência de saída é igual à potência gerada pelo módulo e, conseqüentemente, o valor de pico da corrente injetada na rede elétrica pode ser determinado escalonando a potência gerada pelo fator expresso em (7).

$$K_{ff} = \frac{\sqrt{2}}{127} \quad (7)$$

4. IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL

Para atender aos requisitos de controle como o dos algoritmos de MPPT, ilhamento e sincronização, gerenciamento de falhas e das proteções do microinversor, utilizou-se um único DSC (do inglês, *Digital Signal Controller*) de 16 bits e de baixo custo, modelo dsPIC33FJMC204 da Microchip®. Para implementar todas as funções no *firmware*, optou-se por uma arquitetura baseada em rotinas de interrupção - ISR (do inglês, *Interrupt Service Routine*). A Figura 14 mostra o diagrama de blocos, em alto nível de abstração, da estrutura utilizada para o desenvolvimento do *firmware*. Adicionalmente, uma prática usual para se evitar problemas relacionados à ruídos de chaveamento é a de sincronizar a amostragem do conversor Analógico-Digital (ADC) com o módulo PWM. Contudo, deve-se atentar para configurar este último no modo centralizado (*center-aligned*), garantindo assim que as amostragens do ADC não serão realizadas nas transições dos pulsos. Neste trabalho, dois módulos PWM foram utilizados: um para o controle do conversor CC-CC em 78,125 kHz (MPWM2) e outro para o controle do inversor em 30 kHz (MPWM1). Desta forma, as rotinas de interrupção que contêm as malhas de controle são geradas por esses módulos com submúltiplos das frequências mencionadas acima, de modo a atender às frequências de amostragem e, ao mesmo tempo, sincronizá-las com o sinal PWM.

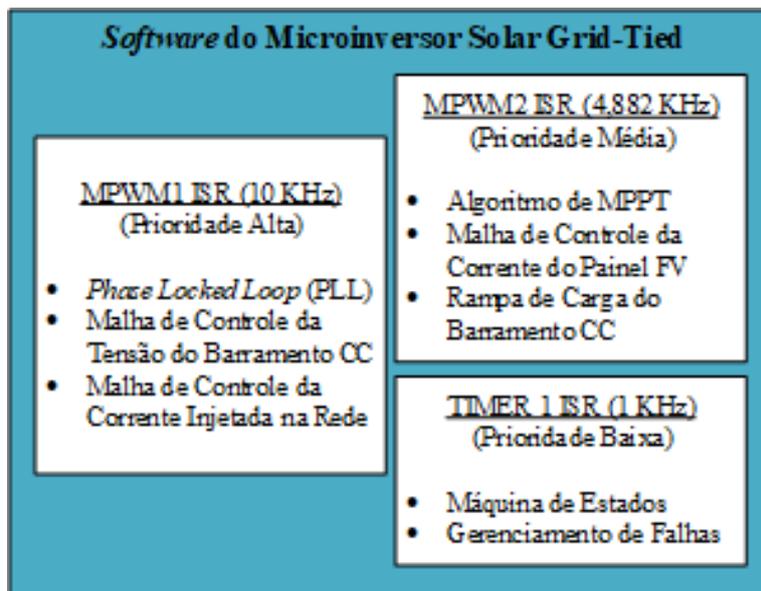


Figura 14 – Diagrama de firmware (software de controle) em alto nível de abstração
Fonte: Autores

4.1 Discretização dos controladores

Os compensadores das malhas de controle da corrente de entrada, da tensão do barramento CC e da corrente de saída foram discretizados através do método Backward Euler (OGATA, 1995). Devido ao fenômeno de *windup* do integrador é recomendável discretizar a ação proporcional e a ação integral de forma independente, pois assim é possível inserir técnicas de *anti-windup* em cada uma das parcelas. A equação resultante desta conversão é expressa por (8), onde K_p corresponde ao ganho proporcional, K_i ao integral e T_s ao período de amostragem.

$$C(z) = K_p + \frac{K_i T_s}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

4.2 Representação em ponto fixo

Uma alternativa para a implementação de compensadores em microcontroladores de baixo custo está na utilização do formato em ponto fixo, uma vez que este permite representar números reais por meio de variáveis do tipo inteiro. Em microcontroladores de 16 bits é muito comum a utilização do formato Q15 por apresentar a máxima resolução possível. Este formato é capaz de representar números reais entre -1 e 0,99996948 escalonados por 2^{15} , o que resulta num intervalo de -32768 a 32767 dentro do microcontrolador. Sendo assim, é necessário normalizar os sinais de realimentação (advindo dos sensores) para transformá-los em grandezas por unidade (p.u.). Uma vez conhecido o máximo valor possível de ser adquirido pelo circuito de sensoriamento, este é considerado como valor base (V_B). Assim, qualquer valor mensurado, denominado de V_{medido} , resultará no valor $[(V_{medido}/V_B) 2^{15}]$. Então, o ganho da realimentação normalizado passa a ser $(1/V_B)$, e deve ser considerado no projeto dos controladores.

4.3 Máquina de estados

Neste tipo de aplicação uma máquina de estados finita com três estados é suficiente para determinar o modo de operação do sistema. A máquina de estados implementada é executada a cada 1 ms dentro da rotina de interrupção do temporizador (Timer 1 ISR). O estado 1 é denominado de “Falha no Sistema”. Neste estado, o sistema se encontra desconectado da rede, os módulos MPWMs são desativados, as principais variáveis/*flags* são reinicializadas e um LED RGB indica se alguma falha ocorreu e qual foi esta. O estado 2 é denominado de “Inicialização do Sistema”. Neste, os módulos MPWMs são ativados e inicia-se a carga do barramento CC controlando a tensão deste barramento para que siga uma referência em rampa até atingir a tensão de 250 V. Neste instante a conexão da rede é permitida usando o algoritmo de sincronismo p-PLL. Por fim, o estado 3, denominado de “Sistema Operando”, habilita as rotinas de controle dos conversores eletrônicos de potência.

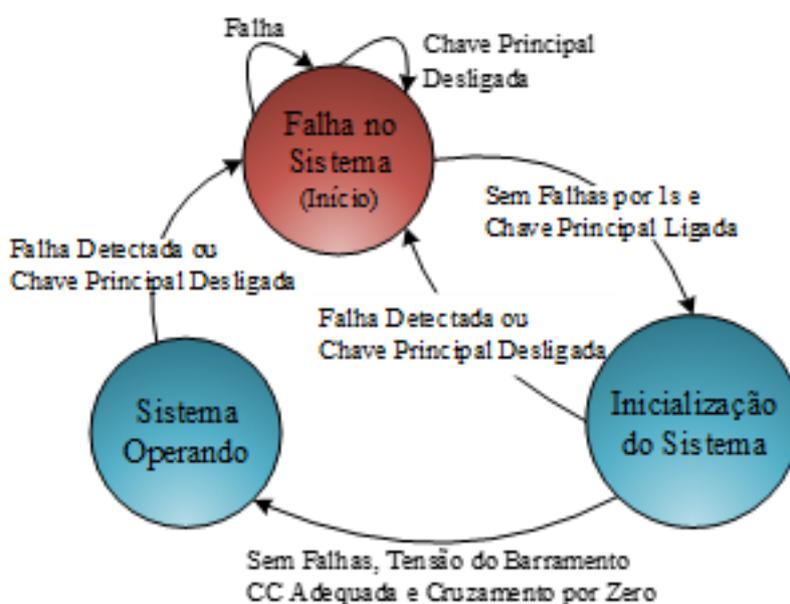


Figura 15 – Diagrama de transição de estados
Fonte: Autores

Como pode ser visto na Figura 15, o microinversor é inicializado no modo “Falha no Sistema” e permanece neste estado enquanto houver alguma falha, ou enquanto a chave principal (liga-desliga) estiver desativada. O estado do sistema mudará para “Inicialização do Sistema” se nenhuma falha for detectada durante 1 segundo e se a chave principal estiver ativada. Assim que ocorrer a transição para o estado “Sistema Operando”, o controle do MPPT e do inversor são ativados, injetando toda potência disponível na rede elétrica. Vale ressaltar que em todos os estados, as falhas continuam sendo monitoradas. Dessa forma, se alguma falha ocorrer durante o processo de inicialização ou de operação, o diagrama de transição de estados retornará para “Falha no Sistema”. O mesmo ocorre se a chave principal for desligada.

5. RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO

O arranjo experimental utilizado para os testes com o microinversor é apresentado na Figura 16. Os testes foram realizados com uma fonte emuladora de módulos fotovoltaicos, E4350B da Agilent Technologies®, configurada para suprir potência de pico de 225 W, conforme se observa pelos valores de tensão e corrente expostos na Tabela 2. Além disso, utilizou-se um módulo inversor SKS 30FB2CI10V12 da SEMIKRON® como estrutura de potência para o estágio CC-CA. A Figura 17-a mostra o momento de inicialização do sistema conversor. Observa-se que a tensão do barramento CC (em amarelo) segue uma rampa de referência até atingir a tensão de 250 V, garantindo uma partida suave, sem sobretensões. Em seguida, a conexão é estabelecida e as malhas de controle são ativadas, iniciando a injeção de potência na rede elétrica (tensão no módulo FV em verde, tensão no módulo FV em rosa e corrente injetada na rede em roxo).

| Componentes | Valor |
|----------------------------|---------------------------|
| Tensão de Circuito Aberto | $V_{OC} = 37 \text{ V}$ |
| Corrente de Curto-circuito | $I_{CC} = 8 \text{ A}$ |
| Tensão no MPP | $V_{MPP} = 30 \text{ V}$ |
| Corrente no MPP | $I_{MPP} = 7,5 \text{ A}$ |

Tabela 2 – Principais parâmetros do módulo FV

Fonte: Dados da pesquisa dos autores

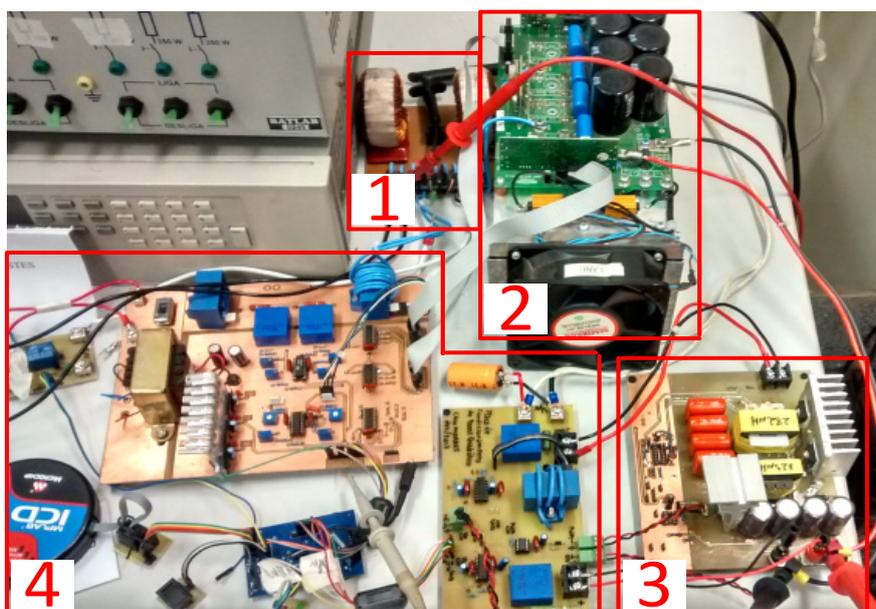


Figura 16 – Arranjo experimental para os testes com o microinversor: 1 – Filtro LCL; 2 – Módulo inversor; 3 – Conversor boost quadrático; 4 – Circuitos de condicionamento e controle.

Fonte: Autores

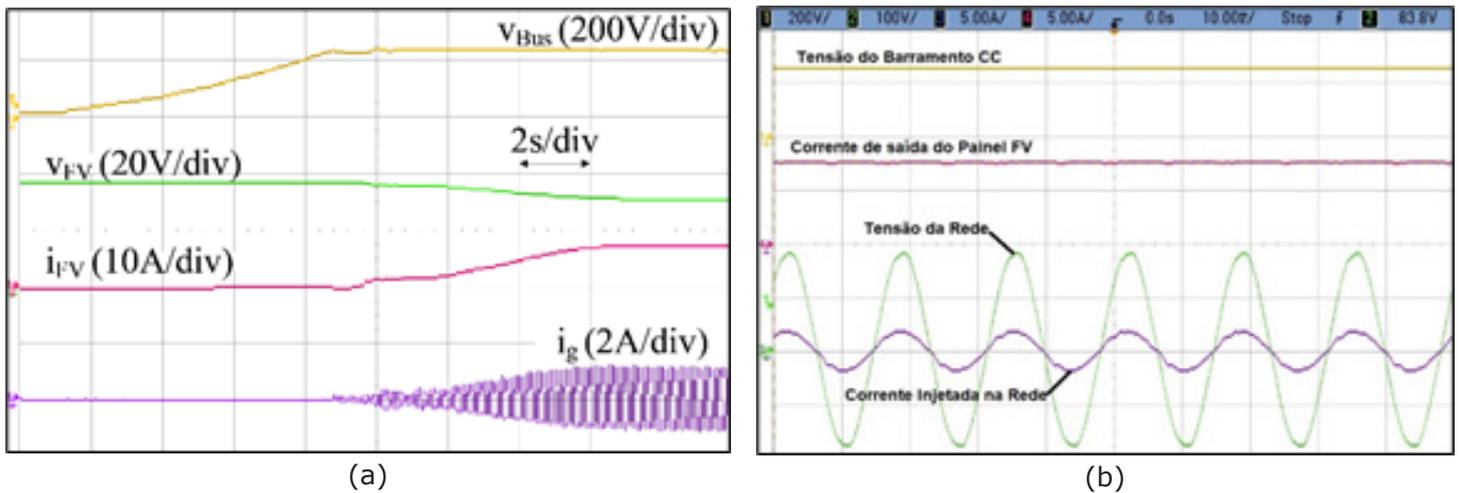


Figura 17 – Resultados experimentais: (a) Inicialização do sistema. Tempo 2 s/div; e (b) Formas de onda para operação em regime permanente. Escala de tempo: 10 ms/div.
 Fonte: Autores

A Figura 17-b destaca as principais formas de onda do sistema em regime permanente, em amarelo a tensão no barramento CC, em rosa a corrente do módulo FV, em verde a tensão da rede e em roxo a corrente injetada na rede. A tensão no barramento CC está estabilizada em seu valor médio demonstrando o desacoplamento de potência entre os estágios de conversão de energia. Verifica-se também que as formas de onda de tensão da rede e de corrente injetada pelo conversor estão em fase, ou seja, existe a injeção majoritária de potência ativa. Após análise do conteúdo harmônico presente na forma de onda de corrente, obteve-se uma distorção harmônica total de 5%, respeitando as normativas para conexão à rede (ABNT, 2013).

Para analisar a resposta dinâmica do sistema foram realizados testes emulando variações na potência disponível do módulo FV. Na Figura 18 pode-se observar o comportamento das formas de onda frente a um degrau de 120 W para 225 W, e vice-versa. Neste teste é possível observar a atuação adequada das malha de controle de tensão e de *feedforward* para ajuste rápido da referência de corrente mantendo a tensão do barramento CC com reduzidos transitórios.

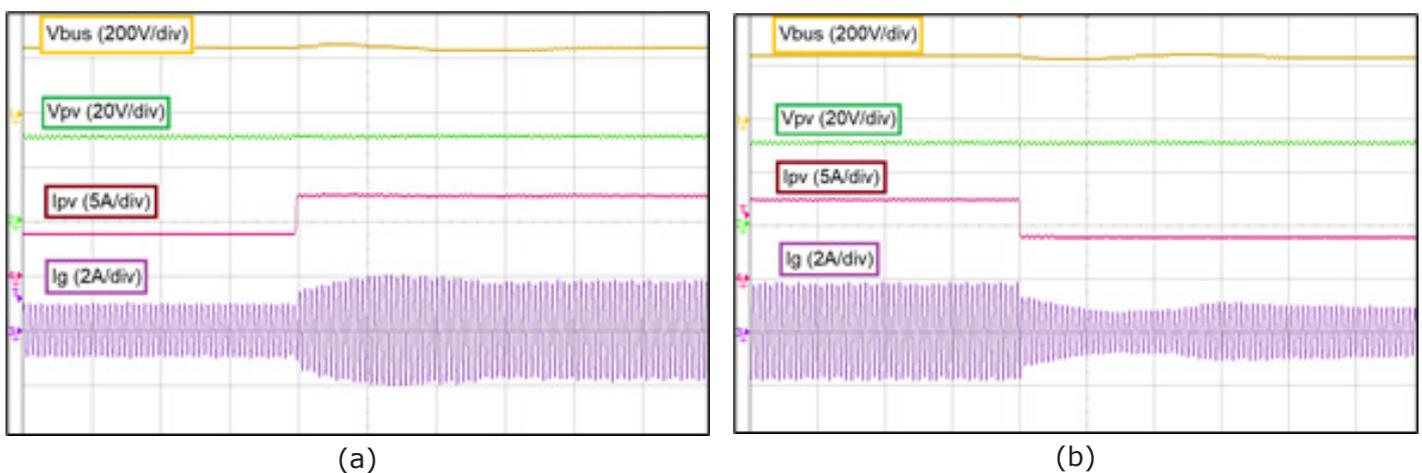


Figura 18 – Formas de onda para variação em degrau: (a) 120 W para 225 W; e (b) 225 W para 120 W. Escala de tempo: 200 ms/div.

Fonte: Autores

5. CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a análise e a modelagem completa de um sistema microinversor a duplo estágio em cascata. O conversor CC-CC é do tipo boost quadrático e o estágio inversor é composto por um estágio em ponte completa com filtro LCL de conexão. O estágio CC-CC é responsável pela elevação de tensão do módulo FV e pelo seguimento do ponto de máxima potência, enquanto o estágio inversor é responsável pela sincronização com a rede, injeção de corrente com reduzida distorção e regulação da tensão do barramento CC.

Com relação aos resultados experimentais, estes comprovaram que uma arquitetura de *firmware* simples, baseada em rotinas de interrupções, e aliada a grandezas por unidade representadas em ponto fixo, se mostrou muito eficiente e segura na implementação das estratégias de controle. Vale salientar que, mesmo para situações de degraus de potência que emularam condições raras e extremas de sombreamento, verificou-se bom desempenho na regulação da tensão do barramento CC, sem implicar em distorções na forma de onda de corrente injetada na rede.

Referências

- ABNT NBR 16150:2013. **Sistemas fotovoltaicos (FV)** - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.
- ALVES, M. G.; BRITO, M. A. G.; CANESIN, C. A. (2017). Análise de estruturas inversoras não isoladas monofásicas para geração distribuída fotovoltaica, **Eletrônica de Potência**, v. 22, n. 2, p. 179-186.
- BRITO, M. A. G.; ALVES, M. G.; CANESIN, CARLOS A. Microgrid System with Emulated PV Sources for Parallel and Intentional Islanding Operations. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, p. 1462-1469, 2020.
- BAO, C.; RUAN, X., WANG, X.; LI, W.; PAN, D.; WENG, K. Step-by-Step Controller Design for LCL-Type Grid-Connected Inverter with Capacitor-Current-Feedback Active Damping, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 3, p. 1239-1253, 2014.
- CAO, D.; JIANG, S.; PENG, F. Z.; LI, Y. (2012). Low cost transformer isolated boost half-bridge micro-inverter for single-phase grid-connected photovoltaic system, **APEC 27th Annual IEEE conference**.
- CHA, H.; VU, T. K. (2010). Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected photovoltaic inverter, **APEC 25th Annual IEEE conference**.
- COELHO, R. F., LAZZARIN, T. B.; MARTINS, D. C. (2011). Modelling and control of the single-phase dc-ac pwm converter for grid-connected applications including a loop for average primary current controlling, **Power Electronics Conference (COBEP)**, 2011 Brazilian.
- CUNHA, R. B. A. (2016). **Proposta de sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica**, (Dissertação), Universidade Federal da Bahia.
- De BRITO, M. A. G.; GALOTTO, L.; SAMPAIO, L. P.; MELO, G. A.; CANESIN, C. A. (2013). Evaluation of the main mppt techniques for photovoltaic applications, **IEEE Trans. Ind. Electron.**, v. 60, n.3, pp. 1156-1167.
- De BRITO, M. A. G.; ALVES, M.; CANESIN, C. A. Hybrid MPP Solution for Double-Stage Photovoltaic Inverter. **J. Control Autom. Electr. Syst.** 2019, 30, 253-265.
- ELLIS, G. Filters in Control Systems: **Control System Design Guide**. 4th ed: Springer: Kluwer Academic Publishers, 2012.
- ERICKSON, R.; MAKSIMOVIC, D. M. **Fundamentals of Power Electronics**, 2nd ed.; Springer: Kluwer Ac-



ademic Publishers: Berlin, Germany, 2001; p. 882.

GODOY et al. Procedure to match the dynamic response of MPPT and droop-controlled microinverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, p. 2358-2368, 2017.

HARB, S.; KEDIA, M.; ZHANG, H.; BALOG, R. S. (2013). Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system: A comprehensive study, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), **IEEE 39th**.

HASAN, R.; MEKHILEF, S.; SEYEDMAHMOUDIAN, M.; HORAN, B. (2017). Grid-connected isolated pv micro-inverters: **A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1065-1080.

HU, H.; HARB, S.; KUTKUT, N.; BATARSEH, I.; SHEN, Z. J. (2013). A review of power decoupling techniques for microinverters with three different decoupling capacitor locations in pv systems, **IEEE Trans. Power Electron.**, v. 28, n. 6, p. 2711-2726 .

IRENA- International Renewable Energy Agency, 2021. Trends in Renewable Energy: Statistic time series. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>

IKKURTI, H. P.; SAHA, S. (2015). A comprehensive techno-economic review of microinverters for building integrated photovoltaics (BIPV), **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 47, p. 997-1006.

MENESES, D., BLAABJERG, F., GARCIA, O.; COBOS, J. A. (2013). Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic ac-module application, **IEEE Trans. Power Electron.**, v. 28, n. 6, p. 2649-2663 .

MORAES, C. G. S. (2017). **Projeto e implementação de um microinversor grid-tied com boost quadrático para desacoplamento de potência e controle de MPPT**, (TCC), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS.

NETO, A. F. (2012). **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, (Dissertação), Universidade de São Paulo.

OGATA, K. **Discrete Time Control Systems**. 2nd Edition. Prentice-Hall, 1995.

SCHMITZ, L., MARTINS, D. C.; COELHO, R. F. (2017). Generalized high step-up dc-dc boost-based converter with gain cell, **IEEE Trans. Circuits and Systems I: Regular Papers**, v. 64, n. 2, p. 480-493.

ROCHA, J. P. M.; SALVADORI, F.; GEHRKE, C. S. Provision of ancillary service in a grid-connected photovoltaic power system. **2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, 2018, pp. 2355-2361, doi: 10.1109/APEC.2018.8341345.

FANG, X.; TAN, J.; YUAN, H.; YIN, S.; WANG, J. Providing Ancillary Services with Photovoltaic Generation in Multi- Timescale Grid Operation. **52nd North American Power Symposium (NAPS)**, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAPS50074.2021.9449700.

TEODORESCU, R., LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. (2011). **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**, John Wiley and Sons Ltd.

ZAKZOUK, N. E.; ABDELSALAM, A. K.; HELAL, A. A.; WILLIAMS, B. W. (2017). Pv single-phase grid-connected converter: Dc-link voltage sensorless prospective, **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 5, n. 1, p. 526-546.

CAPÍTULO 8

MODIFICAÇÃO HIDROTÉRMICA DE ZEÓLITAS NATURAIS E SUA APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DE DICLOFENACO

HYDROTHERMAL MODIFICATION OF NATURAL ZEOLITES AND ITS
APPLICATION IN THE ADSORPTION OF DICLOPHENAC

Henrique Straioto

Paula Valéria Viotti

Wardleison Martins Moreira

Rosangela Bergamasco

Marcelo Fernandes Vieira

Resumo

Este trabalho visa propor uma rota de modificação para zeólitas naturais e utilizá-las na adsorção de diclofenaco. A modificação hidrotérmica apresentou uma melhoria significativa na performance do material ($q_{\text{max}} = 8,93 \text{ mg g}^{-1}$ em pH 5). A partir da caracterização do material e dos demais resultados obtidos pode-se inferir que interações eletrostáticas não são responsáveis pela elevada capacidade de adsorção e que o aumento da hidrofobicidade do material pode justificar a melhora obtida.

Palavras chave: Fármacos, Tratamento de água, Zeólitas naturais, Diclofenaco.

Abstract

This work aims to propose a modification route for natural zeolites and use them in the adsorption of diclofenac. The hydrothermal modification showed a significant improvement in material performance ($q_{\text{max}} = 8,93 \text{ mg g}^{-1}$ at pH 5). From the characterization of the material and the other results obtained, it can be inferred that electrostatic interactions are not responsible for the high adsorption capacity and that the increase in the hydrophobicity of the material can justify the improvement obtained.

Key-words: Drugs, Water treatment, Natural zeolites, Diclofenac.



1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, verifica-se uma crescente preocupação com a remoção de contaminantes emergentes (fármacos, pesticidas, corantes, produtos de higiene pessoal e outros) do meio ambiente. Segundo Jiang et al. (2021), a contaminação por fármacos demanda grande preocupação, visto que são produtos utilizados em grandes quantidades e as estações de tratamento de água e esgoto não apresentam processos eficazes para sua remoção (Onaga Medina et al., 2021; Bi et al., 2021).

Dentre os fármacos mais utilizados, o diclofenaco (DCF), medicamento utilizado mundialmente como anti-inflamatório não esteroide, se mostra potencialmente nocivo ao meio-ambiente e à saúde dos seres vivos. Dentre seus malefícios causados, os mais preocupantes são desenvolvimento de resistência à atividade microbiana, surgimento de superbactérias e deturpação endócrina (Li et al., 2015). O consumo exorbitante desse anti-inflamatório é estimado em valores superiores a 1000 toneladas anualmente (Riguetto et al., 2021).

Os principais métodos e processos de tratamento de água utilizados atualmente incluem: adsorção, tratamento com membrana, osmose reversa, processo de oxidação avançada, troca iônica e outros (Akgül, 2014; Zhang et al., 2016).

Dentre esses processos de tratamento, a adsorção mostra-se como uma excelente alternativa, dado seu desempenho, flexibilidade, custo e por ser amigável ao meio ambiente, visto que o material adsorvente pode ser natural e regenerado, além de não produzir lodos contaminados (Akgül, 2014; Ahmed et al., 2020; Zhang et al., 2016).

Segundo Inglezakis e Pouloupoulos (2006), o processo de adsorção consiste na transferência de fase do contaminante (fase fluida) em uma superfície sólida, denominada como adsorvente. Dessa forma, partículas são adsorvidas nas superfícies externas ou nos poros destes materiais.

Verifica-se que a área específica é um parâmetro de extrema importância para os adsorventes, fator que leva materiais como o carvão ativado, sílica gel e a alumina a serem os principais adsorventes atuais (Inglezakis e Pouloupoulos, 2006). Entretanto, a adsorção é constantemente estudada por ser um processo de simples operação e possibilitar a utilização de materiais naturais, que além de serem ambientalmente corretos podem apresentar um melhor custo benefício para o processo.

Segundo Kyzas e Kostoglou (2014), a escolha do adsorvente ideal depende do tipo de contaminante a ser removido, bem como a disponibilidade deste recurso para aplicação industrial, custo, capacidade de recuperação e outros. Atualmente, verifica-se uma infinidade de adsorventes naturais, que podem incluir resíduos de diversas atividades industriais e agrícolas, bem como desperdícios (cascas, sementes, bagaços e outros).

Dentre os adsorventes utilizados, nos últimos anos verifica-se uma tendência a utilizar materiais naturais ou renováveis. Nesse contexto, as zeólitas naturais se destacam por suas qualidades físicas e químicas, disponibilidade em diversos locais do mundo e por



seu baixo custo (Akgul, 2014; Hai et al., 2014).

Por se tratar de um adsorvente natural, as zeólitas naturais podem apresentar baixas capacidades de adsorção para contaminantes orgânicos. Dessa forma, encontra-se na literatura diversos trabalhos que estudam a modificação e funcionalização de zeólitas naturais com o objetivo de melhorar seu desempenho (Akgül, 2014; Guzel et al., 2016).

Como os fármacos são, em sua maioria, moléculas orgânicas, Krajišnik et al. (2011) justificam que a modificação das zeólitas naturais com surfactantes catiônicos tende a favorecer o processo de adsorção, resultado da alteração da hidrofobicidade do material adsorvente. Modificações ácidas e com surfactantes vem sendo estudadas para zeólitas naturais, e o brometo de hexadeciltrimetilamônio (CTAB) mostra-se como uma opção vantajosa, já que ao criar uma camada orgânica no adsorvente pode melhorar suas propriedades (Hosseinifard et al., 2020).

Sabendo da necessidade de buscar novas alternativas para o tratamento de águas contaminadas por contaminantes emergentes, o presente trabalho buscar modificar zeólitas naturais por uma rota hidrotérmica utilizando surfactante para a remoção de DCF de soluções aquosas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A zeólita natural foi doada pela empresa Celta Brasil e o diclofenaco de potássio ($C_{14}H_{10}Cl_2NKO_2$; pureza > 98%) foi comprado comercialmente em Maringá-PR. O surfactante CTAB ($CH_3(CH_2)_{15}N(Br)(CH_3)_3$) com pureza superior a 98% foi adquirido da Sigma Aldrich, Brasil.

A fórmula estrutural do DCF e suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

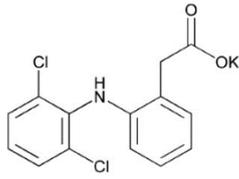
| Estrutura molecular ^(a) | Massa molecular (g mol ⁻¹) | pKa ^(b) |
|---|---|--------------------|
|  | 334.24 | 4.15 |

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas do diclofenaco

(a) Elbalkiny et al. (2018)

(b) Viotti et al. (2019)

2.2 Modificação da zeólita

A zeólita natural (ZN) foi modificada por uma via hidrotérmica. Para o tratamento hidrotérmico, 1,87 g de CTAB e 25 mL de água destilada foram adicionados a 5 g de ZN. A mistura foi submetida a um banho de ultrassom por 30 min para a completa dispersão do meio, e posteriormente transferida para um recipiente de teflon, o qual foi inserido em reator cilíndrico de ácido inoxidável selado. O reator foi mantido em uma estufa à 150 °C durante 6 horas. Após o tratamento hidrotérmico, a zeólita foi lavada abundantemente com água destilada e seca em estufa à 150 °C por 12 horas para remoção completa de água dos microporos do material. A zeólita após o tratamento hidrotérmico foi nomeada ZHT.

2.3 pH_{PCZ} da zeólita modificada

O ponto de carga zero (pH_{PCZ}) da zeólita natural e modificada foi obtido experimentalmente seguindo metodologia de Regabulto e Robles (2004), com modificações. Em um recipiente foram adicionados 0,02 g de zeólita e 20 mL de uma solução de NaCl 0,01 mol L⁻¹. O pH da solução salina foi ajustado de 2 a 12 a partir de soluções de NaOH e HCl 0,1 mol L⁻¹. A mistura foi mantida em agitação por 24 horas à 150 rpm e 30 °C em um banho termostático (Banho Dubnoff, Quimis), e posteriormente o pH do meio foi aferido. Por meio do gráfico de pH_{final} vs $\text{pH}_{\text{inicial}}$, o pH_{PCZ} foi determinado através da faixa em que o pH_{final} se mantém constante independente do $\text{pH}_{\text{inicial}}$.

2.4 Ensaios de adsorção

Os testes de adsorção foram realizados em batelada e em triplicata. 50 mg de adsorvente foi adicionado a 20 mL de solução do fármaco de concentração 50 mg L⁻¹, e a mistura mantida à 30 °C em agitação de 150 rpm em banho termostático. Após a agitação, a mistura foi filtrada em papel filtro e a solução de DCF lida em espectrofotômetro UV-Vis (Thermo Scientific – Genesys 10-S) em um comprimento de onda de 276 nm. Os resultados obtidos foram mensurados de acordo com a curva de calibração anteriormente confeccionada.

A capacidade de adsorção foi obtida de acordo com a equação abaixo:

$$q = \frac{(C_0 - C_f) \times V}{m}$$

Em que q (mg g⁻¹) é a capacidade de adsorção de DCF, C_0 (mg L⁻¹) e C_f (mg L⁻¹) são a concentração inicial e final de DCF, respectivamente.

Inicialmente, foi realizado um ensaio comparativo entre ZN e ZHT na adsorção de DCF. Esse ensaio preliminar foi realizado utilizando uma solução de DCF 50 mg L⁻¹ sem ajuste de pH (pH natural da solução do fármaco é aproximadamente 6,8).



O efeito do pH na adsorção foi analisado. Uma vez que a solução de DCF não é completamente solúvel em pHs inferiores a 4, os ensaios foram realizados variando-se o pH da solução inicial de DCF entre 5 e 11, durante 24 horas. Os ajustes de pH foram feitos utilizando soluções de NaOH e HCl 0,1 mol L⁻¹.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O DCF é um fármaco com características ácidas ($pK_a = 4,15$). Isso indica que em pHs abaixo de 4,15 ele permanece em sua forma neutra, diminuindo drasticamente sua solubilidade. Em pHs superiores a 4,15, os grupos funcionais presentes na molécula do fármaco se dissociam, de modo que a molécula permanece predominantemente com carga negativa.

Visto essas características do fármaco, a densidade de cargas elétricas do adsorvente antes e depois da modificação se torna importante. Logo, o pH_{PCZ} da ZN e ZHT são mostradas na Figura 1.

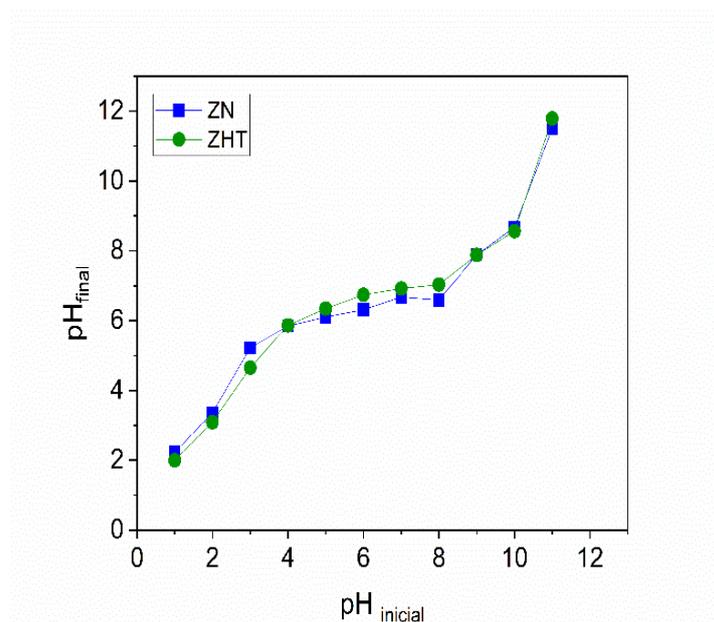


Figura 1 - Ponto de carga zero dos adsorventes

A partir da Figura 1 é possível identificar que o tratamento hidrotérmico com surfactante não alterou o ponto de carga zero do material. O pH_{PCZ} da zeólita modificada e da zeólita sem modificação foi de 6,98 e 6,63, respectivamente.

A Figura 2 mostra um ensaio preliminar com o intuito de comparar o resultado da modificação na adsorção de DCF.

Por meio da modificação hidrotérmica da zeólita, foi possível melhorar sua capacidade de adsorção de forma significativa.

Visto que a densidade de cargas elétricas não foi alterada pela modificação com surfactante, é possível que a melhora significativa da adsorção seja devido a alterações texturais do material, possibilitando o acesso da molécula do adsorvato em um sítio ativo disponível.

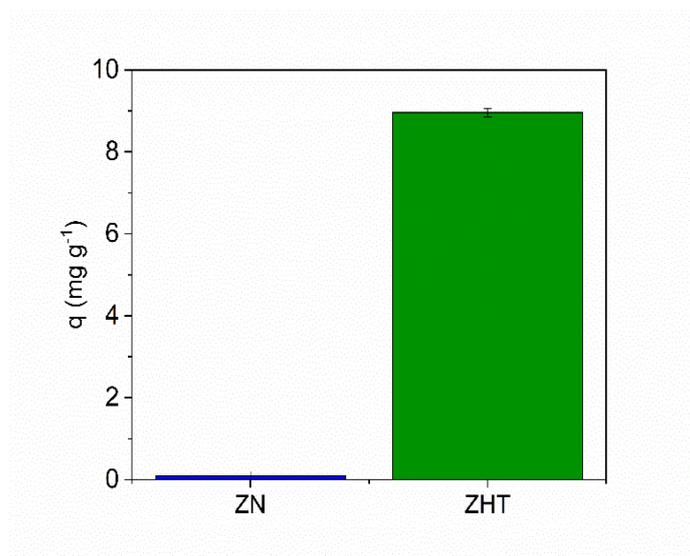


Figura 2 - Ensaio comparativo entre ZN e ZHT na remoção de diclofenaco (0,05 g; 30 °C; 150 rpm; 24 horas; 50 mg L⁻¹ de DCF, pH natural).

Como o DCF é uma molécula orgânica, a especiação da molécula é alterada de acordo com o pH do meio. Dessa forma, o efeito do pH foi avaliado na adsorção de DCF, variando-se o pH da solução inicial de 5 a 11. Os resultados estão apresentados na Figura 3.

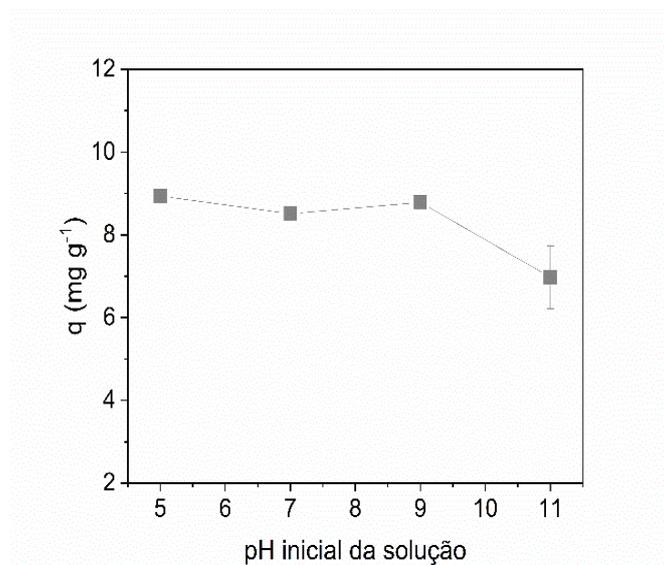


Figura 3 - Efeito do pH na adsorção de DCF em ZHT (0,05 g; 30 °C; 150 rpm; 24 horas; 50 mg L⁻¹ de DCF).

Entre os pHs 5 e 9, a adsorção não apresentou variação significativa. Uma vez que a ZHT tem sua superfície carregada positivamente em pHs abaixo de 6,98, e carregadas negativamente em pHs superiores a esse valor, é possível inferir que interações eletrostáticas não influenciaram na adsorção entre pH 5 e 9. A queda na remoção em pHs básicos já foram relatados em vários estudos na literatura na adsorção de DCF, como nos trabalhos de Bhadra et al., (2017) e Wu et al., (2020).

Com a incorporação do surfactante no material, o aumento da sua hidrofobicidade pode ter ajudado no aumento da remoção do DCF, indicando que interações hidrofóbicas podem influenciar diretamente no mecanismo de adsorção do fármaco.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal modificar uma zeólita natural por rota hidrotérmica utilizando surfactante e avaliar sua aplicação na adsorção de DCF. Após a modificação, a zeólita não apresentou diferenças significativas na densidade de cargas na superfície do material, porém, aumentou sua capacidade de adsorção de forma muito satisfatória. O aumento na hidrofobicidade do material, bem como, possíveis alterações texturais, podem justificar os resultados obtidos. Dessa forma, ZHT se mostrou como um adsorvente em potencial para a remoção de contaminantes emergentes de águas contaminadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e apoio à pesquisa fornecido pela empresa Celta Brasil.

Referências

AHMED, M. J., HAMEED, B. H., & HUMMADI, E. H. Review on recent progress in chitosan/chitin-carbonaceous material composites for the adsorption of water pollutants. **Carbohydrate Polymers**, v. 247, 116690, 2020.

AKGÜL, M. Enhancement of the anionic dye adsorption capacity of clinoptilolite by Fe³⁺-grafting. **Journal of Hazardous Materials**, v. 267, p. 1–8, 2014.

BHADRA, B. N., JHUNG, S. H. A remarkable adsorbent for removal of contaminants of emerging concern from water: Porous carbon derived from metal azolate framework-6. **Journal of Hazardous Materials**, v. 340, p. 179–188, 2017.

BI, L., CHEN, Z., LI, L., KANG, J., ZHAO, S., WANG, B., YAN, P., LI, Y., ZHANG, X. e SHEN, J. Selective adsorption and enhanced photodegradation of diclofenac in water by molecularly imprinted TiO₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, 124759, 2021.

ELBALKINY, H. T., YEHA, A. M., RIAD, S. M., & ELSAHARTY, Y. S. Potentiometric diclofenac detection in wastewater using functionalized nanoparticles. **Microchemical Journal**, v. 145, p. 90–95, 2018.

GUZEL, P., AYDIN, Y. A., & DEVECI AKSOY, N. Removal of chromate from wastewater using amine-based-surfactant-modified clinoptilolite. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 13, p. 1277–1288, 2016.

LIN, H., JIN, X., DONG, Y., HUO, H., & LIU, Q. Influence of calcination on the physical characteristics and nitrogen removal performance of clinoptilolites. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 29, p. 1099–1103, 2014.

HOSSEINIFARD, S. M., AROON, M. A., & DAHRAZMA, B. Application of PVDF/HDTMA-modified Clinoptilolite Nanocomposite Membranes in Removal of Reactive Dye from Aqueous Solution. **Separation and Purification Technology**, v. 251, 117294, 2020.

INGLEZAKIS, V. J.; POULOPOULOS, S. G. **Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications**. 1 st edition: Elsevier Science. 614p. 2006.

JIANG, F., ZHANG, D., OUYANG, X. & YANG, L. Fabrication of porous polyethyleneimine-functionalized chi-



tosan/Span 80 microspheres for adsorption of diclofenac sodium from aqueous solutions. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 21, 100418, 2021.

KRAJIŠNIK, D., DAKOVIĆ, A., MILOJEVIĆ, M., MALENOVIĆ, A., KRAGOVIĆ, M., BOGDANOVIĆ, D. B., DON-DUR, V., & MILIĆ, J. Properties of diclofenac sodium sorption onto natural zeolite modified with cetylpyridinium chloride. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 83, p. 165–172, 2011.

KYZAS, G., & KOSTOGLU, M. Green Adsorbents for Wastewaters: A Critical Review. **Materials**, v. 7, p. 333–364, 2014.

LI, Z., XIANG, X., LI, M., MA, Y., WANG, J., LIU, X. Occurrence and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products and endocrine disrupting chemicals in reclaimed water and receiving groundwater in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 119, p. 74-80, 2015.

NUNES, J. A. **Tratamento Biológico de águas residuárias**. 1. ed. Aracajú: J. Andrade, 265 p. 2010.

ONAGA MEDINA, F. M., AGUIAR, M. B., PAROLO, M. E., e AVENA, M. J. Insights of competitive adsorption on activated carbon of binary caffeine and diclofenac solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 278, 111523, 2021.

REGALBUTO, J.; ROBLES, J. **The engineering of Pt/carbon catalyst preparation**. University of Illinois, Chicago, 14p, 2004.

RIGUETO, C. V. T., ROSSETO, M., NAZARI, M. T., OSTWALD, B. E. P., ALESSANDRETTI, I., MANERA, C., PICCIN, J. S., DETTMER, A. Adsorption of diclofenac sodium by composite beads prepared from tannery wastes-derived gelatin and carbon nanotubes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, 105030, 2021.

VIOTTI, P. V., MOREIRA, W. M., ANDREO DOS SANTOS, O. A., BERGAMASCO, R., SALCEDO VIEIRA, A. M., & VIEIRA, M. F. Diclofenac removal from water by adsorption on *Moringa oleifera* pods and activated carbon: Mechanism, kinetic and equilibrium study. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 809–817, 2019.

WANG, H.-Y., HUANG, H.-F., & JIANG, J.-Q. The effect of metal cations on phenol adsorption by hexadecyl-trimethyl-ammonium bromide (hdtma) modified clinoptilolite (Ct.). **Separation and Purification Technology**, v. 80, p. 658–662, 2011.

WU, L., Du, C., He, J., Yang, z., Li, H. Effective adsorption of diclofenac sodium from neutral aqueous solution by low-cost lignite activated cokes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 384, 121284, 2020.

ZHANG, L., ZENG, Y., & CHENG, Z. Removal of heavy metal ions using chitosan and modified chitosan: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 214, p. 175–191, 2016.



CAPÍTULO 9

INSTRUMENTAÇÃO DE BANCADA DIDÁTICA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

DIDACTIC BENCH INSTRUMENTATION FOR TESTING THREE-PHASE
INDUCTION MOTOR

Alexandre Alves Dalmolim

Périson Pavei Uggioni

Douglas Lucas dos Reis

Diego Tiburcio Fabre

Resumo

O motor elétrico de indução é o tipo de motor mais utilizado no mundo, destacando-se nas aplicações industriais, devido sua robustez, versatilidade e baixo custo. Para compreender o funcionamento e o comportamento de parâmetros elétricos e mecânicos inerentes a estas máquinas, faz-se necessárias bancadas didáticas de ensaio nos laboratórios de institutos e universidades. Desta forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação de instrumentação em uma bancada didática de ensaio de motores de indução trifásicos, pertencente ao Laboratório de Acionamentos Elétricos do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) câmpus Criciúma. Alterações nas condições de funcionamento e aquisição de dados em tempo real fazem da bancada um importante recurso didático para o laboratório.

Palavras chave: Bancada didática; Motor de indução; Ensaio de motor; Instrumentação.

Abstract

The induction electric motor is the most used type of motor in the world, standing out in industrial applications due to its robustness, versatility and low cost. In order to understand the functioning and behavior of electrical and mechanical parameters inherent to these machines, it is necessary to use didactic test benches in the laboratories of institutes and universities. Therefore, this work presents the development and application of instrumentation in a didactic bench for testing three-phase induction motors belonging to the Electrical Drives Laboratory of the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC) Criciúma Campus. Modifications in operating conditions and real-time data acquisition make the bench an important teaching resource for the laboratory..

Key-words: Didactic bench; Induction motor; Motor test; Instrumentation.



1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a quantidade de energia utilizada pelos motores elétricos é de aproximadamente 60% do total consumido no país (Ferreira, 2016). Ferreira afirma ainda que qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar o rendimento destes equipamentos, trás benefícios ambientais, energéticos e, principalmente, redução de custos, com aumento da competitividade. Segundo Araújo (2015), têm sido conduzidas atividades de pesquisa e de desenvolvimento de sistemas instrumentados, capazes de monitorar e diagnosticar motores em operação com o objetivo de conhecer suas condições de funcionamento em situações de cargas previsíveis, temperatura gerada pelos componentes do sistema e do ambiente, além de outras condições como fenômenos de eletromagnetismo, ruído e vibração.

Kirovski (1997 apud Jesus; Cavalcante, 2011) afirma que a engenharia sempre necessitou testar conceitos e aplicações em escala reduzida nas mais variadas áreas, e que com o desenvolvimento e evolução da eletrônica e instrumentação, o uso de sistemas experimentais para simulação e teste, tornou-se muito mais simples e usual, tendo em vista que sistemas computacionais de aquisição de dados e microprocessadores passaram a ser utilizados de forma mais disseminada.

Como consequência, o desenvolvimento de equipamentos didáticos de baixo custo, como bancadas de ensaios, compatíveis com a capacidade de investimento atual das universidades, é uma alternativa viável para minimizar a carência existente nos atuais cursos de engenharia dos países em desenvolvimento (Amorim, 2006).

O Laboratório de Acionamentos Elétricos do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) câmpus Criciúma, possui uma bancada de ensaio de motor de indução trifásico desenvolvida por alunos do curso técnico de Eletrotécnica. Embora funcional, com possibilidade de simular uma carga ao motor, esta bancada apresenta algumas limitações, como: necessidade de equipamentos externos (fontes eletrônicas, instrumentos de medição portáteis, chave de acionamento), falta de instrumentação para aquisição de dados de ensaio (torque, rpm, parâmetros elétricos) e impossibilidade de alterar o número de rotações do motor.

Este artigo apresenta o desenvolvimento e aplicação de instrumentação eletrônica em uma nova bancada didática construída com a finalidade de realizar ensaios de motores elétricos de indução trifásicos de forma otimizada. Através da aquisição de sinais de sensores e transdutores, grandezas elétricas e mecânicas, como: corrente, tensão, rpm, temperatura e torque do motor elétrico são disponibilizados a uma interface gráfica para monitoramento em tempo real dos parâmetros nos ensaios. Também serão apresentados os resultados de testes realizados.

2. METODOLOGIA

Para este trabalho adotou-se uma metodologia de desenvolvimento de produtos mecatrônicos de Castro (2015 apud Uggioni, 2017), representada pela Figura 1.

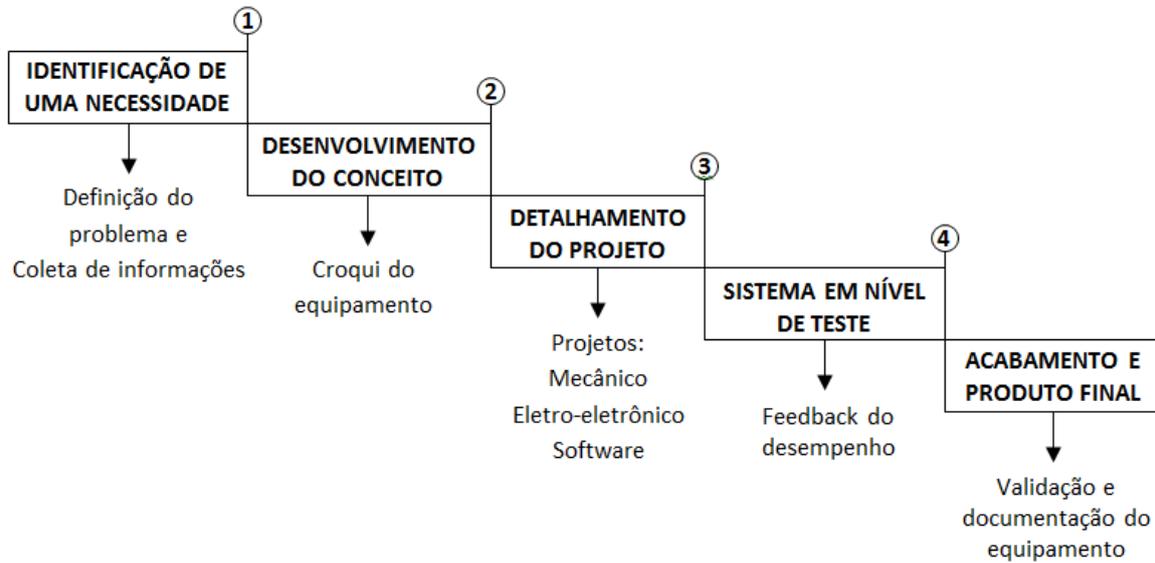


Figura 1 – Metodologia de desenvolvimento de produtos mecatrônicos
Fonte: Castro (2015 apud Uggioni, 2017).

Após análises técnicas e de custo-benefício das soluções avaliadas, foi desenvolvido um conceito de funcionamento da máquina de ensaio, que ocorre da seguinte forma: através do quadro eletroeletrônico de controle, o operador liga/desliga o motor em teste, além de poder ajustar seu rpm (conversor de frequência foi utilizado). Consegue-se aumentar ou diminuir a carga mecânica aplicada ao motor, através de um sistema composto por bobinas elétricas e disco de alumínio (Freio de Foucault), sendo a variável de ajuste a corrente elétrica aplicada. Sensores e transdutores são responsáveis pela aquisição de dados para posterior tratamento e disponibilidade das grandezas elétricas e mecânicas.

Na etapa de projeto foi realizado o dimensionamento de componentes, por meio de critérios técnicos, de segurança, operacionais, e teve como base a utilização de motores com potência mecânica de saída máxima igual a 1CV e IV polos.

O diagrama de blocos da bancada de ensaio e sistema instrumentado é representado pela Figura 2.

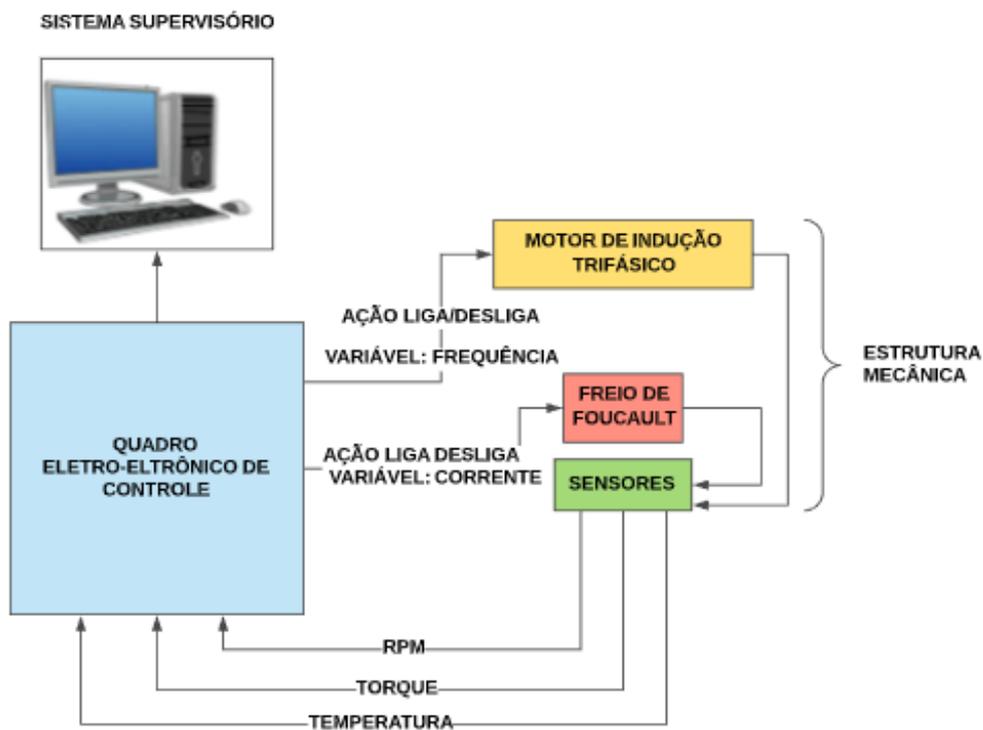


Figura 2 – Diagrama de blocos da bancada.
Fonte: Autores (2019).

Na sequência foram realizados ajustes elétricos, calibração da instrumentação, ajustes mecânicos para posterior validação operacional e metrológica. A Figura 3 apresenta a bancada de ensaio em teste.

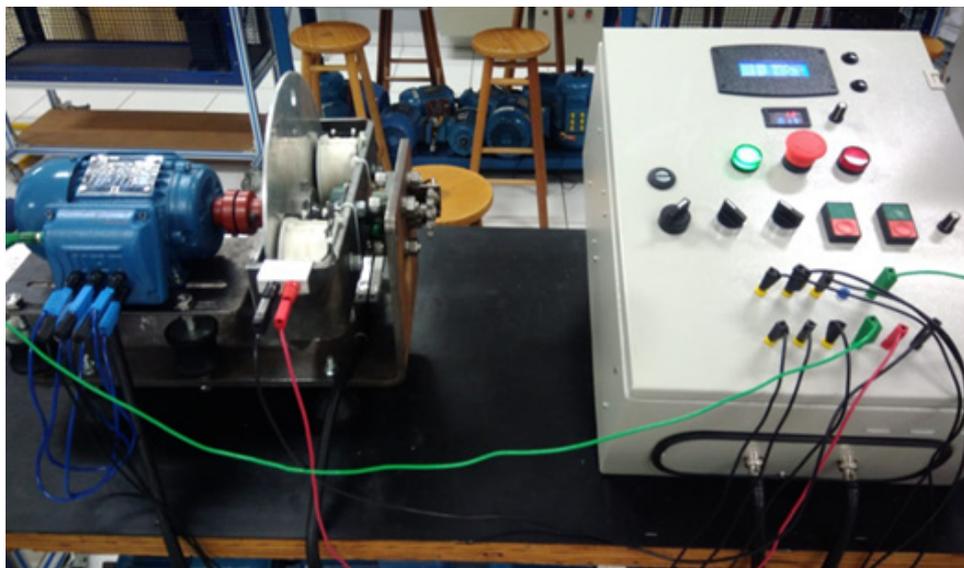


Figura 3 – Bancada de ensaio em teste de funcionamento.
Fonte: Autores (2019).

3. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação da bancada foi realizada para atender parâmetros de leituras definidos, sendo aplicado um sistema de aquisição de dados com sensores e transdutores, placas de condicionamento de sinal e de tratamento de dados, bem como supervisor e demais componentes que se fizeram necessários para o funcionamento de todo o sistema.

O sistema divide-se em: placa de controle, placas de condicionamento de sinal, programação do controlador e sistema supervisor.

3.1 Placa de controle

A placa de controle tem como principal componente o microcontrolador Atmega328P, o mesmo funciona com tensão de alimentação 5V, possui 23 entradas/saídas programáveis, sendo 6 destes canais para leituras analógicas, apresentando conversor A/D de 10 bits.

Este microcontrolador é utilizado nas placas de desenvolvimento tipo Arduino Uno, mas para este projeto optou-se por desenvolver uma placa de controle dedicada. Esta opção se mostrou viável economicamente se comparada a possibilidade de utilizar Controlador Lógico Programável – CLP.

Desta forma, o microcontrolador foi configurado para realizar a leitura de seis grandezas analógicas: corrente elétrica das três fases de alimentação do motor, tensão elétrica, torque de frenagem e temperatura de uma bobina interna do motor elétrico.

As entradas e saídas digitais do microcontrolador receberam funções diversas: comunicação serial, controle do LCD (Display de Cristal Líquido), botão de reset, botões de navegação e troca de página do display e leitura de rpm do motor sob ensaio.

A placa de controle possui saída regulada de 5V e um circuito para conversão do padrão RS-485/TTL, utilizando um circuito integrado modelo MAX485, que permite comunicação com o sistema supervisor. Contêm também filtros passivos passa-baixa do tipo RC a montante das entradas analógicas do microcontrolador. Estes filtros foram projetados para terem frequência de corte de 160 Hz, com o objetivo de atenuar ruídos acima dessa frequência, já que os sensores utilizados disponibilizam sinais com frequência de 60Hz. Através de (1) foi possível dimensionar os valores do resistor (R) e do capacitor (C) para o filtro utilizado.

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (1)$$



3.2 Placas de condicionamento de sinal

3.2.1 Corrente elétrica do motor

Para a leitura de corrente elétrica no motor submetido ao ensaio, optou-se por sensores de corrente alternada não invasivos. São sensores sensíveis a variações de campo magnético, que geram uma tensão de saída devido ao efeito Hall. Tem como principais vantagens o baixo custo, a confiabilidade e a facilidade de aplicação, e como desvantagem a dependência de temperatura (Balbinot; Brusamarello, 2014).

O modelo escolhido foi o SCT-013 do fabricante YHDC, que permite medir valores de corrente máxima de 30A, apresentando tensão de saída proporcional de 0 a 1V, com sensibilidade de $\pm 0,033\text{V/A}$.

Para condicionamento do sinal foi montado um circuito que atendesse as condições de leitura do microcontrolador utilizado (tensão contínua na entrada analógica de 0 a 5V), já que a tensão de saída do sensor é do tipo alternada. Ao sinal do sensor foi adicionada uma tensão de offset de 2,5V, mantendo a variação da tensão 1,5V e 3,5V nas entradas analógicas do microcontrolador. Para garantir uma alta impedância entre a saída do sensor e entrada analógica do microcontrolador, foi utilizado um amplificador operacional modelo LM358 na configuração buffer de tensão conforme Figura 4.

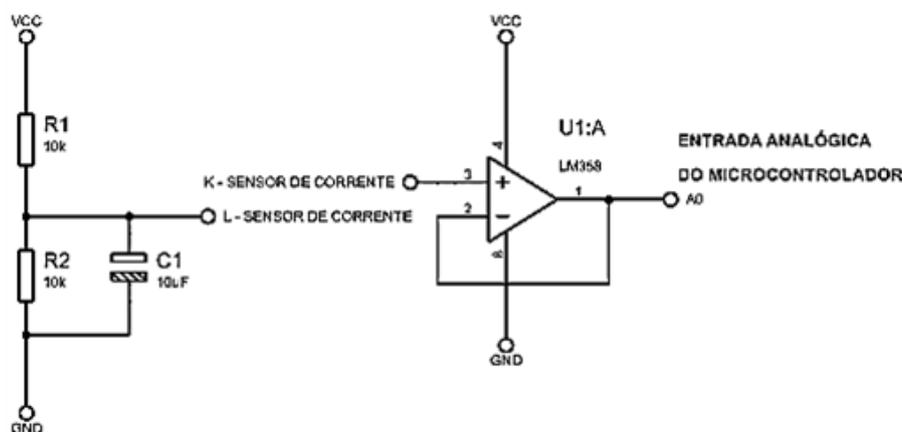


Figura 4 – Circuito para o condicionamento do sinal de corrente.
Fonte: Autores (2019).

Os sensores foram instalados nos três condutores de alimentação do motor, com o objetivo de atender as recomendações da NBR 17094-3 de monitoramento da corrente nas três fases, e possibilitar o estudo independente das correntes de alimentação do motor.

3.2.2 Tensão elétrica entregue ao motor

A leitura do nível de tensão de alimentação no motor em ensaio é utilizada no cálculo de potências elétricas: ativa, reativa e aparente, disponibilizadas ao usuário. É realizado através de um circuito que utiliza três transformadores monofásicos 220/9V, com as bobinas primárias conectadas na configuração estrela. Através de um circuito divisor de

tensão resistivo no secundário de um dos transformadores, é disponibilizada uma amostra de tensão proporcional ao valor do primário. Um circuito de condicionamento formado por uma tensão de offset de 2,5V e um amplificador operacional modelo LM358 na função de buffer de tensão torna o sinal compatível com a entrada analógica do microcontrolador. A Figura 5 apresenta o circuito utilizado.

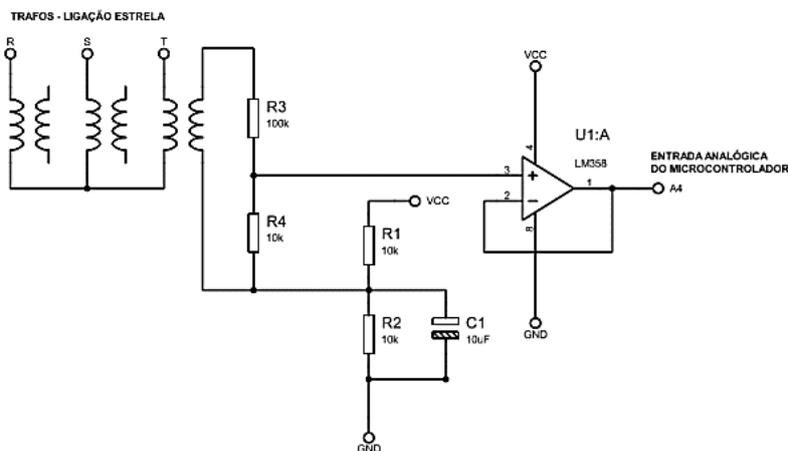


Figura 5 – Circuito para o condicionamento do sinal de tensão.
Fonte: Autores (2019)

3.2.3 Leitura de rotação do motor

A leitura de rotação do motor em ensaio é realizada com a utilização de um sensor indutivo PNP, de 8mm de diâmetro, alimentação 24V e distância sensora nominal de 2mm. Este sensor detecta a proximidade de objetos metálicos produzindo um sinal de saída digital. Foi fixado a estrutura, detectando a passagem dos dentes de uma roda dentada solidária ao eixo do disco de alumínio.

Para disponibilizar o sinal de saída do sensor para o microcontrolador, foi desenvolvido um circuito de condicionamento com a utilização de um optoaclopador, modelo 4N25. Com este circuito, representado na Figura 6, é possível adequar o sinal de saída do sensor para o nível de tensão adequado da entrada digital do microcontrolador, de 5V.

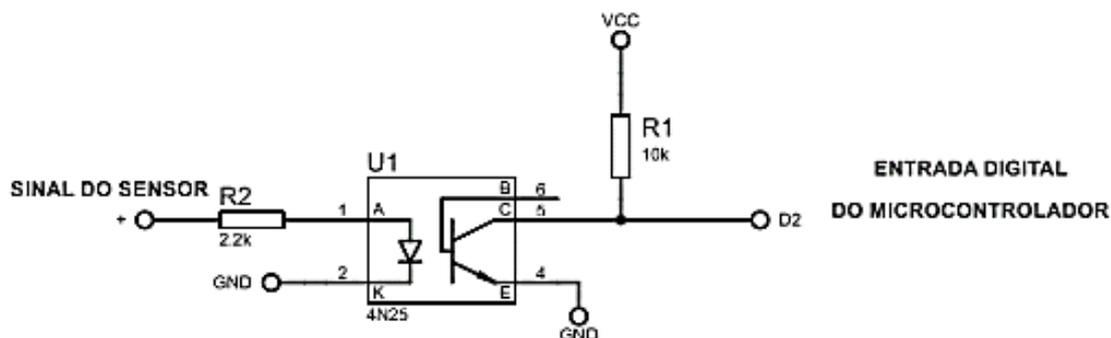


Figura 6 – Circuito para o condicionamento de sinal de rotação.
Fonte: Autores (2019)

3.2.4 Temperatura interna do motor

A leitura de temperatura interna do motor é realizada através da instalação de uma termoresistência de platina Pt100 junto a uma de suas bobinas, sendo que “este tipo de sensor altera sua resistência ôhmica de acordo com a temperatura e é considerado um sensor de alta precisão e ótima repetitividade de leitura” (Balbinot; Brusamarello, 2014).

O modelo do Pt100 selecionado possui a configuração de dois fios e tem intervalo de medição de temperatura entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Optou-se por este modelo, e não por um de três fios, em função da pequena distância entre o quadro elétrico e a bancada.

Para condicionamento do sinal, utilizou-se um módulo conversor que mantém a corrente elétrica do sensor constante, permite a configuração do fundo de escala e gera uma saída de 0 a 5V na entrada analógica do microcontrolador. O módulo utilizado e o esquema de ligação podem ser observados na Figura 7.

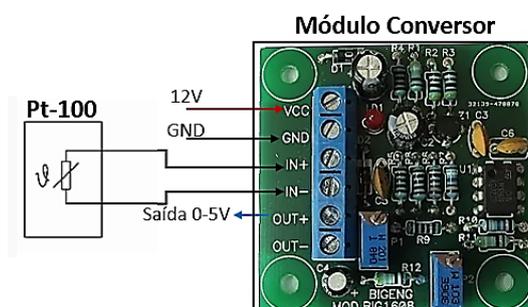


Figura 7 – Módulo de condicionamento para sensor Pt100.
Fonte: Autores (2019).

3.2.5 Torque de frenagem

Para realizar a medição de torque desenvolvido pelo motor, foi utilizado o método de medição de força, através de uma célula de carga tipo single point resistiva. Seu princípio de funcionamento é baseado em extensômetros, que alteram sua resistência quando sofrem algum tipo de deformação provocados por uma força externa, gerando uma diferença de potencial entre seus terminais de saída. Neste projeto, a célula de carga utilizada possui a configuração ponte de Wheatstone, com sensibilidade de 2mV/V e capacidade de 15 kg com sobrecarga segura de 150%. Foi utilizado o modelo SPL do fabricante IWM.

Para adequar os sinais gerados pela célula de carga com o microcontrolador, foi utilizado um amplificador de sinal que fornece uma tensão constante de 10V para alimentação da célula e permite ajuste de ganho. Com um ajuste de ganho de 250, a tensão de saída apresenta um range de 0 a 5V. A instalação elétrica do módulo amplificador e da célula de carga pode ser observada na Figura 8.

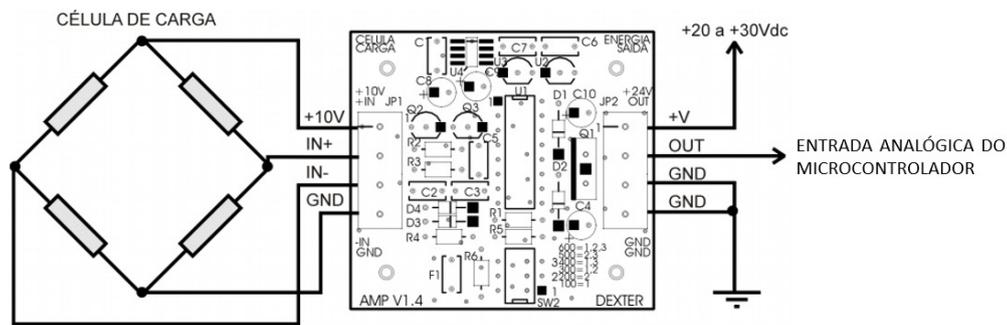


Figura 8 – Conexão da célula de carga e módulo amplificador.
Fonte: adaptado de Dexter (2019).

3.3 Programação do controlador

Para a programação do microcontrolador Atmega328P, foi utilizado a plataforma de desenvolvimento IDE Arduino, que utiliza a linguagem de programação C++.

Inicialmente, o programa desenvolvido configura os pinos de entrada e saída do microcontrolador. Na sequência são adicionadas bibliotecas com funções pré-definidas e que simplificam o código principal. Foram desenvolvidas lógicas para controle e monitoração das variáveis de ensaio da bancada, e também lógicas de setup e fatores de correção. Entre outras funções, o software também é utilizado para controlar a interface com o display LCD fixado na parte frontal do quadro de controle.

Para a transferência dos dados para o sistema supervisório desenvolvido, utilizaram-se bibliotecas para o protocolo Modbus que permitem as configurações de comunicação.

Conforme Figura 9, na primeira etapa do código é realizado a leitura de dados dos sensores, sendo atribuídos a uma variável. Na segunda etapa, se necessário, estes dados são corrigidos (em função da calibração realizada). Na etapa seguinte, faz-se a realização de operações matemáticas para adequar a indicação de parâmetros, conforme grandeza e unidade desejada. E por último, exibe-se o resultado do processamento no display e no sistema supervisório.

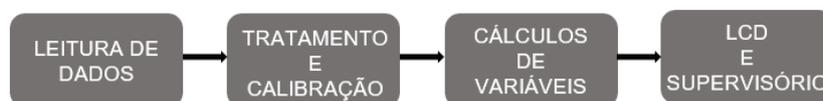


Figura 9 – Fluxograma de funções do software.
Fonte: Autores (2019).

3.4 Sistema supervisório

Os supervisórios podem ser vistos como sistemas que monitoram processos, variáveis e ações tomadas pelo controle automatizado. “O software, conhecido como supervisório, permite a operação e visualização através de telas gráficas elaboradas para qual-

quer processo industrial ou comercial, independente do tamanho de sua planta” (Jurizato; Pereira, 2002).

O software ScadaBR é um sistema de código aberto, gratuito e possui sua aplicação em diferentes sistemas operacionais. Devido a estas características, foi definido como o software supervisorio para a bancada.

Para que seja possível realizar o monitoramento dos dados adquiridos pela placa de controle, foi necessário fazer a conexão física entre o computador e a placa de controle. Optou-se por uma rede de comunicação serial RS485, protocolo Modbus. Um conversor USB-RS485 foi utilizado para adequar os níveis de sinais entre a porta USB do computador e rede RS485.

Para configuração do sistema supervisorio, seguiu-se as etapas:

- Criação do data-source para recebimento de dados, configurado para o protocolo Modbus RTU. Além da configuração do protocolo de comunicação utilizado, foi necessário definir a comunicação da porta serial com os mesmos parâmetros da configuração gravada microcontrolador e na porta serial do computador;
- Criação dos data-points para a leitura das variáveis desejadas. A configuração destes teve como parâmetros mais importantes, a definição da faixa de registro, o tipo de dado Modbus, o ID do escravo e o offset para associar o data-point criado com a variável de leitura desejada;
- Construção da tela de supervisão com imagens ilustrativas, valores e gráficos para uma melhor compreensão e representação dos ensaios de acordo com os recursos disponíveis no software supervisorio. A Figura 10 apresenta a tela desenvolvida para o supervisorio da bancada de ensaios de motores de indução trifásicos.

BANCADA DIDÁTICA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

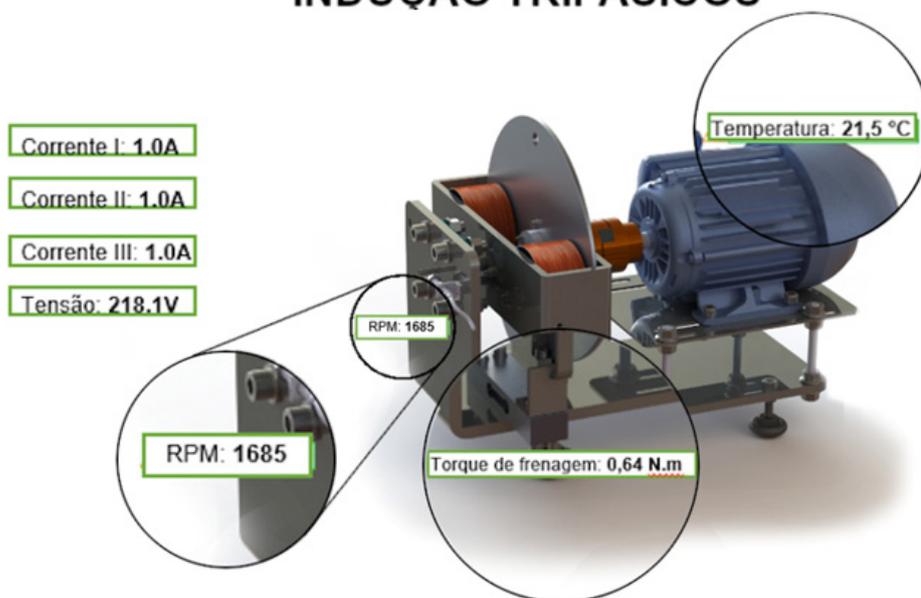


Figura 10 – Interface do sistema supervisorio desenvolvido.
Fonte: Autores (2019).

A parte (1) desta tela tem a função de representar a parte física da bancada de ensaio, e demonstrar em tempo real a leitura dos parâmetros: toque de frenagem, rotação e temperatura. A parte (2) apresenta os valores das correntes e tensão de alimentação do motor elétrico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o término da montagem da estrutura elétrica e mecânica da bancada, foi dado início as etapas de testes operacionais e calibração das grandezas mensuradas conforme metodologia adotada. Esta parte do trabalho descreve ajustes realizados e aborda os principais resultados. Para validação destes, utilizou-se de dados disponibilizados pelo fabricante dos motores e equipamentos de medição comerciais.

Os testes de validação metrológica foram realizados com motor em regime, com características indicadas na Tabela 1, acionado por chave de partida direta.

| Parâmetros | Valor nominal |
|-----------------------|---------------|
| Tamanho da carcaça | 63 |
| Potência mecânica | 0,25CV |
| Polos | IV (1710rpm) |
| Tensão de alimentação | 220/380V |
| Corrente | 1,14/0,66A |

Tabela 1 – Características do motor utilizado para testes.
Fonte: Autores (2019).

4.1 Teste de validação operacional

Para verificação do funcionamento da máquina, iniciaram-se testes de blocos individuais e posteriormente realizou-se a integração de todo sistema. Durante os testes, foram efetuados ajustes no software principal e sistema supervisorio para adequar o funcionamento da máquina.

4.2 Calibração dos sensores da bancada

4.2.1 Leitura de tensão de alimentação do motor

Utilizou-se o método de calibração indireta e tem como objetivo comparar a leitura de tensão elétrica indicada pelo sistema de medição da bancada com a leitura de tensão de um voltímetro digital da marca Fluke, modelo 77iv. A tensão medida pelo voltímetro foi de 216,5V e a Tabela 2 apresenta os resultados das medições realizadas pela bancada.



| Medidas | Tensão(V) |
|----------------|------------------|
| 1ª | 216,0 |
| 2ª | 216,2 |
| 3ª | 217,0 |
| 4ª | 216,4 |
| 5ª | 216,0 |
| 6ª | 217,2 |
| 7ª | 217,1 |
| 8ª | 216,4 |
| 9ª | 216,9 |
| 10ª | 216,1 |

Tabela 2 – Leitura para calibração da medição de tensão.
Fonte: Autores (2019).

Conforme resultados da Tabela 2, os testes apresentaram erros relativos na leitura de tensão de -0,32% em relação ao sistema de medição comercial utilizado como padrão.

4.2.2 Leituras de corrente elétrica do motor

Utilizou-se o método de calibração indireta e tem como objetivo comparar a leitura de corrente elétrica indicada pelo sistema de medição da bancada com a leitura de corrente de um amperímetro tipo alicata da marca Fluke, série 320.

Inicialmente foi realizada a leitura das três correntes de alimentação do motor, sendo que o amperímetro indicou 1,00A para a corrente I, 1,01A para a corrente II e 1,01A para a corrente III. Os resultados das indicações do sistema de medição da bancada podem ser verificados na Tabela 3.

| Medidas | Corrente I (A) | Corrente II (A) | Corrente III (A) |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1ª | 0,99 | 1,01 | 1,02 |
| 2ª | 1,01 | 1,01 | 1,01 |
| 3ª | 1,01 | 1,02 | 1,02 |
| 4ª | 1,00 | 1,01 | 1,02 |
| 5ª | 1,01 | 1,01 | 1,02 |
| 6ª | 0,99 | 1,00 | 1,00 |
| 7ª | 1,01 | 1,01 | 1,00 |
| 8ª | 0,99 | 1,02 | 1,01 |
| 9ª | 1,00 | 1,00 | 1,01 |
| 10ª | 0,99 | 1,02 | 1,02 |

Tabela 3 – Leituras para calibração da medição de corrente.
Fonte: Autores (2019).

Conforme resultados da Tabela 3, os testes apresentaram erros relativos na corrente I de -1%, na corrente II de 0% e na corrente III de 1%, em relação ao sistema de medição comercial utilizado como padrão.

4.2.3 Leitura de rotação do motor

Utilizou-se o método de calibração indireta e tem como objetivo comparar a leitura de rotação indicada pelo sistema de medição da bancada com a leitura de um tacômetro ótico do fabricante Instrutherm, modelo ST-707. A indicação fornecida pelo tacômetro foi de 1696rpm e a Tabela 4 apresenta os resultados das medições realizadas pela bancada.

| Medidas | Rotação (rpm) |
|---------|---------------|
| 1ª | 1254 |
| 2ª | 1264 |
| 3ª | 1265 |
| 4ª | 1262 |
| 5ª | 1255 |
| 6ª | 1255 |
| 7ª | 1265 |
| 8ª | 1266 |
| 9ª | 1264 |
| 10ª | 1256 |

Tabela 4 – Leitura para calibração da medição de rotação.
Fonte: Autores (2019).

Conforme resultados da Tabela 4, os testes apresentaram erros relativos na leitura de rotação de -26,06% em relação ao sistema de medição comercial utilizado como padrão. Assim, houve necessidade de corrigir a indicação do sistema de medição da bancada, sendo realizada através de ajustes no código do microcontrolador (fator de correção).

4.2.4 Leitura de temperatura

Para esta calibração, efetuou-se um ensaio seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 17094-3 para ensaio térmico, utilizando o método de determinação da elevação da temperatura dos enrolamentos. O método ocorre com medições da variação das resistências das bobinas antes e depois de um período de funcionamento do motor. O procedimento inicia com identificação da temperatura ambiente e as resistências ôhmicas iniciais das bobinas do motor, sendo utilizados os sistemas de medição: termômetro digital infravermelho da marca Icel, modelo TD-980 e ohmímetro digital da marca Fluke, modelo 77iv. Para o cálculo da temperatura final T_2 , aplicou-se (2).

$$\frac{T_2 + k_c}{T_1 + k_c} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Sendo:

T_2 - temperatura do enrolamento no fim do ensaio;

T_1 - temperatura do enrolamento no momento da medição da resistência R_1 , estando o motor frio e com a sua temperatura estabilizada;



R_2 - resistência ôhmica do enrolamento ao fim do ensaio;

R_1 - resistência ôhmica do enrolamento na temperatura T_1 ;

k_c - igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade.

Os parâmetros utilizados e o valor da temperatura final calculada podem ser observados na Tabela 5.

| Parâmetros | Bobina I |
|--|----------|
| Resistencia inicial (Ω) | 34,9 |
| Resistencia final (Ω) | 39,0 |
| Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$) | 21,0 |
| Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$) | 51,0 |

Tabela 5 – Valores utilizados para calibração de temperatura.
Fonte: Autores (2019).

Comparando o resultando esperado para temperatura final de 51,0 $^{\circ}\text{C}$ e o valor indicado pelo sistema de medição da bancada de 45,5 $^{\circ}\text{C}$, o erro relativo foi de -13,72%. Assim, houve necessidade de ajustar o sistema de medição da bancada, sendo realizada através de ajustes no código do microcontrolador (fator de correção).

4.2.5 Leitura de torque

Utilizou-se o método de calibração direta, tendo como padrão de referência uma massa de 0,250kg, que foi posicionada sob a célula de carga, conforme Figura 11.



Figura 11 – Massa padrão utilizada para calibração do sistema de medição de torque.
Fonte: Autores (2019)

Através de (3) é possível calcular o torque T a ser indicado pelo sistema de medição da bancada.

$$T = F \cdot d = m \cdot a \cdot d \quad (3)$$

Sendo:

F - força aplicada a célula de carga;

d - distância do ponto de aplicação de força na célula de carga em relação ao eixo do motor, de 0,17m;

m - valor da massa padrão utilizada;

a - valor da aceleração da gravidade.

O resultado esperado é de 0,41Nm, sendo que o sistema de medição da bancada indicou uma leitura de 0,42Nm, apresentado erro relativo de 2,43%. Assim, houve necessidade de ajustar o sistema de medição da bancada, sendo a correção feita através da alteração no código do microcontrolador (fator de correção).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou as etapas de projeto, construção e testes da instrumentação da bancada didática para ensaio de motores de indução trifásicos. Teve como base a pesquisa do estado da arte e tecnologias atuais, e as etapas que se seguiram foram necessárias para atingir os objetivos pré-estabelecidos.

O sistema de instrumentação (sensores, placas de condicionamento e aquisição de dados, placa de controle), demonstraram eficiência e estabilidade satisfatória para fins didáticos.

A opção de um software livre como sistema supervisório apresentou algumas limitações quanto a construção de gráficos de grandezas, mas atendeu grande parte das funcionalidades previstas.

Para o IFSC câmpus Criciúma, financiador deste projeto, tem-se como resultado uma bancada didática instrumentada de grande auxílio no estudo de funcionamento dos motores elétricos, atendendo os cursos de Técnico em Eletrotécnica, Técnico em Mecatrônica e Engenharia Mecatrônica, realizadas no Laboratório de Acionamentos Elétricos.

Segue-se como sugestões para futuros trabalhos: aprimoramento do sistema supervisório para uma melhor visualização gráfica das grandezas inerentes ao ensaio; possibilidade de leitura de novas grandezas pelo sistema de medição, como potência ativa, reativa e aparente do motor, fator de potência, rendimento mecânico, etc.; controle Proporcional Integral Derivativo (PID); comunicação em rede com conversor de frequência instalado no quadro elétrico; realizar comparativo de custo com bancadas comerciais com funcionalidades diferentes e possibilitar acesso das grandezas do sistema através de uma aplicação mobile.



Referências

AMORIM, M. J. **Desenvolvimento de bancada didático experimental de baixo custo para aplicações em controle ativo de vibrações**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2006.

ARAÚJO, R. G. C. **Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução**. Lisboa: Universidade Nova, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17094-3. **Máquinas elétricas girantes, Parte 3: Motores de indução trifásicos – métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CAVALCANTE, P. F.; JESUS, S. S. **Utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas – vibrações mecânicas**. *Holos*, v. 3, p. 18, 2011.

DEXTER. **Amplificador para Célula de Carga – Versão 1.4**. Disponível em: <http://www.dexter.ind.br/wa_files/Amplificador_manual.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

FERREIRA, C. A. **Motor Elétrico Premium**. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2016

JURIZATO, L. A.; PEREIRA, P. S. R. **Sistemas Supervisórios**. v. 7778, n. 1212, p. 105–114, 2006.

UGGIONI, P. P. **Instrumentação, Controle e Supervisão de um Abrasômetro Tipo Roda de Borracha**. Florianópolis: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2017.



CAPÍTULO 10

EXTRATO AQUOSO DE *Ilex paraguariensis*: INCLUSÃO FITOTERÁPICA ANTIOXIDANTE PARA O SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE

AQUEOUS EXTRACT OF *Ilex paraguariensis*: ANTIOXIDANT HERBAL
MEDICINE INCLUSION FOR THE UNIFIED HEALTH SYSTEM

Kátia Gualberto Corrêa
Wilson José Gonçalves

Resumo

O acesso de medicamentos à população brasileira é um problema ocasionado pelo estabelecimento de preços inconciliáveis com a renda média da sociedade. Isso requereu do governo brasileiro a implementação da fitoterapia no Sistema Único de Saúde (SUS), que proporciona soluções alternativas para a sociedade e pesquisas de plantas medicinais como fonte de tratamento terapêutico para diversas patologias. O extrato aquoso de erva-mate apresenta expressiva quantidade de compostos fenólicos, cuja porcentagem concentra-se e se eleva ao aplicar a técnica de crioconcentração, demonstrando possuir potencial na atividade antioxidante e auxílio no tratamento de doenças crônicas, como as cardíacas e a obesidade. O objetivo é analisar a atividade antioxidante do extrato de erva-mate, além de compreender a técnica de crioconcentração aplicada a este extrato, e sua viabilidade como fitoterápico. A metodologia utilizada é a pesquisa bibliográfica. Os resultados mostram que, em testes *in vivo*, o extrato aquoso induziu uma resposta vasodilatadora e vasorelaxante nos vasos sanguíneos e um efeito anti-obesidade, ao reduzir a gordura corporal do organismo, apresentando caráter antioxidante, além de que no extrato crioconcentrado há variação positiva nos teores de compostos fenólicos. Ademais, mesmo que não se tenha o número devido de pesquisas investigando os efeitos colaterais e maléficos desta planta, em testes em animais houve uma segurança inicial do composto. As conclusões sinalizam o uso condizente com a literatura bibliográfica e eficácia do composto no tratamento de doenças, tendo que o extrato de erva-mate é viável como fitoterápico para o Sistema Único de Saúde (SUS).

Palavras chave: Erva-Mate, Extrato, Antioxidante, Fitoterápico, Sistema Único de Saúde (SUS).

Abstract

Access to medicine is, for the Brazilian population, a problem caused by the establishment of prices that are irreconcilable with society's average income. This required the Brazilian government to implement phytotherapy in the Unified Health System (SUS), which provides alternative solutions for society and research on medicinal plants as a source of therapeutic treatment for various pathologies. Yerba mate's aqueous extract shows an expressive amount of phenolic compounds, whose percentage concentrates and rises when applying the cryoconcentration technique, demonstrating its potential in antioxidant activity and by aiding the treatment of chronic diseases, such as heart disease and obesity. The objective is to analyze the antioxidant activity of yerba mate's extract, as well as to understand the cryoconcentration technique applied to this extract, and its viability as a herbal medicine. The methodology used is bibliographic research. The results show that, in *in vivo* tests, the aqueous extract induced a vasodilator and vasorelaxant response in blood vessels, along with an anti-obesity effect by reducing body fat, showing an antioxidant attribute, and also, in the cryoconcentrated extract there's a positive variation in the contents of phenolic compounds. Furthermore, even if there isn't enough research investigating side and harmful effects of this plant, in animal tests there was an initial safety of the compound. The conclusions indicate the use in accordance with bibliographic literature and the compound's effectiveness in treatment of diseases, considering that yerba mate's extract is viable as an herbal medicine for the Unified Health System (SUS).

Key-words: Yerba Mate, Extract, Antioxidant, Herbal Medicine, Unified Health System (SUS).



1. INTRODUÇÃO

O acesso a medicamentos essenciais é um importante indicador de garantia do direito à saúde e bem-estar, dando-se mediante a disponibilidade e a capacidade aquisitiva da sociedade. No entanto, no Brasil, isso ainda é um problema a ser solucionado, visto que para a maioria da população, em especial a parcela mais carente, o preço dos fármacos sintéticos disponibilizados é inconciliável com sua renda. A fim de minimizar essa adversidade, exigiu-se do governo brasileiro a elaboração da Política Nacional de Medicamentos e de Assistência Farmacêutica do Ministério da Saúde, visando à implementação da fitoterapia no Sistema Único de Saúde (SUS), aspecto que oferece menor custo financeiro, com foco no tratamento na Atenção Básica. Nesse contexto, gera-se pesquisas de plantas medicinais como fonte de tratamento terapêutico para múltiplas doenças.

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) vem se estabelecendo como uma fonte natural de compostos benéficos à saúde humana, sendo estudada por indicar um potencial na indústria farmacêutica. É encontrada na região subtropical da América do Sul, tendo o Brasil como uma das áreas de ocorrências naturais e um dos seus expressivos produtores. Essa planta apresenta diversas ações biológicas, dentre elas a atividade antioxidante, a qual pode absorver ou neutralizar radicais livres da atividade metabólica, apresentando eficácia nesse processo por expressar uma complexa composição fitoquímica, em destaque os compostos fenólicos (SERAFIM, 2013).

O processo de crioconcentração pode concentrar produtos alimentares naturais líquidos, congelando-os e, em sequência, separando uma parcela da água congelada, desde o produto líquido (BOAVENTURA, 2015). Por ocorrer em baixas temperaturas, não há alterações de suas características físico-químicas, sendo importante na indústria dos alimentos e farmacêutica. Com essa técnica, indica-se obter um extrato aquoso de erva-mate, a partir de suas folhas, com expressiva porcentagem de compostos bioativos, em especial os compostos fenólicos, com a preservação das suas propriedades iniciais (BOAVENTURA, 2015).

O organismo humano promove uma ação de combate a formação de radicais livres, ocasionados pela atividade metabólica pois, se não neutralizados, favorecem o desenvolvimento de patologias, porém esse processo ainda necessita de auxílio secundário. O extrato aquoso de erva-mate, sobretudo, demonstra ser eficaz no tratamento de doenças crônicas não transmissíveis (DCNTs), com foco para as cardiovasculares e obesidade, que representam um problema de saúde pública, resultam em morbimortalidade significativa e na redução da qualidade de vida no Brasil.

As doenças cardiovasculares referem-se a todas as possíveis alterações que prejudicam o sistema vascular sanguíneo e/ou o coração. Um dos fatores de risco, em geral, envolve a acumulação de lipídios nos vasos sanguíneos, aumentando a força do sangue nas paredes destes, ou a lentidão da passagem de sangue pela sua vasoconstrição, o que pode ocasionar em uma tensão arterial elevada. Nesse sentido, sugere-se que o extrato aquoso de erva-mate possui atividade vasodilatadora, o que poderia contribuir para a reconstituição adequada da circulação do sangue e diminuir o estresse oxidativo do coração, proporcionado pela disfunção endotelial (FELLIPI, 2005).



A obesidade, em sua maioria dos casos, é ocasionada por uma propensão ao acúmulo de gordura excessiva e prejudicial no organismo humano. Como a dieta alimentar de uma significativa parcela da sociedade brasileira é constituída por uma ingestão hiperlipídica, para minimizar as consequências negativas dessa patologia, sugere-se que o extrato aquoso de erva-mate pode ter um efeito protetor na obesidade, como a redução do peso corporal e oxidação de lipídios (RIBEIRO *et al.*, 2012). Esse efeito também pode ser observado em seus extratos crioconcentrados (LAZZARATTO, 2021).

Segundo a definição (ANVISA, 2010) disposta no parágrafo primeiro, artigo primeiro da Resolução da Diretoria Colegiada - RDC Nº 14, de 31 de março de 2010, medicamentos fitoterápicos são caracterizados por serem obtidos se, e somente se, preparados com matéria-prima vegetal ativa, com a eficácia e segurança de seu uso validados através de levantamentos etnofarmacológicos, documentações tecnocientíficas em bibliografia ou estudos farmacológicos e toxicológicos pré-clínicos e clínicos. Nesse sentido, a viabilidade de um composto necessita ser pesquisada por meio destas três condições ou explicitada por, pelo menos, uma destas.

No Brasil, há doze fitoterápicos disponibilizados pelo sistema de saúde pública, tornando esse número deficiente diante do esperado, visto a expressiva biodiversidade da flora no país (HASENCLEVER *et al.*, 2017). Isso expõe a escassez de pesquisas relacionadas com fitoterápicos, e, em consequência, a exclusão fitoterápica do extrato de erva-mate persiste pela insuficiência de seus estudos toxicológicos pré-clínicos e clínicos em humanos, cuja importância é confirmar os efeitos e/ou identificar as reações adversas do produto investigado.

As documentações tecnocientíficas são utilizadas para apresentação de pesquisas, como monografias e dissertações, da droga vegetal presente na formulação do medicamento, que atestem sobre estudos de suas atividades biológicas e direcionem as ações farmacológicas. No caso do extrato de erva-mate, esses documentos podem auxiliar na investigação de suas propriedades farmacológicas que se deseja compreender para proporcioná-lo como fitoterápico, em especial para a atividade antioxidante.

A etnofarmacologia analisa a utilização que determinada comunidade tradicional tem com uma planta medicinal com finalidade terapêutica. Os estudos etnofarmacológicos sobre o conhecimento popular desta planta são essenciais para uma inicial escolha de pesquisas e desenvolvimento de fitoterápicos, uma vez que já se tem um relato sobre o seu efeito terapêutico, podendo ser benéfico ou maléfico (MOLZ; LUDKA, 2016). Ademais, também valoriza e efetiva o saber de comunidades tradicionais.

O objetivo é analisar o potencial antioxidante do extrato aquoso de erva-mate com a sua atividade em doenças crônicas não-transmissíveis, com enfoque para as cardiovasculares e a obesidade. Além de compreender a técnica de crioconcentração aplicada a este extrato dessa planta. E, ainda, analisar sua viabilidade como fitoterápico, seguindo a definição da ANVISA com relação a esse tipo de medicamento, a partir de seu uso em testes com animais e consumo medicinal pela população, para a sua implementação no sistema de saúde pública brasileira.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, com base em pesquisas em bibliotecas digitais e periódicos de universidades. Considerando a metodologia, foi escolhida a temática que se volta para a inclusão fitoterápica antioxidante do extrato aquoso de erva-mate para o sistema de saúde pública no Brasil.

Determinada a temática, procurou-se no ambiente virtual conteúdos e estudos gerais sobre a composição fitoquímica da erva-mate, sendo as suas propriedades estudadas e aplicadas no cotidiano. Nesse sentido, ao se perceber que o sistema de saúde público brasileiro atende números expressivos de pacientes com doenças crônicas, notou-se que o extrato aquoso de erva-mate, que conserva as características da planta e apresenta atividade antioxidante, podendo esta propriedade ser potencializada por meio da técnica de crioconcentração, tem propensão a se tornar um fitoterápico e ser disponibilizado pelo Sistema Único de Saúde para esse tratamento terapêutico.

Localizou-se materiais a respeito da viabilidade de fitoterápicos nesse sistema, em específico o extrato aquoso de erva-mate, porém, logo se deparou que há escassez de estudos que investiguem a flora brasileira, e, como consequência, os estudos de toxicidade clínicos que asseguram a segurança e eficácia do composto. Investigou-se outros mecanismos possíveis frente a tal problemática, e encontrou que, segundo a ANVISA, documentações tecnocientíficas e estudos etnofarmacológicos também podem ser utilizados para se garantir a sua aplicação, logo, procurou-se analisar e demonstrar que o extrato aquoso de erva-mate cumpria esses requisitos.

3. RESULTADOS

Os resultados compreendem que o extrato aquoso de erva-mate possui propriedade antioxidante, que é proporcionada pelos compostos fenólicos. Estes podem neutralizar radicais livres gerados pelo metabolismo ativo do corpo humano, mostrando contribuir no auxílio em doenças cardiovasculares e na obesidade.

A relação do processo de crioconcentração com o extrato analisado por ser explicitada segundo os resultados de Boaventura (2015, p. 64):

Observou-se variação linear positiva e significativa ($p < 0,05$) no teor de todos os compostos fenólicos e metilxantinas analisados, depois da aplicação de cada estágio da crioconcentração. Apesar de a variação de aumento de alguns compostos não modificar ou declinar em alguns estágios, não foi observada redução no teor dos constituintes analisados. Todos os compostos analisados aumentaram, pelo menos, seis vezes após a aplicação do último estágio da crioconcentração, quando comparado aos teores do extrato inicial. [...] Em geral, a atividade antioxidante do extrato aquoso de erva-mate está fortemente correlacionada com todos os compostos fenólicos analisados. O substancial aumento do potencial antioxidante do extrato aquoso de erva-mate, ao longo da aplicação da crioconcentração, não foi associado à presença de um único constituinte. Parece que o aumento sinérgico do teor de compostos fenólicos, após cada estágio da crioconcentração, pode ter in-



fluenciado, positivamente, no aumento da capacidade antioxidante do extrato aquoso da erva-mate.

Isso demonstra que, com a aplicação da técnica de crioconcentração no extrato, há uma variação positiva no teor dos compostos fenólicos e, em seguida, com a análise de sua atividade antioxidante, também se verifica um aumento desta propriedade, tendo a potencialização do seu valor nutricional.

Há a compreensão dos resultados nos experimentos do extrato aquoso envolvendo a ação farmacológica descrita de acordo com Felippi (2005, p. 3):

Recentemente, resultados do nosso laboratório mostraram que o extrato de mate possui a habilidade de inibir a progressão da aterosclerose experimental em coelhos alimentados com dieta rica em colesterol. [...] Os resultados do presente estudo demonstraram que, além da atividade antioxidante *in vitro*, o extrato aquoso de erva-mate apresentou atividade vasorelaxante dependente de NO em artéria aorta torácica isolada de ratos e, de particular importância, reverteu a inibição da contração induzida pela fenilefrina e do relaxamento induzido pela acetilcolina na aorta dos camundongos com aterosclerose.

Isso evidencia que o extrato de erva-mate induz a vasodilatação e o vasorelaxamento em vasos sanguíneos observados nos estudos *in vivo* nos animais, em específico os coelhos e os ratos, promovendo a melhora da contração muscular, em especial a artéria aorta, principal bombeador de sangue oxigenado para o corpo, e proporciona a desobstrução da passagem de sangue. Diante disso, explicita-se o auxílio desse composto quanto às doenças cardíacas.

Visto a composição fitoquímica da erva-mate e seu extrato, que induz propriedades farmacológicas, dentre elas há um efeito de antiobesidade, demonstra-se, por meio de testes em animais ou humanos, se essa característica é proporcionada dentro do organismo humano. Com tal exposição, segundo Piccoli (2017, p. 5):

Em sua pesquisa Kim *et al.*, (2015), suplementou indivíduos obesos com 3g de extrato de erva-mate durante 12 semanas, que obtiveram diminuição significativa de massa gorda corporal, percentual de gordura e tendências na redução da gordura visceral e subcutânea, além de significativa diminuição da relação cintura/quadril, atribuindo estes efeitos aos compostos fenólicos presentes na planta. De Moraes *et al.*, (2009) avaliaram 102 indivíduos normolipidêmicos, dislipidêmicos e hipercolesterolêmicos em uso de estatinas, que ingeriram 330ml de infusão de erva-mate três vezes ao dia. Após 40 dias de tratamento, os participantes normolipidêmicos apresentaram redução de 8,7% do LDL-c, os indivíduos dislipidêmicos reduziram o LDL-c em até 8,6%, e o HDL-c foi aumentado em 4,4%, inclusive nos participantes que faziam uso de estatinas, promovendo redução de 13,1% no LDL-c e aumento do HDL-c em 6,2%, sugerindo que a erva-mate pode contribuir para redução do risco de doenças cardiovasculares em humanos.

Nesse sentido, há a relação, observada em testes monitorados em humanos, que o extrato aquoso da erva-mate, com seus compostos fenólicos, induz a redução da massa corporal, em específico a gordura presente no indivíduo. Ademais, como os indivíduos,



tanto obesos quanto com problemas cardiovasculares, apresentam em excesso a LDL-c, uma lipoproteína de baixa densidade, conhecida também como “colesterol ruim”, que está diretamente ligada a ocorrência de infarto e AVC, ao diminuí-la com o potencial antioxidante da erva-mate, há proporcionalidade direta também com o risco de agravamento das doenças crônicas e a mortalidade do indivíduo.

Além disso, segundo Lazzarotto (2021, p. 26):

Em estudo posterior realizado por Boaventura *et al.* (2015), foram avaliados o consumo de extratos crioconcentrados de erva-mate. Neste estudo 31 voluntários ingeriram em jejum 200 mL de chimarrão, extratos crioconcentrados de erva-mate ou água. Amostras de sangue foram coletadas antes e após 1 h da ingestão das bebidas, para verificar a atividade das enzimas antioxidantes (catalase, superóxido dismutase, glutathione peroxidase e glutathione reduzida), peroxidação lipídica e capacidade antioxidante do soro. A ingestão de extratos crioconcentrados de erva-mate promoveu aumento significativo das atividades das enzimas: catalase (28,7 %), superóxido dismutase (21,3 %), glutathione peroxidase (9,6 %) e glutathione reduzida (8,8 %). Também aumentou a capacidade antioxidante sérica (7,5 %). Enquanto os pacientes que ingeriram chimarrão apresentaram apenas aumento nos valores de glutathione reduzida (8,3 %). Os níveis séricos de peroxidação lipídica não apresentaram alterações significativas para ambas as bebidas.

O extrato crioconcentrado de erva-mate apresenta, em determinada quantidade utilizada no estudo para consumo humano, variação positiva nas atividades das principais enzimas antioxidantes presentes no organismo, sendo estas auxiliares no combate a radicais livres que podem causar doenças crônicas. Isso pode ajudar indivíduos com obesidade, ainda que não se verifique alteração nos níveis séricos de peroxidação lipídica.

Os estudos clínicos apresentam segurança, eficácia ou esquema de dosagem ideal em humanos selecionados. Há a compreensão de que mesmo com a expressiva biodiversidade do Brasil, ainda existe um descaso com o número de pesquisas desenvolvidas envolvendo a fauna e, em consequência, também o há com estudos clínicos contendo sua comprovação de eficácia (BRUNING *et al.*, 2012).

Considerando na literatura, a erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e o seu extrato aquoso apresentam contraindicações e, em determinados casos, efeitos colaterais, de acordo com Piccolli (2017), “Em altas doses, o consumo da erva-mate podem causar insônia, nervosismo, dores abdominais, náuseas e vômitos, sendo contraindicado em pessoas com epilepsia, insônia, nervosismo, e portadores de gastrites e úlceras pépticas (ALONSO, 1998)”. Nesse sentido, tem-se os efeitos colaterais da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) para elucidar os seus malefícios ao ser utilizada em expressivas doses, que não contempla a parcela da população que já apresenta estes problemas ou que podem contraí-los, necessitando de estudos para determinar uma faixa de concentrações do composto que podem ser consumidas sem causar essas adversidades e se ter conhecimento de uma toxicidade designada.

De acordo com Ferreira *et al.*, (2016), “Segundo Canterle (2005) a atividade antioxidante das plantas de erva-mate (*I. paraguariensis*) é maior que em outras espécies do gênero *Ilex* spp., a mesma também é preservada no chimarrão e tererê”. A literatura científica da erva-mate e seu extrato aquoso, junto com estudos de monografias e dis-



sertações, apontam para a atividade antioxidante deste composto e sua eficácia (COLPO, 2012; PICOLLI, 2017; SERAFIM, 2013).

A utilização de plantas medicinais para a fitoterapia condiz com as proposições da Organização Mundial da Saúde (OMS), que incentiva a valorização das terapias tradicionais, reconhecidas como recursos terapêuticos úteis, podendo atender e contribuir para o sistema de saúde público local dos usuários, sendo no caso do Brasil, o Sistema Único de Saúde (SUS). A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) já vinha sendo utilizada e consumida pelos índios, que são uma comunidade tradicional, antes do período de colonização, para fins gerais, com expressividade para uso medicinal em um tipo primitivo de chimarrão (MENDES, 2005), devendo o profundo conhecimento da natureza por esses povos ser considerado um dos fatores fundamentais para desenvolvimento de medicamentos.

Com a sua difusão dentre as épocas e o território brasileiro, a erva-mate (*Ilex paraguariensis*) está difundida na cultura brasileira, sendo utilizada para fins medicinais e consumida em forma de infusão por uma parcela significativa da população, e seu extrato aquoso apresenta indicação medicinal para o tratamento de patologias que envolvem a atividade antioxidante. Nesse sentido, há a confirmação de que a erva-mate na medicina popular se apresenta condizente com a literatura de acordo com Colpo (2012, p. 32):

Matsumoto *et al.* (2009) observam que o consumo regular de chá mate pode melhorar as defesas antioxidantes por múltiplos mecanismos, tanto pelo aumento da circulação de compostos bioativos como pela regulação dos mecanismos celulares enzimáticos que combatem o estresse oxidativo.

Essa concepção da ingestão da forma medicinal tradicional do extrato aquoso da erva-mate é ratificada nos testes em animais utilizando uma dieta hiperlipídica, tendo, em seu resultado, o auxílio do composto na redução de peso e, em consequência, uma melhora no quadro de obesidade (PICCOLI, 2017). Visto isso, o consumo medicinal regular do extrato aquoso, no caso o chá, pode contribuir na atividade antioxidante do metabolismo ativo do organismo.

Na forma de infusão de consumo na sociedade brasileira há o chimarrão e o tererê, os quais possuem como principal componente a erva-mate (*Ilex paraguariensis*), tendo-se parte da transferência dos compostos fenólicos na ingestão destas bebidas populares, segundo Silveira (2013, p.25):

Meinhart e colaboradores (2010) quantificaram o teor de compostos fenólicos totais a partir do chimarrão e do tererê, simulando fielmente a forma popular de preparo dessas bebidas. Foi observado que a taxa de transferência de compostos fenólicos totais presentes na erva-mate para os extratos aquosos variou entre 17 e 24 % (dependendo do tipo de erva-mate). Ainda, verificaram que ocorreram variações drásticas da transferência dos compostos entre os primeiros extratos aquosos e os últimos (dentre 30 estudados). Ainda assim, os níveis de compostos fenólicos totais obtidos nos extratos aquosos que normalmente são ingeridos pelo consumidor foram superiores a diversos alimentos de bebidas reconhecidos como fontes potenciais destes compostos.

Isso elucida que estes compostos contidos no extrato aquoso de erva-mate continuam em porcentagem significativa nessa forma popular de infusão, demonstrando que,



como estes compostos induzem a atividade antioxidante, a medicina popular, com saberes baseados no conhecimento popular e, em parte, ratificados pela ciência, apresentam propriedades condizentes com a literatura bibliográfica.

4. DISCUSSÃO

Outra técnica efetiva para concentrar compostos bioativos é a nanofiltração, a qual se utiliza baixas temperaturas, não tendo alterações nutricionais significativas no produto. Apesar disso, esse processo necessita de regular manutenção por causa do *fouling* (obstrução dos poros nas membranas) (LAZZARATTO, 2021). O processo de crioconcentração se mostra efetivo para preservar as características físico-químicas do extrato aquoso, proporcionando a concentração e o aumento da porcentagem dos compostos fenólicos e, em consequência, a sua atividade antioxidante. Há um resultado semelhante no estudo de Camargo *et al.* (2017), que concluíram que a adição de extrato crioconcentrados de café elevou a porcentagem dos compostos bioativos do cereal matinal de arroz.

Além disso, por reduzir os custos de operação (SABANCI; ICIER, 2020), essa técnica pode ser utilizada, para fins de obtenção do extrato em concentrações desejadas, na redução de despesas do sistema de saúde público, visto que se apresenta como uma alternativa rentável.

Mosimann (2002) verificou redução significativa da área das lesões ateroscleróticas, doença cardiovascular provocada pela inflamação nas paredes das artérias do coração, em coelhos que tiveram uma dieta hipercolesterolêmica em concomitância ao consumo de extrato aquoso de erva-mate. Kang *et al.* (2012) notaram efeito anti-obesidade e uma diminuição nos níveis de glicose no sangue em quatro semanas no grupo tratado com a administração de erva-mate realizado com ratos. Tais resultados vão ao encontro com os observados por Felippi (2005) e Picolli (2017) no que tange a comprovação de que o extrato aquoso induz a vasodilatação nos vasos sanguíneos e a oxidação lipídica corporal. Logo, com a compreensão da atividade antioxidante desse composto, tem-se seu potencial como fitoterápico no sistema público de saúde.

Embora em um primeiro momento o estudo citado por Lazzaratto não houve a evidência das alterações nos níveis séricos de peroxidação lipídica, o qual auxilia a analisar se o composto ajuda a reduzir a gordura corporal, em um estudo posterior, segundo Lazzaratto (2021), "Boaventura *et al.* (2015) observaram que ao administrar por via oral os extratos crioconcentrados de erva-mate aos pacientes, melhoravam os níveis de colesterol, triglicerídeos, glicose, resposta do sistema imunológico e diminuíam o stress oxidativo". Isso indica que o extrato crioconcentrado pode auxiliar com eficácia indivíduos com problema de obesidade, por haver um satisfatório equilíbrio nos níveis de colesterol e gorduras no organismo e em doenças cardíacas, já que diminui o estresse oxidativo, sendo isso aplicado ao coração.

A ANVISA permite que a eficácia e a segurança de um fitoterápico sejam validadas, também, através de estudos farmacológicos pré-clínicos e clínicos. Porém, verifica-se uma escassez destes, no tange a relação de investimento em pesquisas nessa área, incluindo o extrato de erva-mate, em que sua relevância se dá pela identificação do nível de



toxicidade e efeitos colaterais que podem ser ocasionados pelo composto.

Segundo Leite (2000), para a implantação de programas de consumo de fitoterápicos na atenção primária na saúde, os gestores municipais percebem os rendimentos do uso destes tratamentos terapêuticos e não seus benefícios. O autor ainda afirma que a fitoterapia é um aspecto importante da cultura de uma determinada sociedade que deve ser considerada. Nesse sentido, necessita-se de investimentos em pesquisas nesse âmbito para a manutenção e garantia das condições de saúde, visando disponibilizar demais fitoterápicos, em especial o extrato aquoso de erva-mate, a partir de sua relação com a população brasileira e caráter benéfico ao organismo.

Compreendeu-se que em expressivas doses de ingestão de erva-mate há, na literatura bibliográfica, efeitos indesejados, sendo contraindicado para a parcela da população que não se pode expor à tendência destes efeitos. Todavia, segundo Piccoli (2017, p. 13):

Para o uso adequado e indicação de utilização de plantas na terapêutica e prevenção de doenças, é de extrema importância identificar a toxicidade dos compostos presentes em produtos naturais. Andrade *et al.*, (2012), avaliou a toxicidade da erva-mate através da administração crônica de 2g/kg durante 14 dias em coelhos e ratos. Os autores concluíram, após avaliação de parâmetros hematológicos e séricos, histopatológico, índice de sobrevivência e consumo de água e comida, que o uso do extrato de erva-mate não apresentou riscos mediante sua administração crônica. Os estudos em humanos sobre os efeitos da erva-mate, para elucidar melhor a eficácia da mesma a curto e longo prazo e determinar a ingestão mínima e máxima bem tolerada, ainda são pouco evidenciados. Os resultados de outros estudos parecem fornecer suporte com efeitos benéficos para consumir erva-mate.

Há importância nos estudos clínicos que comprovaram sua eficácia através de avaliações em humanos, no entanto, em testes com animais, não se apresentou risco de toxicidade do composto de extrato aquoso de erva-mate na sua administração, demonstrando uma segurança inicial. Nesse contexto, faz-se necessário o composto ser investigado a longo prazo, para se ter uma tolerância mínima e máxima determinadas e as reações adversas.

A inclusão fitoterápica do extrato aquoso de erva-mate compreende a análise de documentações tecnocientíficas que evidenciam, na literatura bibliográfica, as propriedades antioxidantes do extrato, expostas em investigações *in vitro* e em testes *in vivo*, e aos estudos etnofarmacológicos. Estes são essenciais no desenvolvimento inicial da pesquisa para já se ter uma noção dos efeitos do composto no organismo humano ativo, com a Organização Mundial de Saúde (OMS) propondo e apoiando a adoção das práticas tradicionais com comprovada eficácia, como a fitoterapia, como ferramenta para manutenção e garantia das condições de saúde.

No âmbito do Brasil, quando associado a multiplicidade cultural, dispõe-se de um oportuno conhecimento tradicional no que diz respeito ao uso de plantas medicinais, tendo o consumo medicinal da erva-mate usado para tratamento de patologias que envolvem suas ações antioxidantes. Logo, há o uso do extrato aquoso de erva-mate na medicina popular, como a ingestão de chá, que a início pode auxiliar no combate a radicais livres, como demonstra sua literatura bibliográfica, e, por meio de testes em animais, compro-



vou-se que há efetiva atividade antioxidante no organismo com esse consumo regular, indicando eficácia e os benefícios da utilização da planta medicinal e seu extrato.

Ademais, as bebidas tradicionais brasileiras são as expressivas fontes de consumo do extrato aquoso de erva-mate, sendo este aspecto ligado a hábitos culturais, em forma de infusão como chimarrão e tereré. Estas ingestões apresentam significativa porcentagem de erva-mate, havendo transferência de compostos fenólicos. Isso evidencia que conhecer a composição quantitativa dos compostos presentes nas bebidas à base dessa planta é importante para que se tenha a relação da ação do extrato no metabolismo ativo humano com o seu consumo populacional, trazendo benefícios à população.

5. CONCLUSÃO

Compreende-se a atividade antioxidante do extrato aquoso de erva-mate e sua abrangência na sociedade brasileira, no que tange ao seu consumo popular e medicinal, demonstrando a sua eficácia no tratamento de doenças crônicas e o uso condizente com a literatura bibliográfica.

Com a técnica de crioconcentração, obtém-se porcentagem significativa dos compostos fenólicos no extrato analisado em relação ao inicial de erva-mate. Ao considerar sua qualidade nutricional no final deste método, a produção desse composto pode ser aplicada, também, ao consumo humano.

Tendo a relação ao uso das plantas medicinais e fitoterápicos, a fitoterapia resgata a cultura tradicional do uso do extrato aquoso de erva-mate pela população, reforçando que, mesmo com a problemática, o parâmetro utilizado para a verificar a inclusão do composto é relevante, tendo com esses fatores a corroboração para sua implementação no sistema público de saúde brasileiro.

Seguindo a definição de medicamento fitoterápico da ANVISA, o extrato aquoso de erva-mate demonstra viabilidade como fitoterápico antioxidante para o Sistema Único de Saúde (SUS) por meio das suas análises em documentações tecnocientíficas em bibliografia, que refletem o conhecimento prévio consolidado sobre suas propriedades, e estudos etnofarmacológicos, os quais resgatam a sua compreensão de uso e consumo por comunidades tradicionais. Através destes, tem-se a demonstração de eficácia e segurança inicial da atividade antioxidante do extrato em testes em animais e utilização medicinal pela população brasileira, e indicando incorporá-lo como fitoterápico.

Sinaliza-se que a implementação do composto se dá pelo desenvolvimento de estudos em larga escala para comprovar sua eficácia, no que tange sua toxicidade em estudos clínicos e malefícios, podendo ser usado no tratamento terapêutico. Ademais, a sua implantação na atenção básica pode diminuir o número de pacientes com doenças crônicas, no entanto, não deve ser utilizado de forma indiscriminada, devendo, para evitar contraindicações, assegurar o consumo racional e adequado deste composto.



Referências

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC N° 14, de 31 de março de 2010.** Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BOAVENTURA, Brunna Cristina Bremer. **Atividade antioxidante e crioconcentração dos compostos bioativos do extrato aquoso de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.)**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos. Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/132485>. Acesso em: 8 jul. 2021.

BRUNING, Maria Cecília Ribeiro; MOSEGUI, Gabriela Bittencourt Gonzalez; VIANNA, Cid Manso de Melo. A utilização da fitoterapia e de plantas medicinais em unidades básicas de saúde nos municípios de Cascavel e Foz do Iguaçu – Paraná: a visão dos profissionais de saúde. **Ciência & saúde coletiva**. Rio de Janeiro, v. 17, n. 10, p. 2675-2685, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-81232012001000017&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 10 jul. 2021.

CAMARGO, Gabriela; CHANG, Yoon Kil; SAMPAIO, Ulliana; SCHMIELE, Marcio; PEREIRA, Ana Paula; PAS-TORE, Gláucia M.; CLERICI, Maria Teresa Pedrosa Silva. Adição de extrato de café crioconcentrado para aumentar compostos bioativos em cereal matinal à base de arroz. In: XXV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 2017, . **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/unicamp-pibic/pibic-2017/papers/adicao-de-extrato-de-cafe-crioconcentrado-para-aumentar-compostos-bioativos-em-cereal-matinal-a-base-de-arroz>. Acesso em: 12 jul. 2021.

COLPO, Ana Zilda Ceolin. **Perfil fitoquímico e capacidade antioxidante de extratos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* a.st. hill.)**. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Universidade Federal do Pampa. Campus Uruguaiiana, Uruguaiiana, 2012. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/195>. Acesso em: 11 jul. 2021.

FELIPPI, Regina. **Efeito do extrato aquoso de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) na reatividade vascular: enfoque na aterosclerose experimental**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Farmácia. 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102984>. Acesso em: 11 jul. 2021.

FERRERA, T.S.; HELDWEIN, A.B.; DOS SANTOS, C.O.; SOMAVILLA, J.C.; SAUTTER, C.K. Substâncias fenólicas, flavonoides e capacidade antioxidante em erva-mate sob diferentes coberturas do solo e sombreamentos. **Rev. Bras. Pl. Med.** Campinas, v.18, n.2, supl. I, p.588-596, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbpm/a/QvFTbwXjYw3Cm8rdQMK384c/?lang=pt>. Acesso em: 13 jul. 2021.

HASENCLEVER, Lia; PARANHOS, Julia; COSTA, Cíntia Reis; CUNHA, Gabriel; VIEIRA, Diego. A indústria de fitoterápicos brasileira: desafios e oportunidades. **Ciência & saúde coletiva**. V.22, n.8, p. 2559-2569, ago. 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-81232017002802559&script=sci_art-text. Acesso em: 9 jul. 2021.

KANG, Y. R.; LEE, H. Y.; KIM, J. H.; MOON, D. I.; SEO, M. Y.; PARK, S. H.; CHOI, K. H.; KIM, C. R.; KIM, S. H.; OH, S. H.; CHO, S. W.; KIM, S. Y.; KIM, M. G.; CHAE, S. W.; KIM, O.; OH, H.G. Anti-obesity and anti-diabetic effects of Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) in C57BL/6J mice fed a high-fat diet. **Laboratory Animal Research: Korean Association for Laboratory Animal Science**. V. 28, n. 1, p.23-29, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223986926>. Acesso em: 10 jul. 2021.

LAZZAROTTO, Simone Rosa da Silveira. **Avaliação termoanalítica e cromatográfica de amidos incorporados com extratos crioconcentrados de erva-mate**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3329>. Acesso em: 12 jul. 2021.

LEITE, Silvana Nair. **Além da medicação: a contribuição da fitoterapia para a saúde pública**. 2000. 114p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001169541>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MENDES, Rose Maria de Oliveira. **Caracterização e avaliação da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), beneficiada no Estado de Santa Catarina**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102112>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MOLZ, Simone; LUDKA, Fabiana Kalyne. Erva-mate e a Neuroproteção: inovação e desenvolvimento territorial no planalto norte catarinense com base em estudos pré-clínicos. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**. Edição especial: Estudos sobre alternativas de desenvolvimento territorial para o Planalto Norte Catarinense (PNC). V. 6, n. 2, p. 189-206, jul. 2016. Disponível em: <http://www.periodicos.unc.br/index.php/drd/article/view/1211>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MOSIMANN, Ana Luiza Pamplona. **Avaliação da atividade antioxidante do extrato aquoso de *Ilex paraguariensis* (erva mate) na peroxidação lipídica e na aterosclerose experimental em coelhos**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Farmácia. 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/82920>. Acesso em: 10 jul. 2021.

PICCOLI, Regina Maria. **Efeitos da Erva-Mate (*Ilex Paraguariensis* A. St.-Hil.) no organismo humano**. Artigo apresentado ao Curso de Pós-Graduação, Departamento de Ciências da Saúde da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI - Erechim. 2017. Disponível em: <http://repositorio.uricer.edu.br/bitstream/35974/170/1/Regina%20Maria%20Piccoli.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2021.

RIBEIRO, Marina Queiroz; CÉSARO, Álvaro de; ZANCANARO, Vilma; SANTOS, Patrícia. Efeitos da ingestão crônica de extrato aquoso de erva mate (*Ilex paraguariensis*) preparado na forma de "chimarrão" sobre os níveis séricos de colesterol, triglicérides e glicose. **Revista Interdisciplinar de Estudos em Saúde - Uniarp**. V. 1, n. 1, p. 25-37, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248921110_EFEITOS_DA_INGESTAO_CRONICA_DE_EXTRATO_AQUOSO_DE_ERVA_MATE_ILEX_PARAGUARIENSIS_PREPARADO_NA_FORMA_DE_CHIMARRAO_SOBRE_OS_NIVEIS_SERICOS_DE_COLESTEROL_TRIGLICERIDEOS_E_GLICOSE. Acesso em: 9 jul. 2021.

SABANCI, S.; ICIER, F. Rheological behavior of sour cherry juices concentrated by ohmic and conventional evaporation processes under vacuum. **Journal of Food Processing Preservation**. V.44, p.2-9, out. 2020. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.14832>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SERAFIM, Rodolfo Angelo. **Quantificação de compostos fenólicos e avaliação da ação antioxidante de extratos aquosos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. 2013. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1423>. Acesso em: 8 jul. 2021.

SILVEIRA, Tayse Ferreira Ferreira da. **Compostos fenólicos transferidos da erva-mate para os extratos aquosos durante o preparo do chimarrão e do chá mate**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas, SP. 136 p. 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/254313>. Acesso em: 11 jul. 2021.



CAPÍTULO 11

UTILIZAÇÃO DE ZEÓLITA NATURAL E MODIFICADA VISANDO A ADSORÇÃO DE DIURON

NATURAL AND MODIFIED ZEOLITE USE AIMING DIURON ADSORPTION

Henrique Straioto

Alexandre Amado de Moura

Paula Valéria Viotti

Wardleison Martins Moreira

Marcelo Fernandes Vieira

Rosangela Bergamasco

Resumo

Sabendo dos riscos que os contaminantes emergentes apresentam para a saúde humana e para os recursos hídricos, o presente trabalho busca aplicar uma modificação hidrotérmica para uma zeólita natural com brometo de hexadeciltrimetilamônio e ácido clorídrico, visando a melhoria da sua capacidade de adsorção de diuron. Verificou-se que a modificação da zeólita aumentou a capacidade de adsorção de 0,09 para 1,49 mg g⁻¹, enquanto a variação do pH inicial de adsorção não mostrou-se relevante.

Palavras chave: Adsorção, Diuron, Contaminantes emergentes, Pesticidas, Zeólita.

Abstract

Knowing the risks that emerging contaminants pose to human health and to water resources, the present work seeks to apply a hydrothermal modification to a natural zeolite with hexadecyltrimethylammonium bromide and hydrochloric acid, aiming to improve its diuron adsorption capacity. It was verified that the modification of the zeolite increased the adsorption capacity from 0.09 to 1.49 mg g⁻¹, while the variation of the initial pH of adsorption was not relevant.

Key-words: Adsorption, Diuron, Emerging contaminants, Pesticides, Zeolite.



1. INTRODUÇÃO

Como consequência do crescimento populacional e industrial, sabe-se que a contaminação ambiental pelos chamados contaminantes emergentes tem sido um assunto bastante discutido (Zanin et al., 2017; Samadi et al., 2021).

Dentre os contaminantes emergentes mais encontrados nos corpos hídricos, encontra-se o diuron, que é um herbicida utilizado em grande escala pelo setor agrícola para o controle de plantas daninhas, em pré-emergência ou pós-emergência para culturas como algodão, café, cana-de-açúcar ou citros. As propriedades do diuron são apresentadas na Tabela 1.

| Propriedade | Diuron |
|------------------------------|---|
| Peso molecular | 233,09 g mol ⁻¹ |
| Volume molecular | 170,1 cm ³ mol ⁻¹ |
| Área de superfície molecular | 2,19 nm ² |
| Densidade | 1,1786 cm ³ g ⁻¹ |
| Momento dipolar | 7,55 Debyes |
| Solubilidade em água (20°C) | 40 mg L ⁻¹ |
| log K _{ow} | 2,85 |

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do diuron

Fonte: Chen et al. (2011)

O diuron é um contaminante persistente, nocivo à saúde humana e tóxico ao meio ambiente. Logo, tem-se a necessidade da realização de estudos visando o tratamento de água de forma a promover a remoção desse contaminante (Yossa et al., 2020; Zbair et al., 2020). A estrutura molecular do diuron é apresentada pela Figura 1.

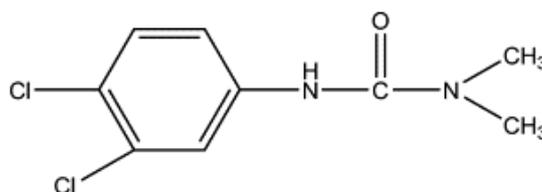


Figura 1 – Estrutura molecular do diuron

Fonte: Liu et al (2010)

As técnicas convencionais para o tratamento de água e efluentes, como coagulação-floculação e tratamentos biológicos são ineficientes na remoção de contaminantes emergentes (Zanin et al., 2017). Logo, processos como a adsorção, filtração por membranas, processos de oxidação avançada, foto-remediação vêm sendo intensamente pesquisados.

Entre esses processos, destaca-se a adsorção, que é um método simples, que apresenta flexibilidade de projeto e operação, economicamente viável e capaz de ser utilizado para uma ampla gama de poluentes (Samadi et al., 2021; Zbair et al., 2020). Para processos de adsorção, alguns materiais vêm sendo investigados, como rejeitos industriais, biomassas, algas marinhas, zeólitas, carvões ativados e diversos outros (Zbair et al., 2020; Yossa et al., 2021; Zanin et al., 2017; Gao et al., 2016).

As zeólitas são conhecidas por ter uma alta porosidade e apresentarem uma estrutura microporosa, fatores que a levam a ser utilizada em grande escala em diversos processos por obter uma alta capacidade de troca iônica. Zeólitas são aluminossilicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos e alcalinos terrosos. Sua estrutura é composta por uma rede tridimensional de aluminossilicatos formados por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados uns aos outros e que compartilham os átomos de oxigênio (Breck, 1974).

Sabendo que as zeólitas são materiais promissores para serem aplicadas como material adsorvente, o presente estudo busca avaliar a eficiência da zeólita clinoptilolita *in natura* e após modificação hidrotérmica para a remoção do herbicida diuron.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi utilizada uma zeólita natural comercial, fornecida pela empresa Celta Brasil. O diuron (3-(3,4-diclorofenil)-1,1-dimetiluréia ($\text{C}_9\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}$) foi fornecido pela empresa Nortox S/A, enquanto o brometo de hexadeciltrimetilamônio (CTAB) de pureza superior a 98% ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{Br})(\text{CH}_3)_3$) foi adquirido da Sigma-Aldrich. O ácido clorídrico (HCl) e o hidróxido de sódio (NaOH) e demais reagentes utilizados foram adquiridos comercialmente em Maringá.

2.2. Modificação da zeólita natural

Visando uma zeólita modificada (ZM) com maior capacidade de adsorção, foi realizada uma modificação hidrotérmica da zeólita natural (ZN) previamente separada com granulometria entre 20 e 16 mesh e lavada diversas vezes.

Para a modificação, uma mistura contendo 40 mL HCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, 4,0 g de ZN e 3,0 g de CTAB foi ultrassonicada por 30 minutos para sua completa dispersão. Posteriormente, a mistura foi inserida em um recipiente de teflon, colocado dentro de um reator selado de aço inoxidável. O reator foi mantido em estufa na temperatura de $240 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas. Após o processo de modificação, a zeólita foi lavada sucessivas vezes e passou por uma etapa de secagem por 24 horas em uma estufa à 100°C .

2.3. Ponto de carga zero

Visando descobrir a densidade das cargas superficiais do material antes e após a modificação, foi determinado o ponto de carga zero (pH_{pcz}). O experimento foi realizado utilizando-se de uma solução de NaCl $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ que teve seu pH ajustado entre 1 e 12, utilizando-se de soluções de HCl e NaOH de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. Os ensaios foram feitos em triplicata e utilizou-se de 0,05 g de zeólita para 20 mL de solução de NaCl, submetidos a uma



agitação de 150 rpm em temperatura de 30 °C por 24 horas em um banho termostático (Banho Dubnoff, Quimis).

2.3. Adsorção do diuron

Para os ensaios de adsorção, foi utilizada uma solução de diuron com concentração inicial de 14 mg L⁻¹, visto a baixa solubilidade em água do herbicida. Os experimentos foram realizados em batelada e em triplicata, utilizando 50 mg de adsorvente e 20 mL de solução de diuron. A mistura permaneceu sob agitação em um banho termostático (Banho Dubnoff, Quimis) por um período de 24 horas na temperatura de 30°C e 150 rpm. Após a adsorção, a concentração de diuron foi mensurada com auxílio de um espectrofotômetro (DR 5000 UV/VIS, Hach), no comprimento de onda de 248 nm.

Para descobrir a concentração final de diuron após os ensaios de adsorção, foi realizada a conversão de absorbância para concentração do contaminante (mg L⁻¹), conforme apresentado pela Equação 1.

$$y = 5,1439.x - 0,4325 \quad (1)$$

Em que:

y: é a concentração de diuron (mg L⁻¹);

x: é a absorbância em 248 nm.

A Equação 1 foi obtida da curva de calibração (apresentada na Figura 2).

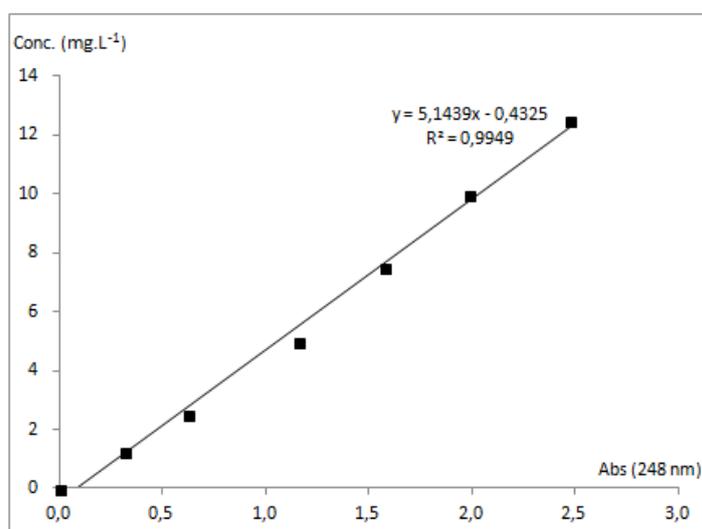


Figura 2 – Curva de calibração utilizada
Fonte: Autoria própria (2021)

Sabendo-se a concentração inicial da solução e a concentração após os ensaios de adsorção, utilizou-se da Equação 2 para a determinação da capacidade de adsorção das zeólitas utilizadas.

$$q = \frac{(C_0 - C_f) \times V}{m} \quad (2)$$

Em que:

q: é a capacidade de adsorção ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);

C_0 : é a concentração inicial de diuron (mg L^{-1});

C_f : é a concentração final de diuron (mg L^{-1});

V: é o volume de solução (L);

m: é a massa de adsorvente (g).

3. Resultados e discussão

Sabendo da importância do efeito de pH em processos de adsorção, verificou-se o efeito da alteração do pH inicial entre 2 e 12. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

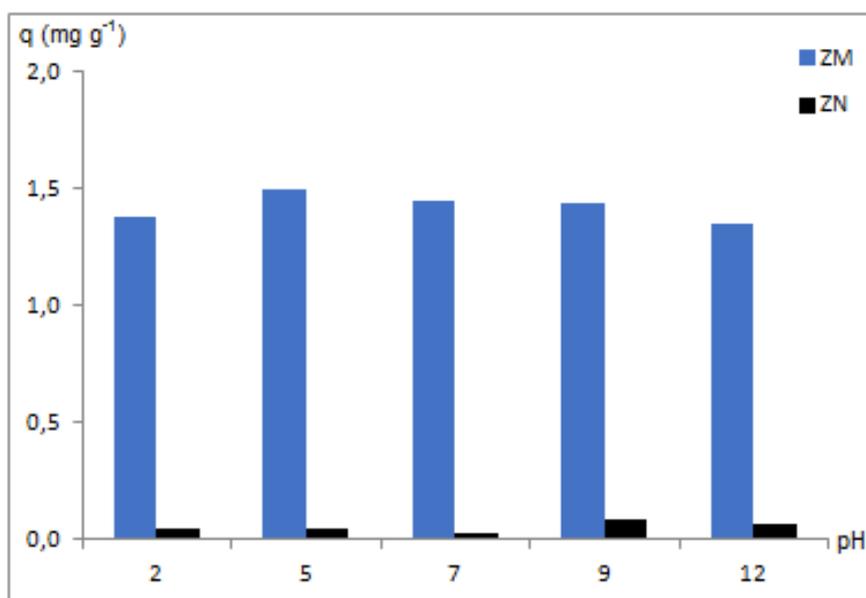


Figura 3 – Capacidade de adsorção do diuron de acordo com o pH da solução
Fonte: Autoria própria (2021)

Através da Figura 3, verifica-se que a zeólita natural não se mostrou como um adsorvente capaz de remover o herbicida (entre $0,02$ e $0,09 \text{ mg g}^{-1}$). Por outro lado, a zeólita modificada mostrou uma significativa melhora na capacidade de adsorver este pesticida, aumentando as capacidades para valores entre $1,35$ e $1,49 \text{ mg g}^{-1}$. Essa melhora pode ser justificada pela utilização de ácido e do surfactante na modificação, gerando a desaluminação, que conseqüentemente muda a composição, a porosidade e a hidrofobicidade da

zeólita (Salvestrini et al., 2016).

Como os contaminantes emergentes são componentes orgânicos apolares, aumentar a hidrofobicidade do adsorvente favorece o processo de adsorção. Segundo Vargas et al. (2020), a baixa capacidade de adsorção das zeólitas naturais pode ser justificada como consequência da sua carga negativa e por possuir cátions inorgânicos, o que impede a interação com espécies hidrofóbicas e aniônicas. Após a incorporação de um surfactante, esses cátions são trocados e o novo revestimento mais hidrofóbico favorece a adsorção.

Outro fator importante observado é que a alteração do pH inicial da solução não se mostrou significativo para a melhora da capacidade de adsorção de diuron. O melhor desempenho foi obtido no pH 5, que entre os estudados é o que mais se aproxima do pH natural da solução ($\approx 5,6$).

Com o intuito de elucidar as interações ocorridas no processo de adsorção, a Figura 4 mostra a distribuição das espécies do diuron de acordo com o pH.

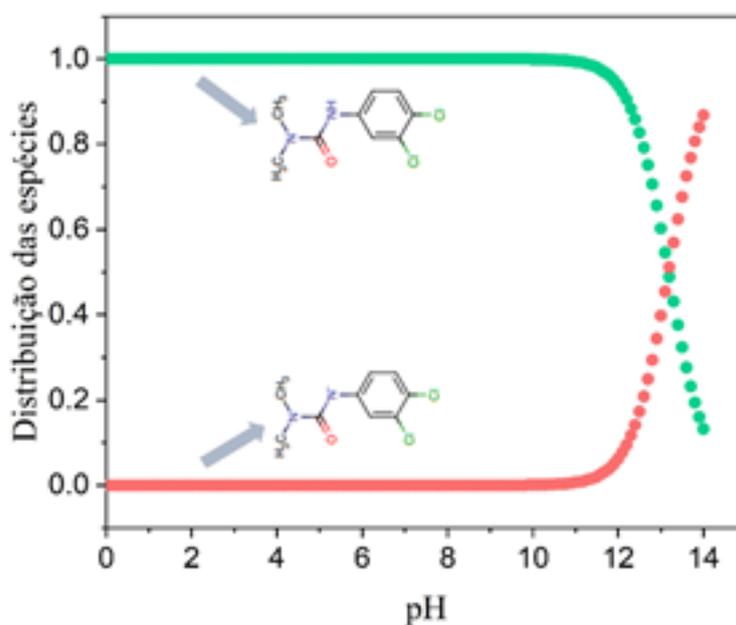


Figura 4 – Distribuição as espécies do diuron de acordo com o pH
Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com a Figura 4, em pH 13,18 há um equilíbrio entre as microespécies existentes em solução e até pH 12, o diuron permanece em sua forma não dissociada. Como a capacidade de adsorção da zeólita não é diretamente influenciada pelo pH da solução, é possível inferir que a adsorção não ocorre por interações eletrostáticas entre o herbicida e o adsorvente.

Através do ensaio de pHpcz, é possível verificar que o tratamento hidrotérmico com ácido e surfactante influenciou no ponto de carga zero do material. A Figura 5 apresenta o resultado obtido para o pHpcz zeólita natural.

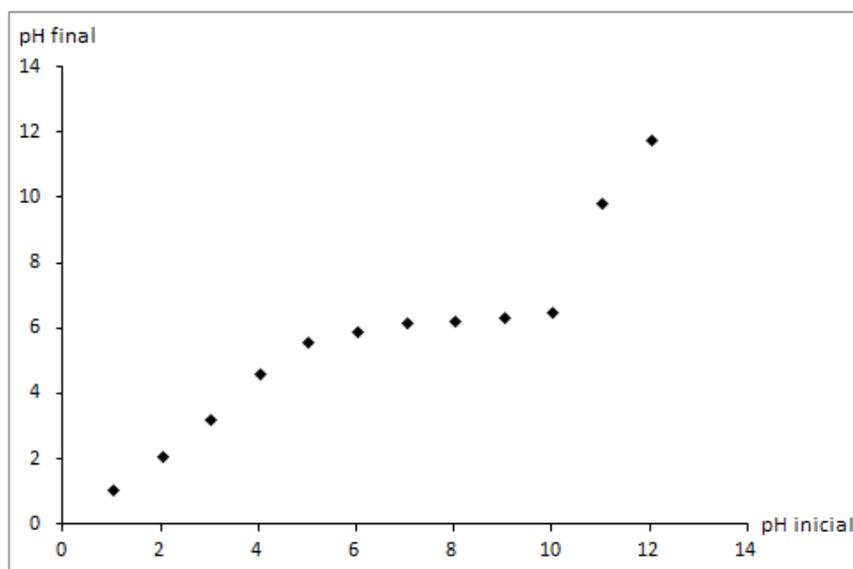


Figura 5 – Ponto de carga zero da ZN
 Fonte: Autoria própria (2021)

O ponto de carga zero avalia a densidade de cargas elétricas na superfície do material. Pela Figura 5 verifica-se que em pH 5,93 a zeólita natural apresenta o somatório de cargas positivas e negativas igual a zero.

Visando o comparativo da zeólita natural com a modificada, a Figura 6 apresenta o gráfico obtido pelo ensaio de ponto de carga zero da ZM.

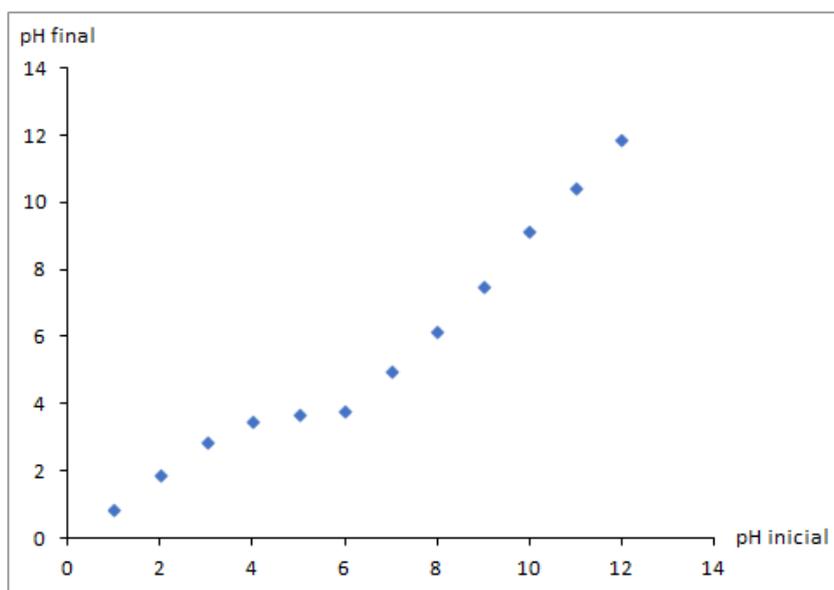


Figura 6 – Ponto de carga zero da ZM
 Fonte: Autoria própria (2021)

Verifica-se por meio da Figura 6 que o tratamento hidrotérmico teve uma relevante alteração na densidade de cargas elétricas da zeólita, uma vez que o ponto de carga zero foi reduzido para 3,95. Logo, em pHs abaixo de 3,95 a zeólita apresenta carga majoritariamente positiva e acima desse pH, a zeólita apresenta carga majoritariamente negativa.

Pelo efeito do pH na adsorção de diuron e pelo pHpcz obtido da zeólita natural e modificada, sugere-se que outras interações entre adsorvato e adsorventes podem ocorrer no processo, como ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas. É possível que com

a ação do surfactante juntamente com o tratamento hidrotérmico tenha modificado a morfologia da zeólita, possibilitando o acesso das moléculas de diuron nos sítios ativos disponíveis no adsorvente.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho busca utilizar o processo de adsorção para a remoção de diuron com zeólitas naturais. Verificando-se que o material in natura não apresentou resultados satisfatórios de remoção, foi realizada uma modificação hidrotérmica em condição subcrítica utilizando surfactante em meio ácido para a melhoria das propriedades do adsorvente.

Apesar de apresentar uma baixa capacidade de adsorção, a ZM mostrou uma considerável melhoria na adsorção de diuron em relação aos resultados obtidos com a ZN, fato que pode ser justificado pela desaluminação e conseqüente redução da hidrofobicidade do adsorvente. Dessa maneira, verifica-se que zeólitas são materiais com potencial para a remoção de herbicidas, e que modificações em sua superfície podem ser cruciais para a eficiência do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, a Universidade Estadual de Maringá e as empresas Celta Brasil e Nortox pelo fornecimento de materiais necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- BRECK, D. W. **Zeolite Molecular Sieves**. New York. John Wiley and Sons, Inc 1974.
- CHEN, G.-C., SHAN, X.-Q., PEI, Z.-G., WANG, H., ZHENG, L.-R., ZHANG, J., & XIE, Y.-N. Adsorption of diuron and dichlobenil on multiwalled carbon nanotubes as affected by lead. **Journal of Hazardous Materials**, v. 188, p. 156–163, 2011. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.01.095.
- LIU, Y., XU, Z., WU, X., GUI, W., & ZHU, G. Adsorption and desorption behavior of herbicide diuron on various Chinese cultivated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, p. 462–468, 2010. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.01.105.
- GAO, P., ZHOU, Y., MENG, F., ZHANG, Y., LIU, Z., ZHANG, W., & XUE, G.. Preparation and characterization of hydrochar from waste eucalyptus bark by hydrothermal carbonization. **Energy**, v. 97, p. 238–245, 2016. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.123.
- SALVESTRINI, S., JOVANOVIĆ, J., & ADNADJEVIĆ, B. X Comparison of adsorbent materials for herbicide diuron removal from water. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, p. 22868–22877, 2016. doi: 10.1080/19443994.2016.1180484.
- SAMADI, A., XIE, M., LI, J., SHON, H., ZHENG, C., & ZHAO, S. Polyaniline-based adsorbents for aqueous pollutants removal: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 418, 129425, 2021. Doi: 10.1016/j.



cej.2021.129425.

VARGAS, A. M., CIPAGAUTA-ARDILA, C. C., MOLINA-VELASCO, D. R., & RÍOS-REYES, C. A. Surfactant-modified natural zeolites as carriers for diclofenac sodium release: A preliminary feasibility study for pharmaceutical applications. *Materials Chemistry and Physics*, v. 256, 123644, 2020. doi:10.1016/j.matchemphys.2020.123644.

YOSSA, L. M. N., OUIHINGA, S. K., SIDIBE, S. S., & OUEDRAOGO, I. W. K. Synthesis of a cleaner potassium hydroxide-activated carbon from baobab seeds hulls and investigation of adsorption mechanisms for diuron: Chemical activation as alternative route for preparation of activated carbon from baobab seeds hulls and adsorption of diuron. *Scientific African*, v. 9, e00476, 2020. doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00476.

ZANIN, E., SCAPINELLO, J., DE OLIVEIRA, M., RAMBO, C. L., FRANSCESCON, F., FREITAS, L., DE MELLO, J. M. M., FIORI, M. A., OLIVEIRA, J. V., & DAL MAGRO, J. Adsorption of heavy metals from wastewater graphic industry using clinoptilolite zeolite as adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 105, p. 194–200, 2017. doi:10.1016/j.psep.2016.11.008.

ZBAIR, M., EL HADRAMI, A., BELLARBI, A., MONKADE, M., ZRADBA, A., & BRAHMI, R. Herbicide Diuron Removal from Aqueous Solution by Bottom Ash: Kinetics, Isotherm, and Thermodynamic Adsorption Studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, 103667, 2020. doi:10.1016/j.jece.2020.103667.



CAPÍTULO 12

LOGÍSTICA 4.0 COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA TECNOLÓGICA NA GESTÃO EMPRESARIAL

LOGISTICS 4.0 AS A TECHNOLOGICAL STRATEGIC TOOL IN BUSINESS
MANAGEMENT

Jaciara Mendonça Mariano

Resumo

O presente artigo trata sobre a logística 4.0, elemento chave para o desempenho sustentável das instituições, na qual essa, está inserida no setor empresarial. Sendo assim, como a logística 4.0 associada a ferramentas tecnológicas influencia na gestão organizacional? Nesse trabalho não foram retratadas hipóteses de nenhuma intervenção. Essa pesquisa foi elaborada com o objetivo principal de compreender a eficiência da logística 4.0 e com objetivos específicos para descrever sua origem e definição, apresentar as principais ferramentas tecnológicas e abordar oportunidades e desafios dessa. A pesquisa constituiu-se de revisão bibliográfica descritiva, na qual, houve como técnica a leitura interpretativa com realização de consultas a livros, dissertações e artigos científicos, selecionados das publicações entre o ano 2010 e 2021 por meio das seguintes bases de dados: Catálogo de teses e google. Os resultados indicam que a eficácia da logística 4.0 é consequência da gestão eficiente de seus sistemas e processos operacionais. Logo, conclui-se que a logística 4.0 promove agilidade e precisão, com redução de desperdícios tanto relacionados a fatores cronológicos quanto a aspectos econômicos, proporciona eficiência na apuração dos resultados assim como, excelência na qualidade da prestação de serviços.

Palavras chave: Logística 4.0, Ferramentas Tecnológicas, Gestão, Eficiência

Abstract

This article deals with logistics 4.0, a key element for the sustainable performance of institutions, in which it is inserted in the business sector. So, how does logistics 4.0 associated with technological tools influence organizational management? In this work, hypotheses of any intervention were not portrayed. This research was designed with the main objective of understanding the efficiency of logistics 4.0 and with specific objectives to describe its origin and definition, present the main technological tools and address its opportunities and challenges. The research consisted of a descriptive bibliographic review, in which, there was an interpretive reading technique with consultations to books, dissertations and scientific articles, selected from publications between 2010 and 2021 through the following databases: Catalog of theses and google. The results indicate that the effectiveness of Logistics 4.0 is a consequence of the efficient management of its operational systems and processes. Therefore, it is concluded that logistics 4.0 promotes agility and precision, with a reduction of waste both related to chronological factors and economic aspects, provides efficiency in the calculation of results as well as excellence in the quality of service provision.

Key-words: Logistics 4.0, Technological Tools, Management, Efficiency



1. INTRODUÇÃO

O presente artigo trata sobre a logística 4.0, considerada como um dos elementos chave para o desempenho sustentável e produtivo das empresas, ela está inserida tanto no setor industrial quanto no mercado em geral. Na qual, com o conhecimento e utilização de ferramentas tecnológicas adequadas, permite que as empresas disponham de técnicas para alavancarem a rentabilidade e produtividade de seus negócios. A pesquisa descreve sobre como surgiu a logística 4.0 e como esta é conceituada bibliograficamente, apresenta as principais ferramentas tecnológicas utilizadas em processos logísticos assim como, aborda oportunidades e desafios identificados na logística 4.0 que impactam de forma direta e/ou indireta na gestão dos negócios e proporcionam alterações significativas em seus planos de ações. A competitividade impulsiona o mercado empresarial no planejamento de estratégias para manterem seus negócios sustentáveis no mercado, na qual, a sustentabilidade das organizações está diretamente relacionada com o desafio destas de proporcionarem serviços de qualidade vinculados com redução de custos. Logo, mediante esse parâmetro, como a logística 4.0 associada a ferramentas tecnológicas influencia na gestão organizacional? Sendo assim, o presente artigo descreve tanto para a sociedade quanto para a comunidade acadêmica, sobre os conceitos bibliográficos do tema pesquisado assim como, aborda sobre os impactos causados na administração organizacional provenientes desse contexto, contribuindo assim, como fundamentação teórica para o planejamento de estratégias como, ações de melhorias e/ou corretivas no ambiente institucional. Essa pesquisa foi elaborada com o objetivo principal de compreender a eficiência da logística 4.0 na tomada de decisão assim como seus resultados obtidos e constituída com objetivos específicos para descrever a origem e definição de logística 4.0, apresentar as principais ferramentas tecnológicas utilizadas em processos logísticos e abordar as oportunidades e desafios encontrados na logística 4.0. O tipo de pesquisa desenvolvida constituiu-se de revisão de literatura, ou seja, a metodologia se restringiu a revisão bibliográfica com pesquisa qualitativa e descritiva na qual, houve como técnica de análise a leitura interpretativa e não foram retratadas hipóteses ou proposições de nenhuma intervenção. Foram realizadas consultas a livros, dissertações e artigos científicos selecionados através de busca nas seguintes bases de dados: Catálogo de teses e google. O período dos artigos pesquisados foram os trabalhos publicados do ano 2010 até 2021. E, as palavras-chave utilizadas na busca foram: Logística 4.0, ferramentas tecnológicas logísticas e processos logísticos.

Em relação a competitividade e gestão organizacional é relevante destacar que:

Uma empresa com o setor logístico funcionando de maneira correta, com boa gestão tende a se consolidar cada vez mais no mercado como uma empresa competitiva e que agrada os clientes. Toda essa busca por melhorias resume-se a reunir conhecimento em tecnologia definindo padrões para as atividades logísticas, que aumenta a flexibilidade e reduz custos, sendo considerada hoje uma abordagem estratégica (SILVA; KAWAKAME, 2019:1).

Entende-se assim que de acordo com os autores, a satisfação dos clientes está vinculada à gestão logística de qualidade, com união de conhecimento e tecnologia por parte das empresas. Tendo em vista que essa gestão influencia em seus processos/atividades e ocasiona assim, estratégia competitiva de mercado com crescimento de flexibilidade, re-



dução de custos e desenvolvimento sustentável. Essa concepção está de acordo com Santos (2017:5) na qual confirma que além do aperfeiçoamento de processos, a logística 4.0 agrega às empresas um potencial competitivo, possibilitando a estas ultrapassarem organizações que ainda utilizam meios ultrapassados. Já, para Jesus e Oliveira (2021:807) a logística 4.0 engloba mais do que processos produtivos e formas de distribuição, ela contempla desde a etapa de planejamento e implementação até a etapa de conectividade e gestão de seus processos logísticos com monitoramento em tempo real da cadeia de suprimentos, veículos em movimento e centros de distribuição. Entende-se assim que, a logística 4.0 coopera significativamente na produtividade organizacional pois, influencia diretamente em sua gestão administrativa e proporciona o acompanhamento de todas suas atividades por meio de recursos tecnológicos que possibilitam estratégias fundamentais para o desenvolvimento eficiente do negócio.

2. ORIGEM E DEFINIÇÃO DE LOGÍSTICA 4.0

O termo logística foi inicialmente utilizado para designar táticas de planejamento e abastecimento em operações militares assim como definir suas estratégias de ações (COSTA; DIAS; GODINHO, 2010:9). Já, o termo logística 4.0, segundo Brandão (2020) “surtiu [...] para dar nome a inúmeras inovações que alteraram todo o processo produtivo. O setor entrou definitivamente na era da inteligência e da digitalização.” Logo, compreende-se que a origem da logística 4.0 provém da quarta revolução industrial e está associada a evolução da logística tradicional, isto é, está vinculada a inclusão de tecnologias de última geração nos processos logísticos como, inteligência artificial e automatização.

Em relação a origem da logística 4.0 ressalta-se que:

O uso da tecnologia na logística é essencial devido ao alto volume de transações, dinamismo e velocidade no processo logístico. Com isso, muitos avanços foram alcançados tanto neste segmento quanto no setor computacional permitindo a sinergia entre eles e a superação de muitos desafios. Essa é a 4ª revolução industrial, onde a tecnologia e automatização estão em foco sendo amplamente aplicada a diversos segmentos do mercado, entre eles o da logística, dando origem a Logística 4.0 (AIRES; ALMEIDA; SILVEIRA, 2019:2).

Entende-se assim que, a logística 4.0 advém do uso de tecnologias e automatização nas transações operacionais e é utilizada em diversos segmentos de mercado na qual possibilita a otimização dos processos logísticos com desenvolvimento mais dinâmico e ágil desses. Contudo, ressalta-se que “não é possível falar sobre logística 4.0 sem [...] comentar sobre indústria 4.0 ou a 4ª revolução industrial. Esse termo [...] tem relação estreita com a automação das fábricas por meio da utilização de sistemas ciberfísicos [...]” (CAVALCANTE et al., 2019:9). Assim, compreende-se que em ambas as citações os autores corroboram a ideia de que a logística 4.0 é oriunda das tecnologias inseridas em processos fabris a partir do advento da revolução industrial.

Conforme Almeida et al. (2019:2) a logística 4.0 ocorre por meio de uma evolução conceitual e prática que contribui para que as organizações se adequem a competitividade global do mercado, tendo em vista que promove o aprimoramento de produtos, serviços e informações com a utilização de máquinas computadorizadas, impressoras 3D e quais-



quer outros equipamentos que predisponham de inteligência artificial e que proporcionem o melhor planejamento da produção. Ainda segundo Almeida et al. (2019:3) o crescimento da produtividade e da eficiência das operações nas empresas é reflexo da utilização de processos automatizados provenientes de soluções como big data, inteligência artificial, cloud computing, internet das coisas e etc.

Em relação a definição e importância da logística para a gestão organizacional resalta-se que:

A logística é um importante componente do gerenciamento da cadeia de suprimentos e a gestão logística é multidisciplinar, interagindo com várias ciências, da administração de empresas a engenharia de produção. Um sistema logístico gerencia fluxos de materiais e informações, englobando a movimentação e o armazenamento eficiente de dados, mercadorias e serviços (CORREA, 2019:17).

Compreende-se assim que, a logística é um sistema multidisciplinar no qual a sua gestão correlaciona-se com áreas que contemplam tanto o gerenciamento de fluxo de materiais, processo produtivo de mercadorias e serviços quanto a apuração e controle de informações/dados necessários que influenciarão para a tomada de decisão. Tornando-a assim, em uma ferramenta chave para a administração eficaz da cadeia de suprimentos e conseqüentemente da gestão dos negócios nas empresas.

Portanto, a logística 4.0 é uma forma de gestão responsável pelo foco sustentável de produtos e serviços no qual promove melhorias tanto no âmbito econômico, social e ambiental quanto proporciona eficiência dos processos da cadeia de valor. Sendo essa, inevitável para a permanência das empresas no mercado, enfatiza-se que estas adequem seus modelos de negócios a fim de manterem-se competitivas e com foco no cliente (PACHECO; REIS, 2019:17).



De acordo com Motta e Lusvarghi (2018:16) as diferenças entre a logística tradicional e a logística 4.0 são descritas em um quadro comparativo, conforme apresenta a Figura 1.

| LOGÍSTICA 4.0 | LOGÍSTICA COMUM |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Cultura de Inovação; • Era da Otimização e Inovação; • Certezas e Controles, sob as maquinas e processos; • Redução e automatização dos movimentadores de carga e peças; • Controles destinados à rede, comandado por tecnologia; • Gestão de rede e conectividade; • Modelo Puxado de produção (Sob demanda); • Gestão através de maquinas que ajudam na tomada de decisão; • Trabalho home office; • Informação na Nuvem • Descentralização das atividades e controle (Portátil); • Atua na redução de ativos ontime e planeja a longo prazo; • Substituição de combustão por maquinário elétrico tecnológico; • Gerenciamento de estoque autônomo; • Roteirização inteligente (tecnológica). | <ul style="list-style-type: none"> • Cultura de Estagnação; • Era de medo do futuro; • Improviso e controles manuais; • Aquisição de movimentadores manuais/combustão, M.O para movimentação de carga; • Controles designado por pessoas; • Gestão de pessoas; • Modelo de empurrado de produção (Sob previsão); • Gestão através de funcionários, submetendo ao erro humano; • Trabalho Presencial 9hrs/dia; • Informações em Desktops, sigilo empresa; • Centralização das atividades e controles; • Estudos de caso tardios, realizando mensurações e atuando á curto e prazo; • Emissão de gases poluentes; • Gerenciamento de estoque manual (por pessoas); • Roteirização manual. |

Figura 1: Quadro comparativo entre a Logística Comum e a Logística 4.0
 Fonte: Motta e Lusvarghi (2018:16)

Na Figura 1, estão exemplificadas as principais mudanças organizacionais existentes entre empresas que já aderiram ao novo sistema e as que ainda não trabalham com logística 4.0. Na qual compreende-se assim que, as empresas que não se adequam as transformações tecnológicas perdem competitividade e sustentabilidade no mercado em razão da falta de agilidade de seus processos e serviços.

3. PRINCIPAIS FERRAMENTAS TECNOLÓGICAS UTILIZADAS EM PROCESSOS LOGÍSTICOS

A tecnologia é a ferramenta chave utilizada na logística 4.0 que proporciona otimização dos processos logísticos com menor custo de transporte. E, a proporção que transforma procedimentos operacionais burocráticos em processos mais ágeis e inteligentes, com sistemas de segurança mais eficazes, também compartilha informações/dados em tempo real da cadeia de suprimentos, permitindo assim, maior fluxo de informações e



consequentemente mais geração de conhecimento que influenciarão no gerenciamento dos negócios (JESUS; OLIVEIRA, 2021:806).

Em associação com as inovações tecnológicas estão os sistemas de informação, na qual ressalta-se que:

Um sistema de informação (SI) é um conjunto de elementos ou componentes inter-relacionados que coleta (entrada), manipula (processo), armazena e dissemina dados (saída) e informações, e fornece uma reação corretiva (mecanismo de realimentação) para alcançar um objetivo. O mecanismo de realimentação é o componente que ajuda as organizações a alcançar seus objetivos, como aumentar os lucros ou melhorar os serviços ao cliente (STAIR; REYNOLDS, 2011:8).

Logo, compreende-se que o sistema de informação é uma ferramenta organizacional, cuja funcionalidade está interligada a inserção de dados que resultam no armazenamento e monitoramento de informações assim como, compartilhamento destas, que auxiliarão as empresas na otimização de seus processos internos e externos.

Entre os benefícios proporcionados às empresas pelo sistema de informação, apresentam-se: Disponibilização de informações tanto para procedimentos operacionais quanto para gerenciamento organizacional e, melhor desempenho na integração de sistemas de gestão (MALAQUIAS; MALAQUIAS, 2014:95).

Segundo Jesus e Oliveira (2021:807) além do planejamento, a logística 4.0 envolve controle e conectividade na administração dos processos logísticos. Essa visão está em conformidade com Radivojević e Milosavljević (2019:287) no qual, destaca que existem diversas tecnologias que são aplicadas a esses componentes conforme exemplifica na Figura 2.

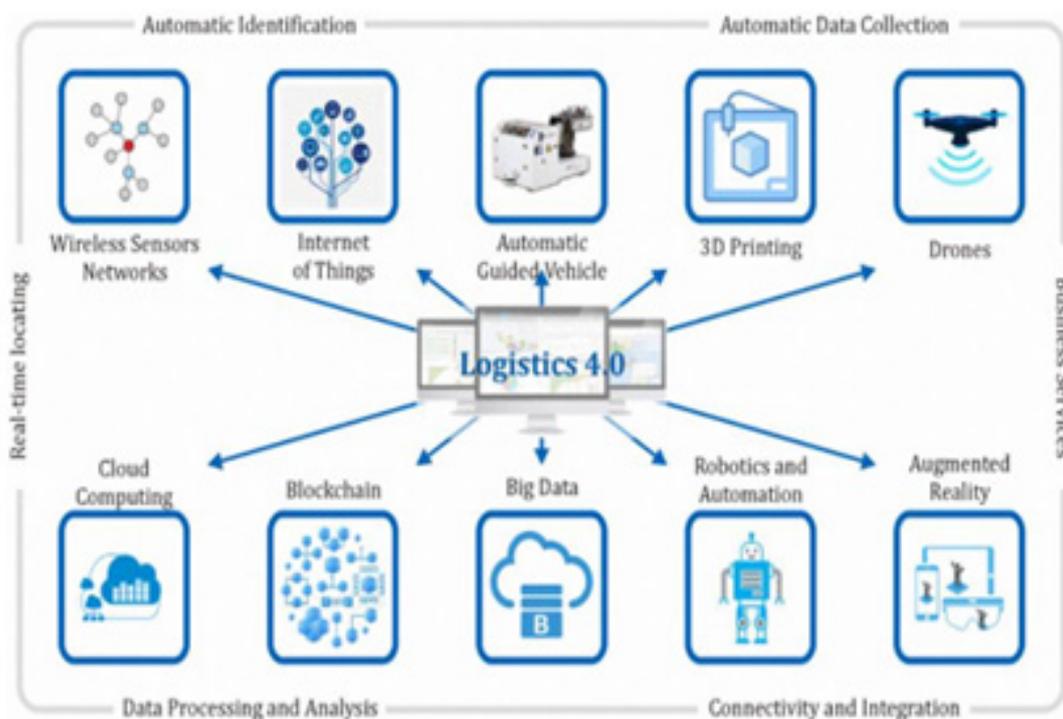


Figura 2 – Componentes e tecnologias da Logística 4.0
Fonte: Radivojević e Milosavljević (2019:287)

A Figura 2 apresenta como principais ferramentas tecnológicas utilizadas nos processos logísticos 4.0: Wireless sensor network, refere-se a uma rede de sensores sem fio responsável pelo monitoramento de ambientes; Internet das coisas, referente a transmissão de dados por meio da internet assim como, conectividade digital entre objetos físicos e usuários; Veículo autoguiado, diz respeito a um robô que se locomove por meio de automatização e permite o transporte de cargas nos centros de distribuição; Impressoras 3D, permite a criação/impressão de objetos de forma tridimensional; Drones, veículos aéreos que são pilotados e controlados de forma remota; Computação em nuvem, permite a disponibilização, processamento e armazenamento de dados/informações por meio de acesso remoto; Blockchain, refere-se a uma série de registros protegidos com criptografia; Big data, permite a análise de grande volume de dados não-estruturados; Robótica e automação, refere-se a habilitação de máquinas para desempenharem processos e atividades de forma autônoma; E, a realidade aumentada que diz respeito a integração de elementos virtuais por meio de uma câmara.

Segundo Meirim (2019) uma das principais responsáveis por essa nova revolução tecnológica dos processos logísticos é a internet das coisas pois, proporciona a conectividade e o compartilhamento de dados/informações em tempo real. Para Brandão (2020) "a conectividade em tempo real, armazenamento em nuvem e integração permitem criar gerenciamentos mais eficientes." Compreende-se desse modo que os autores estão em conformidade em razão de ressaltar a importância da conectividade em tempo real, uma vez que esta, viabiliza melhorias no gerenciamento das atividades institucionais.

Em relação aos modelos de gestão e a influência da tecnologia destaca-se que:

A tecnologia é uma das molas propulsoras da Logística 4.0 e, neste sentido, os modelos de gestão precisarão estar alinhados com este novo cenário. Conhecer as possibilidades proporcionadas pela tecnologia em seu negócio é essencial. Entretanto, os gestores precisam estar atentos para não cair na tentação do uso da tecnologia como um "modismo" e sim como uma ferramenta que possibilite a melhoria nos processos de gestão (MEIRIM, 2019).

Entende-se que nem todas as tecnologias disponíveis no mercado deverão serem implantadas na instituição, ou seja, cada organização precisa realizar uma apuração do que realmente necessita e adequar de acordo com o seu negócio a fim de não efetuar custos desnecessários, gargalos e consequentemente resultados indesejáveis. Ressalta-se contudo que é necessário planejamento associado a um plano de ação eficiente na implantação de tecnologias assim como, inclusão de capacitação/treinamento de todos os envolvidos no processo.

No que tange as soluções tecnológicas aplicadas às operações logísticas é relevante enfatizar que:

São muitos os sistemas informatizados que dão sustentação a essa área, tais como: ERP (Enterprise Resource Planning / Sistemas Integrados de Gestão Empresarial), MRP (Material Requirement Planning / Planejamento das necessidades de materiais), [...], TMS (Transportation Management System / Sistema de Gerenciamento de Transportes), WMS (Warehouse Management System / Sistema de Gerenciamento de Armazém) e outros. Isso acontece porque o fator mais crítico da logística é a informação, e para a obtenção de informações precisas e no tempo necessário é preciso um sistema eficiente, o que só é possível com a TI presente (PEREIRA et al., 2010:149).



Compreende-se assim que a tecnologia contribui significativamente para o desempenho eficiente dos sistemas informatizados, no qual estes, auxiliam e contribuem para o desenvolvimento mais ágil dos processos e facilitam o compartilhamento e armazenamento das informações necessárias que influenciarão na tomada de decisão dos gestores.

Para Platt e Klaes (2010:228) O ERP (Sistema Integrado de Gestão) é uma ferramenta proveniente dos avanços da tecnologia da informação e desenvolvida com o objetivo de auxiliar as atividades empresariais, principalmente nos aspectos relacionados a cada área e departamento. Ainda segundo Platt e Klaes (2010:229) a estrutura do ERP “é composta de módulos que incorporam os processos de negócio da organização, baseados nas melhores práticas mundiais [...] e desenvolvidas por fornecedores como SAP, Oracle, [...] e Datasul.” Logo, cada fornecedor de ERP desenvolve o sistema de acordo com padrões de qualidade mundial, no qual a estrutura desse sistema é constituída por módulos com áreas e departamentos da organização conforme apresenta a Figura 3.

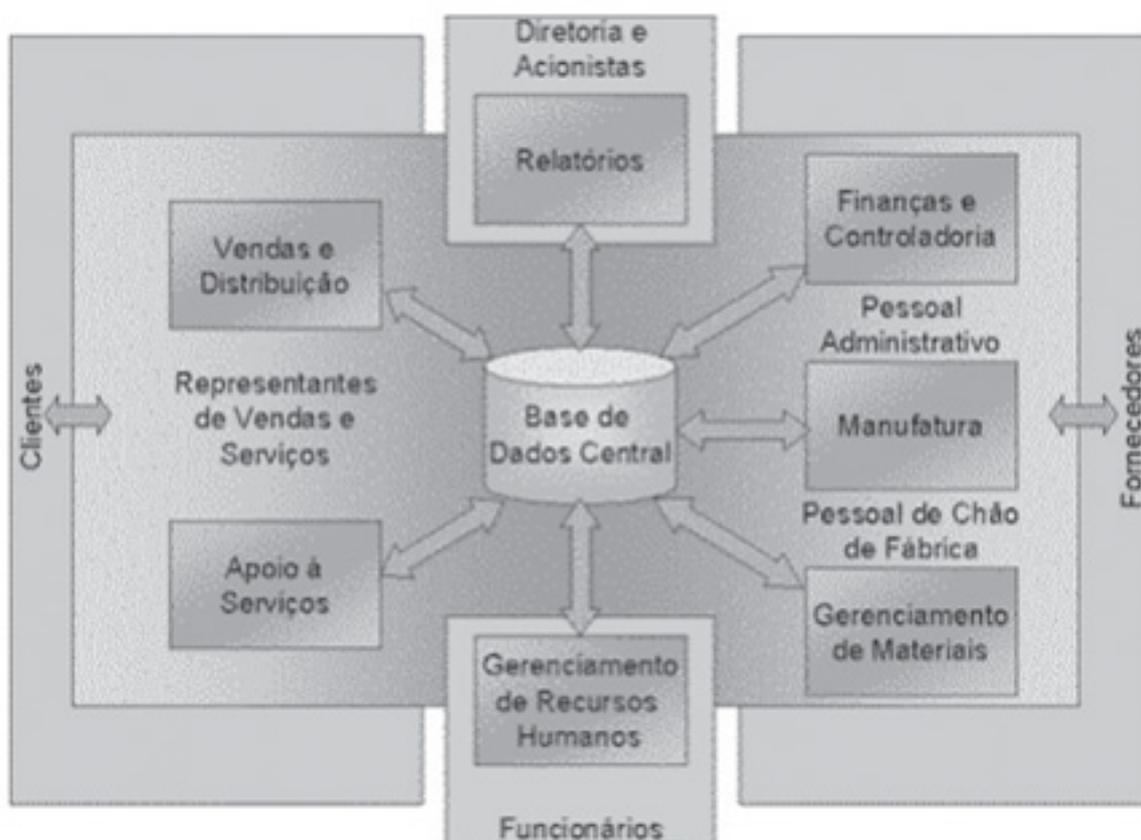


Figura 3: Estrutura típica de funcionamento de um sistema ERP
Fonte: Platt e Klaes (2010:230)

A Figura 3 ilustra a estrutura de funcionamento de um sistema ERP, no qual observa-se as áreas e departamentos envolvidos e, nota-se a conectividade e o fluxo de informações que ocorrem na organização. Ressalta-se ainda que, todas as informações entram e saem de uma base de dados central assim como, ocasionam consequentemente o gerenciamento geral dos processos do negócio.

De acordo com Assumpção e Prates (2017:129) o sistema ERP possui pontos positivos e negativos. Sendo identificadas como vantagens: A integração geral de todas as áreas da empresa, eficiência no compartilhamento de informações com disseminação do conhecimento sobre os processos, otimização da produtividade, confiabilidade e agilidade

nas tomadas de decisões. E, como desvantagens apresenta: Investimento significativo em seu custo de aquisição, contratação e/ou treinamento de mão de obra qualificada para operação do sistema e crescimento de custos operacionais. Contudo, ressalta-se que “[...] as empresas brasileiras estão aumentando gradativamente os gastos e investimentos com TI. Este fato sinaliza uma preocupação de seguir uma tendência mundial [...]” (TEIXEIRA; PETRUCELLI, 2019:10). Compreende-se assim que, as empresas estão tendo que se adaptarem às novas tendências e evoluções tecnológicas para se manterem competitivas e sustentáveis no mercado, uma vez que, necessitam estarem aptas para atenderem as necessidades dos clientes, gerirem com eficiência os negócios e se sobressaírem diante de seus concorrentes.

Outro importante sistema informatizado que contribui nos processos logísticos é o MRP (Material Requirement Planning / Planejamento das necessidades de materiais) pois, além de permitir que as empresas realizem cálculos relacionados às projeções de tempo, tipo e quantidade de materiais que serão necessários nos serviços, possibilita que a empresa controle a entrada e saída de materiais assim como, proporciona o auxílio nas decisões gerenciais garantindo que os processos de manufatura sejam providenciados em tempo hábil e sem desperdícios (RIBEIRO et al., 2015:4). Ressalta-se ainda que, a ferramenta tecnológica MRP está diretamente relacionada ao PCP (Planejamento e Controle da Produção) do ambiente industrial, uma vez que essa, efetua o planejamento das necessidades da produção de acordo com as datas e quantidades determinadas e alinha assim, os níveis de estoques da organização (BENTO; TAMBOSI; PRUS, 2013:3666).



Ainda conforme a visão de Bento, Tambosi e Prus (2013:3669) o fluxo das informações são processadas no MRP de acordo com a Figura 4.

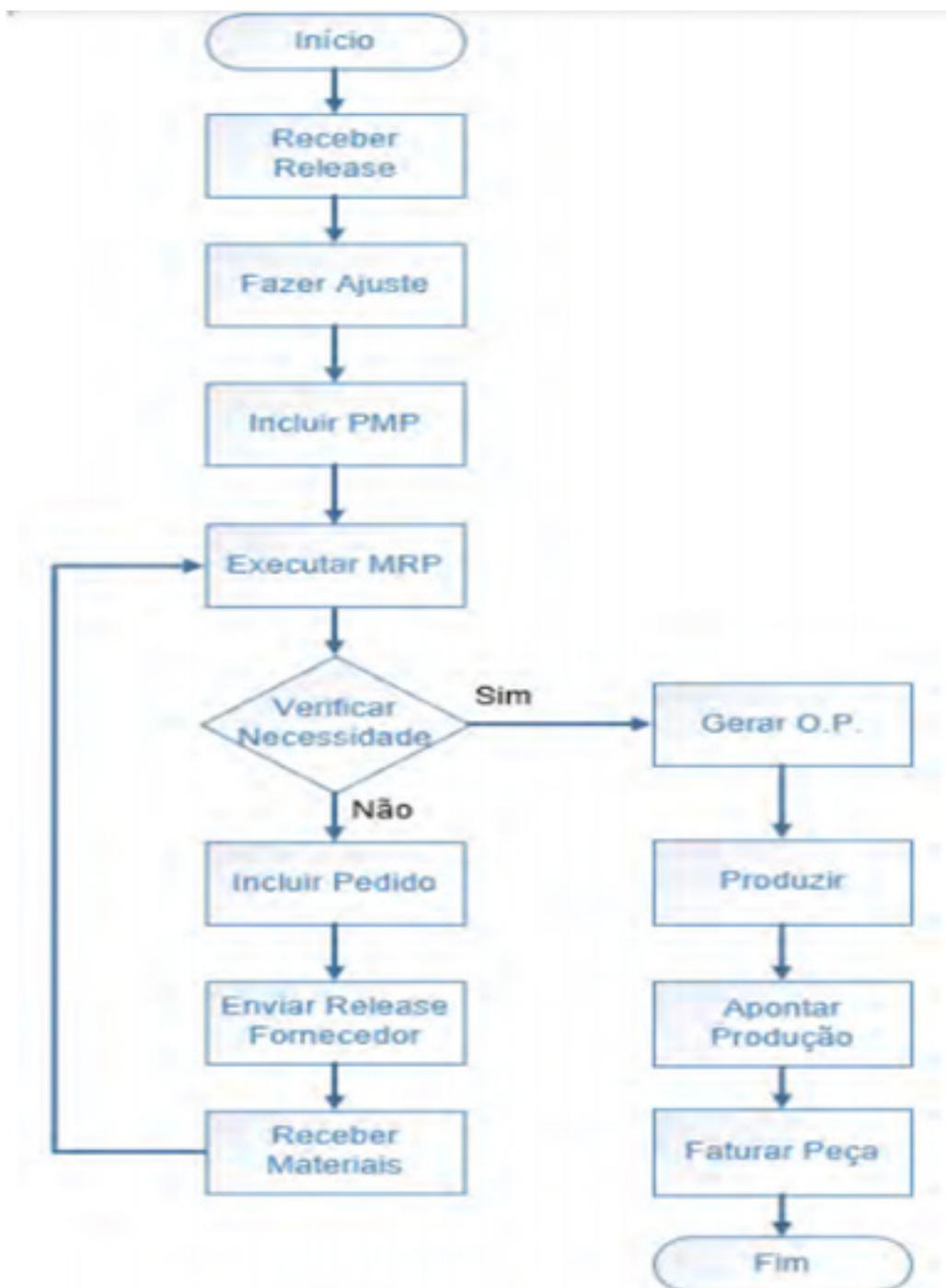


Figura 4: Programação de produção MRP
Fonte: Bento, Tambosi e Prus (2013:3669)

A Figura 4 exemplifica o fluxograma das informações que são inseridas em um sistema de MRP. Na qual, inicialmente, são recebidos os pedidos dos clientes e em seguida são encaminhados para as projeções com base em análises quantitativa produzidas por cada máquina e, após essas análises são realizados os devidos ajustes a fim de adequar ao plano mestre de produção (PMP). Com as informações em conformidade com o PMP, as próximas etapas são procedidas pela execução do MRP, análise da necessidade de compras de matérias-primas e/ou demais componentes que serão fundamentais para a produção de determinado produto.

Em relação a otimização dos processos de transportes destaca-se o sistema TMS (Transportation Management System / Sistema de Gerenciamento de Transportes), “[...] software que permite ao tomador de decisão um controle integrado dos índices, indicadores, informações e documentos referentes ao processo de entrega dos produtos em uma única ferramenta” (KOMMERS, 2016). Logo, compreende-se que esse sistema contribui para acesso às informações em tempo real e permite a integração de todas as etapas da cadeia de suprimentos, auxiliando no mapeamento e monitoramento das operações referentes ao transporte. Para Festa e Assumpção (2012:13) o TMS é um sistema que proporciona assessoria no gerenciamento às negociações dos serviços contratados. Sendo que, quando é interligado a outros sistemas, apresenta resultados que contribuem para a integração de processos logísticos.

O WMS (Warehouse Management System / Sistema de Gerenciamento de Armazém) é outro exemplo de ferramenta tecnológica utilizada para a otimização dos processos logísticos, no qual enfatiza-se que:

Um WMS possibilita a otimização operacional (melhoria na operação) através do aumento da produtividade operacional, otimização dos espaços e melhoria da utilização dos recursos (equipamentos de movimentação e estocagem), redução de custo e serviço ao cliente. A redução de custo é obtida através da melhoria da eficiência da mão-de-obra, resultando num armazém que exige menor carga de trabalho (PEREIRA et al., 2010:155).

Compreende-se assim que o sistema WMS proporciona benefícios como, crescimento na produtividade e redução de custos, em razão de alavancar a eficiência operacional, gerenciamento adequado do fluxo de informações com estoques precisos assim como, gestão e controle dos recursos necessários para a execução e otimização dos processos de armazenagem. Logo, esse sistema é definido como:

[...] um sistema de gestão por software que melhora as operações do armazém através do eficiente gerenciamento de informações e conclusão das tarefas com um alto nível de controle e acuracidade do inventário. As informações gerenciadas são derivadas de transportadoras, fabricantes, sistema de informações de negócios, clientes e fornecedores. O WMS utiliza estas informações para receber, inspecionar, estocar, separar, embalar e expedir mercadorias da forma mais eficiente. A eficiência é obtida através do planejamento, roteirização e tarefas múltiplas dos diversos processos do armazém (BANZATO, 2011).

Sendo assim, entende-se que o sistema WMS é um software de gerenciamento que promove por meio de planejamento e controle, a gestão eficiente do armazém. No qual, os principais dados inseridos nesse sistema são gerados a partir das informações obtidas dos processos realizados no armazém e são processadas no WMS com um nível elevado de segurança e acuracidade dos produtos estocados.



4. OPORTUNIDADES E DESAFIOS ENCONTRADOS NA LOGÍSTICA 4.0

A logística 4.0 por meio das progressivas inovações tecnológicas proporciona melhorias significativas tanto no âmbito organizacional quanto para o mercado global. No entanto, ressalta-se que a adaptação de profissionais com novas tendências de formas de trabalho ocasionará em desafios para as empresas em razão das diversas culturas e habilidades educacionais. Implicando assim, em investimentos organizacionais com treinamento e capacitação contínua de seus colaboradores, a fim destes, prosseguirem efetivamente com suas atividades e se adequarem a novas ferramentas e tecnologias (SANTOS et al., 2018:120). Essa ideia está em conformidade com Motta e Lusvarghi (2018:12) pois, destacam que “para substituir processos que possam ocorrer falhas humanas por processos automatizados, é de suma importância profissionais amplamente capacitados, pois são eles os responsáveis por esse projeto [...]”. Isto é, para que as inovações tecnológicas da logística 4.0 sejam implementadas e executadas de acordo com os resultados desejados é necessário que a primeira etapa a ser analisada, desenvolvida e gerenciada esteja diretamente orientada para a qualificação dos profissionais que atuarão nesse novo sistema logístico. Logo, enfatiza-se que:

Além da adaptação das fábricas a esses novos conceitos, os profissionais também precisarão se adaptar, pois com esse universo ainda mais automatizado, novas demandas surgirão, enquanto algumas deixarão de existir. [...] Por outro lado, as demandas em pesquisa e desenvolvimento oferecerão oportunidades para profissionais tecnicamente capacitados, com formação multidisciplinar para compreender e trabalhar com a variedade de tecnologia que compõe uma fábrica inteligente (FREITAS; FRAGA; SOUZA, 2016:259).

Entende-se contudo que, com a automatização dos processos, diversas tarefas e funções se tornarão ultrapassadas e/ou extintas. Porém, outras atividades surgirão ou serão adaptadas a essa nova modalidade de trabalho. No entanto, é primordial que profissionais estejam aptos e qualificados para desempenhá-lo.

Com a logística 4.0, os negócios se tornam mais sustentáveis pois, permite que as empresas impulsionem sua produtividade e competitividade. Influenciando assim em: Redução de custos operacionais; Otimização de máquinas, equipamentos e tempo; Desburocratização de processos; Alocação de recursos/insumos necessários; Foco em qualidade; Conectividade de processos e informações em tempo real que possibilitam tomadas de decisão mais ágeis e eficientes (SILVA et al., 2020:13).

De acordo com Pedriali, Arima e Piacente (2019:17) observa-se que a principal vantagem da logística 4.0 está associada a disponibilidade de automação dos processos organizacionais de forma geral. Contudo, o desafio correlaciona-se a integração dos processos pois, apesar de proporcionar redução de erros nas atividades e conseqüentemente elevar os lucros das empresas, ressalta-se que essa conectividade ocasiona em um alto grau de risco de vulnerabilidade do sistema devido a este conter informações confidenciais e estratégicas dessas instituições. Logo, destaca-se como oportunidade, o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo de softwares que adotem e mantenham protocolos rígidos de segurança dessas informações.



5. CONCLUSÃO

A logística 4.0 é considerada como uma ferramenta estratégica que proporciona otimização no gerenciamento dos processos logísticos assim como impulsiona resultados favoráveis às empresas. Ressalta-se que seu bom desempenho é consequência das inovações tecnológicas implementadas nas instituições que adequam, controlam e atualizam seus sistemas de acordo com suas necessidades e negócios, tendo em vista assim, o intuito de evitar custos desnecessários e alocar recursos de forma precisa a fim de alavancar sua produtividade e competitividade no mercado. Logo, compreende-se que na logística 4.0 é de fundamental importância que as organizações invistam não somente em novos softwares logísticos e automatização dos processos, porém, é crucial que ocorram investimentos também em treinamentos e qualificação de pessoal para trabalharem com essas inovações, haja visto que são estes profissionais que promoverão a inserção dos dados nos sistemas, que por sua vez, efetuarão as informações que servirão de base para as tomadas de decisões dos gestores, isto é, erros/falhas cometidas por colaboradores inaptos ocasionarão gargalos, custos à produção e relatórios inadequados. O presente artigo alcançou seus objetivos propostos, no qual foi elaborado com o objetivo principal de compreender a eficiência da logística 4.0 na tomada de decisão assim como seus resultados obtidos e constituído com objetivos específicos para descrever a origem e definição de logística 4.0, apresentar as principais ferramentas tecnológicas utilizadas em processos logísticos e abordar as oportunidades e desafios encontrados na logística 4.0. A sustentabilidade das empresas está interligada a técnicas e estratégias de negócios que impulsionem sua produtividade e contribuam para que elas atraiam a atenção de seus clientes, o fidelizem e conseqüentemente elevem sua lucratividade. Mediante esses parâmetros, a logística 4.0 associada a ferramentas tecnológicas influencia diretamente na gestão organizacional pois, promove agilidade e precisão, com redução de desperdícios tanto relacionados a fatores cronológicos quanto a aspectos econômicos, proporciona eficiência na apuração dos resultados que auxiliarão no gerenciamento de seus processos, consolida o fluxo de informações entre empresas, fornecedores e clientes, permitindo conectividade e compartilhamento de informações em tempo real, com excelência na qualidade da prestação de serviços assim como, otimização e controle de ativos e passivos das organizações. Nesse artigo não foram retratadas hipóteses ou proposições de nenhuma intervenção, o tipo de pesquisa desenvolvida constituiu-se de revisão de literatura, ou seja, a metodologia se restringiu a revisão bibliográfica com pesquisa qualitativa e descritiva na qual, houve como técnica de análise a leitura interpretativa. Foram realizadas consultas a livros, artigos científicos e dissertações, na qual foram selecionados por meio de buscas nas seguintes bases de dados: Catálogos de teses e google. O período dos artigos pesquisados foram os trabalhos publicados do ano 2010 a 2021 e, as palavras-chave utilizadas na busca foram: Logística 4.0, ferramentas tecnológicas logísticas e processos logísticos. Ressalta-se que não houve dificuldades na fase de busca por autores que abordem sobre a origem e definição da logística tradicional e logística 4.0 assim como, sobre ferramentas tecnológicas. Porém, observou-se um nível maior de dificuldades na busca por autores que relatem sobre as oportunidades e desafios da logística 4.0, o que significa um fator relevante tanto para a comunidade acadêmica quanto para o mercado em geral, tendo em vista que a disseminação do conhecimento científico sobre esses assuntos, impactam no desenvolvimento e desempenho da sociedade. Sendo assim, sugere-se para futuros trabalhos, pesquisas sobre as oportunidades e desafios identificados na logística 4.0 e como as empresas reagem mediante os impactos em seus negócios.



Referências

AIRES, Clayton Silva França; ALMEIDA, Gabrielly de Jesus; SILVEIRA, Sidioney Onézio. **Inteligência artificial na gestão de estoque**. In: X FATECLOG Logística 4.0 e A Sociedade do Conhecimento. Fatec Guarulhos, São Paulo, 31 de maio e 01 junho de 2019. Disponível em: <<https://fateclog.com.br/anais/2019/INTELIG%C3%8ANCIA%20ARTIFICIAL%20NA%20GEST%C3%83O%20DE%20ESTOQUE.pdf>>. Acesso em: 22 de fev. de 2021.

ALMEIDA, Fabio Augusto Seletti de et al. Indústria 4.0 e Logística 4.0: Inovação, integração, soluções e benefícios reais decorrentes do mundo virtual. In: **X FATECLOG Logística 4.0 & A Sociedade do Conhecimento**. Fatec Guarulhos, São Paulo, 31 de Maio e 01 de Junho de 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/SergioSantos20/publication/345342203_INDUSTRIA_40_e_LOGISTICA_40_inovacao_integracao_solucoes_e_beneficios_reais_decorrentes_do_mundo_virtual/links/5fa4386892851c-c286968af2/INDUSTRIA-40-e-LOGISTICA-40-inovacao-integracao-solucoes-e-beneficios-reais-decorrentes-do-mundo-virtual.pdf>. Acesso em: 27 de fev. de 2021.

ASSUMPÇÃO, André Luís; PRATES, Glaucia Aparecida. Evolução dos Sistemas MRP, MRP 2 e ERP Utilizados no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos do Setor Sucroenergetico Paulista. **Revista Agropampa**, v. 2, n. 2, julho – dezembro / 2017. Disponível em: <<http://200.132.146.161/index.php/agropampa/article/viewFile/23064/8700>>. Acesso em: 07 de mar. de 2021.

BANZATO, Eduardo. **Sistemas de Controle e Gerenciamento do Armazém (WMS)**. 2011. Disponível em: <<https://www.guiadelogistica.com.br/ARTIGO261.htm>>. Acesso em: 11 de mar. de 2021.

BENTO, Alexandre Rodizio; TAMBOSI, Sérgio Luís; PRUS, Élcio Miguel. Utilização da Tecnologia MRP como Melhoria no Planejamento da Produção em Uma Indústria Automotiva. In: **68º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL**. Belo Horizonte - MG, 30 de julho a 2 de agosto de 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/AlexandreBento3/publication/337000290_UTILIZACAO_DA_TECNOLOGIA_MRP_COMO_MELHORIA_NO_PLANEJAMENTO_DA_PRODUCAO_EM_UMA_INDUSTRIA_AUTOMOTIVA/links/5dbefb5fa6fdcc2128009848/UTILIZACAO-DA-TECNOLOGIA-MRP-COMO-MELHORIA-NO-PLANEJAMENTO-DA-PRODUCAO-EM-UMA-INDUSTRIA-AUTOMOTIVA.pdf>. Acesso em: 09 de mar. de 2021.

BRANDÃO, Bruna. **Logística 4.0**: Definição, prática, impactos e desafios dessa revolução. 2020. Disponível em: <<https://maplink.global/blog/logistica-4-0/>>. Acesso em: 28 de fev. de 2021.

CAVALCANTE, Heloiza da Silva et al. **Uma breve análise sobre a evolução da logística**. In: XVI SEGET Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Faculdades Dom Bosco. 2019. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos19/23728201.pdf>>. Acesso em: 23 de fev. de 2021.

CORRÊA, Jobel Santos. **Logística 4.0**: um estudo exploratório sobre tecnologias emergentes. Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.fei.edu.br/bitstream/FEI/769/1/fulltext.pdf>>. Acesso em: 27 de fev. de 2021.

COSTA, João Paulo; DIAS, Joana Matos; GODINHO, Pedro. **Logística**. Imprensa da Universidade de Coimbra, Abril, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_pt&id=w_yr-53GC2JMC&oi=fnd&pg=PA9&dq=log%C3%ADstica&ots=gJn07kWDeB&sig=AOSvhN_S9zHMHjx0A1tHEAT6POk#v=onepage&q=log%C3%ADstica&f=false>. Acesso em: 24 de fev. de 2021.

FESTA, Eduardo; ASSUMPÇÃO, Maria Rita Pontes. Uso da Tecnologia de Informação e Desempenho Logístico na Cadeia Produtiva de Eletroeletrônicos. **Revista de Ciência & Tecnologia**. v. 17, n. 33, p. 7-23, jan./jun. 2012. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/fbdc/c3168c08804b1054d460aad6e6fe08182ecd.pdf>>. Acesso em: 10 de mar. de 2021.

FREITAS, Matheus Menna Barreto Cardoso de; FRAGA, Manoela Adriana de Farias; SOUZA, Gilson P. L. de. **Logística 4.0**: Conceitos e Aplicabilidade: Uma Pesquisa-Ação em uma Empresa de Tecnologia para o Mercado Automobilístico. Programa de Apoio à Iniciação Científica - PAIC 2015-2016. Disponível em: <<https://cadernopaic.fae.emnuvens.com.br/cadernopaic/article/view/214/175>>. Acesso em: 15 de mar. de 2021.

JESUS, Greison Aparecido de; OLIVEIRA, Paulo André de. Logística 4.0 e os impactos das novas tecnologias de mercado no cenário pós-pandêmico. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.804-812 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/22589/18082>>. Acesso em: 19 de fev. de 2021.

- KOMMERS, Michel. **TMS**: otimizando a gestão da logística. 2016. Disponível em: < <https://www.e-commercebrasil.com.br/artigos/tms-otimizando-gestao-da-logistica/>>. Acesso em: 09 de mar. de 2021.
- MALAQUIAS, Fernanda Francielle de Oliveira; MALAQUIAS, Rodrigo Fernandes. Gestão de Custos e Gestão Logística: O Papel dos Sistemas de Informação. **Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade**. UNEB, Salvador, v. 4, n. 2, p. 93-111, maio./ago., 2014. Disponível em: < <https://www.revistas.uneb.br/index.php/financ/article/view/617/573>>. Acesso em: 21 de mar. de 2021.
- MEIRIM, Hélio. **7 tecnologias impulsionadoras da logística 4.0**. 2019. Disponível em: < <https://administradores.com.br/artigos/7-tecnologias-impulsionadoras-da-logistica-4-0>>. Acesso em: 02 de mar. de 2021.
- MOTTA, Maria Jakeline; LUSVARGHI, Gabrieli Cristina. **Logística 4.0 Desafios e Oportunidades na Gestão da Cadeia de Suprimentos Moderno**. 2018. Disponível em: <<http://conic-semesp.org.br/anais/files/2018/trabalho-1000002076.pdf>>. Acesso em: 14 de mar. de 2021.
- PACHECO, Tiago Resende; REIS, João Gilberto Mendes dos. **Logística 4.0**: Uma Breve Revisão da Bibliográfica. In: III ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO. 10 a 13 de setembro de 2019, Naviraí-MS. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/8786/pdf_231>. Acesso em: 28 de fev. de 2021.
- PEDRIALI, Diogo; ARIMA, Carlos Hideo; PIACENTE, Fabrício José. Segurança da informação na Logística 4.0: um estudo bibliométrico. **Research, Society and Development**, v. 9, n.2, e38921949, 2020. Disponível em: < <https://www.rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1949/1663>>. Acesso em: 13 de mar. de 2021.
- PEREIRA, Samáris Ramiro et al. Informática em Logística: Sistema WMS para Gestão de Armazéns. **Fasci-Tech – Periódico Eletrônico da FATEC-São Caetano do Sul**, São Caetano do Sul, v.1, n. 3, Jul./Dez. 2010, p. 148 a 162. Disponível em: <<http://tecspace.com.br/paginas/aula/faccamp/TI/Texto14.pdf>>. Acesso em: 05 de mar. de 2021.
- PLATT, Allan Augusto; KLAES, Luiz Salgado. Utilizando o Sistema Integrado de Gestão (ERP) no apoio ao Ensino de Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos. **Revista de Ciências da Administração**. v. 12, n. 28, p. 224-241, set/dez 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/adm/article/view/21758077.2010v12n28p224/17432>>. Acesso em: 06 de mar. de 2021.
- RADIVOJEVIĆ, Gordana; MILOSAVLJEVIĆ, Luka. **The Concept Of Logistics 4.0**. 2019. Disponível em: <<http://logic.sf.bg.ac.rs/wp-content/uploads/Papers/LOGIC2019/ID-32.pdf>>. Acesso em: 03 de mar. de 2021.
- RIBEIRO, Marcelle Yasmin Dias et al. **Aplicação do MRP como Ferramenta para o Planejamento e Controle da Produção em uma Indústria de Cabos Elétricos de Alumínio**. In: XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PERSPECTIVAS GLOBAIS PARA A ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Fortaleza – CE, 13 a 16 de outubro de 2015. Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_206_221_27199.pdf>. Acesso em: 08 de mar. de 2021.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v.4, n.1, p.111-124, 2018. Disponível em:< <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesenvolvimento/article/view/e316/193>>. Acesso em: 12 de mar. de 2021.
- SANTOS, Rafaela Pedroza dos. **Indústria 4.0 e logística 4.0**: evolução tecnológica. In: 6ª JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA FATEC DE BOTUCATU. Botucatu – São Paulo, 23 a 27 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.jornacitec.fatecbt.edu.br/index.php/VIJTC/VIJTC/paper/viewFile/1107/1507>>. Acesso em: 16 de fev. de 2021.
- SILVA, Eduardo Filipe da; KAWAKAME, Marcelo dos Santos. **Logística 4.0**: Desafios e inovações. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Ponta Grossa, PR, Brasil, 04 a 06 de dezembro de 2019. Disponível em: <http://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/09272019_160930_5d8e6626548f1.pdf>. Acesso em: 16 de fev. de 2021.
- SILVA, Vinícius Radetzke da et al. Análise dos impactos da logística 4.0 em uma empresa do ramo agrícola da cidade de Cambé, Estado do Paraná, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n.8, e696985912, 2020. Disponível em:< <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5912/5818>>. Acesso em: 12 de



mar. de 2021.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. **Princípios de Sistemas de Informação**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TEIXEIRA, Amanda Moreira Lincoln; PETRUCELLI, Franz. A TI Modernizando a Gestão: Uma Abordagem com Foco na Logística. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**. v. 17, n. 2, ago./dez. 2019. Disponível em: < http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/5152/pdf_953>. Acesso em: 07 de mar. de 2021.

CAPÍTULO 13

PROJETO DE UM CONTROLADOR PID EM SISTEMAS INDUSTRIAIS COM APLICAÇÃO EM VIRADORES DE VAGÕES

DESIGN OF A PID CONTROLLER IN INDUSTRIAL SYSTEMS WITH
APPLICATION IN CAR DUMPERS

José Pinheiro de Moura
João Viana da Fonseca Neto
Bruno França Coelho

Resumo

Virador de vagões é um equipamento industrial de grande porte, que consiste em descarregar vagões carregados com granéis sólidos em silos de abastecimento sobre esteiras de aço. A vazão de granéis sólidos em viradores de vagões é o processo de esvaziamento dos silos de abastecimentos por meio da variação de velocidade de rotação dos alimentadores de esteiras de aço. O controle da vazão de granéis sólidos na indústria é feito, na maioria das vezes, de forma empírica, variando-se a velocidade de rotação dos alimentadores, isto é, com base na expertise do operador. Neste capítulo apresenta-se um modelo de sintonia de controlador PID convencional sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e ajustado por tentativa erro. Os resultados são avaliados em respeito ao objetivo de controle e em regime estacionário por meio de simuladores desenvolvidos no *MATLAB/SIMULINK*.

Palavras chaves: Virador de vagões, Silos de abastecimento, Esteiras de aço, Vazão de sólidos, Controlador PID.

Abstract

Car dumper is a large industrial equipment, which consists of unloading cars loaded with bulk solids in supply silos on steel tracks. The flow of bulk solids in car dumpers is the process that consists of emptying the supply silos by varying the speed of rotation of the steel belt feeders. The control of the flow of bulk solids in industry is done, most of the time, in an empirical way, varying the speed of rotation of the feeders, that is, based on the operator's expertise. In this chapter, a conventional PID controller tuning model tuned by the second Ziegler-Nichols method is presented. The results are evaluated with respect to the control objective and in steady state error by means of simulators developed at *MATLAB/SIMULINK*.

Key-words: Car dumper, Supply silos, Steel conveyor, Solid flow, PID control.



1. INTRODUÇÃO

Controladores PID são muito usados em controle de processos industriais, isto deu-se devido a simplicidade dos algoritmos de controladores com ações proporcionais, integrais e derivativas (PID) associados com seu bom desempenho (Shah and Agashe, 2016). Isto faz com que esses controladores tenham boa aceitação na indústria (Lee et al., 2008), (Pai et al., 2010). Em suma, a estrutura de equação integro diferencial do PID permite que as ações advindas da combinação dos três termos sejam representadas na forma de polinômios no domínio da frequência em s ou no domínio do tempo em z . Desta forma, os métodos de sintonia desempenham um importante papel na determinação dos parâmetros de ganhos que são imbuídos das propriedades de otimalidade, adaptabilidade e robustez do sistema de controle aplicado a um modelo matemático aproximado da planta.

É prática comum reduzir um processo real a um modelo de ordem baixa, porque a maioria das regras de ajuste para o controlador industrial do tipo PID é baseada em modelos de baixa ordem (Shamsuzzoha and Lee, 2008), (Lee et al., 1998). Também é de conhecimento, que em vários processos industriais, o modelo de segunda ordem representa melhor a dinâmica do processo real que o modelo de primeira ordem. O projeto do controlador PID tem sido discutido extensivamente na literatura para processos estáveis e instáveis. Mas, o projeto de um controlador simples e robusto com desempenho aprimorado ainda não foi totalmente alcançado (Rivera et al., 1986).

A razão fundamental para a obtenção de um modelo matemático de um sistema dinâmico é a necessidade da existência deste modelo para que se possa desenvolver um controlador para o sistema dinâmico (Zhu and Azar, 2015). A estimação do modelo matemático para o sistema de controle de vazão de sólidos a granel aplicados em Viradores de Vagões (VV), foi concebido com base em dados coletados do processo operacional de descarregamento de vagões, com isso, estimou-se um modelo matemático para representar os aspectos físicos do processo na sua quase totalidade. A identificação de sistemas pode ser feita por meio de análise da dinâmica do sistema físico e o desenvolvimento de um modelo matemático a partir do comportamento do processo (Schwarzenbach and Gill, 1978).

A identificação de sistemas, também pode ser feita por meio de análise computacional ou modelagem empírica, que envolve a coleta de dados das características de entrada-saída do sistema e a utilização destes para a obtenção de um modelo matemático que aproxima-se este comportamento observado (Luenberger, 1979). De posse dos dados coletados da planta por um sistema de gerenciamento de informações e com o uso do *software MATLAB*, obteve-se o modelo matemático aproximado da planta em estudo.

Neste trabalho propõe-se controladores PID convencionais sintonizados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*, denominado de controlador PID-ZN, para o controle de vazão de granel sólidos aplicado ao processo operacional de VV. Controlador PID é muito usado em processos industriais, mas para controle de vazão de granel sólidos em descarregamento de vagões por VV é uma novidade. A relevância deste trabalho é, principalmente, a contribuição técnico/científica inserida em um processo industrial complexo como a operação de descarregamento de vagões por VV, tendo um controlador PID convencional



no controle operacional de vazão de granéis sólidos com seus parâmetros de ganhos sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e ajustado por tentativa e erro.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 faz-se uma breve descrição do processo operacional da planta. Na Seção 3 apresenta-se a formulação do problema, a concepção do modelo matemático e o projeto do sistema de controle proposto. Na Seção 4 são apresentados os experimentos baseados em modelos. Na Seção 5, os resultados das simulações são apresentados e analisado. Por fim na Seção 6 apresenta-se a conclusão deste capítulo.

2. DESCRIÇÃO OPERACIONAL DA PLANTA

VVs são equipamentos utilizados no descarregamento de vagões com granéis sólidos. Estes são giratórios, com movimento de rotação sobre o seu próprio eixo, chegando até 180° . Em cada movimento de rotação, são descarregados dois vagões, os vagões são conjugados, isto é, entre um vagão e outro tem um engate fixo, chamado de barra fixa e nas extremidades de cada par de vagões os engates são móveis, permitindo a rotação dos vagões durante o descarregamento sem ser necessário desacoplá-los (separá-los), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Virador de vagões.

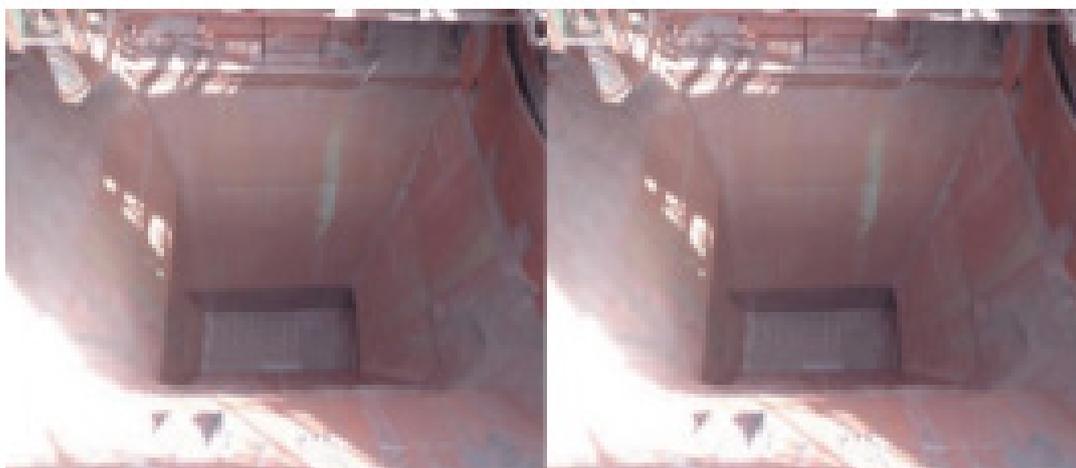


O VV ao executar o movimento de rotação, a carga dos vagões é transferida para os silos, conforme ilustrado na Figura 2, que é direcionada para uma rota operacional que é composta dos seguintes equipamentos: VV; alimentadores de esteiras de aço (AL); correias transportadoras (CT) e empilhadeiras (EP) que executam o empilhamento da carga no pátio de estocagem.

Figura 2: Silos com carga

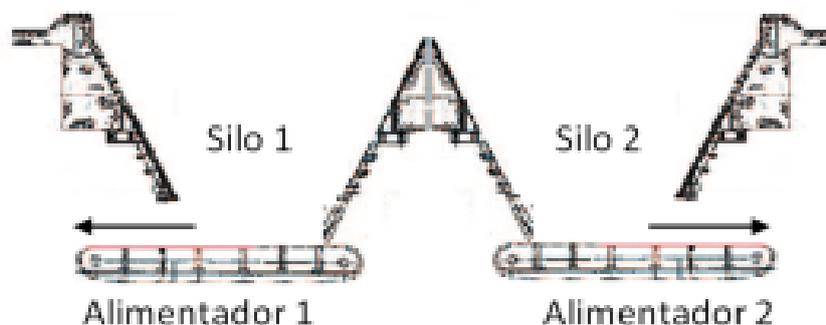


Figura 3: Silos vazios.



A Figura 4 representa o esquemático dos silos com os alimentadores de esteiras, as setas indicam o sentido de rotação de cada AL, os controladores PID-ZN atuam diretamente na variação da velocidade de rotação dos ALs para manter o fluxo horário da carga desejada que é de 8000t/h para cada VV, sendo 4000t/h em cada AL.

Figura 4: Esquemático de um silo com os alimentadores



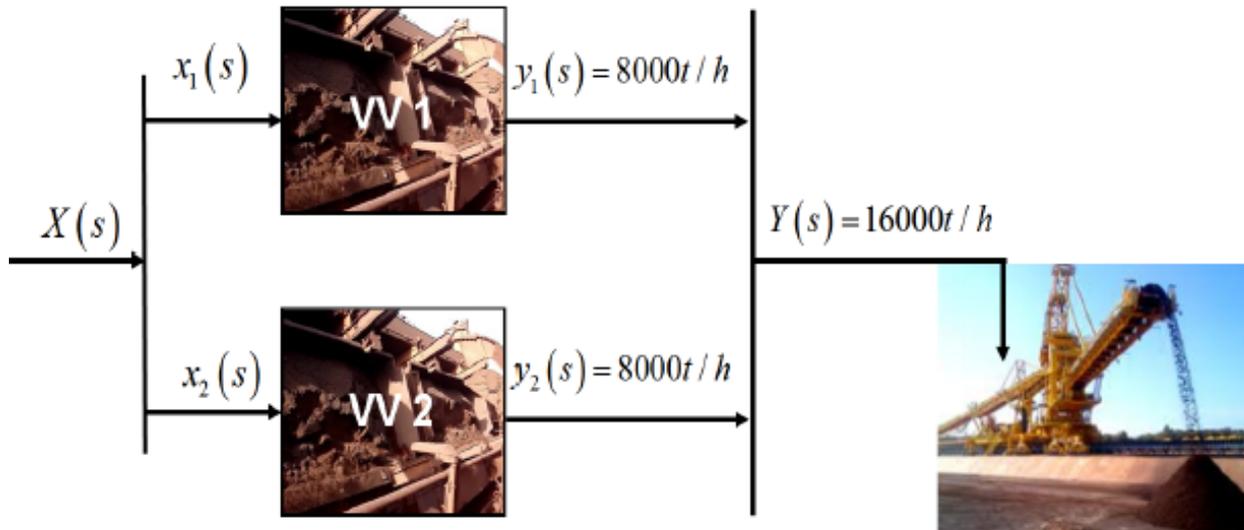
3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A descrição do processo de descarregamento dos VVs para a EP, a identificação do modelo matemático da planta e o método proposto para sintonia dos ganhos do sistema de Controle PID são abordados nesta Seção. Na descrição do processo, é apresentado o modo operacional do sistema que é o descarregamento de vagões por VV e o transporte de granéis sólidos em CT de sistemas de mineração. Para fins de projeto de controladores PID, o compartimento da planta é representado em espaço de estados pelos métodos de identificação de sistemas. A estratégia de controle proposta e o método para sintonia dos parâmetros de ganhos do vetor do controlador PID (K^{pid}) são determinados pelo segundo método de Ziegler-Nichols (ZN) e ajustados por tentativa e erro.

3.1 Processo de Descarregamento de vagões para EP

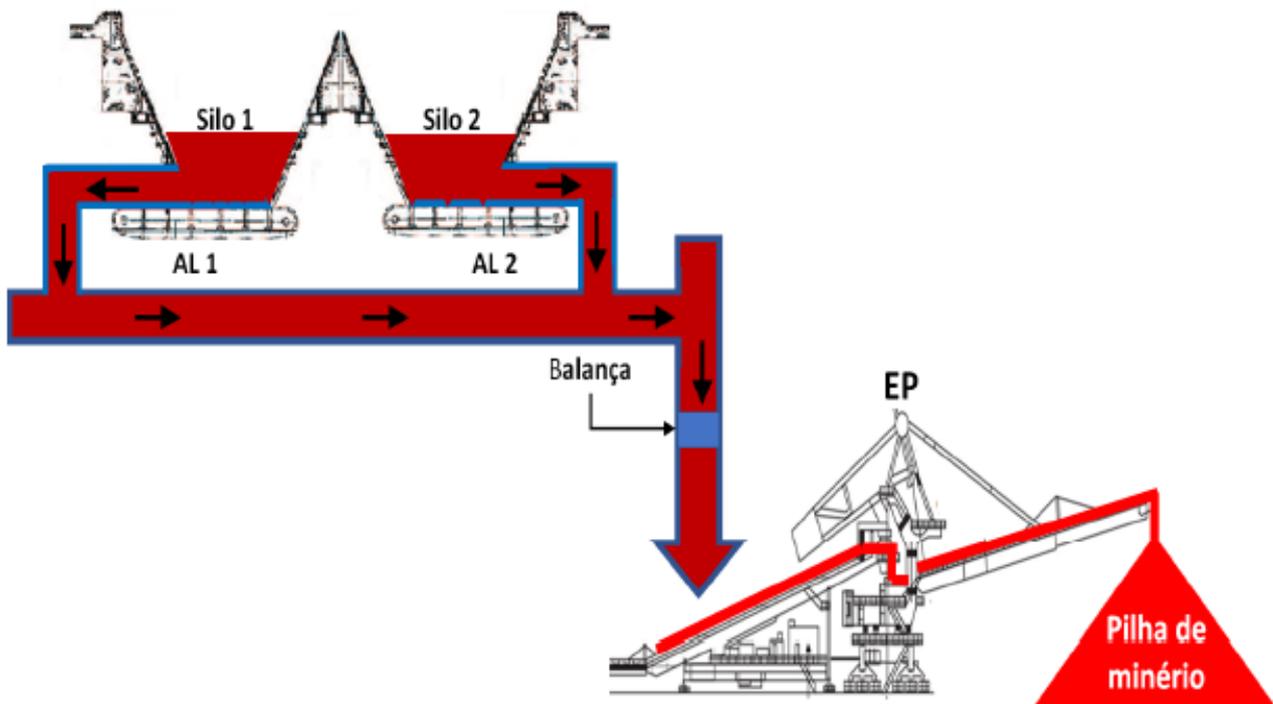
Conforme ilustrado na Figura 5, os equipamentos principais da planta consistem em dois VVs e uma EP. Para modelagem, separa-se em duas subplantas com uma entrada e uma saída cada subplanta, o somatório das saídas das subplantas. O controlador proposto atua na variação de velocidade de cada AL para manter o *setpoint* de 8000t/h por VV e o *setpoint* da planta 16000t/h.

Figura 5: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP



O modelo matemático aproximado foi concebido por meio de dados coletados durante o processo operacional da planta. O sinal de entrada da planta é a referência da velocidade dos ALs e como sinal de saída, a vazão da carga medida pela balança. O tempo da carga ser transportada dos ALs até a balança é de 40 segundos. Na Figura 6, ilustra-se o fluxo da carga destacado em vermelho e a balança destacada em azul.

Figura 6: Fluxo de carga dos AL até a pilha no pátio de estocagem.



No contexto do desenvolvimento proposto, a aplicação do método para identificação do modelo para fins de projeto de controladores, consiste no processo de descarregamento de vagões composto por: a) VVs que fazem o descarregamento dos vagões; de silos de abastecimentos e b) de Als de esteiras de aço que controlam a vazão de saída do sólido a granel dos silos. As variáveis medidas são a velocidade dos Als $v(t)$ e a saída $y_m(t)$, que é a carga medida pela balança dinâmica. A variação de velocidade dos ALs é diretamente proporcional a carga medida.

3.2 Identificação do Modelo Matemático da Planta

Para desenvolver um controlador para atuar no controle da vazão de granéis sólidos dos silos, foi necessário estimar um modelo com base nos dados de referências da intensidade da corrente elétrica (I) dos motores de acionamentos dos ALs e relacionar com a vazão da carga medida pela balança. Com esses dados tratado e simulados no *software MATLAB*, foi gerado um modelo estimado do processo da planta. O modelo em espaço de estado foi concebido com dados reais da planta de descarregamento de vagões, como já foi mencionado. Usando-se do método de subespaço (Mínimos Quadrados) e do algoritmo de busca *Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID).

Duas plantas de descarregamento de vagões são identificadas para o projeto do PID, uma do VV_1 e outra do VV_2 que são apresentadas a seguir:

a) Planta do VV_1 em Espaço de estados

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0,08728 & -0,25 \\ 0,206 & 0,00091943 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,438 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_1 = [0 \ 1], \quad (3)$$

$$D_1 = [0]. \quad (4)$$

A função de transferência da planta do VV_1 associada com as matrizes A_1 e B_1 apresentadas em (12) e (13) é dada por

$$G_1^{VV_1}(s) = \frac{0,348s + 0,03001}{s^2 + 0,08637s + 0,04215}. \quad (5)$$

b) Planta do VV_2 em Espaço de estados

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0,002905 & -0,03078 \\ 0,0963 & 0,04356 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,1721 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$C_2 = [0 \ 1], \quad (8)$$

$$D_2 = [0]. \quad (9)$$

A função de transferência da planta do VV_2 associada com as matrizes A_2 e B_2 apresentadas em (17) e (18) é dada por

$$G_2^{VV_2}(s) = \frac{0,1721s + 0,005}{s^2 + 0,04646s + 0,003091}. \quad (10)$$

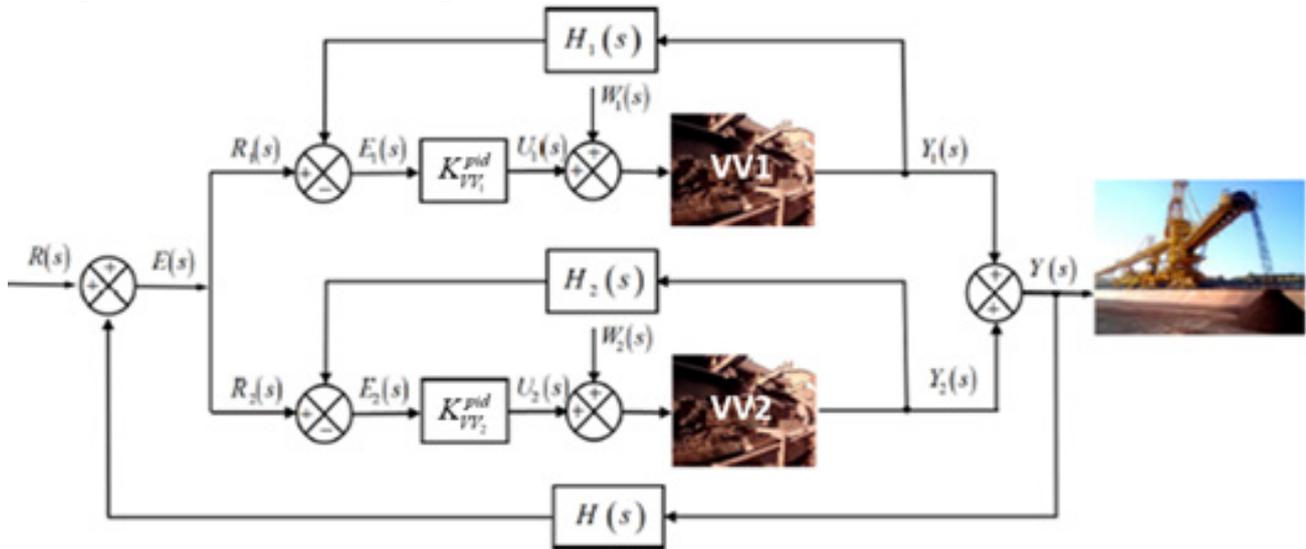
Onde $G_1^{VV_1}(s)$ e $G_2^{VV_2}(s)$ são as funções de transferências das plantas dos VV_1 e VV_2 . Observa-se que são plantas de segunda ordem.

3.3 Projeto do Sistema de Controle PID-ZN

O projeto dos controladores PID sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* é apresentado nesta subseção. O controlador convencional PID é a estratégia de controle mais frequentemente utilizada na indústria devido à sua simplicidade, desempenho, robustez e disponibilidade de muitos métodos de ajustes efetivos e simples com base em conhecimentos mínimos da planta (Ziegler and Nichols, 1942), (Cohen, 1953), (Murrill, 1967), (Parr, 1998).

A planta é representada em diagrama de blocos, onde são representadas as plantas do VV_1 e VV_2 , com os controladores PID e os sinais de perturbações, conforme Figura 7. Sendo $R_1(s)$ e $R_2(s)$ as referências, $E_1(s)$ e $E_2(s)$ os erros, $H_1(s)$ e $H_2(s)$ os sensores (balanças), $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ as saídas, $K_{VV_1}^{pid}$ e $K_{VV_2}^{pid}$ são os ganhos dos controladores PID para as plantas dos VV_1 e VV_2 respectivamente. $U_1(s)$ e $U_2(s)$ as entradas $W_1(s)$ e $W_2(s)$ os sinais de perturbações das plantas VV_1 e VV_2 , respectivamente e finalmente $R(s)$ a referência, $U(s)$ a entrada, $Y(s)$ a saída e $H(s)$ o sensor da planta geral (VV_1 e VV_2 simultâneos).

Figura 7: Planta de Descarregamento de dois VV para uma EP com o Controlador PID-ZN.



Os parâmetros dos ganhos do vetor K^{pid} são obtidos pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* por meio do modelo matemático da planta (função de transferência). De acordo com a Tabela 1, pôde-se usar o segundo método de sintonia de *Ziegler-Nichols* através do lugar das raízes para encontrar o ganho crítico K_{cr} e a frequência das oscilações w_{cr} ($2\pi/w_{cr} = P_{cr}$) (Zhao et al., 1993).

Tabela 1: Regra de ajuste pelo segundo método de Ziegler-Nichols com base no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} .

| Tipo | K_p | T_i | T_d |
|------|---------------|----------------|----------------|
| P | $0,5 K_{cr}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0,45 K_{cr}$ | $1/1,2 P_{cr}$ | 0 |
| PID | $0,6 K_{cr}$ | $0,5 P_{cr}$ | $0,125 P_{cr}$ |

O modelo do controlador PID usado neste capítulo é dada por

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i(s)} + T_d(s) \right). \quad (11)$$

4. EXPERIMENTOS BASEADOS EM MODELOS

Nesta Seção são apresentados os resultados dos experimentos baseados em modelos que são provenientes de simulações do *software MATLAB/SIMULINK*.

4.1 Setup da Simulação

O projeto do controlador PID-ZN proposto neste capítulo, consiste em dois controladores PID convencionais sintonizados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e ajustados por tentativa e erro. Primeiro os ganhos dos controladores PID-ZN são determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e justados, em seguida esses ganhos são inseridos *offline* no controlador PID.

4.1.1 Sintonia dos Parâmetros do Controlador PID das Plantas do VV_1 e VV_2

A função de transferência em malha fechada com o ganho K_{cr} para a planta genérica é dada por

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_{cr}(s)G(s)}{1 + K_{cr}(s)G(s)}. \quad (12)$$

Substituindo $G(s)$ pelo seu numerador N (zeros) e pelo seu denominador D (pólos) tem-se

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_{cr}(s)N/D}{1+K_{cr}(s)N/D} = \frac{K_{cr}(s)N/D}{1+K_{cr}(s)N/D}$$

$$= \frac{K_{cr}(s)N/D}{D+K_{cr}(s)N/D} = \frac{K_{cr}(s)}{D+K_{cr}(s)N}$$
(13)

Resolvendo a Eq. (24), tem-se

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_{cr}(s)N}{D+K_{cr}(s)N}$$
(14)

Onde N é o numerador (zeros) e D o denominador (pólos) da função de transferência.

Das Eqs. (5) e (10) que representam as funções de transferências das plantas do VV_1 e VV_2 respectivamente, geram as figuras do lugar das raízes, conforme Figuras 9-10.

Figura 9: Lugar das raízes associada com a Eq. (16)

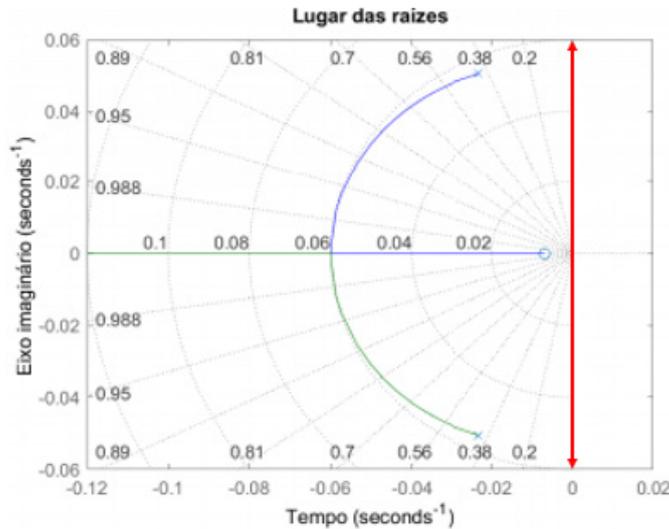
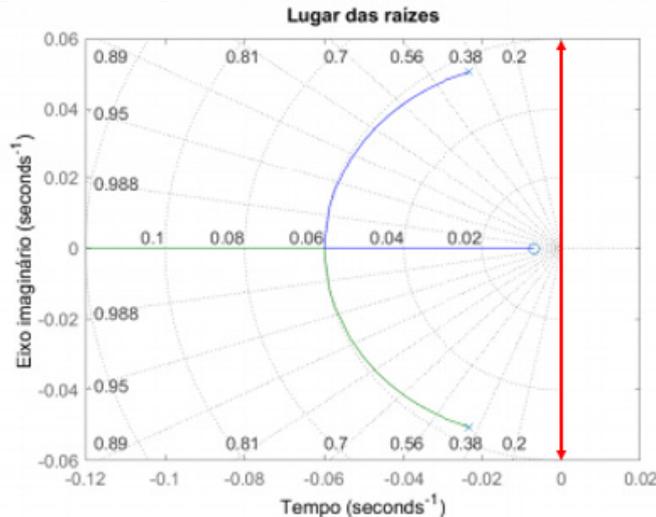


Figura 10: Lugar das raízes associada com a Eq. (21)



Observa-se nas Figuras 9-10, que as raízes não cruzam o eixo imaginário representado pelo seta dupla destacada em vermelho. Com isso não pode-se usar o segundo método de *Ziegler-Nichols*. Então os modelos foram ajustados com zeros no infinito e inserido um integrador ($T_i = 1$), resultando nos novos modelos a seguir:

$$G_{1_1}^{VV1}(s) = \frac{1}{s^3 + 0.08637s^2 + 0.04215s + 0} \quad (15)$$

$$G_{2_1}^{VV2}(s) = \frac{1}{2s^3 + 0.04646s^2 + 0.003091s + 0} \quad (16)$$

Onde $G_{1_1}^{VV1}(s)$ e $G_{2_1}^{VV2}(s)$ são as funções de transferências das plantas do VV1 e VV₂, respectivamente, ajustadas com zeros no infinito e com um integrador.

A Figura 11 foi gerada da Eq. (11), com $K_{cr}^{VV1} = 0,00349$ e $w_{cr}^{VV1} = 0,205$ e a Figura 12 foi gerada da Eq. (16) com $K_{cr}^{VV2} = 0,00014$ e $w_{cr}^{VV2} = 0,0554$. Nestas, observa-se que as raízes cruzam o eixo imaginário, permitindo-se usar o segundo método de *Ziegler-Nichols*. Agora, basta determinar o período crítico P_{cr} para as plantas dos VV₁ e VV₂ e aplicar o segundo método de *Ziegler-Nichols*.

Figura 11: Lugar das raízes associada com a Eq. (15)

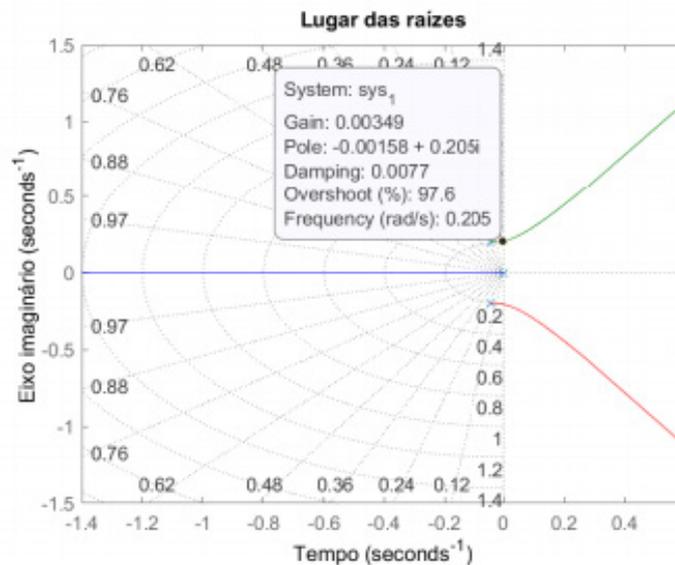
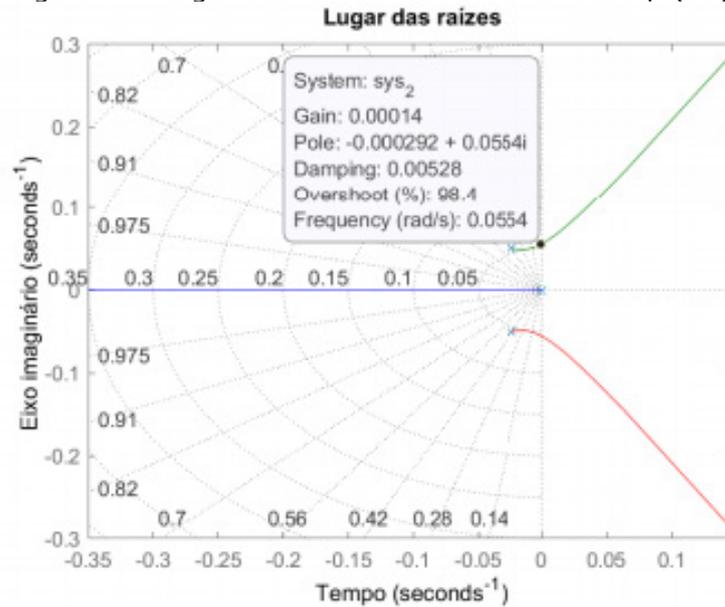


Figura 12: Lugar das raízes associada com a Eq. (16)



4.1.2 Cálculo dos parâmetros do vetor de ganhos $K_{VV_1}^{pid}$

De acordo com o $K_{cr}^{VV_1}$ e o $w_{cr}^{VV_1}$ associados com a Figura 11, determina-se primeiro $P_{cr}^{VV_1}$.

$$P_{cr}^{VV_1} = \frac{2\pi}{w_{cr}^{VV_1}} = \frac{2 \times 3,1416}{0,205} = 30,6497.$$

Substituindo o ganho crítico e o período crítico na terceira linha da Tabela 1, encontra-se o K_p , o T_i e o T_d para as plantas em estudos.

$$K_p^{VV_1} = 0,6 \times K_{cr}^{VV_1} = 0,6 \times 0,00349 = 0,0021,$$

$$T_i^{VV_1} = 0,5 \times P_{cr} = 0,5 \times 30,6497 = 15,3248,$$

$$T_d^{VV_1} = 0,125 \times P_{cr} = 0,125 \times 30,6497 = 3,8312.$$

Como

$$K_i^{VV_1} = \frac{K_p^{VV_1}}{T_i^{VV_1}} = \frac{0,0021}{15,3248} = 0,0001303$$

$$K_d^{VV_1} = K_p^{VV_1} T_d^{VV_1} = 0,0021 \times 3,8312 = 0,0080.$$

4.1.3 Cálculo dos parâmetros do vetor de ganhos $K_{VV_2}^{pid}$

De acordo com o $K_{cr}^{VV_2}$ e o $w_{cr}^{VV_2}$ associados com a Figura 12, determina-se primeiro P_{cr} .

$$P_{cr}^{VV_2} = \frac{2\pi}{w_{cr}^{VV_2}} = \frac{2 \times 3,1416}{0,0554} = 113,4149.$$

Substituindo o ganho crítico e o período crítico na terceira linha da Tabela 1, encontra-se o K_p , o T_i e o T_d para as plantas em estudos.

$$K_p^{VV_2} = 0,6 \times K_{cr}^{VV_2} = 0,6 \times 113,4149 = 68,0489,$$

$$T_i^{VV_2} = 0,5 \times P_{cr}^{VV_2} = 0,5 \times 113,4149 = 56,7075,$$

$$T_d^{VV_2} = 0,125 \times P_{cr}^{VV_2} = 0,125 \times 113,4149 = 14,1769.$$

Como

$$K_i^{VV_2} = \frac{K_p^{VV_2}}{T_i} = \frac{68,0489}{56,7075} = 1,2$$

$$K_d^{VV_2} = K_p^{VV_2} T_d^{VV_2} = 68,0489 \times 14,1769 = 964,7225.$$

4.2 Simuladores

A planta geral é composta por dois VVs e uma EP, conforme apresentada na Seção 3.1. Para controlar a vazão de entrada da EP, são desenvolvidos três controladores para os modelos da planta, sendo:

1. um controlador para a planta do VV_1 , conforme Figura 13;
2. um controlador para da planta do VV_2 , conforme Figura 14 e
3. um controlador da planta do VV_1 e VV_2 , conforme Figura 14, que atuam simultâneos, de forma que, seja alcançado o valor de referência de 16000t/h.

Nas Figuras 13-15, são ilustrados os simuladores desenvolvidos no *MATLAB/SIMULINK*.



Figura 13: Simulador da planta do VV_1 .

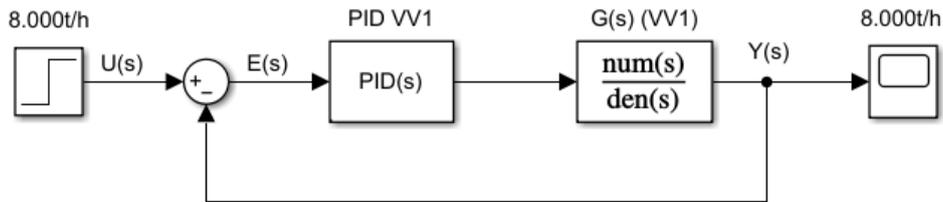


Figura 14: Simulador da planta do VV_2 .

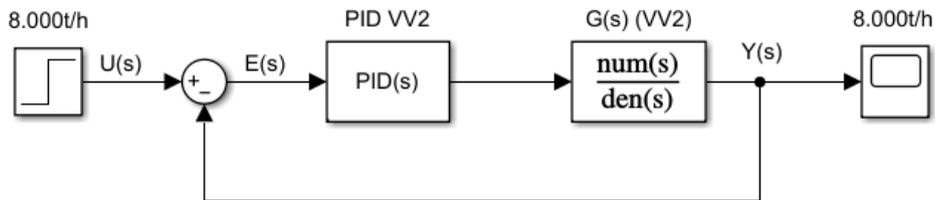
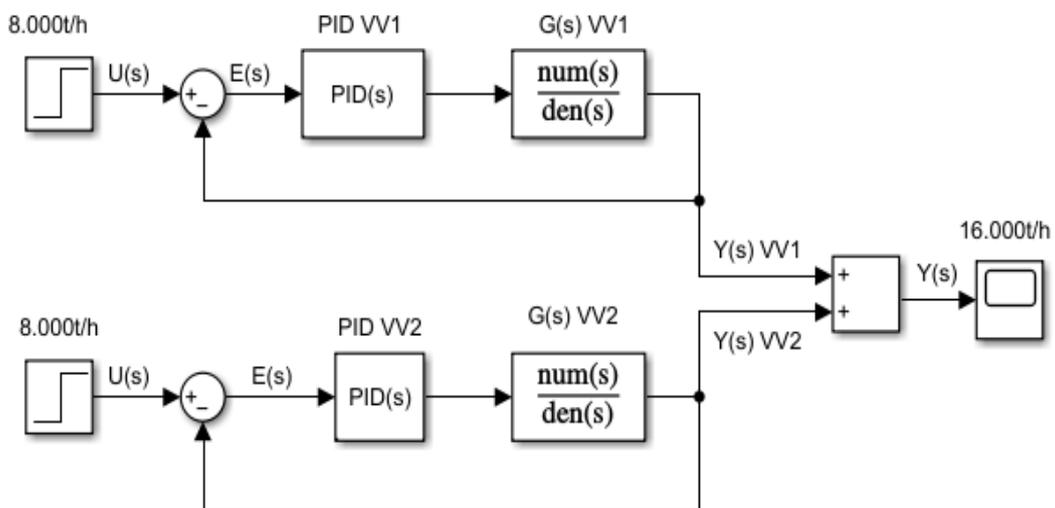


Figura 15: Simulador das plantas do VV_1 e VV_2 simultâneas.

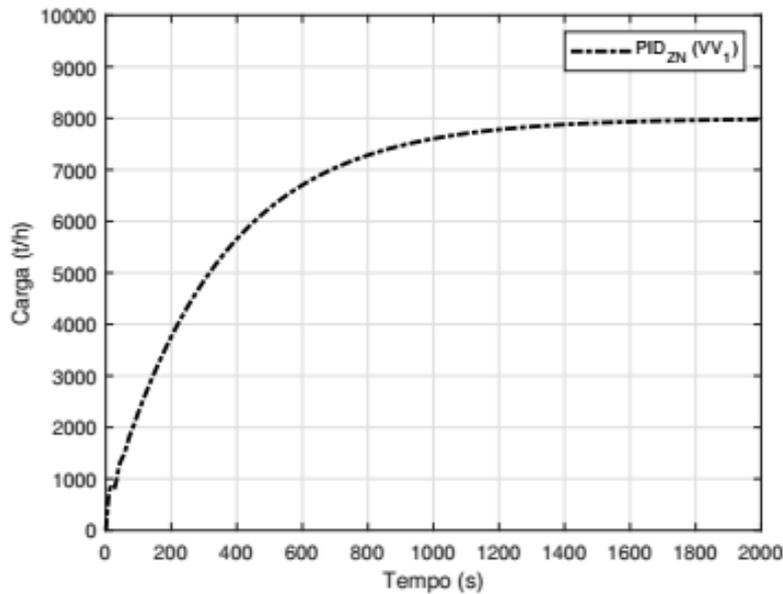


5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS

Primeiramente, faz-se a avaliação das plantas do VV_1 e VV_2 separadas, depois avalia-se o comportamento do processo operacional das plantas simultâneas.

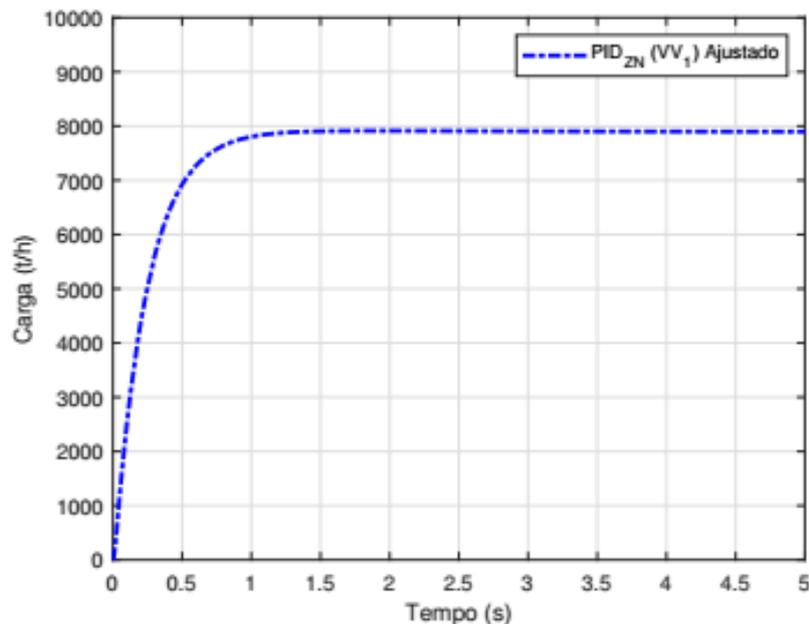
Na Figura 16 apresenta-se o comportamento do controlador PID-ZN do VV_1 , nesta observa-se, que objetivo de controle foi alcançado, porém o seu desempenho não foi satisfatório, demorando-se muito tempo para alcançar o objetivo de controle e entrar em erro estacionário.

Figura 16: Controlador PID-ZN e PI da planta do VV1



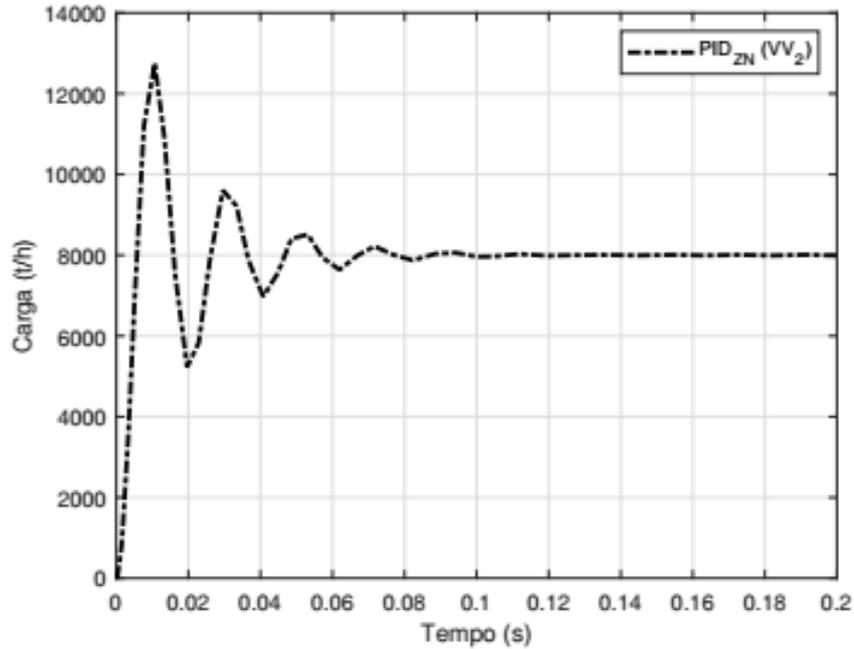
Na Figura 17, apresenta-se o comportamento do controlador PID-ZN da planta do VV₁, com os parâmetros do vetor de ganhos $K_{VV_1}^{pid}$ ajustados por tentativa e erro. Os parâmetros dos ganhos do vetor $K_{VV_1}^{pid}$ determinados pelo segundo método *Ziegler-Nichols*, são usados como referências para os ajustes dos novos parâmetros, que ficam assim depois dos ajustes: $K_p = 0,21$, $K_i = 0,1303$ e $K_d = 4$. Observa-se, que o controlador PID-ZN da planta do VV₁ com os ganhos ajustados, obteve um desempenho excelente, alcançando o objetivo de controle em um tempo muito curto e entrando logo em regime estacionário.

Figura 17: Controlador PID-ZN da planta do VV1 ajustado.



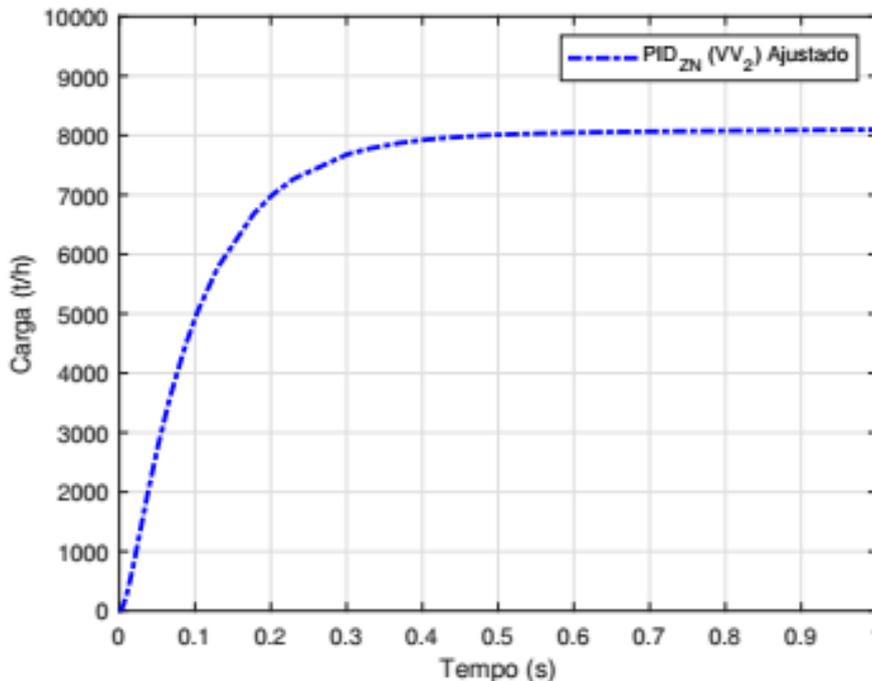
Na Figura 18 apresenta-se o comportamento dos controlador PID-ZN do VV₂, nesta observa-se, que objetivo de controle foi alcançado, porém o seu desempenho não foi satisfatório. Apesar de ter alcançado o objetivo de controle em um curto intervalo de tempo e entrar em regime estacionário. Porém, atingiu um *overshoot* em torno de 60%, não atendendo os requisitos de projetos, que é de no máximo 20%.

Figura 18: Controlador PID-ZN da planta do VV_1 .



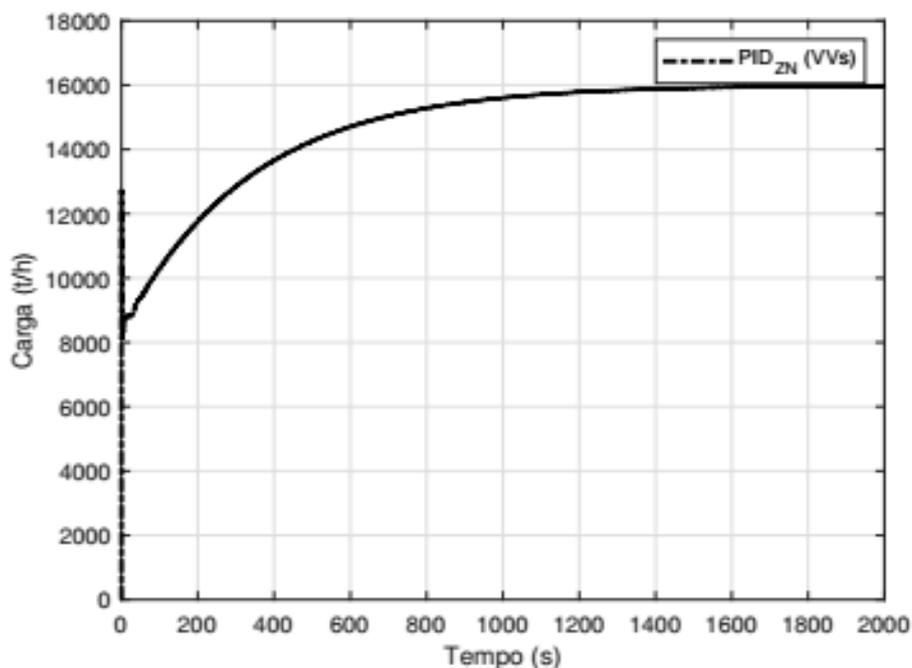
Na Figura 19, apresenta-se o comportamento do controlador PID-ZN da planta do VV_2 , com os parâmetros do vetor de ganhos $K_{VV_2}^{pid}$ ajustados por tentativa e erro. Como já mencionad, os parâmetros de ganhos do vetor $K_{VV_2}^{pid}$ determinados pelo segundo método *Ziegler-Nichols*, são usados como referências para os ajustes dos novos parâmetros, que ficam assim depois dos ajustes: $K_p = 0,6805$, $K_i = 1,2$ e $K_d = 9,6472$. Observa-se, que o controlador PID-ZN da planta do VV_2 com os ganhos ajustados, obtém um desempenho excelente, alcançando o objetivo de controle em um tempo muito curto e entrando logo em regime estacionário.

Figura 19: Controlador PID-ZN da planta do VV_2 ajustado.



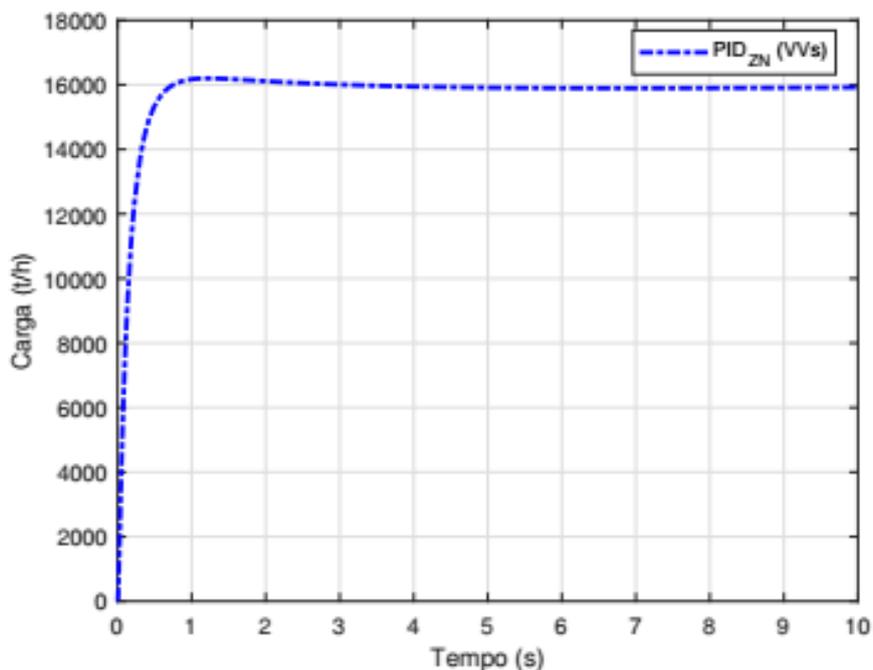
Na Figura 21 apresenta-se o comportamento dos controladores PID-ZN dos VV_1 e VV_2 simultâneos. Nesta, observa-se que objetivo de controle foi alcançado, porém o seu desempenho não foi satisfatório, demorando-se muito tempo para alcançar o objetivo de controle e entrar em regime estacionário.

Figura 21: Controladores PID-ZN das plantas do VV_1 e VV_2 simultâneas.



Na Figura 22, apresenta-se o comportamento dos controladores PID-ZN das planta dos VV_1 e VV_2 simultâneas, com os parâmetros do vetor de ganhos $K_{VV_1}^{pid}$ e $K_{VV_2}^{pid}$ ajustados por tentativa e erro. Observa-se, que os controladores PID-ZN das planta dos VV_1 e VV_2 simultâneas com os ganhos ajustados, obtêm bons desempenhos, alcançando o objetivo de controle em um tempo muito curto e entrando logo em regime estacionário.

Figura 22: Controladores PID-ZN das plantas do VV_1 e VV_2 simultâneas.



6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados e análises dos experimentos simulados, observa-se que os controladores PID convencionais com ganhos fixos conseguem bons resultados em processos industriais que não têm grandes variações paramétricas na dinâmica da planta. Portanto, conclui-se, que a sintonia de controladores PID convencionais sintonizados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*, para o controle de vazão de granéis sólidos em processos de descarregamento de vagões por VV, têm bons desempenhos depois de pequenos ajustes em seus parâmetros, alcançando o valor de referência sem perda da trajetória alcançada.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) por viabilizarem esta pesquisa, . Agradecemos especialmente à FAPEMA por incentivar a pesquisa e a infraestrutura no Estado do Maranhão e por fim agradecemos à CAPES e ao CNPq por promover e apoiar os estudos avançados que contribuíram para desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Åström, K. J. and Wittenmark, B. (2013). Computer-controlled stems: theory and design, Courier Corporation.
- Cohen, G. (1953). Theoretical consideration of retarded control, Trans. Asme 75: 827–834.
- Lee, M., Shamsuzzoha, M. and Vu, T. N. L. (2008). Imc-pid approach: An effective way to get an analytical design of robust pid controller, Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on, IEEE, pp. 2861–2866.
- Lee, Y., Park, S., Lee, M. and Brosilow, C. (1998). Pid controller tuning for desired closed-loop responses for si/so systems, Aiche journal 44(1): 106–115.
- Li, S., Yang, J., Chen, W.-H. and Chen, X. (2016). Disturbance observer-based control: methods and applications, CRC press.
- Ljung, L. (1999). Ljung l system identification theory for user. pdf, PTR Prentice Hall Upper Saddle River NJ 25: 475–476.
- Luenberger, D. G. (1979). Introduction to dynamic systems: theory, models, and applications, Vol. 1, Wiley New York.
- Murrill, P. W. (1967). Automatic control of processes, International Textbook Company.
- Ogata, K. (2009). Modern Control Engineering (5th Edition), Prentice-Hall electrical engineering series. Instrumentation and controls series, 5th edn, Prentice Hall.
- Pai, N.-S., Chang, S.-C. and Huang, C.-T. (2010). Tuning pi/pid controllers for integrating processes with deadtime and inverse response by simple calculations, Journal of Process Control 20(6): 726–733.
- Parr, E. A. (1998). Industrial control handbook, Industrial Press Inc.
- Rivera, D. E., Morari, M. and Skogestad, S. (1986). Internal model control: Pid controller design, Industrial & engineering chemistry process design and development 25(1): 252–265.



- Schwarzenbach, J. and Gill, K. (1978). System modelling and control, J. Wiley.
- Shah, P. and Agashe, S. (2016). Review of fractional pid controller, Mechatronics 38: 29–41.
- Shamsuzzoha, M. and Lee, M. (2008). Design of advanced pid controller for enhanced disturbance rejection of second-order processes with time delay, AIChE Journal 54(6): 1526–1536.
- Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of pid controllers, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 23(5): 1392–1398.
- Zhu, Q. and Azar, A. T. (2015). Complex system modelling and control through intelligent soft computations, Springer.
- Ziegler, J. G. and Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers, trans. ASME 64(11).

CAPÍTULO 14

PROJETO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY EM SISTEMAS INDUSTRIAIS APLICADO EM RETOMADORAS DE GRANÉIS SÓLIDOS NO SETOR DE MINERAÇÃO

PROJECT OF A PID-FUZZY CONTROLLER IN INDUSTRIAL SYSTEMS APPLIED IN SOLID TO BULK RECOVERYS IN THE MINING SECTOR

José Pinheiro de Moura
João Viana da Fonseca Neto

Resumo

Retomadora de granéis sólidos é um equipamento industrial de grande porte, que consiste em retomar o material para embarque, principalmente, de navios. A retomadora é instalada sobre trilho ao longo de um pátio de estocagem, tem comprimento em torno de 102m, uma lança em torno de 50m com uma roda de caçambas com 10m de diâmetro (8m da roda e 2m das caçambas). A retomadora têm os seguintes movimentos: translação ao longo de um pátio de estocagem; movimentos de rotação e içamento (elevação e abaixamento) da lança e movimento de rotação da roda de caçambas em torno do seu próprio eixo. O controle da vazão de sólidos de uma RP é feito, na maioria das vezes, de forma empírica, variando-se a velocidade de rotação da lança da RP, isto é, com base na expertise do operador. Neste capítulo apresenta-se um modelo de sintonia *online* de controlador PID com base em lógica *fuzzy* para controlar a vazão de granéis sólidos. Os resultados são avaliados em respeito ao objetivo de controle e em regime estacionário, ainda neste contexto, faz-se uma comparação do desempenho do controlador proposto com os resultados alcançados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e em respeito a rejeição às perturbações inseridas na planta em estudo por meio de simuladores desenvolvidos no *software MATLAB/SIMULINK*.

Palavras chaves: Retomadora de granéis sólidos, Sintonia *online*, Controlador PID, Lógica Fuzzy, Segundo método de *Ziegler-Nichols*.

Abstract

Reclaimer of solid bulk is a large industrial equipment, which consists of taking the material back for shipment, mainly from ships. The reclaimer is installed on a rail along a stockyard, has a length of around 102m, a boom around 50m with a 10m diameter bucket wheel (8m from the wheel and 2m from the buckets). The reclaimer has the following movements: translation along a stockyard; rotational and lifting (raising and lowering) movements of the boom and rotating movement of the bucket wheel about its own axis. The control of the solids flow of an RP is done, most of the time, in an empirical way, varying the rotation speed of the RP boom, that is, based on the operator's expertise. This chapter presents an online tuning model of a PID controller based on fuzzy logic to control the flow of bulk solids. The results are evaluated with respect to the control objective and in steady state, still in this context, the performance of the proposed controller is compared with the results achieved by the second Ziegler-Nichols method and with respect to the rejection of the disturbances inserted in the plant. under study using simulators developed in MATLAB/SIMULINK software.

Key-words: Solid Bulk Reclaimer, Online Tuning, PID Controller, Fuzzy Logic, Second Ziegler-Nichols Method.



1. INTRODUÇÃO

A retomada de granéis sólidos por retomadora (RP) é realizada dividindo-se a pilha em camadas, cada camada tem aproximadamente 4m de altura, e as camadas são divididas em bancadas de até 12m de comprimentos (de Moura et al., 2019a). Para retomar uma bancada são necessários vários passos (P) de translação (penetração na pilha) variando de 0 a 1m. Para manter o fluxo de granéis desejado ao longo do processo, a velocidade da lança da RP deve ser ajustada periodicamente.

O processo de retomada é um processo complexo e que requer controladores de alto desempenhos. Mas, é difícil a implementação desses controladores em plantas reais, principalmente, nas de alta complexidade de controle (De moura et al., 2019b). O que existe, na maioria, são controles manuais feitos pelos próprios operadores e alguns controladores com ações Proporcionais, Integrativas e Derivativas (PID) com um ou dois termos nulos (Moura, 2019).

A motivação de inserir um controlador de alto desempenho com base em regras *fuzzy* para fazer o escalonamento dos ganhos do controlador PID em tempo real de acordo com a variação paramétrica na dinâmica da planta, deu-se pelo fato de ser factível a implementação, já que a RP tem seu processo operacional automatizado em um Controlador Lógico Programável (CLP), que em sua estrutura, já tem um módulo embutido de programação para sistema *fuzzy*.

As propriedades de adaptabilidade que promovem a solução adequada para uma nova situação operacional e de otimalidade com o menor custo operacional é uma demanda atrativa que justifica o desenvolvimento de controladores PID de alto desempenho (de Moura, et al., 2019c). Para tanto, propõe-se modelos e algoritmos para sistemas de controle para uma classe de problemas atuante no processo de forma sequencial e paralela.

O controlador adaptativo *fuzzy* é definido como um sistema de lógica *fuzzy* com um mecanismo de adaptação (inferência) (Chen and Chen, 2009), (Hwang et al., 2009). Além disso, é construído a partir de um conjunto de regras *fuzzy* IF-THEN e o mecanismo de adaptação associado pode ajustar *online* os parâmetros livres dos sistemas *fuzzy* (Azar and Vaidyanathan, 2015), (Chen et al., 2013), (Lin et al., 2011).

A relevância deste trabalho é, principalmente, a contribuição técnico/científica inserida em um processo industrial complexo como o processo operacional de retomada de granéis sólidos por RP, tendo um controlador de alto desempenho aplicado no controle da vazão com seus parâmetros de ganhos autoajustáveis.

O controlador convencional PID é a estratégia de controle mais frequentemente utilizada na indústria devido à sua simplicidade, desempenho de robustez e disponibilidade de muitos métodos de ajuste efetivos e simples com base em um conhecimento mínimo da planta (Ziegler and Nichols, 1942), (Cohen, 1953), (Murrill, 1967), (Parr, 1998), (Padula and Visioli, 2011).

Neste capítulo propõe-se um controlador de alto desempenho com base em regras



fuzzy e com incrementos nos ganhos: proporcional (K_p) e derivativo (K_d) para o controle de vazão de granéis sólidos aplicado em uma planta real do processo operacional de uma RP, com o modelo matemático de terceira ordem, representado por meio de sua função de transferência.

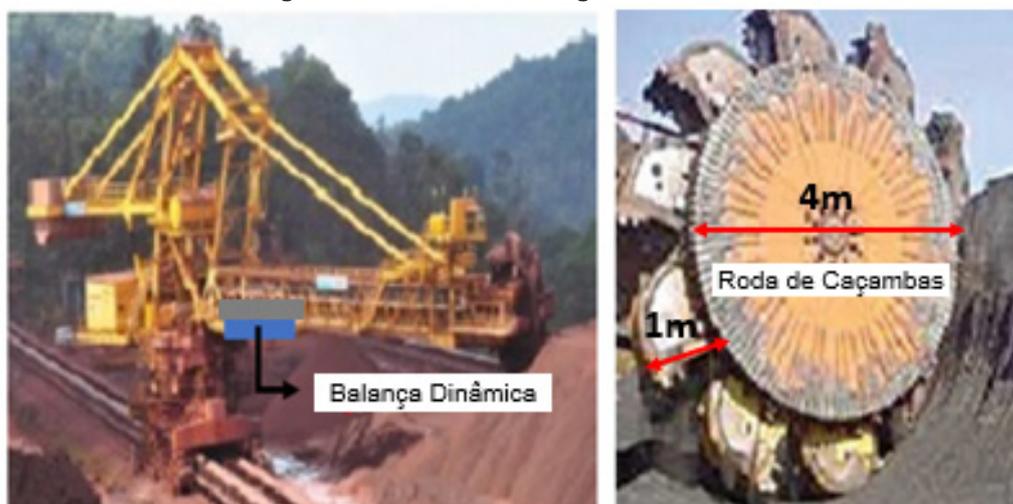
O controle *fuzzy* há muito tempo foi aplicado à indústria com vários resultados teóricos importantes e bem sucedidos. Originalmente introduzido como abordagem de projeto de controle sem modelo. Mas, nas últimas décadas o controle *fuzzy* baseado em modelo ganhou significado generalizado e foi proposto para muitas aplicações industriais, no entanto, combinado com controladores PID convencionais para controle de vazão de granéis sólidos por RP é uma novidade (de Moura and da Fonseca Neto, 2016). A principal vantagem do método de controle proposto é capacidade de autoajustes nos parâmetros de para atender as variações paramétricas sofridas na planta.

A seguir apresenta-se a organização do capítulo: Na Seção 2 faz-se uma breve descrição do sistema. Na Seção 3 apresenta-se o modelo do controlador PID-Fuzzy. Na Seção 4 os resultados simulados são apresentados e analisados e por fim, na Seção 5 apresenta-se a conclusão do capítulo.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O processo de retomada de granéis sólidos consiste em retomar o material estocado nas pilhas e transportar via correias transportadoras para o embarque, geralmente, de navios. As RPs têm capacidade nominal de 8.000t/h, as rotas operacionais, que são compostas por RPs, Correias Transportadoras (CTs) e Carregadores de Navios (CNs) têm capacidade nominal de transportar até 16.000t/h, podendo assim duas RPs fazerem a retomada simultâneas para uma rota de 16.000t/h ou uma RP fazer a retomada para uma rota de 8.000t/h (Moura et al.,). Na Figura 1 lado esquerdo está a representação de uma retomadora fazendo a retomada de uma pilha de minério de ferro, em azul está destacada a balança dinâmica. No lado direito da figura representa-se a roda de caçambas (RC) com 10 caçambas.

Figura 1: Retomada de granéis sólidos



Fonte: (de Moura et al., 2019a).

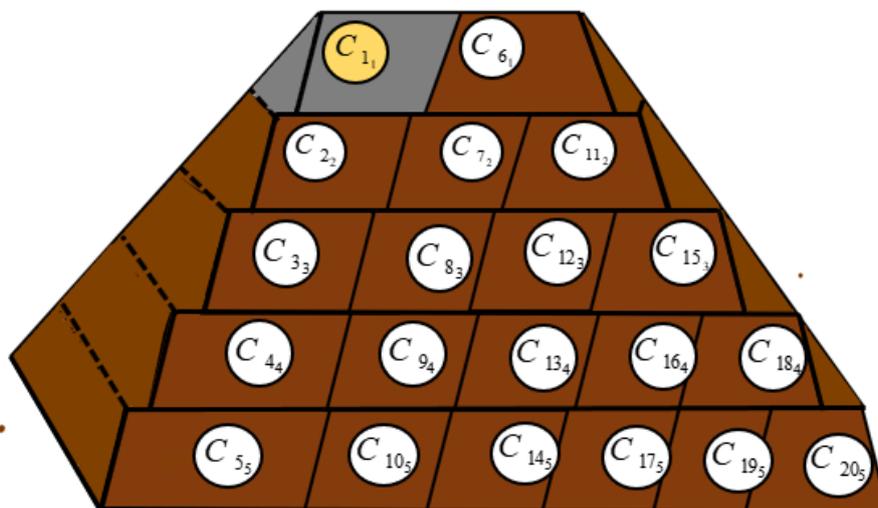
Tabela 1: Comportamento do fluxo em toneladas por hora (t/h) da camada C_{1j} nos passos (P) de 1 a 12.

| C_{ij} | I(A) | P(m) | G(m/s) | F(t/h) | T(s) |
|----------|------|------|--------|--------|------|
| C_1 | 50 | 1,00 | 4,00 | 5.500 | 40 |
| C_2 | 65 | 0,80 | 4,30 | 6.030 | 42 |
| C_3 | 69 | 0,70 | 4,50 | 4.840 | 38 |
| C_4 | 80 | 0,60 | 4,50 | 6.700 | 41 |
| C_5 | 78 | 0,60 | 4,40 | 6.500 | 43 |
| C_6 | 67 | 1,00 | 3,90 | 6.500 | 45 |
| C_7 | 65 | 0,80 | 4,20 | 7.210 | 43 |
| C_8 | 75 | 0,70 | 4,40 | 6.530 | 48 |
| C_9 | 82 | 0,60 | 4,50 | 5.340 | 50 |
| C_{10} | 55 | 0,90 | 4,50 | 6.510 | 56 |
| C_{11} | 60 | 1,00 | 4,40 | 5.200 | 51 |
| C_{12} | 65 | 1,00 | 4,30 | 6.150 | 54 |

Fonte: (de Moura et al., 2019a).

Na Figura 3 apresenta-se uma pilha com $i = 1, \dots, 20$ e $j = 1, \dots, 5$. Onde i é o número de camadas e j o número de bancadas. Para o desenvolvimento do modelo matemático aproximado, usou-se os dados da camada C_{1j} , que está destacada em cinza. Nesta, observou-se que o comportamento é similar para outras camadas.

Figura 3: Pilha de grãos sólidos.

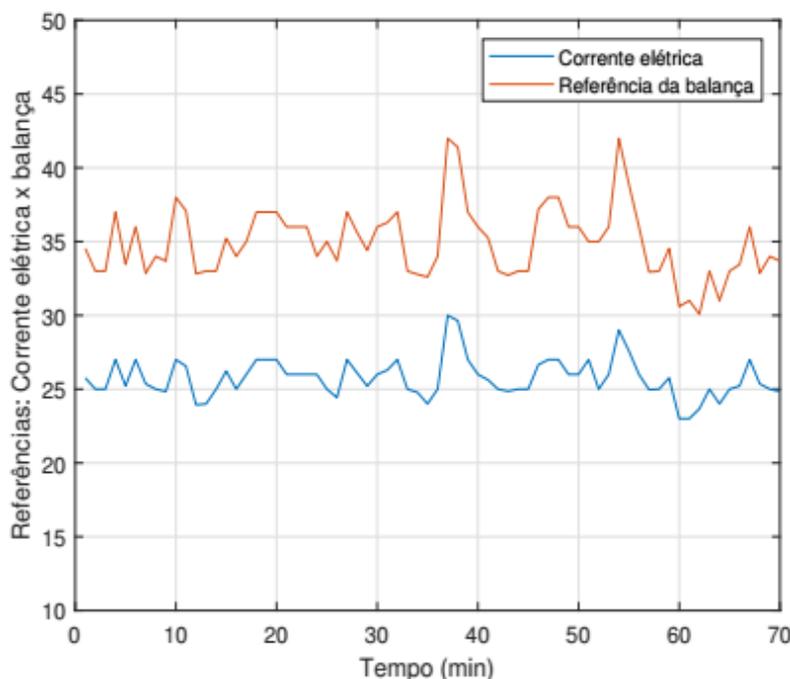


Fonte: Adaptação (de Moura et al., 2019a).

O modelo matemático aproximado é concebido por meio do comportamento da referência da intensidade média da corrente elétrica do motor da RC em comparação com a carga medida pela balança dinâmica, onde constatou-se uma similaridade muito grande entre esses eventos. Como a balança é localizada em torno de 30 metros da RC, a decisão não pode ser tomada pelos dados da balança, pois, caso isso acontecesse, a decisão poderia ser tomada no tempo inadequado. Com isso optou-se por desenvolver uma balança virtual com a referência da corrente elétrica do motor da RC e ajustada pela referência da balança. Visto que, a RC é o dispositivo que faz a retomada do material. Na figura 4, ilustra-se o comportamento da referência da corrente elétrica do motor da RC com o com-

portamento da referência da balança. Onde, pode-se observar a semelhança entre os tais comportamentos.

Figura 4: Referências da corrente elétrica do motor da roda de caçamba x fluxo de sólidos a granéis medido pela balança dinâmica.



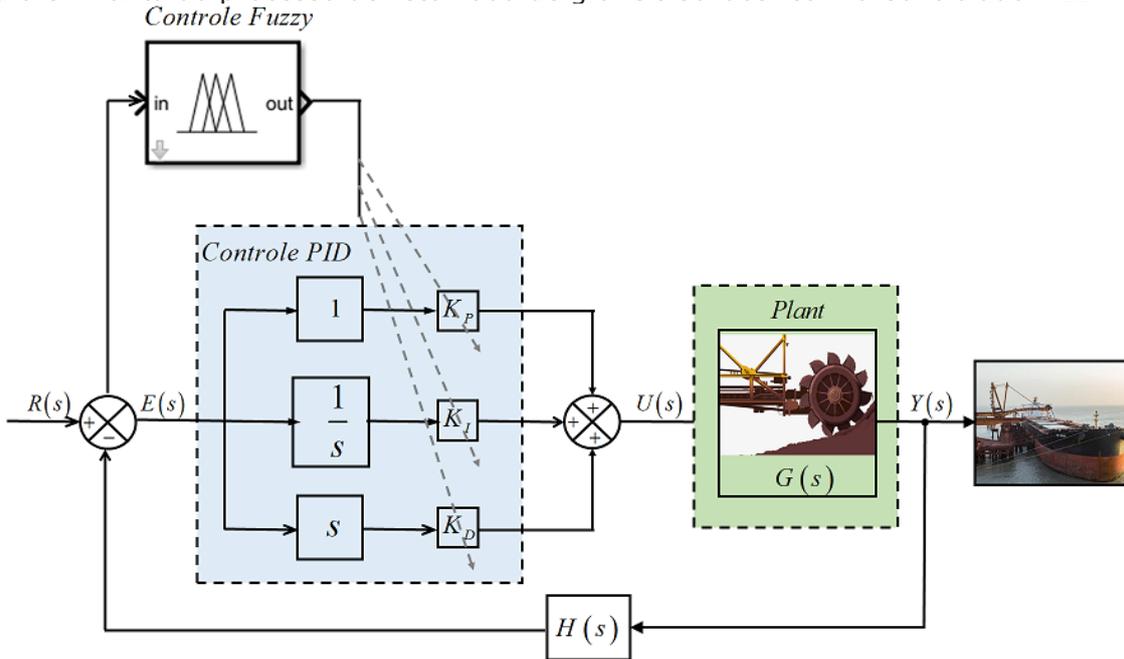
O modelo da planta é concebido, primeiro em espaço de estado, usando-se o método de subespaço (Mínimos Quadrados) e do algoritmo de busca *Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification* (N4SID) (OVERSCHEE; MOOR, 2012) e (OVERSCHEE, 1996). São definidas como variáveis de estado $X(s)$, sendo x_1 a intensidade da corrente elétrica (I) do motor da RC, x_2 o tamanho do passo de translação (P), x_3 a carga medida pela balança, que é igual a $Ym(s)$ e $Y(s)$ a saída da planta (MOURA et al., 2019a) e (MOURA et al., 2019b). O modelo em função de transferência foi obtido por meio do *software MATLAB* e é dado por

$$G^{RP}(s) = \frac{0,1812s + 0,0871}{s^3 + 0,3553s^2 + 0,1117s + 0,01567} \quad (1)$$

3. MODELO DO CONTROLADOR PID-FUZZY

A proposta deste trabalho é adaptar incrementos nos ganhos: proporcional e derivativo no modelo PID-Fuzzy proposto por Zhao e Tomizuka (Zhao et al., 1993) para o processo operacional de RP, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Planta do processo de retomada de granéis sólidos com o Controlador PID-Fuzzy.

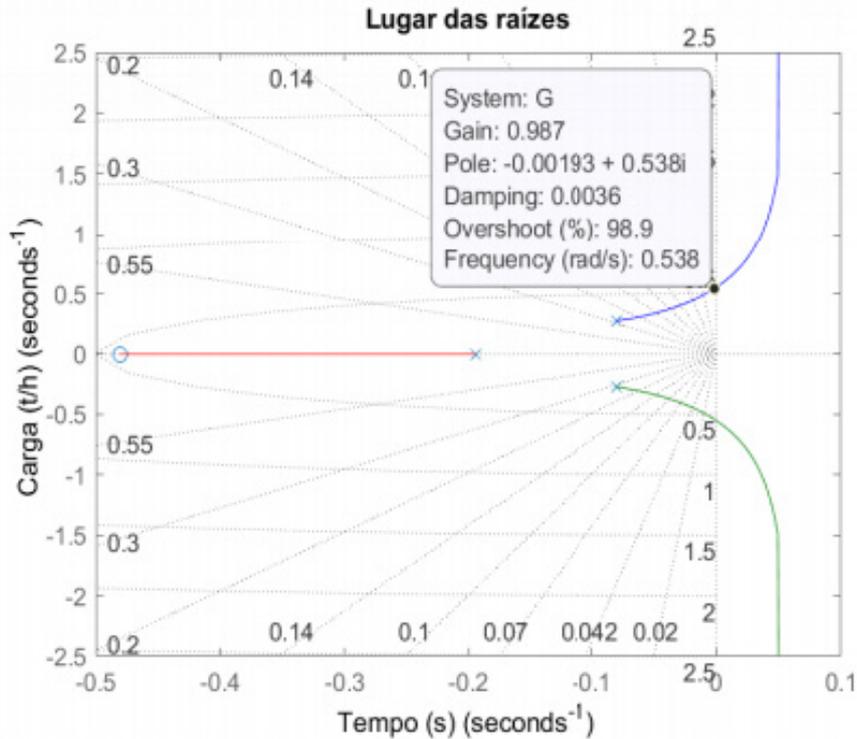


O sistema de controle utiliza um sistema baseado em regras *fuzzy* para a sintonia do controlador PID por meio do agendamento de ganhos do vetor K^{pid} . O sistema *fuzzy* assume que K_p e K_d estão em intervalos prescritos em $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ e $[K_{dmin}, K_{dmax}]$, respectivamente. As entradas do controlador PID-Fuzzy são: o erro $e(t)$ e sua derivada $\dot{e}(t)$ e as saídas são K'_p , K'_d e α . Sendo K'_p e K'_d os ganhos normalizados num intervalo de 0 a 1 por meio de uma transformação linear e α é um parâmetro utilizado para o cálculo do ganho K_i .

2.2 Cálculo dos ganhos do vetor K_{ZN}^{pid} pelo segundo método de Ziegler-Nichols

Os parâmetros de ganhos do vetor K_{ZN}^{pid} , determinados pelo segundo método do *Ziegler-Nichols* com base no ganho crítico (K_{cr}) e frequência de oscilações críticas (w_{cr}) são obtidos pelo gráfico do lugar das raízes (Ogata, K., 2009), conforme Figura 6.

Figura 6: Lugar das raízes associada com a Eq. (1)



Onde $K_{cr} = 0,987$, $w_{cr} = 0,538$ e $P_{cr} = \frac{2\pi}{w_{cr}} = \frac{2 \times 3,1416}{0,538} = 11,6788$, aplicando-se do segundo método de Ziegler-Nichols, conforme a tabela abaixo:

Tabela 2: Regra de ajuste pelo segundo método de Ziegler-Nichols com base no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} .

| Tipo | K_p | T_i | T_d |
|------|---------------|---------------|----------------|
| P | 0,5 K_{cr} | ∞ | 0 |
| PI | 0,45 K_{cr} | $1/1,2P_{cr}$ | 0 |
| PID | 0,6 K_{cr} | 0,5 P_{cr} | 0,125 P_{cr} |

Fonte: Ogata, K. (2009)

$$K_p = 0,6 \times K_{cr} = 0,6 \times 0,987 = 0,5922,$$

$$T_i = 0,5 \times P_{cr} = 0,5 \times 11,6788 = 5,8394 \Rightarrow K_i = \frac{0,5922}{5,8394} = 0,1014,$$

$$T_d = 0,125 \times P_{cr} = 0,125 \times 11,6788 = 1,4599 \Rightarrow K_d = K_p \times T_d = 0,5922 \times 1,4599 = 0,8646.$$

2.3 Formulação Matemática dos Ganhos do Vetor K_{Fuzzy}^{pid}

Para determinar os valores numéricos de K'_p e K'_d , utilizou-se dos valores dos ganhos do vetor K^{pid} determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* apresentados na subseção anterior. As fórmulas para determinar-se K'_p e K'_d são dadas por

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p_{\min}}}{K_{p_{\max}} - K_{p_{\min}}}, \quad (2)$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d_{\min}}}{K_{d_{\max}} - K_{d_{\min}}}. \quad (3)$$

No projeto PID-Fuzzy, os parâmetros do PID são determinados com base no erro atual $e(k)$ e a diferença do erro $\Delta e(k)$. A constante de tempo integral é determinada com referência à constante de tempo de derivação, que é dada por

$$T_i = \alpha T_d \quad (4)$$

e o ganho integral é obtido por

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d}. \quad (5)$$

Uma vez que K_p , K_d e α são obtidos, os parâmetros do controlador PID são calculados a partir das seguintes equações

$$K_p = (K_{p_{\min}} - K_{p_{\max}}) K'_p + K_{p_{\min}} \Rightarrow K'_p = \frac{-K_{p_{\min}}}{K_{p_{\min}} - K_{p_{\max}}}, \quad (6)$$

$$K_d = (K_{d_{\min}} - K_{d_{\max}}) K'_d + K_{d_{\min}} \Rightarrow K'_d = \frac{-K_{d_{\min}}}{K_{d_{\min}} - K_{d_{\max}}}. \quad (7)$$

Com base em um extenso estudo de simulação em vários processos apresentados em (Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S., 1993), chegou-se a uma regra geral para determinar-se o intervalo de K_p e o range de K_d apresentado na tabela abaixo

Tabela 3: Parâmetros para cálculo de K_p e K_d .

| $K_{p_{\min}}$ | $K_{p_{\max}}$ | $K_{d_{\min}}$ | $K_{d_{\max}}$ |
|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| $0,32K_{cr}$ | $0,6K_{cr}$ | $0,08K_{cr}P_{cr}$ | $0,15K_{cr}P_{cr}$ |

Fonte: Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993).

2.4 Cálculo dos parâmetros de ganhos do vetor K_{Fuzzy}^{pid}

Os valores numéricos de $K_{P_{min}}$ e $K_{P_{max}}$; $K_{d_{min}}$ e $K_{d_{max}}$ são obtidos por meio da Tabela 3.

$$K_{P_{min}} = 0,32 \times K_{cr} = 0,32 \times 0,987 = 0,3158 ,$$

$$K_{P_{max}} = 0,6 \times K_{cr} = 0,6 \times 0,987 = 0,5922 ,$$

$$K_{d_{min}} = 0,08 \times K_{cr} P_{cr} = 0,08 \times 0,987 \times 11,6788 = 0,9222 ,$$

$$K_{d_{max}} = 0,15 \times K_{cr} P_{cr} = 0,15 \times 0,987 \times 11,6788 = 1,7290 .$$

Substituindo os valores numéricos nas Eqs. (6) e (7), encontra-se os valores de K'_p e K'_d

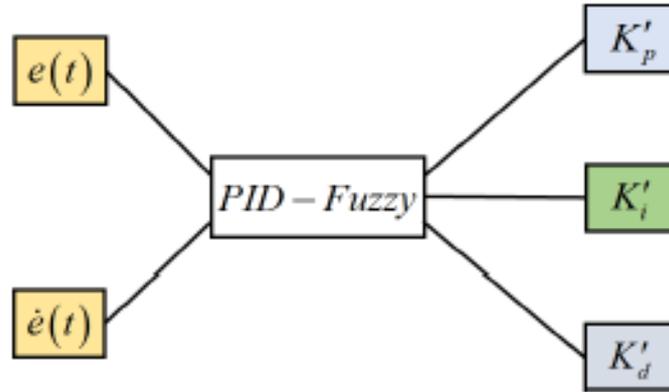
$$K'_p = \frac{-0,3158}{(0,3158 - 0,5922)} = 1,1425 ,$$

$$K'_d = \frac{-0,9222}{(0,9222 - 1,7290)} = 1,1428 .$$

Os parâmetros de ganhos do vetor K_{Fuzzy}^{pid} (K'_p , K'_d e K'_i) são determinados a partir de um conjunto de regras *fuzzy* e que são os novos parâmetros de ganhos do vetor K^{pid} , que são ajustados *online* nos intervalos prescritos de $K_{P_{min}}$ e $K_{P_{max}}$; $K_{d_{min}}$ e $K_{d_{max}}$. Porém, o K'_i é ajustado *online*, também, por meio dos valores atribuídos a α (Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S., 1993).

Na Figura 2, ilustra-se a estrutura do projeto de lógica *fuzzy* para lidar com o problema de controle operacional de RP. O projeto de lógica *fuzzy* consiste em um sistema de inferência *fuzzy* do tipo *Mamdani* com duas entradas, que são: o erro $e(t)$ e sua derivada $\dot{e}(t)$ e três saídas, que são: K'_p , K'_d e K'_i , estes são os parâmetros *online* do controlador PID. Uma vez que K'_p e K'_d são obtidos das Eqs. (1) e (2).

Figura 2: Projeto de lógica fuzzy do processo operacional de VVs.



O escalonamento dos ganhos do vetor K^{pid} , para K_p e K_d são guiados pelas regras da Tabela 2, enquanto K_i é obtido da Eq. (4) e obbedece as regras da Tabela 3. Onde G é grande, M é médio e P é pequeno. Sendo as funções de pertinências NP: negativo pequeno, NM: negativo médio, NG: negativo grande, PP: positivo pequeno, PM: positivo médio, PG: positivo grande.

Tabela 2: Regras de sintonia para saídas K_p e K_d das entradas $e(t)$ e $\dot{e}(t)$.

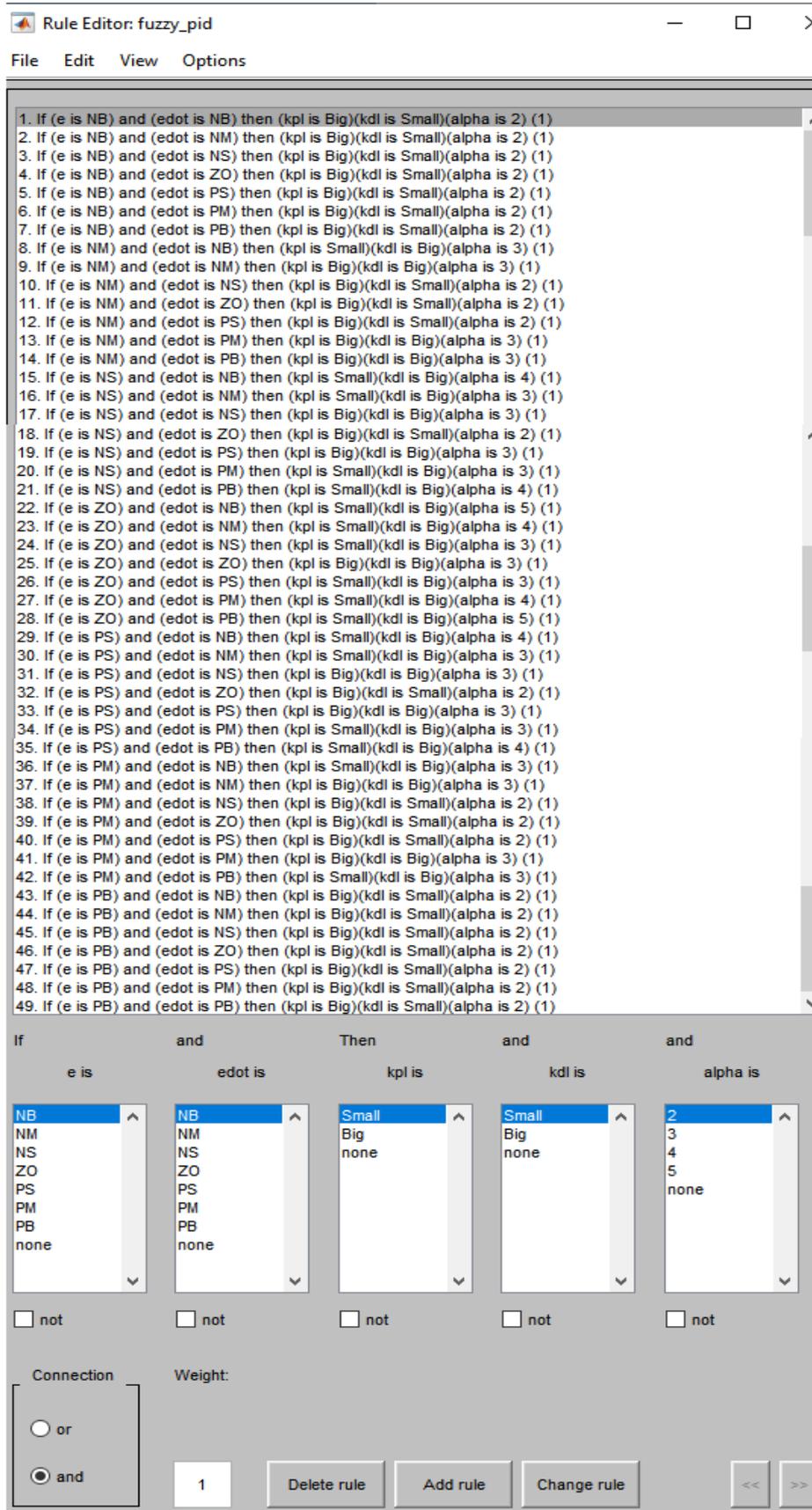
| $e(t) \backslash \dot{e}(t)$ | NG | NM | NP | Z0 | PP | PM | PG |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| NG | G/P |
| NM | P/G | G/G | G/P | G/P | G/P | G/G | P/G |
| NP | P/G | P/G | G/G | G/P | G/G | P/G | P/G |
| Z0 | P/G | P/G | P/G | G/P | P/g | P/G | P/G |
| PP | P/G | P/G | G/G | G/P | G/G | P/G | P/G |
| PM | P/G | G/G | G/P | G/P | G/P | G/G | P/G |
| PG | G/P | G/P | G/P | G/P | G/P | G/G | G/G |

Tabela 3: Regras de ajuste para α das entradas $e(t)$ e $\dot{e}(t)$.

| $e(t) \backslash \dot{e}(t)$ | NG | NM | NP | Z0 | PP | PM | PG |
|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NG | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| NM | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| NP | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| Z0 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 |
| PP | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| PM | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| PG | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

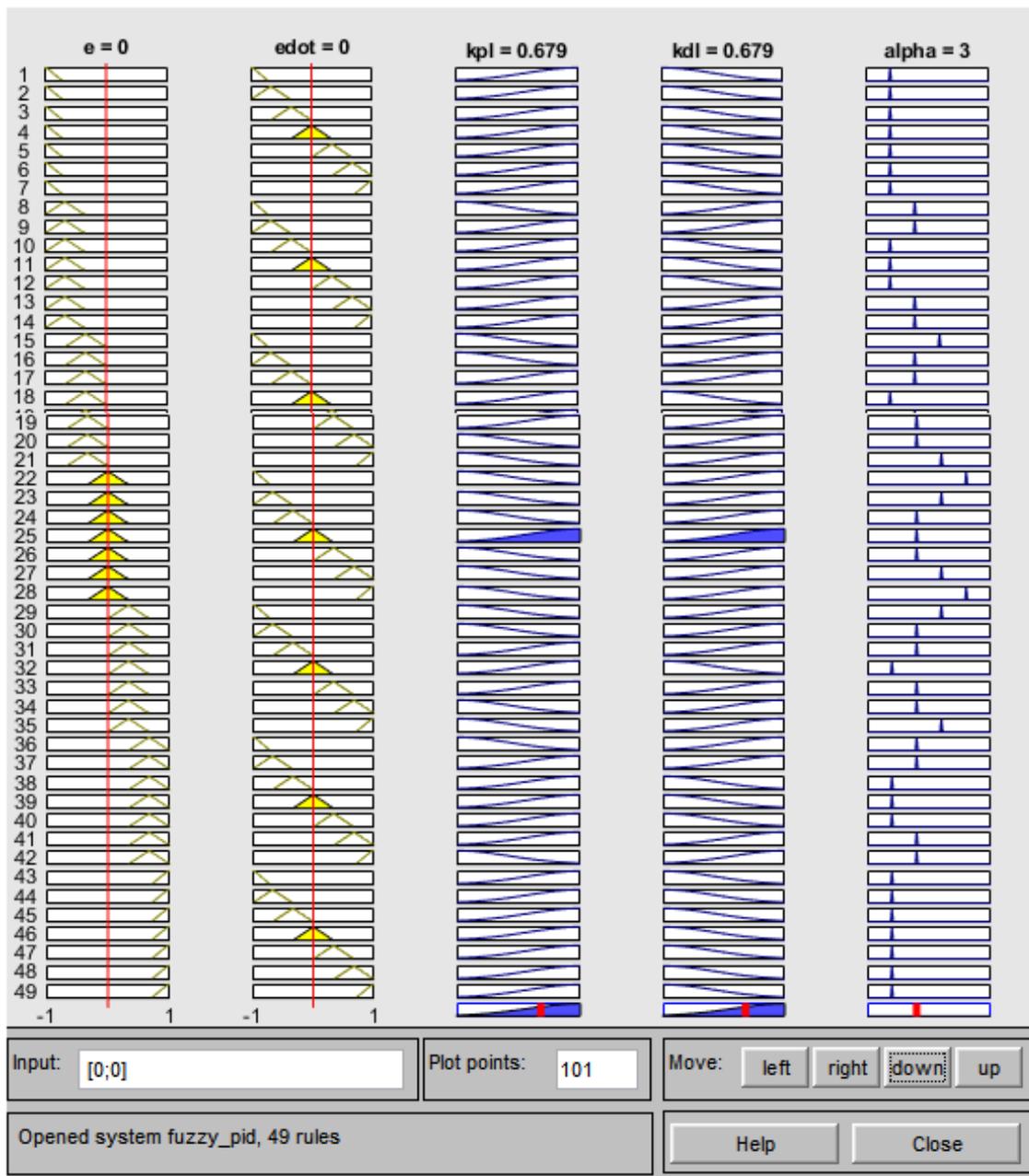
O controlador PID *fuzzy* apresenta 7 termos linguísticos, onde são utilizadas 49 regras, conforme Figura 3. A quantidade de regras é obtida, elevando-se o número de termos linguísticos ao quadrado.

Figura 3: Conjunto de regras do sistema *fuzzy*.



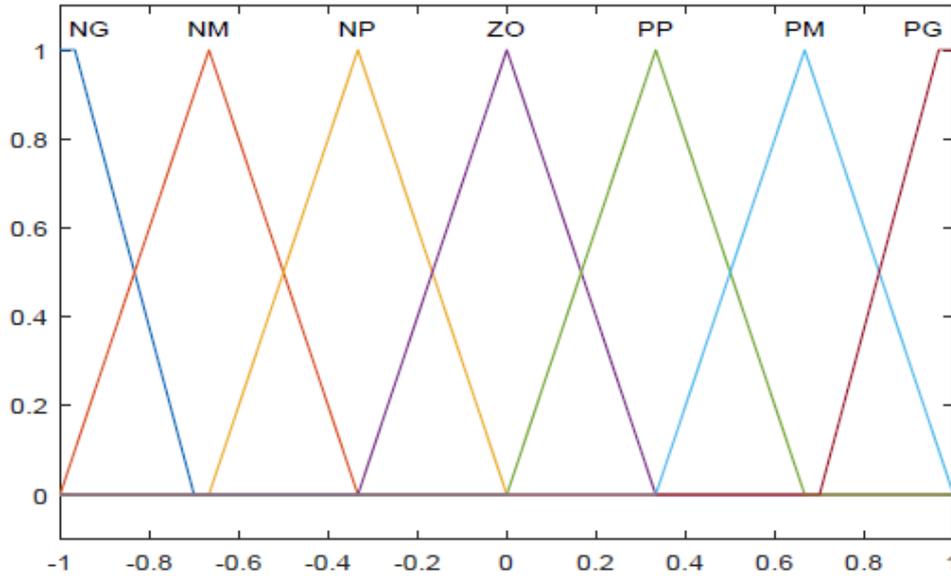
Na figura 4, observar a ativação das regras, com isso, pode-se avaliar e desativar as regras que não estão impactando no resultado final, para reduzir o tempo de reposta do sistema fuzzy. No caso do controlador PID-Fuzzy, optou-se por deixar todas as regras ativadas para efeito didático, mesmo as que não estão influenciando no resultado do sistema, porque não afetou o tempo de resposta do controlador proposto.

Figura 4: Visualizador das regras do sistema fuzzy.



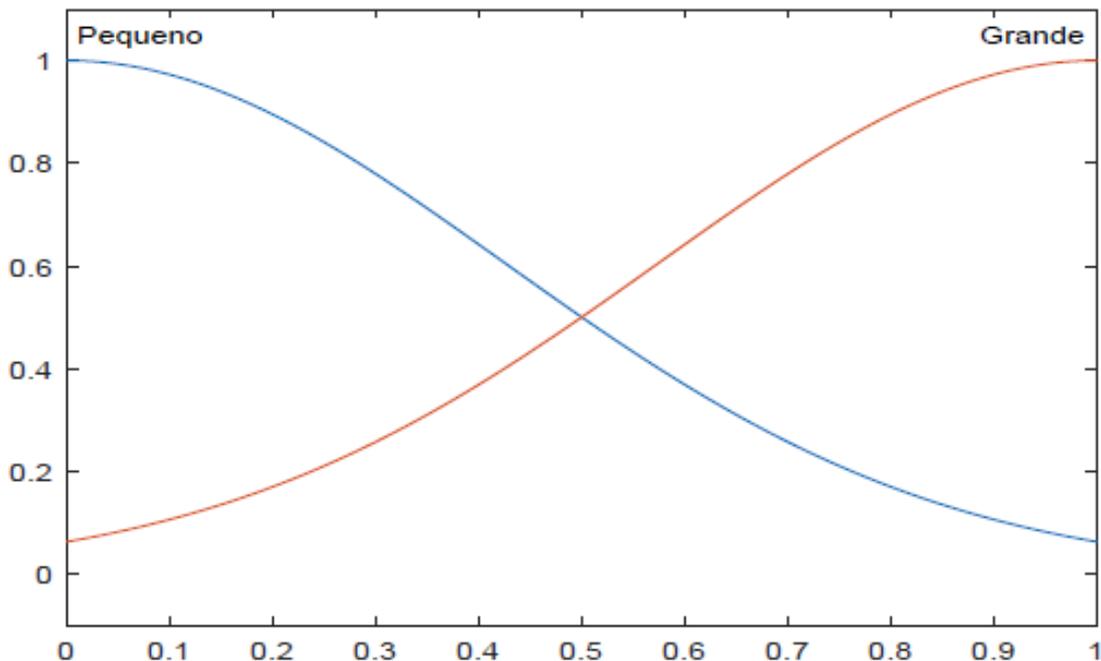
As funções de pertinências são implementadas com o operador mínimo, e o método de defuzzificação adotado foi o método do centro de gravidade, que assegura uma superfície de controle suave e contínua. As funções de pertinências do erro $e(t)$ e da derivada do $\dot{e}(t)$ são ilustradas na Figura 5. Estas, são triangulares.

Figura 5: Função de pertinência do erro $e(t)$ e da derivada do erro $\dot{e}(t)$.



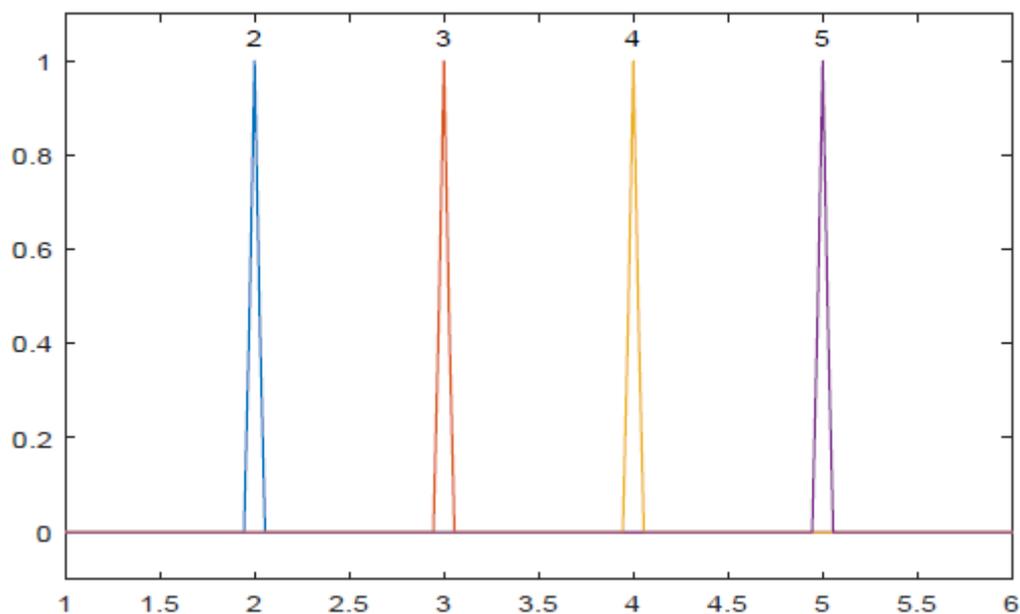
Na Figura 6 apresenta-se as funções de pertinências para os ganhos: proporcional K'_p e derivativo K'_d associada com a Tabela 2. Essas, São Gaussianas, como não são lineares, esta é a melhor topologia para representá-las.

Figura 6: Função de Pertinência dos ganhos proporcional K'_p e derivativo K'_d .



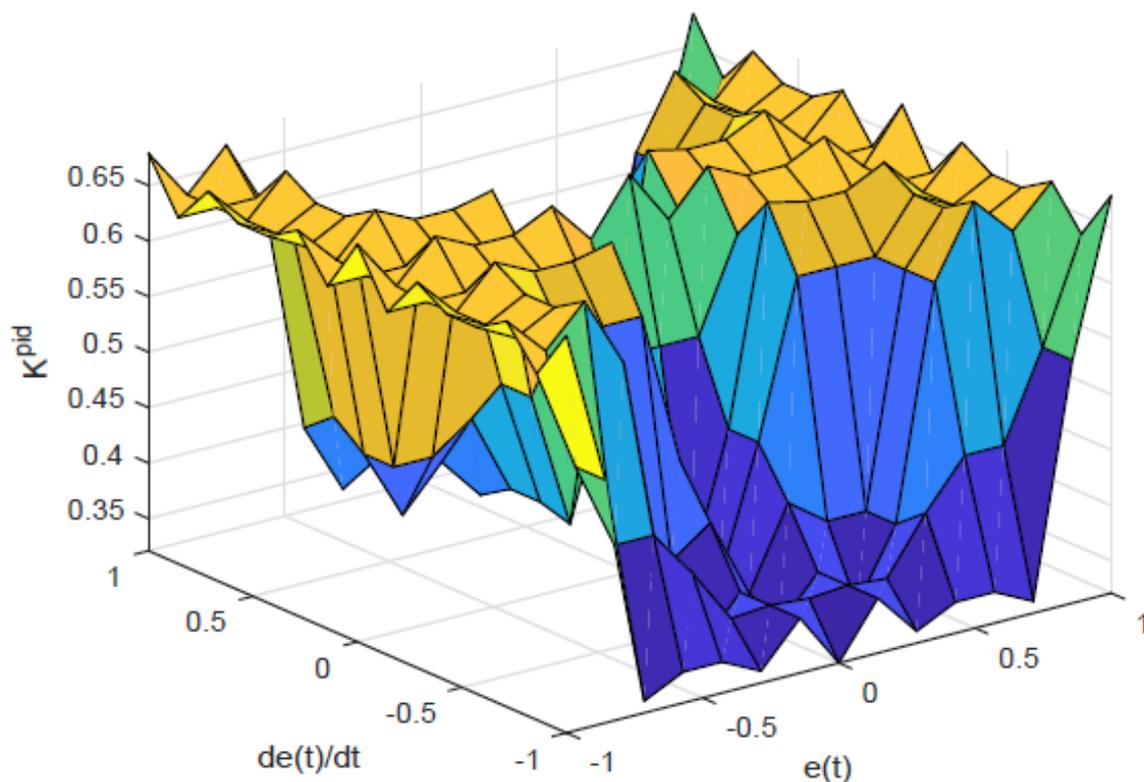
Na Figura 7 apresenta-se as funções de pertinências da variável α , a forma mais apropriada para representá-las é do tipo singleton, uma vez que são constantes inteiras, de acordo com Table 3.

Figura 7: Função de pertinência da constante α .



O comportamento dos ganhos do vetor K^{pid} em relação a sua dependência com o erro $e(t)$ e sua derivada $\dot{e}(t)$ está representado na Figura 8. Onde K_p , K_i e K_d são as saídas do projeto do sistema *fuzzy*. Como K_i e K_d dependem de K_p , logo o comportamento da superfície é irregular, pois se alterar o valor de uma das variáveis, todas são impactadas.

Figura 8: Comportamento de $K^{pid} \times e(t) \times \dot{e}(t)$.



4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

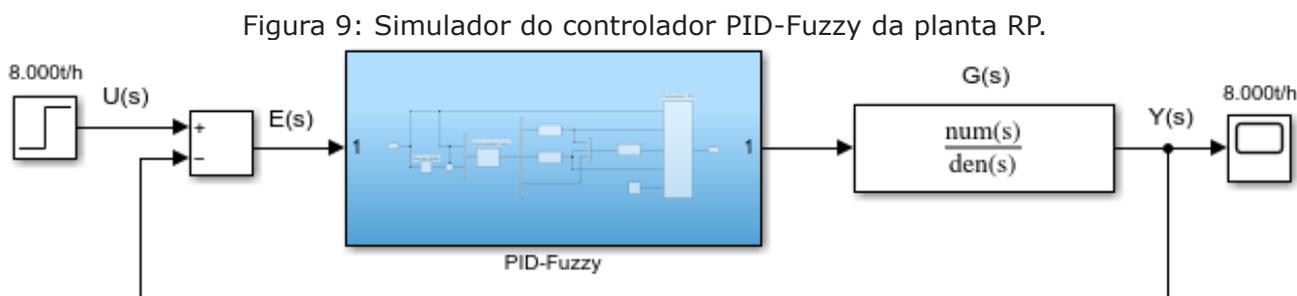
Nesta Seção são apresentados os resultados simulados no *software MATLAB/SIMULINK* com base em dados reais coletados da planta.

4.1 Setup da Simulação

O projeto do controlador PID-Fuzzy, utiliza os ganhos do vetor K^{pid} determinados pelo segundo método de *Ziegler-Nichols* e em seguida, ajusta esses ganhos *online* por regras *fuzzy* com adição intuitiva de incrementos nos ganhos K_p e K_d para ajustar-se as variação paramétrica da dinâmica da planta. Isto é, o controlador PID-Fuzzy faz a sintonia fina dos parâmetros de ganhos do vetor K^{pid} .

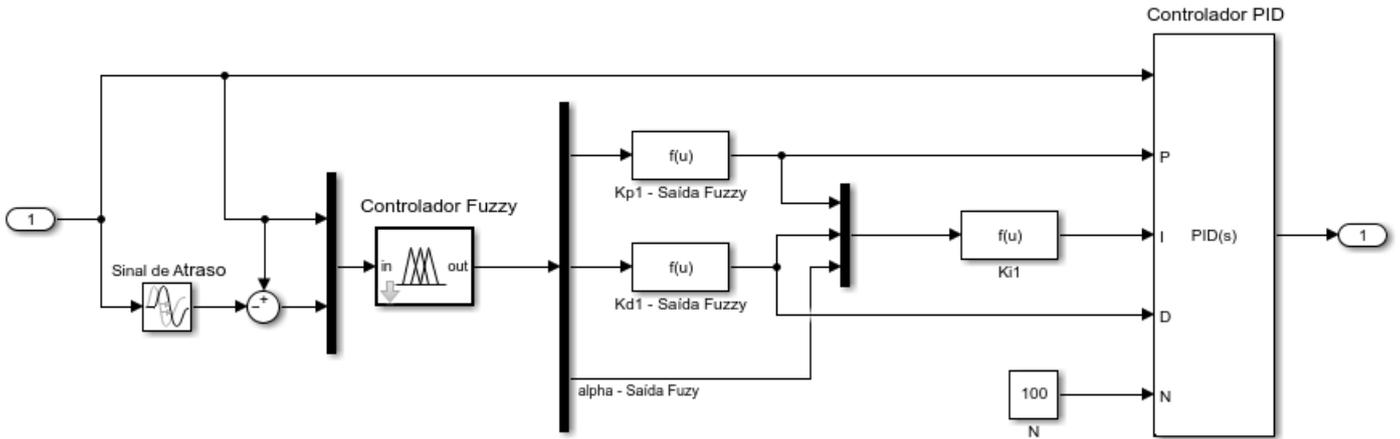
4.2 Simuladores

Foi desenvolvido um simulador PID-Fuzzy no *software MATLAB/SIMULINK*, para efeitos de avaliação do método ajustado por regras *fuzzy*. Na Figura 9 apresenta-se o simulador do controlador PID-Fuzzy.



Na Figura 10, apresenta-se o bloco do sistema PID-Fuzzy expandido apresentado na Figura 8. Nesta observa-se que o parâmetro do ganho K_i é impactado pelos parâmetros dos ganhos K_p e K_d , conforme Eq. (5)

Figura 10: Bloco do controlador PID-Fuzzy expandido.



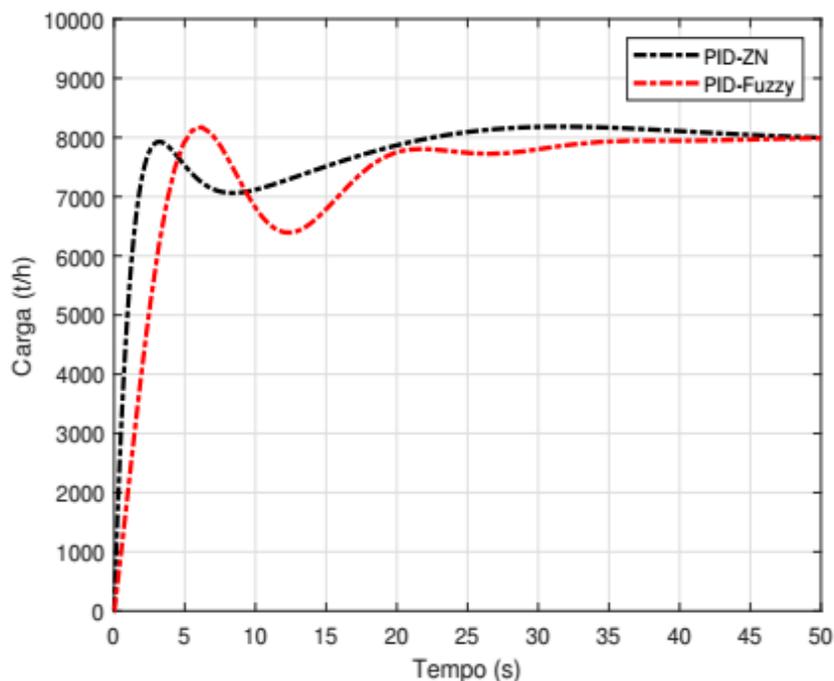
5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS

Os resultados da planta apresentada na Seção 2 são avaliados por meio da função de transferências dada na Eq. (1).

5.1 Resposta ao degrau unitário

Na Figura 11, ilustra-se o comportamento em respeito ao objetivo de controle dos controladores: PID-ZN e PID-Fuzzy. Nesta, observa-se que o controlador PID-ZN obtém melhor desempenho em respeito ao objetivo de controle em comparação com o PID-Fuzzy.

Figura 11: Resposta ao degrau unitário para os controladores PID-ZN e PID-Fuzzy relacionados com a Eq. (1).



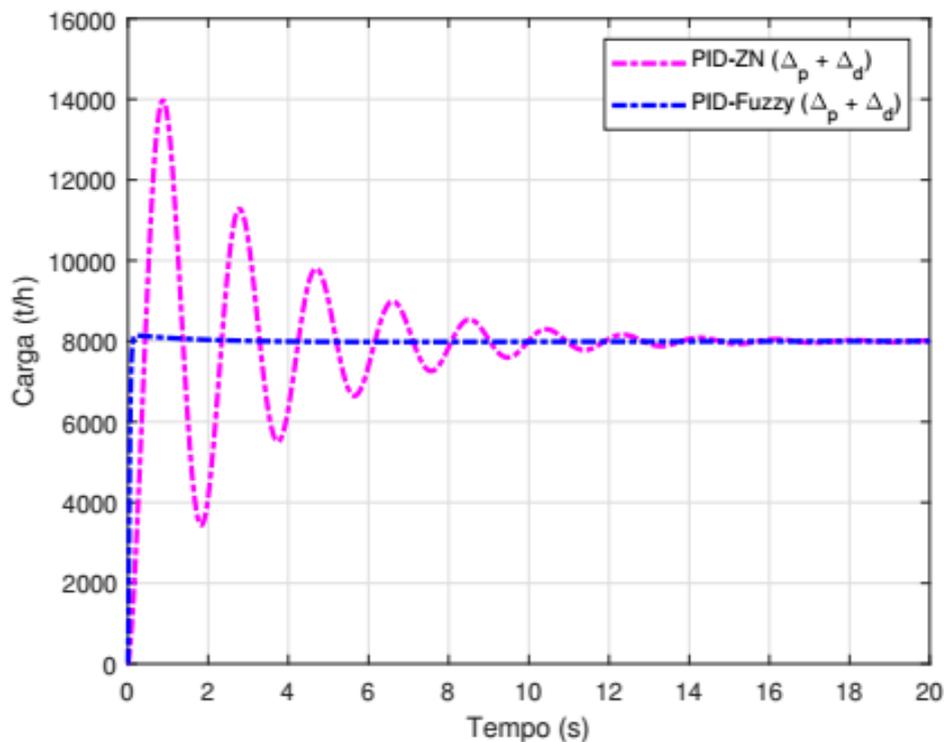
No intuito de melhorar o desempenho do controlador PID-Fuzzy, nas Eqs. (2) e (3) são adicionados incrementos intuitivos Δ_p e Δ_d aos ganhos K_p e K_d , respectivamente, As Eqs. (2) e (3) são relacionadas ao controlador PID-Fuzzy, que depois dos incrementos são apresentadas da seguinte forma:

$$K_p = ((K_{p_{\min}} - K_{p_{\max}}) K'_p + K_{p_{\min}}) \Delta_p, \quad (8)$$

$$K_d = ((K_{d_{\min}} - K_{d_{\max}}) K'_d + K_{d_{\min}}) \Delta_d. \quad (9)$$

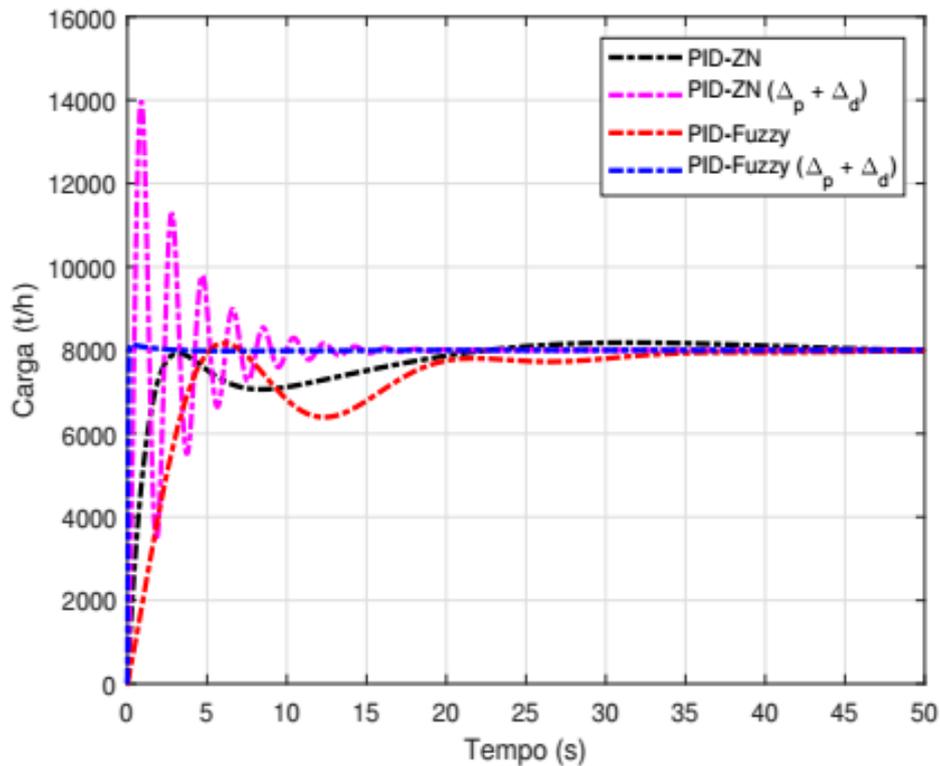
Onde $\Delta_p = \Delta_d = 100$. Esses mesmos valores são adicionados aos ganhos K_p e K_d do controlador PID-ZN, para efeitos de avaliação dos resultados do controlador proposto e do controlador PID-ZN. Na Figura 12, mostra-se o desempenho dos dois controladores com os incrementos Δ_p e Δ_d adicionados. Obseva-se, que os incrementos Δ_p e Δ_d causam mais impactos positivos, no controlador PID-Fuzzy obtendo melhor desempenho em respeito ao objetivo de controle e mantendo-se na trajetória alcançada.

Figura 12: Resposta ao degrau unitário para os controladores PID-ZN e PID-Fuzzy relacionados com a Eq. (1).



Para melhor compreensão das Figuras 11-112. Estas, são apresentadas em uma única figura, conforme Figura 13. Nesta, pode-se observar o desempenho individual dos controladores PID-ZN e PID-Fuzzy com e sem os inrementos Δ_p e Δ_d aos ganhos K_p e K_d , respectivamente.

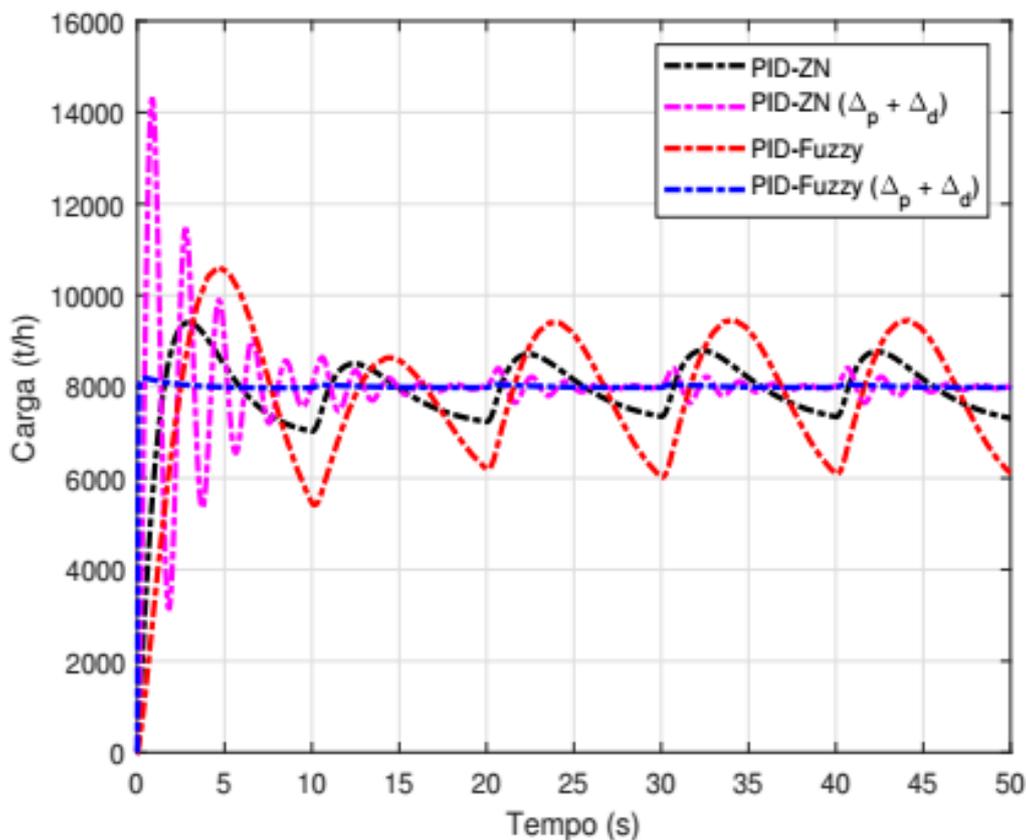
Figura 13: Resposta ao degrau unitário para os controladores PID-ZN, PID-Fuzzy relacionados com a Eqs. (1), (8) e (9)



5.2 Rejeição às Perturbações

No processo analisado, são inseridos sinais de perturbações de 250% do valor de referência para avaliar a rejeição às perturbações nas variações paramétricas nas dinâmicas das plantas. Observa-se, que os controladores PID-ZN e PID-Fuzzy antes dos incrementos adicionados e o PID-ZN ($\Delta_p + \Delta_d$) depois dos incrementos adicionados, oscilaram muito, enquanto o PID-Fuzzy ($\Delta_p + \Delta_d$) depois dos incrementos adicionados, resistiu essas perturbações, de forma que, o seu desempenho é satisfatório, com pequenas oscilações, atendendo as especificações de projetos, mantendo-se em torno do ponto de referência, conforme mostra-se na Figura 12. Esta está relacionada com a Figura 11, com sinais de perturbações inseridos.

Figura 12: Resposta ao degrau unitário dos controladores PID-ZN e PID-Fuzzy antes e depois dos incrementos, com sinal de 250% de perturbação no valor de referência



6. CONCLUSÃO

No método do controlador PID-Fuzzy sem os incrementos Δ_p e Δ_d nos ganhos K_p e K_d apresentado neste capítulo, apresentou bom desempenho, porém, o controlador PID-ZN, obtém uma ligeira vantagem. No entanto, o controlador PID-Fuzzy com os incrementos Δ_p e Δ_d nos ganhos K_p e K_d , obtém desempenho muito superior aos do controlador PID-ZN. Logo, a contribuição científica do método proposto está na adição dos incrementos nos parâmetros de ganhos dos ganhos K_p e K_d . Portanto, de acordo com os resultados e análises dos experimentos simulados, o controlador PID baseado em lógica fuzzy com incrementos Δ_p e Δ_d nos ganhos K_p e K_d , para o controle de vazão em processos de retomada de granéis sólidos é aprovado e obtém o melhor desempenho em comparação com o controlador PID-ZN sintonizado pelo segundo método de *Ziegler-Nichols*, tanto em respeito a seguir a referência com e sem sinal de perturbação na planta.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) por viabilizarem esta pesquisa, . Agradecemos especialmente



à FAPEMA por incentivar a pesquisa e a infraestrutura no Estado do Maranhão e por fim agradecemos à CAPES e ao CNPq por promover e apoiar os estudos avançados que contribuíram para desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- de Moura, J. P., Rego, P. H. M., & da Fonseca Neto, J. V. (2019)a. Online discrete-time LQR controller design with integral action for bulk Bucket Wheel Reclaimer operational processes via Action-Dependent Heuristic Dynamic Programming. *ISA transactions*, 90, 294-310.
- De moura, José Pinheiro, Bruno França Coelho e João Viana da Fonseca Neto. "Controlador pid para o controle de vazão de sólidos em sistemas industriais com aplicação em viradores de vagões." Congresso Brasileiro de Automática-CBA. vol. 1. no. 1. 2019b.
- Moura, José Pinheiro de. "Metodologias de sintonia online e ótima para controladores com ações PID baseadas em modelos Neuro-Fuzzy e guiadas por dados de sensores (Data-Driven Ótima)": Tese de Doutorado – Orientador: João Viana da Fonseca Neto, (2019).
- de Moura, J. P., da Fonseca Neto, J. V., & Rêgo, P. H. M. (2019)c. A Neuro-Fuzzy Model for Online Optimal Tuning of PID Controllers in Industrial System Applications to the Mining Sector. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(8), 1864-1877.
- de Moura, José Pinheiro, and João Viana da Fonseca Neto. "Fuzzy controller in the cargo control wagons dump." 2016 IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS). IEEE, 2016.
- Chen, C.-S. and Chen, H.-H. (2009). Robust adaptive neural-fuzzy-network control for the synchronization of uncertain chaotic systems, *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 10(3): 1466–1479.
- Chen, D., Zhao, W., Sprott, J. C. and Ma, X. (2013). Application of takagi–sugeno fuzzy model to a class of chaotic synchronization and anti-synchronization, *Nonlinear Dynamics* 73(3): 1495–1505.
- Azar, A. T. and Vaidyanathan, S. (2015). *Chaos modeling and control systems design*, Vol. 581, Springer.
- Chen, D., Zhao, W., Sprott, J. C. and Ma, X. (2013). Application of takagi–sugeno fuzzy model to a class of chaotic synchronization and anti-synchronization, *Nonlinear Dynamics* 73(3): 1495–1505.
- Cohen, G. (1953). Theoretical consideration of retarded control, *Trans. Asme* 75: 827–834. de Moura, J. P. and da Fonseca Neto, J. V. (2016). Fuzzy controller in the cargo control wagons dump, *Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, 2016 IEEE Conference on, IEEE, pp. 10–16.
- Lin, T.-C., Lee, T.-Y. and Balas, V. E. (2011). Adaptive fuzzy sliding mode control for synchronization of uncertain fractional order chaotic systems, *Chaos, Solitons & Fractals* 44(10): 791– 801.
- Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of pid controllers, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23(5): 1392–1398.
- Chen, C.-S. and Chen, H.-H. (2009). Robust adaptive neural-fuzzy-network control for the synchronization of uncertain chaotic systems, *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 10(3): 1466–1479.
- Murrill, P. W. (1967). *Automatic control of processes*, International Textbook Company.
- Parr, E. A. (1998). *Industrial control handbook*, Industrial Press Inc.
- Padula, F. and Visioli, A. (2011). Tuning rules for optimal pid and fractional-order pid controllers, *Journal of process control* 21(1): 69–81.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering (5th Edition)*, Prentice-Hall electrical engineering series. Instrumentation and controls series, 5th edn, Prentice Hall.
- Zhao, Z.-Y., Tomizuka, M. and Isaka, S. (1993). Fuzzy gain scheduling of pid controllers, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23(5): 1392–1398.

AUTORES¹

1 Currículo vide Lattes / LinkedIn

Alexandre Amado de Moura

Possui bacharelado em Engenharia Civil (2016), especialização e mestrado (2018) e iniciou o doutorado em (2019). Desenvolve pesquisa na área de resíduo industrial. Possui interesse na proteção da propriedade intelectual e no desenvolvimento de pesquisa aplicada em inovação tecnológica.

Alexandre Alves Dalmolim

Engenheiro Mecatrônico, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

Ana Paula Lima Pacheco

Professora do departamento de engenharia química (UFPE) desde janeiro de 2012. Atualmente Adjunto 2, graduada em Engenharia Química pela Universidade Católica de Pernambuco (1992) e em Licenciatura Plena em Química pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (1996); mestrado (1999) e doutorado (2003) em Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Foi professora substituta no Colégio de Aplicação (UFPE) e na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), ministrando as disciplinas de química geral, orgânica, inorgânica e físico-química. Desenvolvi pesquisa no Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN/CNEN) nas áreas de radioisótopos (produção de radiofármacos) e dosimetria das radiações ionizantes em baixas doses (metrologia). Tenho experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Aplicações Industriais de Radioisótopos, principalmente nos seguintes temas: polímeros convencionais e condutores, dosimetria, radiação gama e x, polianilina, Tomografia por Emissão de Pósitrons (PET), radiofármacos (FDG), radioresistência em sistemas poliméricos. Atuei na TissueBond Adesivos Biológicos com gerente nas área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), controle de qualidade e garantia da qualidade, onde desenvolvi pesquisa nas áreas de radioresistência e radioesterilização de polímeros, liofilização de proteínas, e determinação de resíduos orgânicos e inorgânicos em kits para produção de cola cirúrgica.

Aurian Moura de Lira

Graduada, Universidade federal de Pernambuco, Recife-PE.

Ayssi do Carmo Oliveira

Mestre em Astrofísica, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, Marabá - PA. Atua principalmente nos seguintes temas: caracterização de sistemas binários/triplos eclipsantes, busca e caracterização de exoplanetas, ensino de ciências, itinerância.

Bruno França Coelho

Mestre em Automação e Controle de Processos Industriais pela Universidade Federal do Maranhão (2019) e Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Maranhão (2013). Experiência na área de planejamento, manutenção industrial e prototipagem virtual, desenvolvimento de pesquisas na área de Automação e Controle de



Processos Industriais. Além disso, atua como professor/instrutor em cursos técnicos e profissionalizantes há 4 anos.

Caio Guilherme da Silva Moraes

Doutorando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis-SC. Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), onde participou da competição internacional IEEE International Future Energy Challenge (2015), recebendo o prêmio Best Educational Impact em Michigan, EUA. Também possui curso técnico em Eletrotécnica, com ênfase em Controle e Processos Industriais, pela Escola Técnica Estadual (ETEC) de Ilha Solteira. Tem experiência e interesse nas áreas de eletrônica de potência, sistemas de controle e sistemas embarcados, mais especificamente nos temas modelagem dinâmica de conversores CC-CC, inversores conectados à rede e controle digital aplicado a conversores estáticos.

Carlos Eduardo de Souza

Engenheiro mecânico formado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1998), mestre em Engenharia Mecânica também pela UFRGS (2003) e doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo ITA(2013). O doutorado foi realizado na área de aeroelasticidade de asas flexíveis fabricadas em compósitos. Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria, atuando nos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia Aeroespacial e no Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil. Trabalhou como pesquisador do Instituto de Aeronáutica e Espaço, no Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, em São José dos Campos, SP, entre 2004 e 2012, e na Aeromot Indústria, entre 1997 e 2001. Atuou como pesquisador visitante na Universidade de Michigan em Ann Arbor, entre 2010 e 2011. Tem experiência na área de Engenharia Aeroespacial, com ênfase em Aviões e Foguetes de Sondagem, atuando principalmente nos seguintes temas: análise aeroelástica de asa fixa e rotativa, cargas em voo de aeronaves e foguetes, projeto e análise de cascas laminadas, elementos finitos, otimização estrutural, topológica e de forma, análise estrutural estática e dinâmica e modal de estruturas aeroespaciais.

Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Possui graduação (1996), mestrado (1999) e doutorado (2004) em Engenharia Elétrica, área de concentração Controle & Automação, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, campus de Ilha Solteira, estado de São Paulo, Brasil. Atualmente é Professor Associado da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Foz do Iguaçu, estado do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Otimização, Técnicas de Otimização, Planejamento de Sistemas Elétricos.



Charles Rech

Possui graduação em Engenharia Mecânica (1998/UFRGS). Mestrado em Energia (2001/UFRGS). Doutorado em Fenômenos de Transporte (2010/UFRGS), em análise numérica e experimental do escoamento em motores de combustão interna. Pós-doutorado em energia (UFRGS) atuando na pesquisa de sistemas de recuperação de energia, turbina Tesla. Atualmente é professor adjunto na UFSM Campus Cachoeira do Sul com pesquisa no desenvolvimento de dispositivos de medições mecânicas associado a internet das coisas aplicados a área da saúde. É colaborador de projetos de pesquisa na área da saúde na Universidade Lasalle Canoas e UFRGS. Tem experiência em análise numérica e experimental em sistemas fluido-mecânico, atuando nos temas: instrumentação na área da saúde, internet das coisas, motores de combustão interna, eficiência energética, recuperação de energia, instrumentação mecânica, análise experimental e simulação numérica.

Cristiano Frandalozo Maidana

Possui Graduação (2008), Mestrado (2011) e Doutorado (2015) em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com ênfase na análise de sistemas térmicos, aplicação do processo de combustão enriquecida com oxigênio (OEC) e no desenvolvimento de turbinas de múltiplos discos. Foi professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Regional Integrada (URI), onde lecionou disciplinas das áreas de ciências térmicas e fenômenos de transporte. Atualmente é professor Adjunto A e coordenador do curso de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Cachoeira do Sul.

Diego Tiburcio Fabre

Mestre em Mecatrônica pelo Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC/Florianópolis (2019), possui especialização em Automação Industrial pelo Centro de Tecnologia em Automação e Informática do SENAI/SC (2007) e Psicopedagogia pelo Instituto de Pós-Graduação da Escola Superior de Criciúma - ESUCRI (2010). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais.

Douglas Lucas dos Reis

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Universitário Assis Gurgacz (2013). Foi bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial (DTI) financiado pelo CNPq na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP (2014-2015). Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela Universidade de São Paulo - USP (2018). Atualmente é docente do ensino básico, técnico e tecnológico no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

Elizete de Andrade Amorim

Possui graduação em Matemática pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul(1997), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho(2001), doutorado em Engenharia Elétrica - Ilha Solteira pela Universidade Estadual



Paulista Júlio de Mesquita Filho(2006) e pós-doutorado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho(2007). Atualmente é Revisor de periódico da IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution (1350-2360), Revisor de periódico da Anais do Congresso Brasileiro de Automática e Revisor de periódico da Applied Soft Computing (Print). Tem experiência na área de Matemática. Atuando principalmente nos seguintes temas:Fluxo de Potência Ótimo, Algoritmos Evolutivos, Decomposição do Sistema de Potência, Fluxo de Potência Ótimo Descentralizado, Metaheurísticas e Otimização Multiobjetivo.

Fábio Estelita Silveira Ferreira

Graduado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

Felipe da Silva Morais

Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul. Atualmente no 8º Semestre. Bolsista de monitoria nas disciplinas de Mecânica Geral II e Mecanismos. Bolsista voluntário no projeto de pesquisa Dispositivos de Medições Mecânicas Associado a Internet das Coisas e integrante do grupo de pesquisa IoT Healthcare Solution Group.

Henrique Straioto

Doutorando em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Paranaense (2016), com experiência na área de construção civil; Pós-Graduação "lato sensu" em Engenharia de Segurança do Trabalho em andamento pela EDUCO - Organização Educacional de Cruzeiro do Oeste Ltda (Previsão de conclusão em 2018); Pós-Graduação "stricto sensu" em Engenharia Ambiental, com linha de pesquisa de Saneamento Ambiental, em andamento pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Jaciara Mendonça Mariano

MBA em Logística, Supply Chain e Transportes pelo Instituto de Pós-graduação e Graduação-IPOG, Graduação em Engenharia de Produção pela Faculdade Pitágoras de São Luís e Graduação em Ciências Contábeis pela Faculdade Atenas Maranhense-FAMA.

João Antônio Lima Pacheco

Graduando, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

João Viana da Fonseca Neto

É Professor associado da Universidade Federal do Maranhão. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1986), e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2000). Desenvolveu projetos de P&D em Mode-



lagem e Controle para Indústria de Alumínio do Maranhão, Sistemas Inteligentes para Tomada de Decisão para Descarga e Estocagem de Minérios e para Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Atualmente, desenvolve pesquisa em Inteligência Computacional com enfoque na fusão das abordagens de redes neuronais artificiais, computação evolutiva, lógica fuzzy para identificação e controle de sistemas dinâmicos do mundo real. A sua pesquisa está direcionada em sintonia online e seleção de controladores ótimos para sistemas MIMO. Também desenvolve métodos bayesianos para o treinamento da Recorrência de Riccati em Filtros Estocásticos dos tipos Kalman Padrão, EKF e Unscented. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos Eletrônicos e Retroalimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: modelos baseados em inteligência artificial para sistemas industriais, algoritmos genéticos, sintonia de controladores PID, medição indireta via Filtragem de Kalman, solução neuronal da equação algébrica de Riccati, recuperação inteligente da malha de controle LQR e Programação Dinâmica Aproximada para desenvolvimento de sistemas embarcados que realizam controle ótimo e robusto.

José Pinheiro de Moura

Técnico em Mecânica pela a Escola Técnica Federal do Piauí - IFPIP (1984). Possui Graduação em Química Industrial pela Universidade Federal do Maranhão (1998), Graduação em Licenciatura Plena em Ciências - Química pela Universidade Estadual do Maranhão (2001), Mestrado em Engenharia de Eletricidade - Automação e Controle pela Universidade Federal do Maranhão (2003) e Doutorado em Engenharia de Eletricidade - Automação e Controle pela Universidade Federal do Maranhão (2019). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão e Professor de Química do Ensino Médio SEDUC-MA. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Controles, atuando principalmente nos seguintes temas: inteligência artificial, indústria 4.0, controle fuzzy, redes neurais e sistema especialista, controladores PID, automação industrial, equipamentos portuários, controlador lógico programável, programação dinâmica adaptativa dependente e independente de modelos, etc.

José Roberto Sanches Mantovani

Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) - Campus de Ilha Solteira (1981), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (1987, 1995). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Tem interesse e desenvolve pesquisas nas áreas de Planejamento e Controle de Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Desenvolvimento de modelos matemáticos e aplicação de técnicas meta-heurísticas e de otimização clássica em problemas de planejamento e controle de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Kátia Gualberto Corrêa

Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande-Mato Grosso do Sul.



Kyria Maria Alves da Silva

Engenheira Civil, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, Marabá - PA.

Leonardo Ramos Rodrigues

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES-2003), mestrado na Área de Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA-2008) e doutorado na Área de Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA-2013). Atualmente atua como Docente Permanente no programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia Eletrônica e Computação do ITA. Atua ainda como Tecnologista no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), uma instituição pública de pesquisa subordinada ao DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial). Tem experiência de mais de 10 anos nas áreas de Monitoramento de Sistemas, Detecção de Falhas e Prognóstico de Falhas. Também realiza pesquisas nas áreas de Pesquisa Operacional, Gerenciamento de Estoques, Otimização Combinatória, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquinas.

Lucas Oliveira Lima

Graduação em andamento em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Luigi Galotto Junior

Possui graduação em 2003 e mestrado em 2006 em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e doutorado em 2011 em Eletrônica de Potência e Automação pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Atualmente, é professor adjunto e pesquisador da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). As principais áreas de atuação são: Eletrônica de Potência, Sistemas de Controle e Técnicas de Estatística e Inteligência Artificial Aplicadas. Entre os principais projetos realizados estão: Monitoramento e diagnóstico de sensores, Analisadores de enxofre em gás natural, Metodologia de tolerância à falta em sensores e Conversores para a Geração com Energia Fotovoltaica.

Lygia Maria Policarpio Ferreira

Engenheira de Materiais pela Universidade Federal do Pará (2011), Mestre em Engenharia Mecânica (área de Materiais e Processos de Fabricação) pela Universidade Estadual de Campinas (2013) e Doutora em Engenharia Mecânica (área de Materiais e Processos de Fabricação) pela Universidade Estadual de Campinas (2017). Parte do mestrado foi realizado no Institut Supérieur de Mécanique de Paris-SUPMECA/Paris e parte do doutorado (doutorado sanduíche) foi realizado na SUPMECA/Paris. Atualmente desenvolve pesquisas na área de Materiais e Processos de Fabricação, com foco na fabricação e caracterização de Materiais Compósitos aplicados à Construção Civil; como centro da pesquisa estão materiais reforçados com nanopartículas e materiais reforçados com diferentes agregados (primários e provenientes de reciclagem). Compõe o quadro docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA, ministrando as disciplinas da área de Materiais da grade curricular do referido curso.



Marcelo Fernandes Vieira

Possui graduação em Engenharia Química pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (1995), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (1999), doutorado sandwich em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (2003) e Conselho Superior de Investigação Científica de Madri, Espanha. Pós-doutorado no CSIC- Madrid, dentro do Instituto de Catálise e Petroquímica. Atualmente é professor Adjunto da Universidade Estadual de Maringá com dedicação exclusiva. Tem experiência na áreas de Processos Separação, síntese enzimática e imobilização de enzimas.

Marcelo Semensato

Professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) no ano de 2004, 2007 e 2018, respectivamente. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade de Energia Elétrica.

Maykon Willian Soares Souza

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, Marabá - PA.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Campus de Ilha Solteira-SP (12/2005). Mestre (05/2008) e Doutor (06/2013) em Engenharia Elétrica - Área Automação, Sub-área Eletrônica de Potência, com a melhor Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do ano de 2013. Foi Coordenador de Curso na UTFPR, membro da Câmara de Licenciaturas e Bacharelados e também membro do Conselho de Graduação e Educação Profissional da UTFPR. De junho de 2013 até abril de 2016 foi Professor do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campus de Campo Mourão-PR e atualmente (a partir de abril/2016) é Prof. do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e está integrado ao Laboratório de Inteligência Artificial, Eletrônica de Potência e Eletrônica Digital - BATLAB. É Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Atua como Revisor de diversos Periódicos Internacionais. Áreas de Interesse: Correção ativa do fator de potência, conversores CC-CC, fontes chaveadas, controle digital, FPGAs, inversores isolados e com conexão à rede de distribuição usando fontes renováveis.

Paula Valéria Viotti

Doutoranda em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR. Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2014) e mestrado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2017), atuando na linha de pesquisa Gestão, Controle e Preservação Ambiental, com ênfase em tratamento de água. Atualmente é doutoranda em Engenharia Química pela Universidade Estadual



de Maringá, atuando em pesquisa na área de Biocatálise e Processos Bioquímicos.

Pericles Nicolau Balafa

Mestrando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre-RS. Graduado em Engenharia Mecânica na Universidade La Salle - Canoas/RS, possui experiência em engenharia de produto, projeto mecânico e design industrial.

Périson Pavei Uggioni

Possui diploma de curso técnico em Eletrônica e Eletrotécnica- Escola Técnica da SATC (1996). Graduação de Tecnologia em Automação Industrial pela Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC (2003). Especialização em Automação Industrial pelo SENAI - CTAI/SC (2007). Especialização em Psicopedagogia pela FURB (2012). Mestre em Mecatrônica pelo IFSC (2017). Atualmente é professor do Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, campus Criciúma. Tem experiência na área industrial - manutenção eletroeletrônica.

Rayana Luiza Silva

Graduada, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

Rosangela Bergamasco

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (1984), mestrado em Ciências de Alimentos pela Universidade Estadual de Londrina (1989), doutorado sanduiche em Engenharia Química - Université de Montpellier II (Scien. et Tech Du Languedoc) (1996) e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (1996). Pós-doc em Engenharia Química - Université Laval - Québec- Canadá(2002). Atualmente é professor associado da Universidade Estadual de Maringá. Tem experiência na área de Engenharia Sanitária e Química, com ênfase em Técnicas alternativas para o Tratamento de Águas, atuando principalmente nos seguintes temas: processos separação com membranas, utilização de coagulantes naturais, produção e caracterização de meios porosos para a filtração. Outras áreas de atuação: resíduos sólidos, aproveitamento (reuso) de resíduos sólidos provindos da Indústria de alimentos e têxtil e efluentes líquidos (foto-fenton, eletrofenton e foto-eletrofenton). Avaliadora do sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior - SINAES - Avaliador de Curso de Graduação e Avaliador Institucional.

Ruben Barros Godoy

Doutor em Engenharia Elétrica na área de automação pela Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (2010). Realizou pós doutorado na École de Technologie Supérieure, em Montreal, na área de Eletrônica de Potência Aplicada a Sistemas Elétricos de Energia. Atualmente é professor Associado na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, atuando em disciplinas de Instalações Elétricas Prediais e Industriais, Eletrônica de Potência e Sistemas Ininterruptos de Energia. É também professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Atua na área de



projetos em sistemas elétricos de baixa e média tensão, eficiência energética, sistemas fotovoltaicos off-grid e on-grid, qualidade de energia, cabeamento estruturado e projetos complementares. Atua nas áreas de pesquisa e desenvolvimento de sistemas ininterruptos de energia on-line, off-line e line-interactive, microinversores, transferência de potência wireless e modernas técnicas de medição de energia e potência elétrica.

Saymon Henrique Santos Santana

Bacharel Física pela Universidade Estadual de Feira de Santana (2009), Mestre em Física pela Universidade Estadual Paulista (2011). Doutor em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2015). Atualmente é professor Adjunto da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA. É o líder do grupo de pesquisa "Métodos Matemáticos e Computacionais Aplicados à Solução de Problemas em Engenharia". Tem experiência em Modelagem Computacional, Sistemas Dinâmicos, Dinâmica orbital e Controle de Caos.

Simone Ferigolo Venturini

Mestranda em Fenômenos de Transporte na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (conclusão em 2021) e graduanda em Engenharia Mecânica pela Universidade La Salle. Possui graduação em Engenharia de Produção pela Universidade La Salle e formação como Técnico Industrial de Nível Médio com Habilitação em Eletromecânica. Tem experiência na área de manutenção elétrica em redes de distribuição de baixa e média tensão e manutenção eletromecânica em usinas de geração de energia elétrica.

Vandilberto Pereira Pinto

Bolsista de Produtividade em Pesquisa, Estímulo à Interiorização e à Inovação Tecnológica - BPI da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP. Pós-doutorado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA (2017), Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, Especialização em Matemática pela Universidade Estadual do Ceará, graduação em Engenharia Elétrica com habilitação em Eletrônica pela Escola Politécnica no Centro Universitário Internacional Uninter, graduação em Matemática pela Universidade Federal do Ceará, formação Técnica e tecnológica Pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará em Telecomunicações. Atualmente é professor Adjunto IV da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) - Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS) e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFC (PPGEEC-UFC) da Universidade Federal do Ceará no Campus de Sobral. Tem experiência sistema de potências, fontes alternativas, Controle e Automação Industrial, controle de sistemas eólicos, Robótica, otimização e teoria de controle atuando principalmente nos seguintes temas: controle ótimo e Robusto, Estimção, Filtro de Kalman, Inteligência artificial (IA), restrições tipo desigualdades matricial linear (LMI), sistemas eólicos, Robótica Móvel e detecção e diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos.



Wardleison Martins Moreira

Graduado, mestre e doutor em engenharia química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM), participou do Programa de Educação Tutorial - Engenharia Química (PET - EQ) e de projetos de pesquisa relacionados às áreas de Processos de Separação e Sistemas Particulados (UEM), Processos de Separação com Membranas (University of Southern California - USC), Tissue Engineering (Texas Tech University - TTU) e desenvolvimento de biomateriais (UEM e Universidade de Coimbra).

Wilson José Gonçalves

Professor Titular da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2016). Possui graduação em Direito pela Universidade Católica Dom Bosco (1991), graduação em Letras pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1986), Mestrado em Direito pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (1994), Doutorado em Direito pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (1998) e Pós-doutorado pela Universidad Del Museo Social Argentino (2001). Possui especialização em Direito e Processo do Trabalho e Direito Constitucional. Presidente da Academia de Letras Jurídicas do Estado de Mato Grosso do Sul - ALJ-MS. Editor. Pesquisador. Coordenador do Laboratório de Estudos da Violência - LEV/CCHS. Advogado em Campo Grande-MS. Grupo de Pesquisa CNPq - Jurisprudência e Argumentação Jurídica. Integra o quadro da FAENG - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (2017). Projeto de Pesquisa: Memorial Descritivo de Projeto - análise lógica e metodológica. Editor-Chefe da Revista Argamassa.

Wilson Kataoka Oyama Filho

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, Marabá - PA.



ORGANIZADORES

Eduardo Mendonça Pinheiro



Doutorado em Agroecologia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, em andamento). Mestre em Agroecologia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, 2017). Pós Graduação em Gestão de Projetos pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER, em andamento). Especialista em Gestão Agroindustrial pela Universidade Federal de Lavras-MG (UFLA, 2006), Especialista em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER, 2017). Graduado em Agronomia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, 2004), Licenciatura Plena pela Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL, 2008). Mestrado em Engenharia pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA, interrompido em 2014). Engenheiro Agrônomo concursado pela Secretaria Municipal de Agricultura, Pesca e Abastecimento de São Luís (SEMAPA). Sócio Proprietário da Editora Pascal LTDA. Professor dos cursos de Engenharia pela Faculdade Pitágoras/FAMA. Professor Conteudista e Pesquisador do Curso de Tecnologia de Alimentos pela UEMANET. Consultor pelo Programa Alimentos Seguros (PAS).

Patrício Moreira de Araújo Filho



Doutor e Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Projetos e Materiais, pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Licenciado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa no Maranhão (FAPEMA), é Professor/pesquisador Adjunto na Universidade do CEUMA (UniCeuma), Líder de grupo de pesquisa em engenharia aeronáutica e aeroespacial (GPEAA) e Coordena o Projeto SAE-UniCeuma desenvolvendo atividades nas áreas de Engenharia e Ensino.

Glauber Tulio Fonseca Coelho



Possui Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional - UNIDERP (2020), mestrado em Engenharia Civil (Concentração: Saneamento Ambiental) pela Universidade Federal do Ceará - UFC (2009), MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas - FGV e graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (2006). Discente do curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Atualmente é Coordenador Acadêmico da Faculdade Pitágoras de São Luís, bem como professor de disciplinas na área de Meio Ambiente e Tecnologia da Construção. Possui experiência em Construção Civil, Gestão de Projetos, Meio Ambiente, Hidrologia e Drenagem. Empresário no setor de livros virtuais científicos, sócio proprietário da Editora Pascal LTDA.

Nesta obra os Organizadores ressaltam a importância da série científica “Engenharia 4.0: a era da produção inteligente” no contexto empresarial, científico e seus utilitários, por se tratar de tema da maior relevância para a indústria e centros de pesquisa que buscam identificar propostas com o potencial de desenvolvimento tecnológico e inovação. Pautada com trabalhos focalizados em discussões da Engenharia a respeito da produção inteligente e sua nova fronteira, oportuniza aos acadêmicos, professores e profissionais atuantes excelente material para novas reflexões.

ISBN: 978-65-86707-59-5

CD



9 786586 707595

△ 5320