

PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS

Volume 8



Ednilson Sergio Ramalho de Souza
(Editor)



Rfb
Editora

PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS

Volume 8





Todo o conteúdo apresentado neste livro, inclusive correção ortográfica e gramatical, é de responsabilidade do(s) autor(es).
Obra sob o selo *Creative Commons*-Atribuição 4.0 Internacional. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

Conselho Editorial

Prof. Dr. Ednilson Sergio Ramalho de Souza - UFOPA (Editor-Chefe)

Prof. Dr. Laecio Nobre de Macedo-UFMA

Prof^a. Ma. Rayssa Feitoza Felix dos Santos-UFPE

Prof. Me. Otávio Augusto de Moraes-UEMA

Prof. Dr. Aldrin Vianna de Santana-UNIFAP

Prof^a. Ma. Luzia Almeida Couto-IFMT

Prof^a. Dr^a. Raquel Silvano Almeida-Unespar

Prof. Me. Luiz Francisco de Paula Ipolito-IFMT

Prof. Me. Fernando Vieira da Cruz-Unicamp

Prof. Dr. Carlos Erick Brito de Sousa-UFMA

Prof^a. Dr^a. Ilka Kassandra Pereira Belfort-Faculdade Laboro

Prof^a. Dr. Renata Cristina Lopes Andrade-FURG

Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves-IFF

Prof. Dr. Clézio dos Santos-UFRRJ

Prof. Dr. Rodrigo Luiz Fabri-UFJF

Prof. Dr. Manoel dos Santos Costa-IEMA

Prof^a. Ma. Adriana Barni Truccolo-UERGS

Prof. Me. Pedro Augusto Paula do Carmo-UNIP

Prof.^a Dr^a. Isabella Macário Ferro Cavalcanti-UFPE

Prof. Me. Alisson Junior dos Santos-UEMG

Prof. Me. Raphael Almeida Silva Soares-UNIVERSO-SG

Prof. Dr. Rodolfo Maduro Almeida-UFOPA

Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné-Faccrei

Prof. Me. Fernando Francisco Pereira-UEM

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos-UEL

Prof. Me. Antonio Santana Sobrinho-IFCE

Prof.^a Dr.^a. Maria de Fatima Vilhena da Silva-UFPA

Profa. Dra. Dayse Marinho Martins-IEMA

Prof. Me. Darlan Tavares dos Santos-UFRJ

Prof. Dr. Daniel Tarciso Martins Pereira-UFAM

Nossa missão é a difusão do conhecimento gerado no âmbito acadêmico por meio da organização e da publicação de livros científicos de fácil acesso, de baixo custo financeiro e de alta qualidade!

Nossa inspiração é acreditar que a ampla divulgação do conhecimento científico pode mudar para melhor o mundo em que vivemos!

Equipe RFB Editora

Ednilson Sergio Ramalho de Souza (Editor)

Volume 8

PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS

Edição 1

Belém-PA
RFB Editora
2022

© 2022 Edição brasileira
by RFB Editora
© 2022 Texto
by Autor
Todos os direitos reservados

RFB Editora
CNPJ: 39.242.488/0001-07
www.rfbeditora.com
adm@rfbeditora.com
91 98885-7730
Av. Augusto Montenegro, 4120 - Parque Verde, Belém - PA, 66635-110

Editor-Chefe
Prof. Dr. Ednilson Souza

Diagramação e capa
worges.com

Imagens da capa
www.canva.com

Revisão de texto
O autor

Bibliotecária
Janaina Karina Alves Trigo Ramos
Produtor editorial
Nazareno Da Luz

<https://doi.org/10.46898/rfb.9786558893479>

Catálogo na publicação
Elaborada por RFB Editora

P474

Pesquisas em Temas de Engenharias / Ednilson Sergio Ramalho de Souza (Editor) –
Belém: RFB, 2022.

(Pesquisas em temas de engenharias, V.8)

Livro em PDF

3.600 KB., il.

ISBN: 978-65-5889-347-9

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479

1. Engenharias. I. Souza, Ednilson Sergio Ramalho de (Editor). II. Título.

CDD 370

Índice para catálogo sistemático

I. Engenharias.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	9
CAPÍTULO 1	
ANÁLISE DO CONTROLE DO GRAU DE SUPERAQUECIMENTO DE UMA VÁLVULA DE EXPANSÃO TERMOSTÁTICA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO.....	11
Arthur Pacheco Luz Hélio Augusto Goulart Diniz Neylor Makalister Ribeiro Vieira Sara Isabel de Melo Resende DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.1	
CAPÍTULO 2	
REESTRUTURANDO A FORMAÇÃO DE ENGENHEIROS ATRAVÉS DE UMA EDUCAÇÃO CENTRADA EM COMPETÊNCIAS: A INICIATIVA CDIO	33
Henrique Gasparetto Ana Carolina Ferreira Piazzzi Fuhr DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.2	
CAPÍTULO 3	
OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁCIDO LÁTICO POR <i>Lactobacillus</i> UTILIZANDO SORO DE QUEIJO COMO SUBSTRATO.....	43
Ana Carolina Ferreira Piazzzi Fuhr Henrique Gasparetto DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.3	
CAPÍTULO 4	
UMA PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA UM SISTEMA DE CIP INDUSTRIAL.....	53
François de Souza Martins DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.4	
CAPÍTULO 5	
DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS DE ROTOR DE MOTORES DE INDUÇÃO USANDO ANÁLISE ESPECTRAL E CLASSIFICAÇÃO PERCEPTON MULTICAMADAS	61
François de Souza Martins DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.5	
CAPÍTULO 6	
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS: ESTUDO DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO	69
François de Souza Martins DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.6	
CAPÍTULO 7	
ESTUDO SOBRE HARMÔNICOS GERADOS PELOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO	77
François de Souza Martins DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.7	

APRESENTAÇÃO

Prezad@s,

Satisfação! Esse é o sentimento que vem ao meu ser ao escrever a apresentação deste delicioso livro. Não apenas porque se trata do volume 8 da Coleção Pesquisas em Temas de Engenharias, publicado pela RFB Editora, mas pela importância que essa área possui para a promoção da qualidade de vida das pessoas.

Segundo a Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), fazem parte dessa área: Engenharia de Minas, Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Engenharia Química, Engenharia Nuclear, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção, Engenharia Naval e Oceânica, Engenharia Aeroespacial, Engenharia Elétrica, Engenharia Biomédica. Tal área suscita, portanto, uma gama de possibilidades de pesquisas e de relações dialógicas que certamente podem ser relevantes para o desenvolvimento social brasileiro.

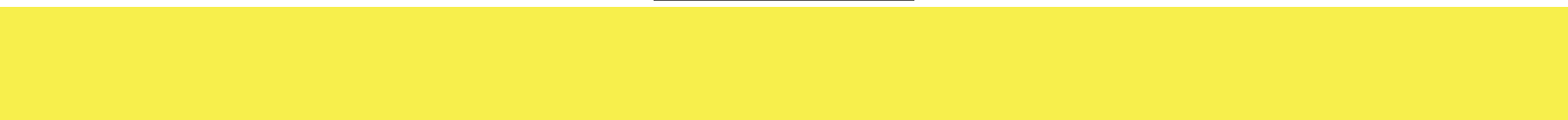
Desse modo, os artigos apresentados neste livro - em sua maioria frutos de árduos trabalhos acadêmicos (TCC, monografia, dissertação, tese) - decerto contribuem, cada um a seu modo, para o aprofundamento de discussões na área de Engenharia, pois são pesquisas germinadas, frutificadas e colhidas de temas atuais que vêm sendo debatidos nas principais universidades brasileiras e que refletem o interesse de pesquisadores no desenvolvimento social e científico que possa melhorar a qualidade de vida de homens e de mulheres.

Acredito, verdadeiramente, que a ampla divulgação do conhecimento científico de qualidade pode mudar para melhor o mundo em que vivemos!

Esse livro é parte singela da materialização dessa utopia.

Prof. Dr. Ednilson Sergio Ramalho de Souza

Editor-Chefe



CAPÍTULO 1

ANÁLISE DO CONTROLE DO GRAU DE SUPERAQUECIMENTO DE UMA VÁLVULA DE EXPANSÃO TERMOSTÁTICA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO

ANALYSIS OF THE OVERHEATING DEGREE CONTROL OF A THERMOSTATIC EXPANSION VALVE IN COOLING AND HEATING SYSTEMS

Arthur Pacheco Luz¹

Hélio Augusto Goulart Diniz²

Neylor Makalister Ribeiro Vieira³

Sara Isabel de Melo Resende⁴

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.1

¹ Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica; arthur_pacheco.luz@hotmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica; Centro Universitário Estácio de Sá de Belo Horizonte; Engenharias; heliougmg@gmail.com

³ Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica; neylormakalister@yahoo.com.br

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica; sara_sidmr@yahoo.com.br

RESUMO

O grau de superaquecimento de um fluido frigorífico em um ciclo de compressão por vapor, seja ele aplicado em sistemas de refrigeração ou aquecimento, é de fundamental importância para a boa operação do compressor e bom rendimento do sistema. A refrigeração por compressão de vapor é aplicada em larga escala no condicionamento de ambientes e no resfriamento e congelamento de alimentos. O grande desafio para a indústria de refrigeração e aquecimento é reduzir o consumo de energia dos sistemas, sem comprometer a sua produtividade e a qualidade das instalações. Este trabalho tem por objetivo avaliar o controle do grau de superaquecimento no evaporador de uma máquina de refrigeração ar-ar e no evaporador solar de uma bomba de calor de expansão direta, por meio de uma válvula de expansão termostática, quando é aplicado um degrau de temperatura em seu evaporador. Um estudo sobre o comportamento dos principais parâmetros de funcionamento do sistema foi realizado e verificou-se que quando o evaporador aquece, por meio da troca de calor com o fluido secundário, a vazão de fluido frigorífico na aspiração do compressor aumenta e o grau de superaquecimento aumenta abruptamente. Então, a válvula de expansão termostática atua sobre o sistema permitindo o aumento da vazão de fluido no evaporador, diminuindo assim o superaquecimento da máquina até que um novo ponto de equilíbrio seja encontrado. Os resultados mostraram que, após ajustado o grau de superaquecimento a válvula de expansão termostática trabalha de forma efetiva na condução do ciclo de volta para a estabilidade.

Palavras-Chave: Válvula. Expansão. Termostática. Superaquecimento. Refrigeração.

ABSTRACT

The overheat degree of a refrigerant fluid in a vapor compression cycle, whether applied in cooling or heating systems, has fundamental importance for the good operation of the compressor and good performance of the system. Vapor compression cycle is applied on a large scale in air conditioning and in cooling and freezing of food. The great challenge for the cooling and heating industry is to reduce the energy consumption, without compromising their productivity and the quality of installations. This work aims to evaluate the control of the overheat degree in the evaporator of an air-air cooling machine and in the solar evaporator of a direct expansion heat pump, through a thermostatic expansion valve when there is a rapid change of temperature in evaporator. A study on the behavior of the main operating parameters of the system was carried out and as a result it was shown that when the evaporator heats up, through the exchange of heat with the secondary fluid, the refrigerant flow in the compres-

sor suction increases and the overheating degree abruptly increases. Then, the thermostatic expansion valve acts allowing the system to increase the flow of fluid in the evaporator, thus decreasing the overheating of the machine until a new equilibrium point is reached. The results showed that, after adjusting the overheating degree, the thermostatic expansion valve works effectively driving the cycle back to stability.

Keywords: Valve. Expansion. Thermostatic. Overheating. Refrigeration.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia tem desempenhado um importante papel na vida da sociedade, entretanto, antes de se tornar uma ferramenta de extrema importância para o indivíduo, foi necessário buscar outros meios que permitissem satisfazer suas necessidades, como os sistemas de refrigeração e aquecimento de ambientes, clássicos exemplos deste progresso da inovação. A primeira patente para refrigeração mecânica data de 1834 na Grã-Bretanha e se deve ao inventor americano Jacob Perkins. O princípio básico de funcionamento dos sistemas modernos continua sendo o mesmo, apresentado por Perkins, um fluido que altera do estado líquido para o gasoso, abaixando a temperatura dos objetos ao seu redor pela retirada de calor. Atualmente, a principal motivação para novas pesquisas no campo da refrigeração é a busca por melhorias deste processo, visto que a economia energética está diretamente relacionada com a efetividade e eficiência de funcionamento do mesmo e, por consequência, dos seus componentes.

Existe a necessidade contínua por obtenção de energia de forma eficiente e que não agrida o meio ambiente. A sustentabilidade energética apresenta-se como um dos grandes desafios da humanidade para este século. A sustentabilidade energética tem por objetivo garantir energia suficiente para atender às necessidades energéticas futuras de toda a população mundial. Para Nunes (2013), o grande desafio para a indústria de refrigeração é reduzir o consumo de energia dos sistemas sem comprometer sua produtividade e a qualidade das instalações. Tudo isso pois, em residências, instalações comerciais e industriais, os sistemas de refrigeração são amplamente utilizados no controle da temperatura de ambientes tanto para conforto humano, promoção de boas condições de armazenamento de alimentos, processos industriais diversos e outras utilidades.

Através destes aspectos, a análise dos componentes de uma máquina de refrigeração, que obedece ao ciclo de compressão a vapor, faz-se necessária, pois, tem-se por objetivo entender o funcionamento de cada elemento do circuito e minimizar suas perdas, neste trabalho iremos aprofundar no estudo de um dos componentes fundamentais de um sistema de refrigeração, a válvula de expansão termostática.

Uma válvula de expansão termostática atua no sentido de controlar a temperatura na saída do evaporador, permitindo o superaquecimento deste fluido e garantindo a sua entrada como vapor superaquecido no compressor, preservando assim o equipamento (FABRIS, 2006). O valor do superaquecimento, ou seja, a diferença entre temperatura de evaporação e a temperatura do fluido na saída do evaporador é mantido em uma faixa de determinados valores. Isto porque, se por um lado é seguro manter o fluido na entrada do compressor como minimamente vapor superaquecido, para não comprometer o compressor, por outro lado, o superaquecimento exagerado diminui o rendimento do compressor, que por seguinte, diminui o desempenho do sistema (DINIZ, 2017).

Koury *et al.* (2001) desenvolveram dois modelos numéricos para simular o comportamento transiente e de equilíbrio de sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Em tais modelos, o condensador e o evaporador ficaram divididos num certo número de volumes de controle e as equações utilizadas decorreram de balanços de energia, massa e momento. A válvula de expansão e o compressor estavam modelados de acordo com modelos de estado de equilíbrio, pois tais componentes possuem uma inércia térmica muito pequena. As simulações foram executadas com o objetivo de verificar a possibilidade de controlar o sistema de refrigeração e o superaquecimento do gás refrigerante na saída do evaporador pela variação da velocidade do compressor e pela diminuição da área de secção da válvula termostática. Os gases refrigerantes aplicados em tais simulações foram o R-12 e o R-134a. Os resultados da simulação, quando comparados aos experimentais, apresentaram uma boa fidelidade, validando os modelos.

Neste estudo, será investigado o controle do grau de superaquecimento no evaporador convencional de uma máquina de refrigeração e em uma bomba de calor com evaporador solar, ambos dotados de uma válvula de expansão termostática. Será aplicado um aumento súbito de temperatura do ar na entrada do evaporador, de forma a induzir um acréscimo na temperatura de evaporação. Por conseguinte, a vazão de fluido frigorífico na entrada da válvula de expansão tende a aumentar. Em seguida a temperatura do sistema retornará ao ponto de funcionamento original. Através do experimento, estabelece-se uma busca a respeito da quantificação teórica referente ao comportamento da vazão mássica no interior e da válvula de expansão.

Finalmente, será realizado uma breve apresentação bibliográfica sobre o ciclo de refrigeração e aquecimento à compressão de vapor, dando enfoque especial ao componente de expansão do sistema, bem como realizar cálculos sobre este dispositivo, tendo como base, modelos previamente desenvolvidos e, por fim, avaliar a influência da válvula de expansão termostática dentro do ciclo quanto ao controle do grau de

superaquecimento no evaporador e na regulagem da vazão de fluido refrigerante no mesmo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ciclo de compressão de vapor

Um sistema frigorífico, segundo Borgnakke e Sonntag, (2013), que opera segundo o ciclo de compressão a vapor, é composto indispensavelmente por um equipamento de compressão, um equipamento de expansão e dois trocadores de calor, sendo estes últimos equipamentos citados denominados, condensador e evaporador. Para se compreender o comportamento do fluido no ciclo de compressão a vapor faz-se útil a análise de um diagrama Pressão-Entalpia, como exemplifica a Figura 1, que esboça um ciclo ideal de compressão a vapor.

O ciclo inicia-se no compressor (1), sua finalidade é aumentar a pressão do fluido, absorvendo-o a baixa pressão e comprimindo-o em direção ao condensador. O processo de compressão (1) para (2) acontece de forma isentrópica no ciclo ideal apresentado, no qual o vapor saturado passa da pressão P_{evap} para pressão P_{cond} e da entalpia h_1 para h_2 , consumindo trabalho mecânico (VARGAS, 2010). Na sequência do ciclo ideal, o fluido chega ao condensador (2) e sofre o processo de condensação entre (2) e (3), cedendo calor, do fluido refrigerante para o ambiente externo, à pressão constante, passando de vapor superaquecido para líquido saturado (STOECKER E JABARDO, 2002).

O dispositivo de expansão (3) realiza uma importante função, reduzindo a pressão do fluido entre os pontos (3) e (4). Este dispositivo recebe líquido comprimido vindo do condensador e o converte em uma mistura de líquido e vapor à uma pressão inferior à de entrada, que é encaminhada para o evaporador (4). Este é um processo idealmente isentálpico, desde a pressão de condensação P_{cond} , até a pressão de vaporização P_{evap} (VENTURINI E PIRANI, 2005).

Por fim, Lima (2015), apresenta que ao final do ciclo, ocorre a evaporação do fluido no evaporador, entre os pontos (4) e (1) da Figura 1. O fluido recebe calor do ambiente externo e passa, desde um estado bifásico, líquido-vapor, até atingir o estado de vapor saturado. Assim sendo, o fluido é encaminhado ao compressor (1), fechando o ciclo. Então, um ciclo de refrigeração absorve calor através do evaporador, e cede calor por meio do condensador.

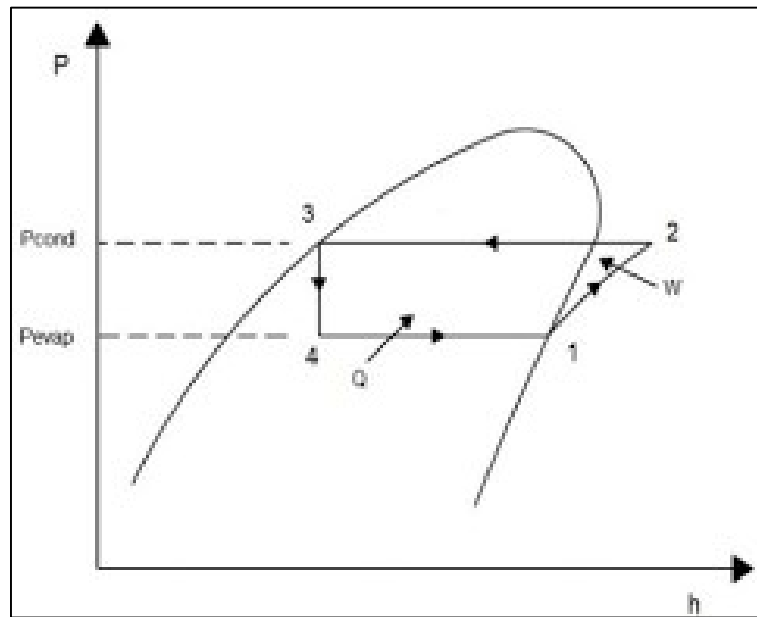


FIGURA 1. Diagrama P-h de um ciclo ideal de refrigeração. Fonte: Mandal e Roy (2014).

Entretanto, Barbosa e Medeiros, (2009) demonstram que o ciclo descrito, referente a Figura 2, é um ciclo ideal, e neste não é levado em consideração grau de superaquecimento na saída do evaporador, subresfriamento na saída do condensador, tampouco as perdas de carga nos trocadores de calor e perdas de eficiência no compressor. Na prática, a entrada do fluido no compressor é representada na região de superaquecimento (pontos 1-1'), de acordo com a Figura 2, que retrata as principais diferenças entre o ciclo real e teórico de refrigeração por compressão de vapor. Determinado aumento de temperatura visa assegurar que o fluido entre totalmente no estado de vapor, garantindo a segurança e o funcionamento do compressor. Outra diferença é o subresfriamento (pontos 3-3') do refrigerante na saída do condensador, sendo um processo muito importante, pois evita que haja vapor na saída do condensador. (STOECKER E JONES, 1985).

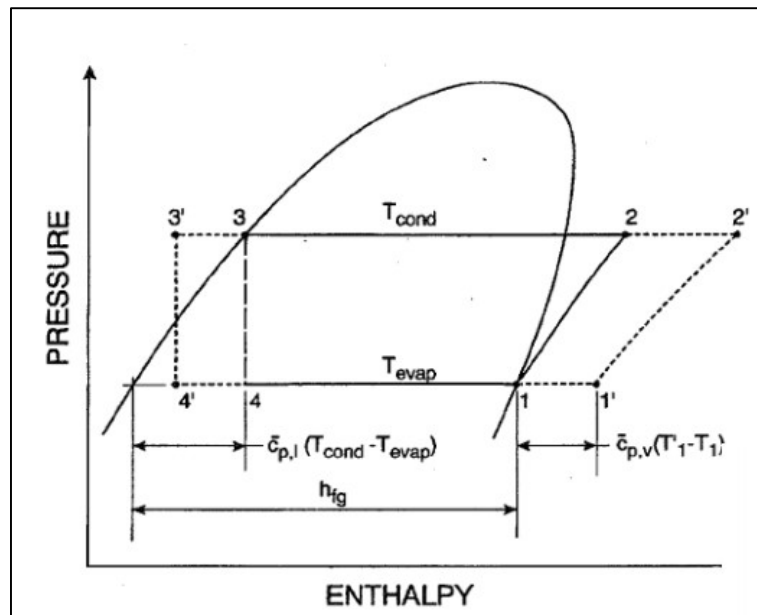


FIGURA 2. Diferenças entre o ciclo ideal e o real. Fonte: Barbosa e Medeiros (2009).

2.2 Válvula de expansão termostática (VET)

De acordo com Lima (2015), a capacidade volumétrica do compressor, a vazão mássica de refrigerante e a potência de compressão são parâmetros dependentes das pressões de evaporação e condensação. Diante disso, os dispositivos de expansão exercem um papel importante no equilíbrio destas pressões, sendo fundamentais para o melhor desempenho do ciclo. Assim sendo, um componente deste ciclo que denota certas peculiaridades é a válvula de expansão termostática (VET), simbolizada pela Figura 3. Ela desempenha a imprescindível função de regular o fluxo de refrigerante para o evaporador, de forma a manter, na saída do evaporador, um superaquecimento aproximadamente constante. Quando o superaquecimento no final do evaporador é ampliado, em virtude do aumento da carga térmica, a válvula de expansão térmica intensifica o fluxo de refrigerante até que haja uma normalização no nível de superaquecimento. O inverso também acontece e, com isso o evaporador permanece ativo em praticamente todas as condições operacionais.

De acordo com Mesquita (2009), a válvula de expansão altera a vazão de refrigerante na entrada do evaporador em função da taxa de evaporação. Sempre que ocorrer um superaquecimento no evaporador, a temperatura na saída do evaporador sobe, causando aumento na temperatura do bulbo. O fluido contido no interior do bulbo expande e força o diafragma para baixo, causando abertura da válvula. Com o aumento da vazão na válvula de expansão, e, conseqüentemente, no evaporador, o grau de superaquecimento inicial é reestabelecido.

Stoecker e Jones (1985) afirmam que uma das funções da válvula de expansão termostática é manter aproximadamente constante a quantidade de refrigerante líquido dentro do evaporador. Se a quantidade de líquido diminui, a temperatura do fluido na saída do evaporador aumenta, uma vez que o vapor fica exposto a uma maior área de troca térmica no evaporador. O aumento de temperatura do vapor superaquecido implica em um aumento de pressão no bulbo que, por sua vez, empurra o diafragma e consequentemente, causa a abertura da válvula.

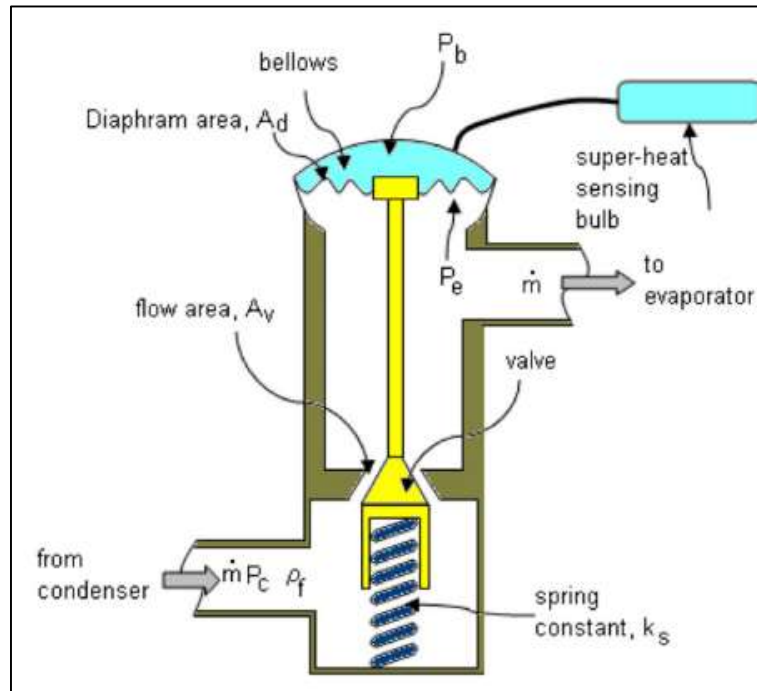


FIGURA 3. Diagrama de uma válvula de expansão termostática (VET). Fonte: Eames *et al.* (2014).

2.3 Modelagem matemática da VET

Koury *et al.* (2001) descreveram em seu trabalho as equações que determinam a vazão mássica na saída da válvula de expansão (entrada do evaporador) e na aspiração do compressor (saída do evaporador). A Equação 1 relaciona a vazão na entrada do compressor, já a Equação 2 trata do rendimento volumétrico do compressor e a Equação 3 apresenta a vazão imposta pela válvula termostática.

$$\dot{m}_{comp} = NV\rho_{asp}\eta_v \quad (1)$$

$$\eta_v = 1 + \left[c - c \left(\frac{P_{cond}}{P_{ebul}} \right)^{\frac{c_v}{c_p}} \right] \quad (2)$$

$$\dot{m}_{exp} = C_d \sqrt{(P_{cond} - P_{ebul})\rho_{ent}} \quad (3)$$

Onde \dot{m}_{comp} , N , V , ρ_{asp} e η_v são, respectivamente, a vazão mássica no compressor, rotação do compressor, capacidade volumétrica do compressor, massa específica do refrigerante na aspiração do compressor e rendimento volumétrico do compressor. Na sequência, c , P_{cond} , P_{ebul} , cv e cp são, respectivamente, o coeficiente de espaço morto do compressor, pressão de condensação, pressão de ebulição, calor específico a volume constante e calor específico a pressão constante do refrigerante. Por fim, \dot{m}_{exp} é a vazão mássica imposta pela válvula de expansão, C_d é a constante característica da válvula de expansão (produto entre a seção de passagem e um coeficiente adimensional de atrito) conhecida como coeficiente de descarga e ρ_{ent} é a massa específica do fluido na entrada da válvula de expansão. Estas equações foram utilizadas nos trabalhos de Machado (1995), Koury *et al.* (2001), Maia (2000), Maia (2007), Nunes (2010) e Nunes (2013).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentadas e exploradas duas bancadas utilizadas para os experimentos e obtenção de resultados sobre o comportamento da válvula termostática. Serão elas, uma bancada didática de refrigeração por compressão de vapor ar-ar que opera com fluido frigorífico R-12 e, uma bomba de calor solar de expansão direta (DX-SAHP) que opera com fluido frigorífico R-134a.

3.1 Bancada experimental de refrigeração

A máquina frigorífica utilizada nos ensaios é do tipo ar-ar. Isto significa que o fluido que troca calor com o refrigerante tanto no evaporador quanto no condensador é o ar. O fluido de trabalho utilizado nessa máquina é o diclorodifluormetano (CCl₂F₂), genericamente tratado como R-12. Todas as tubulações de fluido do banco de testes são bem vedadas e isoladas termicamente.

Os trocadores de calor que compõe uma máquina de refrigeração do tipo ar-ar possuem a função de absorver calor da fonte fria (ar), cedendo este calor à fonte quente (ar) por intermédio de um compressor. A máquina de refrigeração opera com um compressor semi-hermético. Possui um evaporador e um condensador, ambos aletados com fluxo forçado de ar. Como dispositivos de expansão, estão disponíveis um tubo capilar, uma válvula automática e uma válvula termostática. Para a medição da vazão de fluido frigorífico, o sistema conta com um rotâmetro instalado na linha de líquido. Como sistema de proteção, a bancada experimental possui um acumulador de vapor, um acumulador de líquido, um separador de óleo e um filtro secador. As Figuras 4 (vista geral) e a Figura 5 (detalhe dos componentes).



FIGURA 4. Bancada experimental (vista geral). Fonte: Luz (2021).

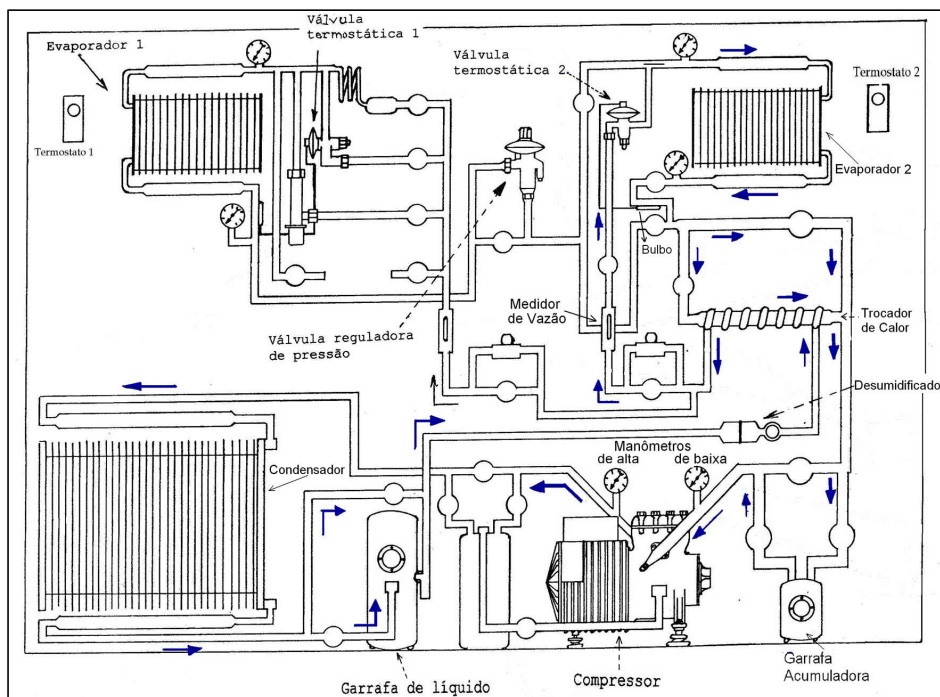


FIGURA 5. Representação esquemática do banco de ensaios. Fonte: Adaptado de Fabris (2006).

O sistema apresenta-se instrumentado com manômetros de Bourdon e termopares tipo K, localizados em pontos que permitem a estimativa das perdas de cargas e perdas ou trocas térmicas ao longo de todo o circuito.

3.2 Procedimentos experimentais máquina de refrigeração

Para a execução do experimento, com a finalidade de analisar o comportamento das variáveis influenciadas pela atuação da válvula de expansão termostática (VET), as seguintes variáveis foram mensuradas, temperatura de entrada e saída do evaporador e a vazão do fluido refrigerante. Todos os dados foram registrados em intervalos de tempo controlado. Para que os valores dos parâmetros experimentais da equação que descreve a vazão de fluido frigorífico na válvula de expansão termostática pudessem ser avaliados, foram realizados ensaios no banco de testes descrito, que envolviam o monitoramento do comportamento de algumas grandezas do ciclo da máquina frigorífica e do fluido R-12, no evaporador, ao sofrer uma variação do tipo degrau.

Essa perturbação é causada no fluido através do aquecimento do ar que atravessa o evaporador. São apresentadas, a seguir, as adaptações introduzidas no banco de testes, com o objetivo de se provocar a perturbação degrau no fluido.

O banco de testes no qual foram realizados os ensaios conta com dois evaporadores. Nos ensaios feitos para o presente trabalho, apenas o evaporador 2 foi utilizado (todas as válvulas do circuito que direcionam o fluido para o evaporador 1 ficaram fechadas). Os ventiladores dos evaporadores 1 e 2 são iguais, no entanto, foram feitas adaptações apenas para o evaporador 2, uma vez que apenas este foi utilizado. Uma resistência elétrica foi colocada na admissão de ar do evaporador (do tipo tubos aletados com escoamento cruzado de ar forçado por um ventilador) conforme apresenta a Figura 6, isto permitiu a execução de um sinal degrau de temperatura no evaporador, possibilitando a mudança da temperatura de evaporação do fluido. A resistência elétrica foi calculada para provocar uma elevação de 20 °C na temperatura do ar.



FIGURA 6. Montagem da resistência elétrica na bancada. Fonte: Fabris (2006).

3.3 Bancada experimental bomba de calor solar

O protótipo utilizado é uma bomba de calor que possui R134 como fluido de trabalho, conforme a Figura 7 e a Tabela 1, sendo composto por um compressor, uma

válvula de expansão termostática, um condensador do tipo inundado em formato de serpentina, um condensador do tipo coaxial, um evaporador solar, um evaporador convencional de tubos aletados com convecção forçada de ar e um reservatório térmico de água. Foram realizados ensaios apenas com a utilização do condensador inundado e do evaporador solar.

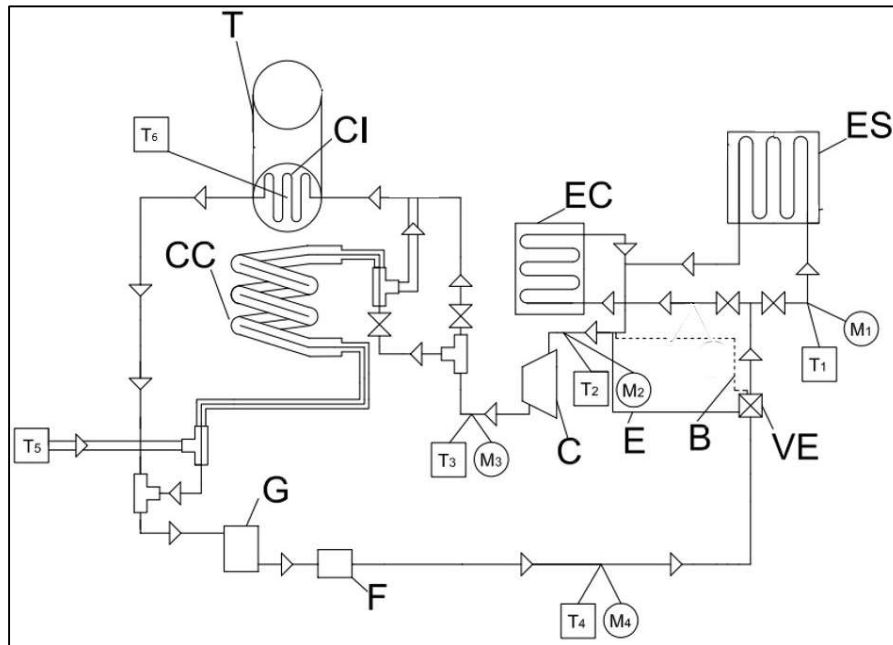


FIGURA 7. Projeto Esquemático da Bomba de Calor. Fonte: Vieira *et al.* (2018).

TABELA 1. Descrição dos Equipamentos na BDC

Legenda	Termopares
VET - Válvula de Expansão Termostática	T1 - Entrada ES
EC Evaporador Convencional	T2 - Entrada C
ES - Evaporador Solar	T3 - Entrada CI
C- Compressor	T4 - Entrada VET
CI - Condensador por Imersão	T5 - Temperatura Ambiente
CC - Condensador Coaxial	T6 - Água CI
B - Bulbo	Manômetros
G - Garrafa de Líquido	M1 - Entrada ES
E- Equalizador	M2 - Entrada C
F - Filtro Secador	M3 - Entrada CI
T - Tanque	M4 - Entrada da VET

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2018).

A máquina encontra-se instrumentada com quatro manômetros (do tipo *bourdon*), sendo dois manômetros de baixa e dois de alta pressão. Possui também seis termopares, sendo que quatro deles estão instalados próximos aos manômetros, viabili-

zando a determinação dos quatro pontos do ciclo de refrigeração. O quinto termopar é destinado à medição da temperatura ambiente e o sexto termopar é destinado à medição da água no tanque (onde se encontra o condensador inundado).

A máquina possui também um medidor de vazão na saída do condensador e um piranômetro (medição de irradiação solar - W/m^2) no plano do evaporador. Todas as medidas, exceto as pressões, são registradas em intervalos de um décimo de segundo no software LabView por meio de placas de aquisição de dados. A descrição completa do protótipo pode ser encontrada em Diniz (2017).

Para simulação do degrau de temperatura, os testes foram realizados em um dia ensolarado na cidade de Belo Horizonte - MG. Uma tenda foi utilizada, com o objetivo de encobrir o evaporador solar, simulando assim, a baixa irradiação solar. Assim que o sistema entra em operação no regime permanente (na sombra), a tenda é retirada, aumentando a intensidade de irradiação sobre o evaporador (a quantidade de calor subiu em até 9 vezes).

3.4 Procedimento experimental bomba de calor solar

Analisaram-se os comportamentos das variáveis influenciadas pela atuação da válvula de expansão termostática (VET), sendo elas, temperatura no evaporador, variação da vazão mássica no evaporador e o controle de superaquecimento no evaporador. Foi utilizada uma tenda sobre o evaporador solar, simulando assim, um dia nublado. Registraram-se as temperaturas, vazão mássica e irradiação nesta situação. Posteriormente, a tenda foi retirada fazendo com que a radiação solar sobre o evaporador aumentasse de forma expressiva (até nove vezes). Com isso, um degrau de temperatura no evaporador foi realizado, permitindo a mudança da temperatura de evaporação do fluido. Foram analisadas as variações de temperaturas na entrada e saída do evaporador e a vazão mássica em função do tempo, além das pressões de alta e baixa do sistema. Como resultado principal, têm-se gráficos representando o comportamento da vazão mássica ao longo do tempo, bem como a variação da temperatura do evaporador também em função do tempo.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados nos dois modelos de experimento executados, o primeiro no sistema de refrigeração em bancada operada com o fluido R-12 e o segundo em um sistema de aquecimento de água por meio de uma bomba de calor assistida por energia solar operando com o fluido R-134a.

4.1 Resultados sistema de refrigeração

Foram registradas as variações de temperaturas na entrada T_1 (admitida como a temperatura de evaporação do refrigerante) e na saída do evaporador T_2 ao longo do tempo, bem como a vazão de refrigerante (o rotâmetro está próximo da admissão da VET), conforme demonstra as Tabelas 2 e 3, que reproduzem, respectivamente, os valores aferidos com a resistência elétrica ligada e desligada.

TABELA 2. Dados mensurados com a resistência elétrica ligada.

Tempo (s)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	ΔT_{sa} (°C)	Vazão (kg/s)
0	4,7	8,4	3,7	0,011
10	5,3	9,9	4,6	0,010
20	5,1	12,0	6,9	0,010
30	5,0	13,7	8,7	0,010
60	5,4	15,5	10,2	0,011
90	6,2	15,0	8,8	0,011
120	6,9	14,7	7,8	0,011
150	7,5	14,7	7,1	0,011
180	8,0	14,7	6,6	0,011
210	8,4	14,8	6,4	0,012
240	8,6	14,8	6,3	0,012
270	8,8	15,0	6,2	0,012
300	9,0	15,0	6,0	0,012
330	9,0	15,0	6,0	0,012
360	9,2	15,0	5,8	0,012
390	9,2	15,0	5,8	0,012
420	9,3	15,1	5,8	0,012
450	9,3	15,0	5,7	0,011
480	9,4	15,1	5,7	0,012
510	9,5	15,2	5,8	0,012

Fonte: Adaptado de Luz (2021).

TABELA 3. Dados mensurados com a resistência elétrica desligada.

Tempo (s)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT_{sa} (° C)	Vazão (kg/s)
540	9,5	15,2	5,7	0,012
550	9,2	14,9	5,7	0,013
560	8,9	12,3	3,4	0,013
570	9,1	7,5	-1,6	0,012
600	7,3	7,1	-0,2	0,011
630	5,8	9,9	4,1	0,011
660	5,6	9,7	4,1	0,011
690	5,5	9,3	3,8	0,011
720	5,4	9,4	4,0	0,011
750	5,3	9,4	4,1	0,011
780	5,3	9,1	3,8	0,011
810	5,2	9,0	3,8	0,011
840	5,1	9,4	4,3	0,011
870	5,1	9,4	4,3	0,011
900	5,1	9,3	4,2	0,011
930	5,1	9,2	4,1	0,011
960	5,1	9,4	4,2	0,011
990	5,1	9,5	4,4	0,011
1020	5,1	9,4	4,3	0,011
1050	5,0	9,1	4,1	0,011

Fonte: Adaptado de Luz (2021).

A partir das equações apresentadas ao longo deste trabalho e com auxílio dos instrumentos presentes na bancada de testes, pode-se elaborar a Tabela 4 que sintetiza os principais resultados calculados.

TABELA 4. Parâmetros em regime permanente antes e após o degrau.

Parâmetros	Antes do Degrau	Após o Degrau	Unidades
T_{evap}	8,98	5,38	°C
T_{VET}	39,00	37,51	°C
T_{asp}	24,67	23,14	°C
T_{cond}	44,00	42,51	°C
P_{evap}	410,0	366,6	kPa
P_{cond}	1058,0	1021,0	kPa
c_v	0,5625	0,5582	kJ/kg.K
c_p	0,6692	0,6605	kJ/kg.K
ρ_{asp}	21,95	19,55	kg/m ³
ρ_{ent}	1257	1263	kg/m ³
η_{vol}	0,8782	0,8624	-
Cd	$1,688 \times 10^{-6}$	$1,466 \times 10^{-6}$	-

Fonte: Adaptado de Luz (2021).

Por fim, foram elaborados gráficos que apresentam a variação da vazão mássica do fluido refrigerante logo após a VET, apresentado pela Figura 8 e a variação das temperaturas de entrada e saída do evaporador ao longo do tempo de ensaio, apresentado pela Figura 9.

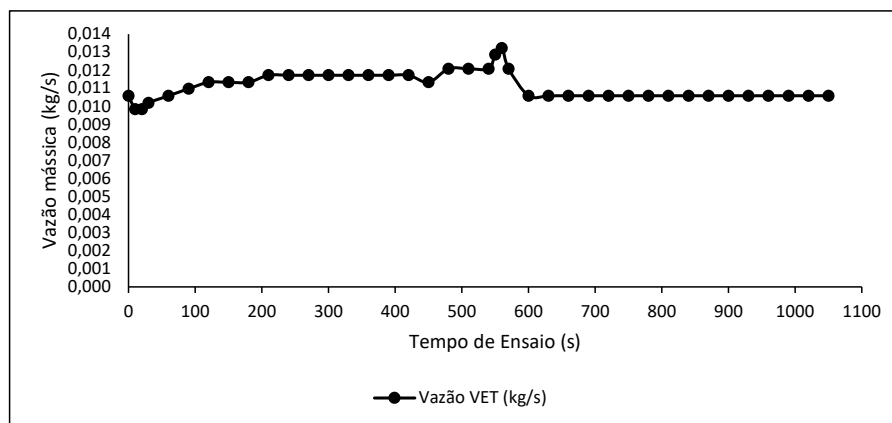


FIGURA 8. Vazão mássica de fluido refrigerante. Fonte: Luz (2021).

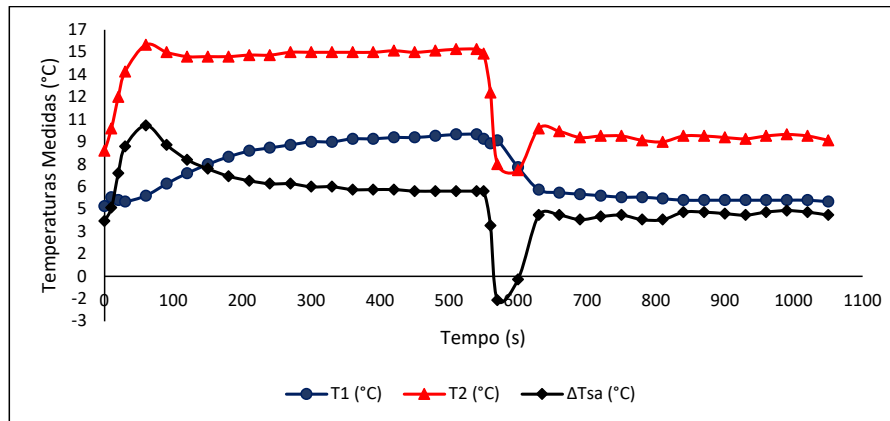


FIGURA 9. Variação das temperaturas de entrada e saída do evaporador. Fonte: Luz (2021).

Através do aumento da temperatura do fluido secundário, que envolve o evaporador, por intermédio do acionamento de uma resistência elétrica, altera-se o grau de superaquecimento, intensificando assim, a temperatura de ebulição, segundo a Figura 9. Como consequência, a vazão na entrada do evaporador diminuiu, conforme análise da Equação 3, pois a pressão de ebulição aumentou. Em seguida, com o aumento da pressão de ebulição, o rendimento volumétrico aumenta, de acordo com a Equação 2. A vazão imposta pelo compressor também aumenta, segundo a Equação 1, pois, um dos motivos é o aumento do rendimento volumétrico deste equipamento. O aumento desta vazão é retratado na Figura 7. O crescimento da pressão de evaporação também implica na diminuição do volume específico do fluido e conseqüente aumento de sua massa específica, a qual é destinada à aspiração do compressor, colaborando, assim, para aumentar a vazão imposta por este equipamento. Logo, o volume de fluido no evaporador diminui, o que provoca um crescimento no grau de superaquecimento. Então, o fluido de calibração presente no interior do bulbo capilar da VET atua no diafragma, ampliando a seção de passagem da válvula termostática e permitindo um suprimento de vazão em sua entrada. Sendo assim, o evaporador é preenchido com fluido refrigerante novamente, o que faz o superaquecimento diminuir, retornando para o valor de ajuste. Contudo, o grau de superaquecimento neste novo ponto de operação é o mesmo de antes da mudança no sistema.

4.2 Resultados bomba de calor solar

O teste foi realizado no mês de julho de 2018 (inverno no hemisfério sul) na parte da manhã. O céu estava limpo e ensolarado. A intensidade de irradiação chegou próxima de 1000 W/m^2 . Todos os dados, exceto das pressões, foram coletados em intervalos de tempo de 0,1. O teste durou uma hora e 34 minutos.

O experimento se inicia ligando o compressor da bomba de calor com o evaporador solar coberto pela tenda. Quando o sistema atinge o regime permanente, a tenda

é retirada e um degrau de temperatura é observado no evaporador solar, aumentando a vazão imposta pela válvula termostática. O sistema atinge um novo ponto de operação e, por fim, a tenda é recolocada na posição original, projetando sombra sobre o evaporador novamente. A Figura 10 demonstra o comportamento da vazão mássica durante este processo, lembrando que o medidor de vazão está localizado na entrada da válvula de expansão termostática, ou seja, passa apenas líquido comprimido neste instrumento.

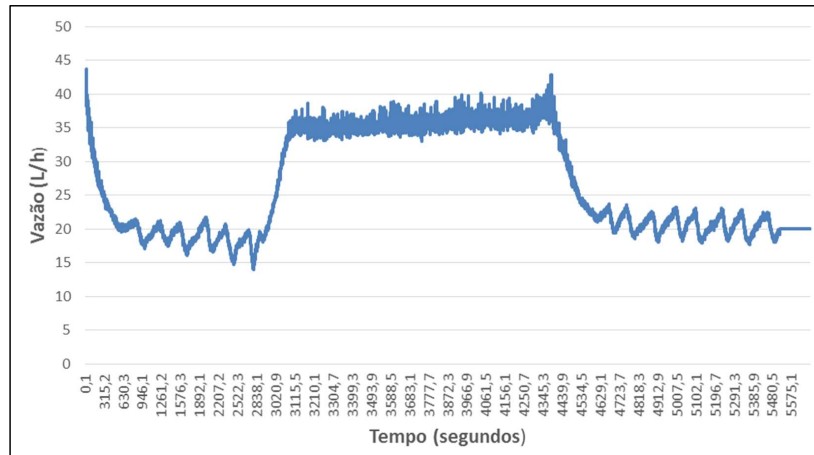


FIGURA 10. Comportamento da vazão mássica no evaporador solar. Fonte: Vieira *et al.* (2018).

Na Figura 11 é mostrada a irradiação incidente no evaporador solar nos instantes em que a tenda projeta sombra sobre o evaporador (valores próximos de 100 W/m²) e no instante em que a tenda é retirada, onde se tem valores mais altos (próximos de 900 W/m²).

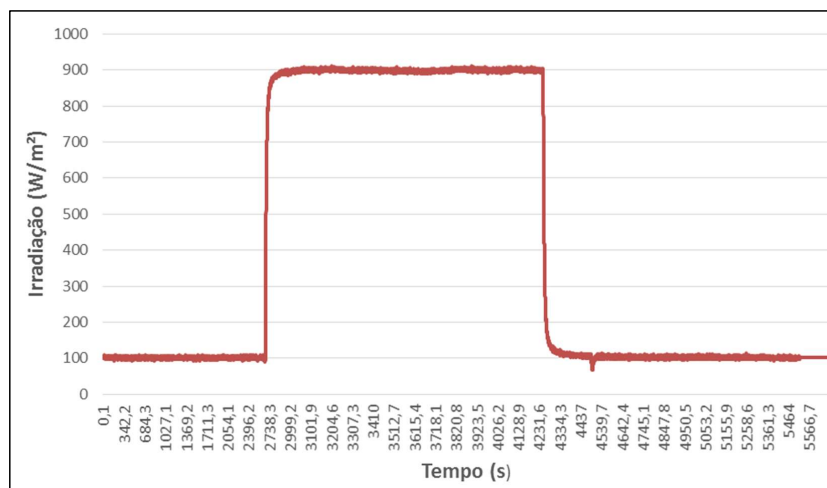


FIGURA 11. Irradiação incidente no plano do evaporador solar. Fonte: Vieira *et al.* (2018).

Por fim, a Figura 12 apresenta o comportamento das temperaturas dos quatro pontos do ciclo de refrigeração da bomba de calor. Nota-se que o perfil de variação da temperatura na entrada do compressor (T02) é similar ao perfil do fluxo de irradiação

solar (Figura 11), evidenciando o impacto que a variação desse fluxo de calor ocasiona no grau de superaquecimento do sistema.

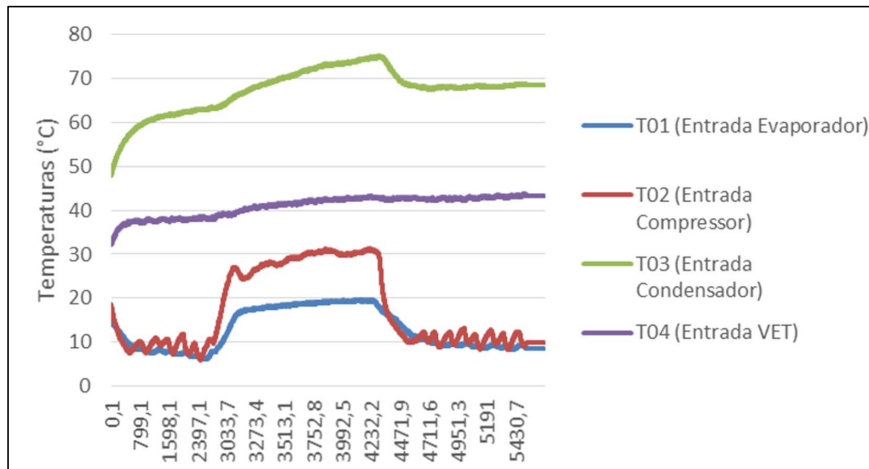


FIGURA 12. Temperaturas nos 4 pontos do ciclo da Bomba de Calor. Fonte: Vieira *et al.* (2018).

As pressões foram registradas em 3 etapas, sendo a primeira com a tenda projetando sombra no evaporador, a segunda sem a tenda com a radiação solar incidindo diretamente no evaporador e a última etapa com a tenda sendo colocada novamente na posição original. Todas as etapas foram medidas em regime permanente, ou seja, quando a máquina encontra seu ponto de operação e suas pressões encontram-se estáveis como apresentado na Tabela 5.

TABELA 5. Pressões no sistema.

Configuração	P1 [kPa]	P2 [kPa]	P3 [kPa]	P4 [kPa]
	Entrada Evap. Solar	Entrada Compressor	Entrada Condensador	Entrada VET
1ª Etapa Sombra	260,00	190,00	1.157,18	980,66
2ª Etapa Sol	460,00	330,00	1.353,32	1098,35
3ª Etapa Sombra	300,00	220,00	1.421,96	1.225,83

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2018).

A temperatura ambiente e a umidade do ar foram coletadas a partir de um termo-higrômetro. Durante o experimento, a temperatura ambiente média foi de 21,4 °C e a umidade relativa média do ar foi de 57,3%.

Com o aumento da temperatura no evaporador, simulada por uma função degrau através da retirada da tenda, a temperatura de evaporação aumentou, levando um aumento da pressão de evaporação, que como consequência da Equação 3,

diminuiu a vazão mássica na entrada do evaporador. Em seguida, o rendimento volumétrico do compressor aumentou com o aumento da pressão de evaporação, de acordo com a Equação 2, acarretando assim, um aumento da vazão mássica imposta pelo compressor, segundo a Equação 1. Este aumento é intensificado pela elevação da massa específica do fluido que acontece com o aumento da pressão de evaporação, acarretando o esvaziamento do evaporador, que por seguinte, provoca um aumento no grau de superaquecimento. Neste instante, a válvula termostática atua permitindo o aumento em sua seção de abertura, o que possibilita a passagem de mais fluido frigorífico, preenchendo o evaporador novamente até um ponto de estabilidade, onde a temperatura e a pressão de evaporação são maiores do que o valor inicial. Assim, neste momento, a tenda foi colocada e o sistema se comportará de maneira inversa até um novo ponto de operação com a pressão e temperatura mais baixas.

Resultados semelhantes são descritos por Zhang *et al.* (2016), onde é mostrado a variação de pressão e de fluxo de massa dentro de um evaporador através da abertura e fechamento de uma válvula de expansão elétrica. Além disso, Fabris (2006) desenvolveu um trabalho semelhante e chegou a resultados conforme descritos acima.

5 CONCLUSÕES

O ciclo de compressão a vapor é muito comum em diversos equipamentos frigoríficos e, atualmente, abrange as mais variadas aplicações, sejam industriais ou domésticas. Dado este cenário, as máquinas frigoríficas tornam-se de extrema importância e, cada vez mais, tem-se buscado mecanismos que possam aperfeiçoá-las. O estudo do comportamento dos parâmetros termodinâmicos e operacionais das máquinas de aquecimento e refrigeração por compressão de vapor auxilia no entendimento de sua operação e promove a melhoria nos sistemas, aumentando o seu coeficiente de desempenho. Um dos principais equipamentos que pertence a este ciclo de compressão de vapor é a válvula de expansão termostática. Por isso, este estudo focou principalmente no entendimento deste componente tão importante.

O experimento realizado contou com uma bancada frigorífica de testes bem instrumentada que opera por um ciclo de compressão de vapor, e com auxílio desta, foi possível avaliar o comportamento da temperatura de superaquecimento no evaporador, bem como a variação da vazão mássica do sistema. Ao ser submetido um degrau de temperatura no evaporador por meio de um sistema secundário composto por uma resistência elétrica e um ventilador, foi possível observar a ação da VET no sentido de devolver a estabilidade do ciclo por meio da variação da vazão de fluido refrigerante. O mesmo aconteceu no sistema elaborado a partir de uma bomba de calor com evaporador solar, onde foi simulado um degrau de temperatura no fluido primário que troca

calor com o evaporador de uma bomba de calor, permitindo assim, o entendimento do comportamento deste equipamento que, muitas das vezes, funciona trocando calor com o ambiente externo. O evaporador estudado é um evaporador solar de expansão direta, onde a temperatura e o calor provindo do sol não são constantes, podendo ter dias ensolarados, bem como dias nublados e até chuvosos. Com os resultados simulados para algumas situações de operação do evaporador, foi analisada a atuação da válvula termostática, provocando a mudança da temperatura do fluido refrigerante e, conseqüentemente, da pressão de evaporação.

Os resultados encontrados durante os experimentos mostraram que após ajustado o grau de superaquecimento, a VET trabalha conduzindo sempre o ciclo para sua estabilidade. Também foi possível observar que a temperatura na saída do evaporador segue uma relação inversamente proporcional à vazão de fluido inserido neste componente.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C.R.F.; MEDEIROS, P.S.G., 2009. Análise de um coeficiente de performance de um chillier doméstico operando com o R-401a em regime transiente. *Holos*, vol. 4, p. 62-74.
- BORGNAKKE, C. e SONNTAG, R. E., 2013. *Fundamentos da Termodinâmica*, 8ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- DINIZ, H.A.G., 2017. “Estudo comparativo da eficiência energética de uma bomba de calor assistida por energia solar operando com condensadores por imersão e coaxial”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- EAMES, I.W.; MILAZZO, A.; MAIDMENT, G.G., 2014. *Modelling thermostatic expansion valves. International Journal of Refrigeration*, vol. 38, p. 189-197.
- FABRIS, G., 2006. Desenvolvimento de um modelo semi-empírico de uma válvula de expansão termostática de um sistema de refrigeração. *11th Brazilian Congress of Thermal Sciences Engineering*, Curitiba.
- KOURY, R.N.N.; MACHADO, L.; ISMAIL, K.A.R., 2001. *Numerical simulation of a variable speed refrigeration system. International Journal of Refrigeration*, vol. 24, nº 2, p. 192-200.
- LIMA, L.H.P., 2015. Análise do desempenho de um refrigerador doméstico funcionando com válvula de expansão micrométrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- LUZ, A. P., DINIZ, H. A. G., VIEIRA, N. M. R., RESENDE, S. I. M., MACHADO, L., 2021. Análise Transiente Da Operação De Uma Válvula De Expansão Termostática Em Uma Máquina De Refrigeração Ar-Ar. XXI CONEMI, Belo Horizonte.

MACHADO, L., 1995. *Modèle de Simulation et Étude Expérimentale d'un Évaporateur de Machine Frigorifique en Régime Transitoire*. Doctoral thesis. Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon.

MAIA, A.A.T., 2000. Estudo Experimental do comportamento Transiente do Conjunto Evaporador Válvula de Expansão. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MAIA, G.F.F., 2007. Modelagem Matemática e Estudo Experimental de uma Bomba de Calor Ar Água de Baixo Custo para Uso Residencial. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MANDAL, K.; ROY, R., 2014. *First law and second law analysis of mechanical vapor compression refrigeration system using refrigerants CFC12, R134a and R290*. *International Journal of Current Engineering and Technology*, India.

MESQUITA, N., 2009. Elementos do circuito de refrigeração. Documento nº 3. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

NUNES, R.O., 2010. Modelo Transiente Para Um Evaporador Estático De Uma Bomba De Calor Ar-Água. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NUNES, R.O., 2013. Modelo dinâmico e estudo experimental para um resfriador de uma bomba de calor operando com CO₂ para aquecimento de água residencial. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STOECKER, W. F. e JABARDO, J. M. S., 2002. *Refrigeração Industrial*, 2ª edição, Editora Blucher, São Paulo.

STOECKER, W.F.; JONES, J.W., 1985. *Refrigeração e ar-condicionado*. São Paulo: McGraw Hill.

VARGAS, L.C.P., 2010. Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

VENTURINI, O.J.; PIRANI, M.J., 2005. *Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial*. Rio de Janeiro.

VIEIRA, N. M. R., DINIZ, H. A. G., VEIIRA, J. M. G., RODRIGUEZ, O. R. S., PABON, J. J. G., MACHADO, L., 2018. Análise Do Regime Transiente Em Um Evaporador, De Uma Bomba De Calor, Através De Um Degrau Na Temperatura De Evaporação. 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Águas de Lindóia.

ZHANG, Z., 2016. *Experimental Investigation on the Influence of Refrigerant Charge on the Performance of Trans-critical CO₂ Water-Water Heat Pump*. 16th International Refrigeration na Air Conditioning Conference at Purdue.

CAPÍTULO 2

REESTRUTURANDO A FORMAÇÃO DE ENGENHEIROS ATRAVÉS DE UMA EDUCAÇÃO CENTRADA EM COMPETÊNCIAS: A INICIATIVA CDIO

RESTRUCTURING ENGINEERING EDUCATION THROUGH SKILL-CENTERED EDUCATION: THE CDIO INITIATIVE

Henrique Gasparetto¹
Ana Carolina Ferreira Piazzzi Fuhr²

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.2

¹ <http://lattes.cnpq.br/1305700206958790>
² <http://lattes.cnpq.br/8848158642213383>

RESUMO

Tal qual as mais diversas áreas da ciência, a educação também passa por transformações e avanços. A atual forma de educação na engenharia vem recebendo fortes críticas quanto a sua engessada metodologia focada no desenvolvimento de habilidades técnicas. Entretanto, a academia e a indústria vêm notando a necessidade de reinventar a formação de novos engenheiros a fim de compreender habilidades sociocomportamentais. Neste sentido, a iniciativa *Conceive-Design-Implement-Operate* (CDIO) busca orientar a reestruturação curricular dos cursos de engenharia no mundo todo. A mesma compreende os conceitos-chaves de conceber, projetar, implementar e operar e busca abordar habilidades técnicas em conjunto com o desenvolvimento de habilidades pessoais, profissionais, comportamentais, entre outras, abrangendo a formação técnica aliada a problemas, projetos, produtos e sistemas do mundo real. Desta forma, o presente artigo faz uma crítica a atual concepção de ensino em engenharia, trazendo a iniciativa CDIO como alternativa à formação de engenheiros restritos a habilidades técnicas.

Palavras-chave: Iniciativa CDIO. Educação em engenharia. Engenheiro moderno.

ABSTRACT

Like the most diverse areas of science, education also undergoes transformations and advances. The current form of engineering education has received strong criticism regarding its rigid methodology focused on developing technical skills. However, academia and industry have noticed the need to reinvent the training of new engineers to understand socio-behavioral skills. In this sense, the *Conceive-Design-Implement-Operate* (CDIO) initiative seeks to guide the curricular restructuring of engineering courses worldwide. It comprises the key concepts of conceiving, designing, implementing, and operating. It aims to address technical skills with the development of personal, professional, and behavioral skills, covering specialized training combined with problems, projects, products, and systems in the real world. In this way, this article criticizes the current conception of engineering education, bringing the CDIO initiative as an alternative to the training of engineers restricted to technical skills.

Keywords: CDIO initiative. Engineering education. Modern engineer.

1 INTRODUÇÃO

Frente a um mundo que apresenta cada vez mais desafios que soluções, a educação não ficaria de fora desta perspectiva. O problema da modernização do ensino

de engenharia vem tomando espaço a nível mundial. Ao levar em conta a formação técnica e atuação profissional de profissionais da engenharia, cerca de 40% dos profissionais recém graduados necessitam desenvolver habilidades e conhecimentos não abordados nos cursos de graduação. Dentre estas, é possível citar: trabalho em equipe, comunicação e inovação. Estas deficiências podem estar relacionadas à falta de metodologias ativas de ensino, como, por exemplo, metodologias de aprendizagem baseada em problemas e projetos, sala de aula invertida, método de instrução por pares, entre outras (CHUCHALIN, 2016).

Desta forma, o objetivo deste artigo é abordar a iniciativa CDIO (*Conceive-Design-Implement-Operate*) como proposta modeladora dos cursos de engenharia, a fim de garantir uma educação atualizada às necessidades do mundo moderno, em relação a habilidades técnicas e sócio-comportamentais. O artigo traz uma crítica ao atual modelo de ensino e aborda a complexa estrutura da iniciativa CDIO, a qual cada vez mais está fazendo parte do cotidiano de estudantes de engenharia no mundo todo. A metodologia utilizada foi de pesquisa bibliográfica, agrupando diferentes materiais encontrados em livros e artigos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 O problema da educação

Ainda que a tecnologia e a ciência tenham passado por grandes transformações ao longo dos séculos, é curioso notar que os métodos de ensino tenham se mantido os mesmos. As atuais abordagens em engenharia estão focadas, majoritariamente, em memorização. Sabe-se que as práticas de ensino não passam inalteradas por transformações sociopolítico econômicas, sendo fundamental que estas também busquem se adaptar para que continuem ocupando o relevante papel que a sociedade sempre lhe destinou (ARAÚJO, 2011; BAZZO, 1998; FONSECA, 2017).

Neste sentido, a pesquisa em educação vem tomando espaço no meio acadêmico. Não faltam referências quanto as propostas de mudanças das atuais concepções de ensino, todavia, pôr estas evoluções em prática ainda anda a passos curtos. Atualmente, sabe-se que para atingir construções de conhecimento significativas é necessário adotar posturas que tornem os alunos como sujeitos ativos no processo de ensino aprendizagem - deixando de lado as aulas puramente expositivas. Como metodologias ativas é possível citar a aprendizagem baseada em problemas e projetos, a sala de aula invertida, a aprendizagem por pares, a iniciativa CDIO para engenharias, entre outras. Assim, são amplas as possibilidades que os sujeitos responsáveis pela transmissão de

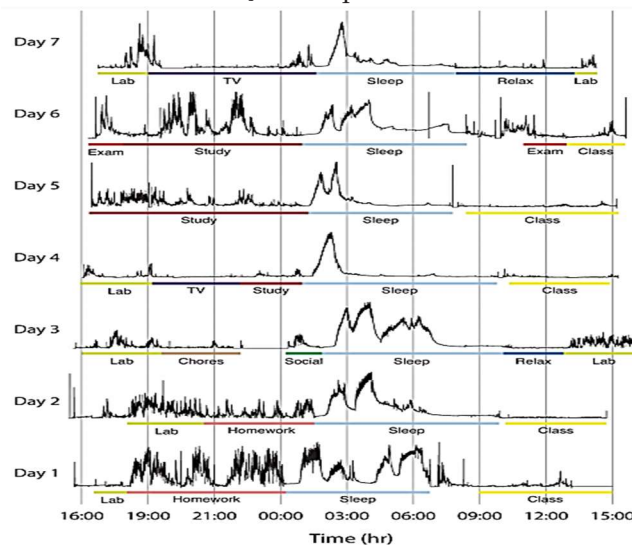
conhecimento podem adotar para transformarem aulas focadas nos professores em aulas focadas nos alunos.

Neste sentido, a fim de realizar construções positivas de conhecimento através de uma cultura educacional focada no aluno, Chickering (1987), após realizar uma ampla revisão de literatura educacional, propõe 7 princípios que sucedem boas práticas em educação, estes:

1. Encorajam o contato entre o aluno e professor;
2. Incentivam a cooperação entre alunos;
3. Incentivam a aprendizagem ativa;
4. Fornecem *feedback* imediato;
5. Enfatizam o tempo na tarefa;
6. Comunicam as altas expectativas;
7. Respeitam os diversos talentos e as diferentes formas de aprendizagem.

Para ilustrar como as atuais práticas de construção de conhecimento não possuem seu foco nos estudantes, a Figura 1 traz os resultados da avaliação da atividade eletrodérmica de um indivíduo que realiza atividades comuns como estudar e dormir.

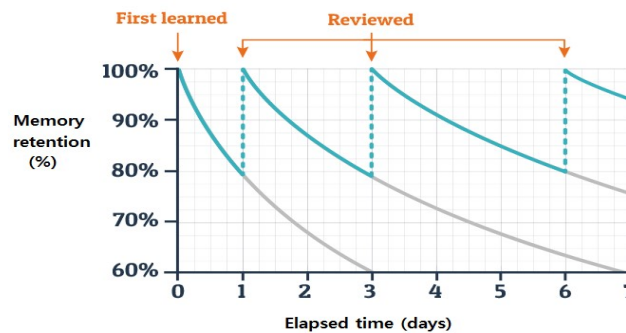
Figura 1 - Atividade cerebral em relação ao tipo de atividade desenvolvida (POH, 2010).



Analisando a Figura 1 é possível notar que a atividade cerebral do indivíduo é baixa quando está em uma aula comum. Ao ir para o laboratório, fazer suas atividades da faculdade e estudar, a atividade cerebral torna-se intensa, pois o indivíduo é o centro do seu próprio estudo e não se mantém recebendo conteúdos de maneira passiva.

Da mesma forma, mesmo que fosse possível atingir boas construções de conhecimento através da metodologia convencional focada no professor, a quantidade de informação que é realmente fixada na memória é muito baixa. A Figura 2 traz uma forma de superar o problema do esquecimento, através de sucessivas revisões, a porcentagem de informações absorvidas torna-se cada vez maior.

Figura 2 - Forma de superar a curva de esquecimento de Ebbinghaus (Chun, 2018).



É necessário utilizar uma metodologia dinâmica que estimule a aprendizagem individual, torne o sujeito ativo na construção de conhecimento e seja capaz de estabelecer o máximo de relações entre a prática e a informação. A fim de obter o máximo de retenção de conhecimento, bem como, adicionalmente, favorecer o desenvolvimento de habilidades comportamentais.

2.2 A iniciativa CDIO

A instituição de ensino politécnica de Singapura foi uma das primeiras a implementar a metodologia CDIO em seus cursos de engenharia. A estrutura foi desenvolvida pelo *Instituto de Tecnologia de Massachusetts* (MIT) e, atualmente, já é adotada por mais de 150 instituições de ensino no mundo. CDIO é a abreviatura para *Conceive-Design-Implement-Operate*, ou seja, conceber, projetar, implementar e operar. A abordagem visa transmitir tanto conhecimentos técnicos como outros tipos de habilidades, formando um engenheiro inovador e centrado no aprendizado contínuo (SINGAPORE POLYTECHNIC, 2019).

A iniciativa CDIO surgiu da necessidade de “reformatar” a formação de engenheiros, criando indivíduos capazes de conceber, projetar, implementar e operar produtos, processos e sistemas complexos, de uma maneira moderna e baseada no trabalho em equipe. Afinal, os engenheiros modernos estão comprometidos em todas as etapas de criação de produtos, processos e sistemas. Ao observar a sociedade, estes podem conceber um sistema ou dispositivo e projetá-lo através da manipulação de tecnologias. Em suma, para conceber, projetar, implementar e operar algo o engenheiro precisa trabalhar em grupos com comunicação eficaz, pensar crítica e criativamente e agir com responsabilidade, utilizando, ao mesmo tempo, uma variedade de habilidades pessoais e profissionais (CRAWLEY, 2014).

Existem duas necessidades ao se pensar em educação na engenharia: de um lado está a necessidade de transmitir o crescente conhecimento tecnológico e, de outro, o reconhecimento que os estudantes e engenheiros formados devem possuir várias habilidades sociocomportamentais. Assim, existe uma forte crítica quanto a atual forma

de educação de engenheiros, a qual é centrada no desenvolvimento de habilidades técnicas. Neste sentido, o desafio é formar engenheiros especialistas sobre determinadas tecnologias e generalistas sobre uma variedade de habilidades pessoais e interpessoais (CRAWLEY, 2014).

A iniciativa CDIO é um modelo que une o entendimento e desenvolvimento de habilidades técnicas enquanto simultaneamente trabalha competências pessoais e profissionais, necessárias à prática da engenharia (EDSTRÖM, 2020). Apanhando o desafio de formar engenheiros com habilidades técnicas e sociocomportamentais, a iniciativa CDIO possui três objetivos principais na educação de estudantes, a fim de tornar estes capazes de (CRAWLEY, 2014):

1. Dominar habilidades técnicas fundamentais;
2. Liderar a criação e operação de novos produtos, processos e sistemas;
3. Entender a importância e o impacto da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico na sociedade.

Para atingir uma educação baseada na iniciativa CDIO, conceber, projetar, implementar e operar não devem ser conteúdo da formação de engenheiros, mas sim, o contexto. É importante desenvolver uma abordagem que identifique as necessidades de aprendizagem dos estudantes, construindo uma sequência de experiências de aprendizagem. Estes dois elementos são chamados de CDIO *Syllabus* e CDIO *Standards*, o primeiro trata da codificação de resultados de aprendizagem específicos e o segundo estabelece uma estrutura de práticas efetivas de sucesso na educação em engenharia. Sendo que a abordagem curricular utilizada é orientada à disciplina, problemas e projetos (CRAWLEY, 2014; EDSTRÖM, 2014). Para resumir os conceitos abordados até aqui, construiu-se o Quadro 1.

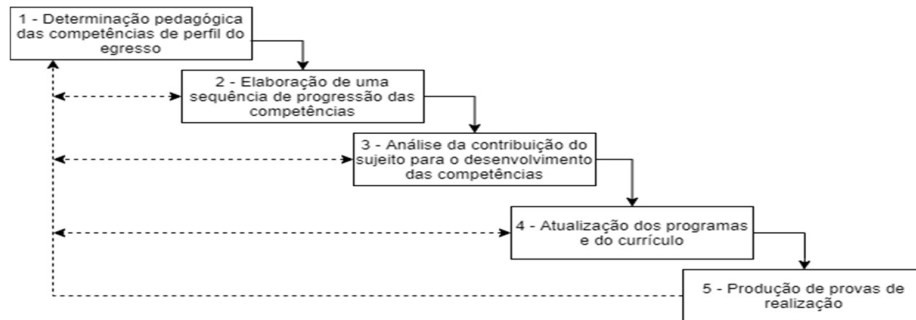
Quadro 1 - Conceitos chave da iniciativa CDIO (Muñoz, 2020).

CDIO Initiative	Estrutura educacional inovadora focada na melhoria contínua da formação de engenheiros. É desenvolvida pela cooperação entre instituições de ensino, estudantes, indústrias e engenheiros, busca focar na formação de novos engenheiros concebendo, projetando, implementando e operando produtos, processos e sistemas do mundo real.
CDIO Syllabus	Descreve o que é esperado de um graduando em engenharia a fim deste ganhar seu diploma através de 4 categorias: conhecimentos técnicos, atributos pessoais e profissionais, habilidades interpessoais e habilidades associadas a conceber, projetar, implementar e operar produtos, processos e sistemas.
CDIO Standards	São 12 princípios orientadores que auxiliam na concepção do currículo, estes abordam: o desenvolvimento do currículo, as experiências de projeto e implementação, métodos de ensino-aprendizagem, desenvolvimento do corpo docente e avaliação.

A Figura 3 apresenta a proposta de redesenho e atualização curricular proposta por Icarte (2016). Esta visa o desenvolvimento de uma carreira à luz do desen-

volvimento e aprendizagem de competências, proposta ancorada nos princípios da iniciativa CDIO.

Figura 3 - Proposta de redesenho curricular baseado em 5 etapas (Icarte, 2016).



Icarte (2016) cita que as atualizações curriculares devem ir além da atualização de conteúdos, devendo abordar o desenvolvimento de competências através da análise do perfil necessário aos egressos dos cursos de engenharia. Na primeira etapa do fluxograma proposto, é necessário estabelecer competências a serem desenvolvidas baseando-se no perfil dos egressos, levando em conta a opinião de profissionais formados da área. A segunda etapa visa desmembrar as competências e escaloná-las em níveis a serem alcançados, baseando-se na versão pedagógica obtida pela etapa 1. A etapa seguinte visa analisar a progressão da aprendizagem e desenvolvimento das competências estabelecidas no programa curricular. Nesta terceira etapa é possível determinar se algumas competências são pouco trabalhadas e necessitarão de mais atenção. Na etapa 4 busca-se seguir as recomendações a fim de aumentar a integração entre currículo, programa e perfil dos egressos, desta forma, é buscado seguir as conclusões obtidas na etapa anterior. Por fim, a etapa 5 permite quantificar o desenvolvimento de competências pelos estudantes. É interessante mencionar que as etapas são realizadas em sequência, mas o modelo permite a retroalimentação das informações, com o objetivo de manter a constante atualização e coerência do modelo.

Muñoz (2020) realizou um estudo sobre a implementação de uma estrutura curricular baseada na iniciativa CDIO em uma universidade do Chile, buscando responder quais ações ajudam efetivamente na sua implementação e quais fatores devem ser considerados. O estudo mostra que adotar a iniciativa CDIO traz melhorias nas habilidades pessoais e interpessoais dos estudantes em contextos de engenharia.

A iniciativa CDIO é capaz de formar engenheiros inovadores, dando um sentido à sua formação desde o primeiro ano, na qual o estudante é capaz de praticar a engenharia através da união da teoria com a prática. A formação estimula a inovação, uma vez que, o estudante é posto a trabalhar em equipes multidisciplinares e, também, estimula o desenvolvimento de um indivíduo capaz de pensar criativamente, podendo este atuar na indústria ou, até mesmo, na comunidade. As habilidades técnicas po-

dem ser trabalhadas a partir de aspectos teóricos e experimentais, integrando a estas, o desenvolvimento de habilidades sócio-comportamentais.

O modelo é baseado em uma reestruturação contínua e troca de experiência entre instituições de ensino, a fim de contribuir ao máximo na formação do engenheiro moderno. É interessante mencionar que a iniciativa CDIO é uma estrutura de formação, as metodologias utilizadas pelos docentes no processo de ensino-aprendizagem podem e devem utilizar metodologias ativas, levando em consideração a reciprocidade e a empatia. O professor não deve ser sujeito central da aprendizagem e deve assumir caráter intrinsecamente instrutivo, ao passo em que a educação deve ser focada no graduando.

É ampla a variedade de metodologias ativas que podem ser utilizadas para dar suporte ao processo de ensino-aprendizagem. Atualmente, começa-se a pensar até mesmo na utilização do *Design thinking* e *Scrum* como ferramentas de suporte na educação. O mais importante, é utilizar uma abordagem que torne o estudante centro de seu próprio estudo e que busque desenvolver outras habilidades além de uma formação puramente técnica. As metodologias utilizadas devem ser acompanhadas por objetivos, como, por exemplo, se a instituição percebe que é necessário desenvolver a proatividade, utilizam-se métodos que a desenvolvam. Obviamente, raramente alguma instituição irá conseguir obter a excelência em todas as dimensões da proposta pedagógica, todavia, é possível focar o desenvolvimento àquelas que são mais valorizadas.

3 CONCLUSÃO

A reinvenção do ensino é assunto que já vem sendo abordado nas mais diversas áreas de estudo. Utilizar metodologias ativas e centrar o ensino no estudante são práticas que podem ajudar os alunos e docentes nos processos de ensino-aprendizagem. A fim de reestruturar a formação de engenheiros, a iniciativa CDIO surge para preencher lacunas e aprimorar o ensino engessado ao desenvolvimento de habilidades exclusivamente técnicas. Ao buscar o desenvolvimento de habilidades comportamentais, como trabalho em equipe, oratória, abre-se espaço para que os estudantes possam superar a falta de motivação presente nos primeiros anos de faculdade, pois a iniciativa estabelece uma efetiva união da teoria com a prática do mundo real.

REFERÊNCIAS

CHICKERING, A. W.; GAMSON, Z. F. Seven principles for good practice in undergraduate education. *AAHE bulletin.*, 1987.

CHUN, B. A.; HEO, H. J. The effect of flipped learning on academic performance as an innovative method for overcoming Ebbinghaus' forgetting curve. **ICIET 18: Proceedings of the 6th International Conference on Information and Education Technology.**, p. 56-60, 2018.

CRAWLEY, E. F.; et al. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. **Springer**. 2 ed. New York.

EDSTRÖM, K. The role of CDIO in engineering education research: Combining usefulness and scholarliness. **European Journal of Engineering Education.**, v. 45, n. 1, p. 113-127, 2020.

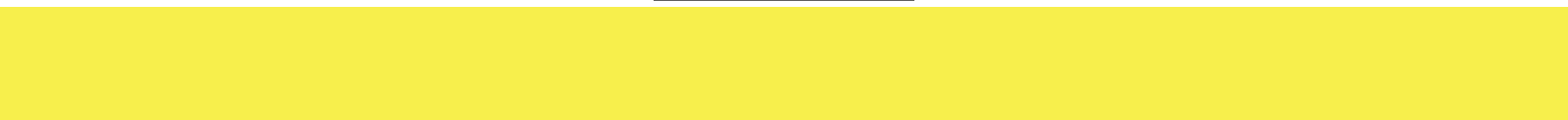
EDSTRÖM, K.; KOLMOS, A. PBL and CDIO: Complementary Models for Engineering Education Development. **European Journal of Engineering Education.** v. 39, n. 5, p. 539-555, 2014.

ICARTE, G. A.; LABATE, H. A. Metodología para la Revisión y Actualización de un Diseño Curricular de una Carrera Universitaria Incorporando Conceptos de Aprendizaje Basado en Competencias. **Formación Universitaria.**, v. 9, n. 2, 2016.

MUÑOZ, M. et al. Lessons learnt from a CDIO-based curricular reform of the computer science program at the Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. **European Journal of Engineering Education.** v. 45, n. 1, p. 55-72, 2020.

POH, M.; SWENSON, N. C.; PICARD, R. W. A wearable sensor for unobtrusive, long-term assessment of electrodermal activity. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering.**, v. 57, n. 5, 2010.

SINGAPORE POLYTECHNIC. CDIO. School of Electrical & Electronic Engineering (EEE). 2019. Disponível em: <<https://www.sp.edu.sg/engineering-cluster/eee/about-eee/pedagogy>>. Acesso em: 15 fev. 2021.



CAPÍTULO 3

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁCIDO LÁTICO POR *Lactobacillus* UTILIZANDO SORO DE QUEIJO COMO SUBSTRATO

*OPTIMIZATION OF LACTIC ACID PRODUCTION BY *Lactobacillus* USING CHEESE WHEY AS SUBSTRATE*

Ana Carolina Ferreira Piazzzi Fuhr¹
Henrique Gasparetto²

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.3

¹ <http://lattes.cnpq.br/8848158642213383>
² <http://lattes.cnpq.br/1305700206958790>

RESUMO

As bactérias do gênero *Lactobacillus* possuem a capacidade de utilizar resíduos agroindustriais como substrato para a produção de ácido láctico (AL), aliando sustentabilidade e retorno econômico. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de bactérias do gênero *Lactobacillus* utilizar soro de queijo como substrato para produção de AL, considerando, também, a suplementação do meio com peptona e extrato de levedura a fim de determinar as variáveis significativas para o processo. Inicialmente, o meio foi composto por 2, 6 e 10% m/v de soro de queijo, a suplementação com peptona e extrato de levedura ocorreu nas concentrações de 3 e 6% m/v. Um delineamento composto rotacional central buscou avaliar a composição do meio contendo soro de queijo nas concentrações de 1,2, 2,0, 4,0, 6,0 e 6,8% m/v suplementado com peptona 4,4, 5,0, 6,5, 8,0 e 8,6% m/v e extrato de levedura com concentração fixa de 4,0% m/v. Os resultados mostram que maiores concentrações de soro de queijo e peptona levam a uma maior produção de AL, sendo possível atingir um ponto ótimo de produção de 92%. Os resultados mostram que o soro de queijo pode ser utilizado para a produção de AL como forma alternativa de utilizar este resíduo.

Palavras-chave: Peptona. Extrato de levedura. Biotecnologia.

ABSTRACT

Bacteria of the genus *Lactobacillus* can use agro-industrial residues as a substrate for the lactic acid (LA) production, combining sustainability and economic return. This work aimed to evaluate the capacity of bacteria of the genus *Lactobacillus* to use cheese whey as a substrate for the LA production, considering the supplementation of the medium with peptone and yeast extract to determine the significant variables of the process. Initially, the medium was composed of 2, 6, and 10% w/v of cheese whey, supplementation with peptone and yeast extract occurred at concentrations of 3 and 6% w/v. A central rotational composite design sought to evaluate the composition of the medium containing cheese whey at concentrations of 1.2, 2.0, 4.0, 6.0, and 6.8% w/v supplemented with peptone at 4.4, 5.0, 6.5, 8.0 and 8.6% w/v and yeast extract with a fixed concentration of 4.0% w/v. The results show that higher concentrations of cheese whey and peptone lead to a higher LA production, reaching an optimal point of 92%. Against this background, the LA production is an alternative to using cheese whey residue.

Keywords: Peptone. Yeast extract. Biotechnology.

1 INTRODUÇÃO

Uma alternativa para o manejo de resíduos agroindustriais é por meio de rotas biotecnológicas. Essas rotas utilizam agentes biológicos para desenvolver processos e produtos, ou mesmo para solucionar problemas^{1,2,3,4,5,6}. Ao se tratar do setor ambiental, a biotecnologia se destaca pela biodegradação: a capacidade de decompor a matéria orgânica por meio de microrganismos. Tal processo é benéfico ao meio ambiente e ao ser humano, pois é possível concomitantemente eliminar contaminantes e obter produtos de valor agregado^{1,4,7}.

As alternativas biológicas que estão sendo estudadas visam processos que utilizem resíduos agroindustriais, transformando-os em produtos de valor agregado como álcoois, ácidos orgânicos e enzimas, por meio de processos fermentativos^{1,4,6}. Os resíduos agroindustriais costumam apresentar alto teor de açúcares fermentescíveis, fazendo com que sejam utilizados em diversos estudos^{1,3}.

Em relação à fermentação, sabe-se que bactérias do gênero *Lactobacillus* podem converter resíduos agroindustriais em produtos fermentativos, como o ácido láctico (AL)^{8,9}. Aliado a uma expectativa de aumento da necessidade de AL há uma necessidade de se descobrir alternativas ao tratamento de resíduos industriais pela produção concomitante de AL.

Um dos resíduos mais comuns produzidos pelas indústrias alimentícias e agroindustriais é o soro de queijo, sendo um líquido residual obtido pela precipitação e remoção da caseína do leite nos processos de fabricação de queijos^{10,11,12,13}. Esse subproduto equivale a 85-95% do volume do leite, retendo até 55% de seus nutrientes, como proteínas solúveis, lactose, vitaminas e minerais¹¹, fazendo com que o soro tenha quase todos os aminoácidos essenciais¹⁴ e tornando atrativa a sua utilização como substrato em bioprocessos¹⁵.

O Brasil é um grande produtor de leite e seus derivados. Em 2015, aproximadamente 11 bilhões de litros de leite foram destinados à produção de queijos, o equivalente a 46% da produção total de leite naquele ano¹⁶. Neste sentido, para cada tonelada de queijo produzida, são geradas cerca de 8 toneladas de soro de leite^{17,18}, que necessita de uma destinação final adequada devido a sua alta carga orgânica. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a produção de AL através da transformação do soro de queijo utilizando *Lactobacillus*.

2 METODOLOGIA

2.1 Inóculo

Os microrganismos utilizados forma *Lactobacillus* cultivados inicialmente em meio MRS¹² adaptado. O meio de cultura foi composto por peptona (10,0 g L⁻¹), extrato de levedura (5,0 g L⁻¹), extrato de carneiro (10,0 g L⁻¹), glicose (20,0 g L⁻¹), fosfato dibásico de potássio anidro (2,0 g L⁻¹), acetato de sódio (2,0 g L⁻¹), sulfato de amônio (2,0 g L⁻¹), sulfato de magnésio (0,20 g L⁻¹) e sulfato de manganês (0,05 g L⁻¹)¹².

2.2. Planejamento Experimental Fatorial

O soro de queijo em pó ultrafiltrado foi reconstituído em água destilada para preparar o soro líquido. O meio foi suplementado com extrato de levedura e peptona, conforme Tabela 1. Meio esterilizado a 121°C por 20 min. Cultivo mantido a 37°C²⁰ e 150 rpm, com concentração de inóculo 10% v/v. O tempo de fermentação foi de 5 dias.

Para cada experimento foi determinada a acidez expressa em porcentagem de ácido lático. Posteriormente, foram realizados tratamentos estatísticos para identificar as variáveis mais significativas no processo de fermentação. Os resultados foram analisados por meio do gráfico de Pareto.

Tabela 1. Concentrações do meio de cultivo.

Variáveis	Concentração (% m/v)		
	+1	0	-1
Soro de queijo	2	6	10
Extrato de levedura	0	3	6
Peptona	0	3	6

2.3. Delineamento composto central rotacional (DCCR)

A partir dos resultados obtidos através do planejamento experimental fatorial, foram realizados novos ensaios com um novo desenho experimental - DCCR, para a respostas de acidez expressa em porcentagem de AL. Para este planejamento, a concentração de extrato de levedura foi estabelecida em 4% m/v, enquanto as demais variáveis foram variadas conforme Tabela 2. A análise estatística foi realizada de acordo com o gráfico e Pareto.

Tabela 2. Concentração das variáveis do DCCR do soro de queijo suplementado.

Variável	Concentração (% m/v)				
	- α	-1	0	+1	+ α
Peptona	4,4	5,0	6,5	8,0	8,6
Soro de queijo	1,2	2,0	4,0	6,0	8,0

2.4. Acidez expressa em porcentagem de AL (%)

Para a determinação da acidez titulável foi realizado uma titulação de 10 mL do cultivo com NaOH 0,1 M. A dosagem de AL foi determinada de acordo com a Equação 1. Em que, V = volume de NaOH necessário para o ponto de viragem, F_c = fator de correção para NaOH e, V_a = volume de amostra titulada¹⁶. O procedimento foi realizado em triplicata.

$$AL(\%) = \frac{0,9 \cdot V \cdot F_c}{V_a} 100\% \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Planejamento Experimental Fatorial

A Tabela 3 apresenta os resultados do planejamento fatorial completo, que avaliou os efeitos das variáveis: concentração de soro de queijo, concentração de peptona e concentração de extrato de levedura, na variável de resposta porcentagem de AL. É possível observar que os ensaios 5 e 6 apresentaram a maior produção de AL, cerca de 92,07 e 89,99%, respectivamente. Os ensaios que apresentaram a menor produção de AL foram 1 e 2, os quais não apresentaram suplementação do meio.

Tabela 3. Matriz dos testes do fatorial completo com resultados expressos em (%) de AL.

Exp.	Soro (% m/v)	Extrato de levedura (% m/v)	Peptona (% m/v)	AL (%)
1	(-1) 2	(-1) 0	(-1) 0	26,730 \pm 1,782
2	(+1) 10	(-1) 0	(-1) 0	40,689 \pm 2,722
3	(-1) 2	(+1) 6	(-1) 0	57,618 \pm 2,058
4	(+1) 10	(+1) 6	(-1) 0	75,141 \pm 2,242
5	(-1) 2	(-1) 0	(+1) 6	92,070 \pm 1,361
6	(+1) 10	(-1) 0	(+1) 6	89,991 \pm 1,543
7	(-1) 2	(+1) 6	(+1) 6	73,953 \pm 2,673
8	(+1) 10	(+1) 6	(+1) 6	88,506 \pm 2,058
9	(0) 6	(0) 3	(0) 3	85,239 \pm 0,514
10	(0) 6	(0) 3	(0) 3	83,457 \pm 2,864
11	(0) 6	(0) 3	(0) 3	83,160 \pm 2,572

Analisando os dados obtidos para a porcentagem de AL, é possível observar (Figura 1) que, a 5% de significância, apenas a concentração de peptona apresentou relevância significativa para a produção de LA.

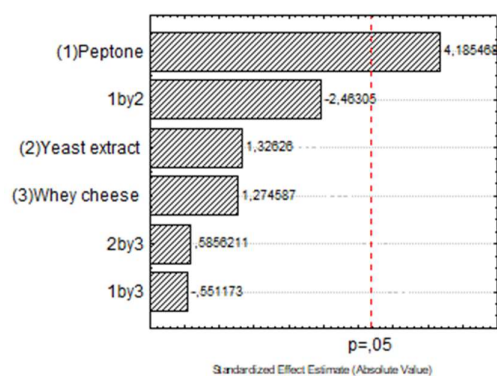


Fig. 1. Gráfico de Pareto para a porcentagem de AL para o planejamento fatorial experimental.

3.2 Delineamento composto central rotacional

Na Tabela 4 são apresentados os resultados do DCCR, podendo-se observar que todos os testes apresentaram resultados satisfatórios. Os ensaios 8 e 4 se destacam por apresentarem maior produção de AL, cerca de 74,42 e 70,69%, respectivamente. Verificou-se que uma maior concentração de soro de leite e uma concentração moderada de peptona apresentaram maior produção de AL.

Tabela 4. Matriz dos testes do DCCR com resultados expressos em (%) de AL.

Exp.	Soro de queijo (% m/v)	Peptona (% m/v)	% LA
1	(-1) 2,0	(-1) 5,0	56,675 ± 1,079
2	(+1) 6,0	(-1) 5,0	67,885 ± 2,351
3	(-1) 2,0	(+1) 8,0	56,052 ± 0,000
4	(+1) 6,0	(+1) 8,0	70,688 ± 1,079
5	(0) 4,0	(-α) 4,4	61,034 ± 1,427
6	(0) 4,0	(+α) 8,6	60,412 ± 0,539
7	(-α) 1,2	(0) 6,5	51,070 ± 0,539
8	(+α) 6,8	(0) 6,5	74,425 ± 0,539
9	(0) 4,0	(0) 6,5	65,083 ± 0,539
10	(0) 4,0	(0) 6,5	65,394 ± 0,000
11	(0) 4,0	(0) 6,5	65,084 ± 0,539

Analisando os dados obtidos para a porcentagem de AL é possível observar (Figura 2) que, a 5% de significância, a única variável que interfere na produção de AL é o soro de queijo, ultrapassando o nível de significância.

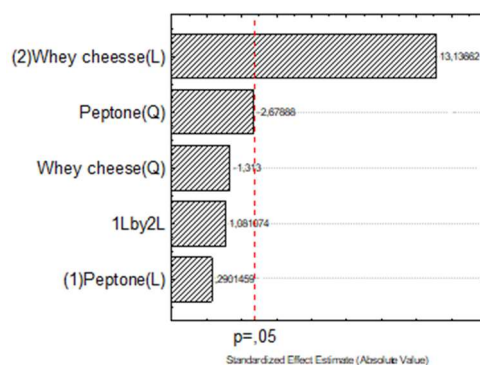


Fig. 2. Gráfico de Pareto para a resposta percentual expressa em AL para o DCCR.

Uma vez que os microrganismos que realizam a fermentação láctica obtêm energia por meio de açúcares fermentescíveis e por serem biossinteticamente limitados, estes apresentam exigências nutricionais que devem ser supridas para seu bom desenvolvimento²³. Além do carbono, suas necessidades nutricionais incluem nitrogênio, minerais e vitaminas, que podem ser incluídos na forma de aminoácidos, peptídeos, peptona, extrato de levedura, ureia ou sulfato de amônio e sais^{24,25}. Sua demanda nutricional geralmente é suprida quando há presença de carboidratos fermentescíveis, peptona e extratos de levedura e de carne presentes no meio de cultura²⁶. A fonte de carbono e nutrientes mais utilizada foi o soro de queijo, que contém lactose, proteínas, gorduras, vitaminas e minerais^{11,27}. Isso faz com que o soro apresente quase todos os aminoácidos essenciais, exceto os aromáticos^{14,28}, uma alta concentração de aminoácidos de cadeia ramificada²⁸ e contendo enxofre²⁹. Além de conter vitaminas do complexo B, sais minerais (NaCl, KCl), cálcio (na forma de fosfatos), ureia e ácido úrico^{11, 12}. Neste sentido, a composição do soro de queijo o torna atrativo para ser utilizado como substrato em bioprocessos¹⁵.

A maior produção de AL foi obtida quando o soro foi suplementado com peptona, no qual foi possível obter cerca de $92,070 \pm 1,361$ % de AL. Isso acontece porque, para o aproveitamento completo da lactose do soro, é necessário complementá-la com uma fonte adicional de nitrogênio²⁷, como a peptona³⁰. O extrato de levedura, no entanto, não teve grande influência na produção de AL, de forma que não agrega diferentes nutrientes ao meio de cultura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com alta produção de resíduos agroindustriais e com expectativa de aumento da demanda por AL, há uma necessidade de estudar alternativas que combinem o tratamento de resíduos com a produção concomitante de AL. Nesse sentido, é importante estudar microrganismos que tenham capacidade de produzir AL, para testar sua capacidade de produção quando submetidos a substratos constituídos de resíduos. É fundamental que haja respostas a estímulos ou mudanças ambientais, uma vez que as condições em que são submetidos no laboratório podem não condizerem com as naturais, impossibilitando a obtenção do produto de interesse. Sabe-se que bactérias do gênero *Lactobacillus* possuem a capacidade de utilizar diversos resíduos agroindustriais como substrato para a produção de AL. Assim, o crescimento e a capacidade de produção de AL foram testados por planejamento experimental, utilizando soro de queijo como substrato, suplementado com extrato de levedura e peptona, a fim de suprir a deficiência nutricional do soro de queijo. Com base no delineamento experimental, o ponto ótimo para a produção de AL com soro de queijo foi de $92,07 \pm 1,36$ %, quando se

utilizou 2% m/v de soro de leite e suplementado com peptona na concentração de 6% m/v para o fatorial completo. Os resultados obtidos demonstram que a suplementação do meio de cultura aumenta a produção de AL. No entanto, estudos aprofundados são necessários em relação à suplementação média, uma vez que o uso de extrato de levedura e peptona inviabiliza o custo do processo. Da mesma forma, sugere-se que outras fontes de nutrientes possam ser estudadas como suplementos para reduzir os custos de produção.

REFERÊNCIAS

- [1] FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M. de. Biotecnologia: uma visão geral. Biotecnologia estado da arte e aplicações na agropecuária. Embrapa. p. 13–30, 2011.
- [2] DELGADO, C. H. O.; FLEURI, L. F. Orange and mango by-products: Agro-Industrial waste as source of bioactive compounds and botanical versus commercial description – A review. **Food Reviews International**, v. 32, p. 1–14, 2016.
- [3] MALAJOVICH, M. A. Biotecnologia e Indústria. Biotecnologia. ACTE, p. 114–130, 2016a.
- [4] MALAJOVICH, M. A. O que é biotecnologia? Biotecnologia. ACTE, p. 1–8, 2016b.
- [5] WEC – World Energy Council. **World Energy Resources Wast to Energy**, p. 3–10, 2016.
- [6] GUTIERREZ-MACIAS, P.; JESUS, M. de L. H. de; BARRAGEN-HUERTA, B. E. The production of biomaterials from agro-industrial waste. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 26, p. 4128–4152, 2017.
- [7] PANESAR, P. S.; KAUR, S. Bioutilization of agro-industrial waste for lactic acid production. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 50, p. 2143–2151, 2015.
- [8] HOFVENDAHL, K.; HAHN-HÄGERDAL. Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resources. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 26, p. 87–107, 2000.
- [9] DUMBREPATIL, A. ADSUL, M. CHAUDHARI, S. KHIRE, J. GOKHALE, D. Utilization of molasses sugar for lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii subsp. delbrueckii* mutant uc-3 in batch fermentation. **Appl. Environ. Microbiol.**, p. 333-5, 2008.
- [10] ZADOW, J. G. Utilization of milk components: whey. Modern Dairy Technology vol. 1 – Advances in milk processing. **Springer – Science + Business Media**, p. 313–374, 1994.

- [11] SISO, M. I. G. The biotechnological utilization of cheese whey: a review. **Biore-source Technology**, p. 1-11, 1996.
- [12] PRAZERES, A. R.; CARVALHO, F.; RIVAS, J. Cheese whey management: A review. **Journal of Environmental Management**, p. 48-68, 2012.
- [13] CARVALHO, F.; PRAZERES, A.F.; RIVAS, J. Cheese whey: characterization and treatment. **Science of the total environment**, p. 385-396, 2013.
- [14] SGARBIERI, V. C. Propriedades fisiológicas-funcionais das proteínas do soro de leite. **Rev. Nutr.**, p. 397- 409, 2004.
- [15] NERY, T. B. R.; BRANDÃO, L. V. Biossíntese de goma xantana a partir da fermentação de soro de leite: rendimento e viscosidade. **Química Nova**, p. 1927-1941, 2008.
- [16] ZOCCAL, R. Queijos produção e importação. 2016. Disponível em: < <http://www.baldebranco.com.br/queijos-producao-e-importacao/>>. Acesso em: 03 de nov. de 2017.
- [17] KNIPSCHILDT, M. E.; ANDERSEN, G. G. Drying of milk and milk products. Modern Dairy Technology vol. 1 - Advances in milk processing. **Springer - Science + Business Media**, p. 159-254, 1994.
- [18] BASTOS, A. Pesquisadores identificam composto benéfico para a saúde em soro de leite. Embrapa, 2015. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias//noticia/4989705/pesquisadores-identificam-composto-benefico-para-a-saude-em-soro-deleite>>. Acesso em: 03 de nov. de 2017.
- [19] MAN, J. C., ROGOSA, M.; SHARPE, M. E. A medium for the cultivation of *Lactobacilli*. **Journal of Applied microbiology**, p. 130-135, 1960.
- [20] PANESAR, P. S.; KENNEDY, J. F.; KNILL, C. J.; KOSSEVA, M. Production of L(+) lactic acid using *Lactobacillus casei* from whey. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, p. 219-226, 2010.
- [21] SILVA, D. J. Determinação do pH, da acidez titulável e do ácido láctico da silagem. **Análise de Alimentos: métodos químicos e biológicos**, p. 110-114, 1981.
- [22] INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. v.1, p. 203-204, 1985.
- [23] MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. Metabolismo microbiano. **Microbiologia de Brock**, 2016.
- [24] GROOT, W.; KRIEKEN, J. V.; SLIEKERS, O.; VOS, S. de. Production and purification of lactic acid and lactide. Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. **John Wiley & Sons**, p. 25-50, 2011.

- [25] MARTINEZ, F. A. C.; BALCIUNAS, E. M.; SALGADO, J. M.; GONSÁLEZ, J. M. D.; CONVERTI, A.; OLIVEIRA, R. P. De S. Lactic acid properties, applications and production: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 30, p. 70-83, 2013.
- [26] WHITMAN, W. B.; PARTE, A. C. *Bergey's manual of systematic bacteriology*. Springer, 2009.
- [27] WEE, Y. J.; KIM, J. N.; RYU, H. W. Biotechnological production of lactic acid and its recent applications. **Food Technol. Biotechnol.**, p. 163-172, 2006.
- [28] MARSHALL, K. Therapeutic applications of whey protein. **Alternative Medicine Review**, v. 9, n. 2, p. 136-156, 2004.
- [29] BAUMAN, D. E.; MATHER, I. H.; WAL, R. J.; LOCK, A. L. Major advances associated with the biosynthesis of milk. **Journal of Dairy Science**, v. 89, n. 4, p. 1235-1243, 2006.
- [30] CRUEGER, W.; CRUEGER, A. *Biotechnología - Manual de microbiología industrial*. Editorial ACRIBIA, 1993.

CAPÍTULO 4

UMA PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO PARA UM SISTEMA DE CIP INDUSTRIAL

A AUTOMATION PROPOSAL FOR AN INDUSTRIAL CIP SYSTEM

François de Souza Martins¹

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.4

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8269-5149>

RESUMO

O presente trabalho destina-se a obtenção de soluções de automação para processos de fabricação presentes nas indústrias alimentícias brasileiras. Através do emprego de controladores lógicos programáveis (CLP) e elementos de interface homem-máquina foi possível obter soluções de automação do processo de CIP (do inglês: Clean-in-place, que se refere à limpeza e desinfecção dos equipamentos utilizados no processo de fabricação) de uma planta destinada a elaboração de refrigerantes. Partindo de uma réplica 3D do parque fabril, com uso de softwares destinado a programação e simulação de CLPs em linguagem LADDER foi possível empregar técnicas de controle e lógicas de etapas para a obtenção de um sistema capaz de realizar a limpeza dos equipamentos. Concluiu-se que as os programas propostos refletem bem a realidade e contém robustez suficiente para implementação prática.

Palavras-chave: CLP. LADDER. Automação. CIP.

ABSTRACT

The present work is intended to obtain automation solutions for manufacturing processes present in the Brazilian food industries. Through the use of programmable logic controllers (PLC) and human-machine interface elements, it was possible to obtain automation solutions for the CIP process (Clean-in-place, which refers to the cleaning and inspiration of the equipment used in the process of manufacture) of a plant destined to the elaboration of soft drinks. Starting from a 3D replica of the industrial shop floor, with the use of software meaning the programming and simulation of PLCs in LADDER language, it was possible to use control techniques and step logic to obtain a system capable of cleaning the equipment. It was concluded that the proposed programs reflect reality well and contain sufficient robustness for practical implementation.

Keywords: CLP. STAIRS. Automation. CIP.

1 INTRODUÇÃO

Em muitas indústrias alimentícias e/ou de bebidas brasileiras as condições de operação ainda são precárias, com impactos em aspectos humanos e de segurança alimentar, gerando inúmeros transtornos para todos os envolvidos na cadeia de produção. Porém, com o advento da automação, atividades que eram inseguras ou imprecisas puderam ser revistas e melhoradas através de processos autônomos sem, ou com mínima interferência humana (LAMB, 2015). Isso resultou para as empresas menores custos com a não qualidade de seus produtos e segurança trabalhista de seus funcio-

nários. Atividades insalubres ou de risco puderam ser substituídas por máquinas que realizavam o serviço sem risco de vida do operador.

Vê-se atualmente um enorme uso da automação industrial aliada ao data-driven advindo de inteligências artificiais. A figura da automação promove a possibilidade de fornecer dados de fabricação para a formação de big-data e posteriormente os utilizar nas decisões tomadas por algoritmos estratégicos para interferir, no próprio chão de fábrica, o melhor cenário. Esse laço é considerado um sistema de controle de malha fechada e é atualmente o estado da arte em decisões autônomas industriais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Em (LAMB, 2015) Podemos encontrar aspectos práticos de implementações de automação nos ambientes fabris. Esta literatura foi utilizada para embasar as propostas de soluções durante a produção deste trabalho.

Já em (RODRIGUES, 2016), tem-se a abordagem da instrumentação e sinais geralmente utilizados nas manufaturas necessários para mensurar e estabelecer o controle das variáveis de interesse.

Ainda, em (TAMIME, 2008), há um rico detalhamento dos processos de limpeza química mais utilizados nas indústrias alimentícias e de bebidas ao redor do mundo. Trata-se de uma literatura completa sobre aspectos cruciais no projeto e implementação de sistemas de CIP e foi de grande valia para a realização deste trabalho.

3 METODOLOGIA

Para a correta proposta de solução deve-se, inicialmente, conhecer o problema existente. Isso, se tratando de parques fabris, geralmente significa fazer uma visita à empresa e reconhecer as dificuldades in loco além de conversas com os principais envolvidos no processo a ser automatizado.

Nesta ocasião, foram relatados os seguintes pontos:

- Risco de segurança e ergonomia operacional: atualmente o operador deve acessar a estação de CIP para realizar as manobras em placas de fluxo, direcionando o agente químico para o tanque que será realizada a limpeza;
- Falta de controle de qualidade: Sendo manual os engates, a dependência de obediência de tempos e concentrações está totalmente atrelada ao operador, que está sujeito a falhas humanas;

Assim, alinhando com a supervisão e gerência da área de produção, foram levantadas as tarefas a serem automatizadas, levando em consideração o orçamento disponível para o projeto:

- Realizar de forma automática (após o engate manual na placa de fluxo alinhando o tanque alvo) as diversas receitas de CIP existente na planta, construindo a

lógica pra troca automática de tanque de solução química (soda cáustica, ácido nítrico, água quente, ...) e os enxagues necessários;

- Controlar a eficiência de enxague dos químicos por condutividade da solução (uma vez que a dosagem de solução alcalina ou ácida promove a elevação da condutividade da solução);
- Controlar a vazão do fluido garantindo a existência de fluxo turbulento, necessário para a correta eficiência do processo de limpeza;

Reconhecido o problema, propõe-se as soluções cabíveis de lógica de programação, geralmente validados em simulações presentes nos próprios softwares dos fabricantes.

Prosseguiu-se para a construção do ambiente de simulação 3D do parque fabril, conforme a Figura 1. Foram alocados todos os tanques em que o processo de CIP ocorria e desenhado o layout de plataformas, escadas, segregações, bacias de contenção, e os demais elementos estruturais da planta.

Partindo-se das premissas de projeto a serem cumpridas, foram definidas as entradas e saídas digitais e analógicas a serem lidas/controladas pelo CLP e o setup comercial proposto, conforme a Figura 2.

Figura 1 - Modelagem 3D do parque fabril.

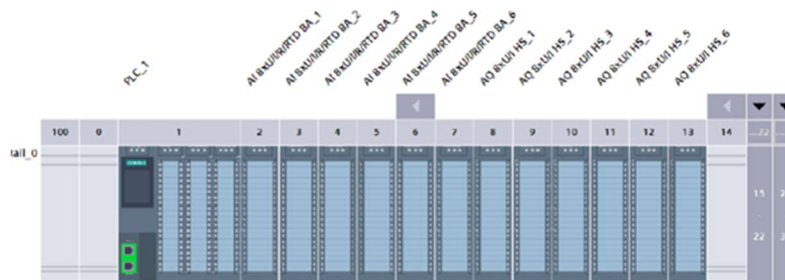


Fonte: Do autor, 2022.

Figura 2 - Entradas, saídas e setup necessário para implementação do controle de processo.

Projeto	Entradas		Saídas	
	17	51	18	51
	Digitais	Analógicas	Digitais	Analógicas
Tanques para CIP		8		8
Tanques de XC		28		28
Tanques de água		10		10
Botão de Start	1			
Botão de parada	1			
Botão de reset	1			
Alarme sonoro			1	
Alarme luminoso			3	
Seletora de aquecimento do Tanque de Soda	2			
Seletora de aquecimento do Tanque de Água	2			
Válvula de vapor do Tanque de Soda			1	
Válvula de vapor do Tanque de Água			1	
Bomba de avanço			1	
Bomba de retorno			1	
Entrada reserva	10	5		
Saída reserva			10	5

Setup	Entradas		Saídas	
	32	53	32	50
	Digitais	Analógicas	Digitais	Analógicas
CPU 1512C (Família 1500)	32	5	32	2
6ES7 531-7QF00-0AB0 (06 un)		48		
6ES7 532-5HF00-0AB0 (06 un)				48



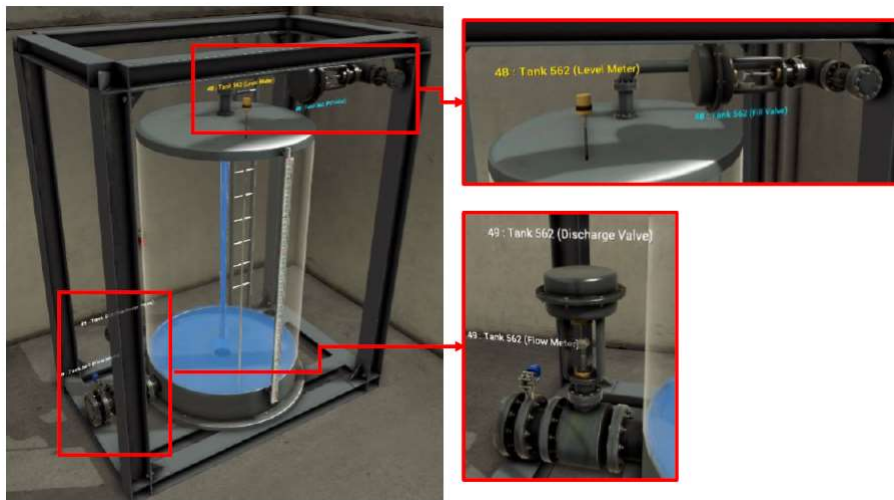
Fonte: Do autor, 2022.

A próxima etapa é a programação LADDER de um algoritmo capaz de realizar todas as exigências do projeto. Inúmeras soluções poderiam ser aplicadas ao processo, portanto, se faz necessário o detalhamento das partes mais importantes deste projeto a fim de esclarecer as decisões de construção tomadas:

- Deve-se obedecer a uma velocidade de escoamento de escoamento mínimo para a obtenção de um fluxo turbulento garantindo a correta limpeza das superfícies desejadas (TAMIME, 2008). Assim, tomou-se como elementos a serem controlados as válvulas moduladoras de entrada e saída dos tanques, utilizando-se um controle PID (proporcional, integral e derivativo);
- O sistema deve evitar o transbordo do tanque de solução de CIP ou o tanque a ser limpo. Isso deve ser implementado através do sensor analógico ultrassônico (RODRIGUES, 2016) (detalhe representado na Figura 3);
- O usuário deve ser capaz de selecionar alguma receita de CIP dentre as várias cadastradas. Além de alocar parte da memória para receitas personalizadas que possam surgir no futuro, sendo possível à própria supervisão da fábrica cadastrá-las;
- O usuário deve ser capaz de repetir passos (enxagues, por exemplo) quantas vezes forem necessárias;

- Em caso de surtos ou quedas de energia, o programa deve ser capaz de retornar o processo de CIP no passo em que foi interrompido;

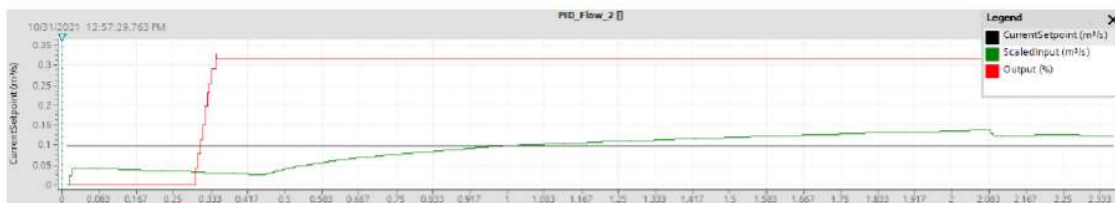
Figura 3 - Detalhe das válvulas moduladoras, medidor de nível e fluxo presente nos tanques.



Fonte: Do autor, 2022.

Na Figura 4. pode-se observar a resposta de abertura da válvula moduladora de alimentação de um dos tanques controlado pelo PID proposto. Vale ainda lembrar que as variáveis analógicas tratadas variavam entre 0 e 10V e quando recebidas pelos cartões analógicos de entrada, são convertidas em valores binários digitais salvos em double words. Internamente, o algoritmo converte esses valores binários para valores reais e os coloca em escala a fim de serem controlados corretamente pelos parâmetros inseridos na IHM (Interface homemáquina) (LAMB, 2015).

Figura 4 - Resposta ao controle PID.



Fonte: Do autor, 2022.

O algoritmo deve seguir, portanto, a sequência abaixo;

1. Após o alinhamento da placa de fluxo e válvulas físicas entre a estação de CIP e o tanque a ser limpo, o usuário deve entrar com seu ID (número identificador interno da empresa) na IHM e selecionar a receita de CIP que irá realizar;
2. Apertando o botão de start o procedimento da referida receita deve ser iniciado, respeitando os tempos de circulação ou molho de cada agente químico, as concentrações e correções de dosagem dos produtos químicos, a eficiência de enxague assegurada por condutividade, a temperatura das soluções utilizadas, ...;
3. Ao final do processo de CIP, deve haver um alarme sonoro e visual;
4. Caso haja alguma falha nos intertravamentos necessários do programa, estes devem ser exibidos em uma tela especialmente destinada a isso e, caso sejam resetados, serem armazenados em histórico com data, hora e descrição;

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao final das simulações e testes de robustez do algoritmo, verificou-se a eficácia da solução para a fábrica pois atende a todos os requisitos estabelecidos durante o levantamento e formulação do problema. Pode-se assegurar corretamente os tempos de circulação, vazão, velocidade de escoamento, temperatura, dentre outros parâmetros de qualidade, além de garantir a segurança dos operadores envolvidos com a realização do serviço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, observa-se que através da implementação de soluções de automação nos ambientes fabris é possível obter avanços em campos importantes para a segurança alimentar e pessoal dos envolvidos, sejam consumidores ou fabricantes dos produtos.

As simulações são grandes aliadas para o processo de implementação, poupando tempo, esforço e gastos imprevistos durante a realização prática dos projetos uma vez que antecipa grande parte das dificuldades e empecilhos que poderiam surgir.

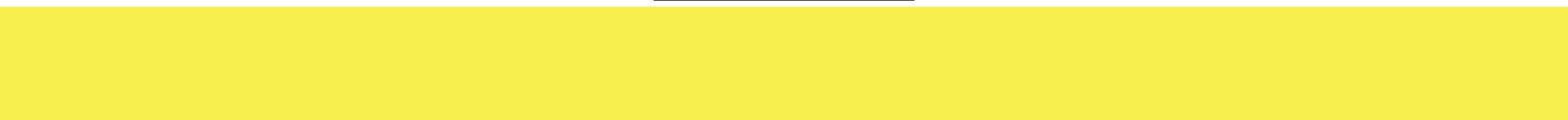
Devido a popularização dos equipamentos de automação, a queda nos preços também favorece a substituição de operações humanas ou manuais por sistemas inteligentes e confiáveis baseado em máquinas.

REFERÊNCIAS

LAMB, FRANK. **Automação industrial na prática: [Série Tekne]**. 1. ed. [S. l.]: McGraw-Hill/Bookman, 2015.

TAMIME, Adnan. **Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2008. 250 p.

RODRIGUES, Rodrigo. **Controle e Automação da Produção**. São Paulo: SAGAH EDUCAÇÃO S.A., 2016. 208 p.



CAPÍTULO 5

DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS DE ROTOR DE MOTORES DE INDUÇÃO USANDO ANÁLISE ESPECTRAL E CLASSIFICAÇÃO PERCEPTRON MULTICAMADAS

INDUCTION MOTORS ROTOR BROKEN BARS DETECTION USING SPECTRAL ANALYSIS AND MULTILAYER PERCEPTRON CLASSIFICATION

François de Souza Martins¹

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.5

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8269-5149>

RESUMO

Os motores de indução são o tipo mais comum de máquina elétrica usada em fábricas em todo o mundo. Existem vários métodos para melhorar a confiabilidade desses motores e evitar gastos com manutenções corretivas emergenciais, mas ainda hoje poucas empresas possuem um sistema de monitoramento automático capaz de rastrear as falhas antecipadamente. O objetivo deste trabalho é demonstrar um sistema automático capaz de detectar barras de rotor quebradas de motores de indução e sua severidade com alta precisão utilizando aprendizado de máquina. Essa inteligência artificial pode prever a condição de uma máquina classificando-a em motor saudável ou motor com uma, duas, três ou quatro barras de rotor quebradas com mais de 98% de precisão.

Palavras-chave: barras de rotor quebradas, diagnóstico de falhas, motores de indução, rede neural, MLP.

ABSTRACT

Induction motors are the most common type of electric machine used in factories around the world. There are several methods to improve the reliability of these motors and avoid expenses with emergency corrective maintenance, but even nowadays few plants have an automatic monitoring system capable to track the failures early. The purpose of this work is to demonstrate an automatic system able to detect broken rotor bars of induction motors and this severity with high accuracy using machine learning. This artificial intelligence can predict the condition of a machine classifying it in a healthy motor or motor with one, two, three or four rotor broken bars with more than 98% of accuracy.

Keywords: broken rotor bars, fault diagnosis, induction motors, neural network, MLP.

1 INTRODUÇÃO

Devido aos ambientes inóspitos e/ou de difícil acesso em que grande parte dos motores estão alojados, sob condições de operação não ideais as pesquisas crescentes em métodos de detecção preditiva de falhas tem ganhado cada vez mais interesse do mercado. Este trabalho propõe a identificação de falhas de quebras de barras do rotor (e sua severidade) de motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo através da análise das correntes valendo-se de transformação para o domínio da frequência (Transformada de Fourier) e identificação de padrões por redes neurais completamente conectadas (MLP).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Estima-se em (BONNETT e YUNG, 2008) que as falhas mais comuns estão distribuídas em: rolamentos (69%), enrolamentos do estator (21%), barras do rotor (7%) e eixo/acoplamento (3%). Porém, ainda hoje há uma enorme dependência da interpretação humana de dados para determinação de anomalias. Dados estes que, muitas vezes, são de difícil obtenção uma vez que grande parte dos métodos disponíveis necessita do acesso direto à máquina e instrumentos de custo elevado. Assim, há um vasto campo de pesquisa em torno da detecção de falhas em motores de indução através de métodos não invasivos como as análises da assinatura da corrente elétrica (MCSA), análises termográficas, análises vibratórias, análises do fluxo magnético, inteligências artificiais, entre outras (MEHALA e DAHIYA, 2007).

Para falhas em rolamentos, eixos e acoplamentos há ferramentas eficazes como analisadores de vibração, alinhadores a laser e ultrassonografias (DE SÁ MENEZES, 2018; ALSHORMAN, ALKAHATNI, *et al.*, 2021) que são bastante consolidadas no mercado.

Em (BARZEGARAN, MAZLOOMZADEH e MOHAMMED, 2013; LIANG, ALI e ZHANG, 2019; FISERAND e FERKOLJ, 2001; WATSON, PATERSON e DORRELL, 1999) demonstra-se o uso de métodos de elementos finitos para análise e detecção de falhas em motores de indução trifásicos (MIT). Em (MOHAMMED, ABED e GANU, 2007; SUPANGAT, ERTUGRUL, *et al.*, 2005) utiliza-se wavelets para processar os sinais das correntes de partida dos motores, extraindo-se características que evidenciam a quebra de barras.

Em (BENBOUZID, 2000) faz-se um apanhado geral dos métodos que utilizam a análise espectral das correntes através da transformada de Fourier.

Aproximando-se do intuito deste trabalho, temos em (LIBONI, 2017; SUE-TAKE, 2012) o uso de redes neurais para identificação de falhas de quebra de barras. O primeiro utilizando-se a transformação em eixos de referência (QD0) e extraindo características no domínio do tempo e o segundo visa detectar distorções no espectro de frequência provenientes de anomalias no rotor.

Ambos fazem uso de redes neurais completamente conectadas (Multilayer perceptron). Por fim, em (INCE, 2019) estuda-se o uso de redes neurais convolucionais (CNN) para análise temporal das correntes do motor trifásico.

Os dados utilizados durante o estudo estão disponíveis em (ELLY TREML, ANDRADE FLAUZINO e RAVAZZOLI MACIEJEWSKI, 2020) e incluem as tensões, correntes e vibrações de um motor de indução de 1hp, 220V/380V, 3.02A/1.75A, 4

polos, 60Hz, com torque nominal de 4.1Nm e velocidade nominal de 1715rpm. Ainda, possui rotor do tipo gaiola de esquilo composto por 34 barras. Foram realizados ensaios como o motor em sua condição saudável e com uma, duas, três e quatro barras adjacentes quebradas.

3 METODOLOGIA

3.1 Determinação de quebra de barras através da análise do espectro de correntes

Motores de indução saudáveis apresentam apenas componentes positivas de campo girante. Porém, quando há quebra de barras do rotor nota-se o surgimento de componentes de sequência negativa devido a assimetria causada pela quebra o que resulta em uma distorção do espectro de harmônicos do MIT. Essa distorção possui frequências definidas pela Eq. (1) conforme descrito em (LIANG, ALI e ZHANG, 2019). Onde f_b é a frequência de oscilação de barras quebradas, s é o escorregamento, k é o índice da harmônica e f_s é a frequência de alimentação. Pode-se ver na Figura 1 um exemplo de rotor com três barras quebradas.

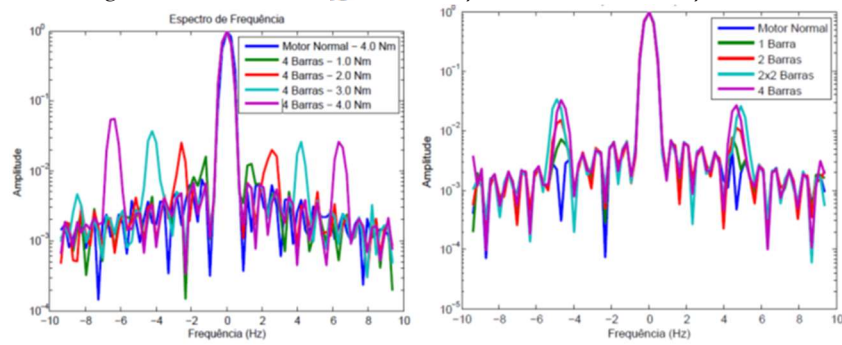
$$f_b = (1 \pm 2ks)f_s, \quad k = 1,2,3, \dots \quad (1)$$

Figura 1 - Exemplo de rotor com três barras quebradas.



Fonte: Adaptado de (HARLIŞCA, HANGIU, et al., 2011), 2012.

Ainda, percebe-se que a severidade (número de barras adjacentes quebradas) e o torque exigido do motor estão diretamente relacionados com a amplitude de pico de f_b , sendo que este último também afetará a frequência de oscilação de f_b uma vez que está relacionado ao escorregamento apresentado. Tais efeitos podem ser visualizados na XXX do trabalho de Suetake (SUETAKE, 2012).

Figura 2 - Variação de f_b com o torque e a severidade de quebras.(a) f_b VS Torque.(b) f_b VS severidade da quebra.

Fonte: Adaptado de (SUETAKE, 2012), 2012.

Para torques muito baixos a identificação de falhas se torna demasiadamente difícil dado os efeitos mencionados anteriormente. Então, este trabalho tem como foco o estudo em caso de torques variando de 80% a 100% do nominal, uma vez que os MITs são quase sempre projetados para atuarem com sua carga máxima dentro das indústrias.

3.2 pré-processamento de dados

Dada a amostra de uma das correntes do MIT, aplica-se a transformada de Fourier para a obtenção do sinal no domínio da frequência. Os dados de corrente, após serem pré-processados, servem de entrada para uma rede neural do tipo MLP que é então treinada e testada (CZUM, 2020).

3.3 Parâmetros de treinamento e teste

A rede consiste nas camadas descritas na Tabela 1.

Utilizou-se a entropia cruzada como função de perda que é suficiente para problemas de classificação. Onde \mathbf{x} é o vetor de entrada de dimensões \mathbf{x} (batchsize; class).

Tabela 1 - MLP Proposta.

Camada	Tipo de Rede	Entrada	Saída
1	Linear	200	400
2	ReLu	400	400
3	Linear	400	800
4	ReLu	800	800
5	Linear	800	400
6	ReLu	400	400
7	Linear	400	200
8	ReLu	200	200
9	Linear	200	25
10	ReLu	25	25
11	Linear	25	5
12	SoftMax	5	5

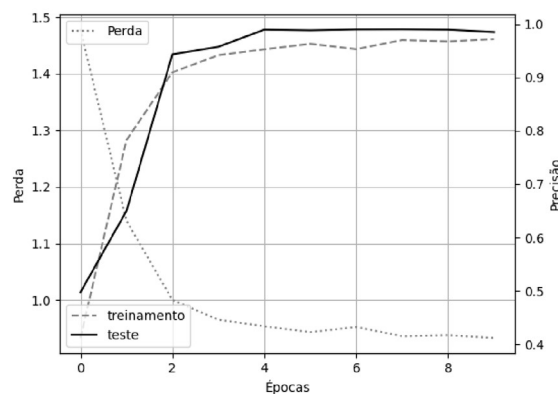
Fonte: Do autor, 2021.

Notadamente, todo o desempenho da rede neural é muito sensível a outros parâmetros que devem ser determinados de forma arbitrária. Estes são chamados de Hiperparâmetros e foram escolhidos como 10 épocas, taxa de aprendizado de 0,001 e Batch size = 4. Ainda, fez-se uso do gradiente descendente estocástico como otimizador dos parâmetros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segue na Figura 5 as curvas de perda, precisão de treinamento e precisão de teste para 10 épocas de treinamento. Observa-se que já após a 5ª época há uma convergência de acerto durante o teste acima de 98% chegando a 99; 02% na 7ª época. Isso demonstra uma ótima capacidade de predição de falhas com elevada taxa de acerto de severidade.

Figura 5 - Perda, precisão de treinamento e precisão de teste X Épocas.



Fonte: Do autor, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema proposto demonstra alta taxa de acerto (acima de 98%) não só na detecção de falhas de quebras de barras do rotor em motores de indução do tipo gaiola de esquilo, quanto na classificação da severidade do dano, entregando maior confiabilidade da ferramenta de análise.

REFERÊNCIAS

ALSHORMAN, O. et al. Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 13(2), p. 1-19, 2021.

BARZEGARAN, M.; MAZLOOMZADEH, A.; MOHAMMED, O. A. Fault Diagnosis of the Asynchronous Machines Through Magnetic Signature Analysis Using Finite-Element Method and Neural Networks. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, v. 28, p. 1064-1071, 2013.

BENBOUZID, M. E. H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, p. 984-993, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/41.873206>>.

BONNETT, A. H.; YUNG, C. Increased Efficiency Versus Increase Reliability. **IEEE Industry applications Magazine**, v. 14, p. 29-36, 2008.

CZUM, J. M. Dive into deep learning. **Journal of the American College of Radiology**, v. 17, p. 637-638, 2020.

DE SÁ MENEZES, P. H. O. Ferramenta Preditiva por Ultrassom para Detecção de Falhas de Lubrificação, p. 1-83, 2018.

ELLY TREML, A.; ANDRADE FLAUZINO, R.; RAVAZZOLI MACIEJEWSKI, N. A. Experimental database for detecting and diagnosing broken bar defects in a three-phase induction motor., 2020. Disponível em: <<https://iee-dataport.org/open-access/experimental-database-detecting-and-diagnosing-broken-bar-defects-three-phase-induction>>.

FISERAND, R.; FERKOLJ, S. Application of a Finite Element Method to Predict Damaged Induction Motor Performance. **IEEE Transaction On Magnetics**, v. 37, p. 3635-3639, 2001.

HARLIŞCA, C. et al. Broken Rotor Bars Detection in Squirrel-Cage Induction Machines by Motor Current Signature Analysis Method. **Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty**, v. 17, p. 20-25, 2011.

INCE, T. Real-time broken rotor bar fault detection and classification by shallow 1D convolutional neural networks. **Electrical Engineering**, v. 101, p. 599–608, June 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00202-019-00808-7>>.

LIANG, X.; ALI, M. Z.; ZHANG, H. Induction Motors Fault Diagnosis Using Finite Element Method: A Review. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, v. 56, p. 1205–1217, 2019.

LIBONI, L. H. B. Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos Baseado em Decomposição em Componentes Ortogonais e Aprendizagem de Máquina., 2017.

MEHALA, N.; DAHIYA, R. Motor Current Signature Analysis and its Application in Induction Motor Fault Diagnosis. **International Journal of Systems Applications, Engineering & Development**, v. 2, p. 29–35, 2007.

MOHAMMED, O. A.; ABED, N. Y.; GANU, S. **Modeling and characterization of induction motor internal faults using finite element and discrete wavelet transforms**. 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. [S.l.]: IEEE. May 2007.

SUETAKE, M. Sistemas Inteligentes para Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos, 2012.

SUPANGAT, R. et al. **Broken rotor bar fault detection in induction motors using starting current analysis**. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. [S.l.]: IEEE. 2005.

VARGAS, R.; GONÇALVES, A. Implementando um Mural Eletrônico em PHP: Uma Aplicação Voltada a uma Instituição de Ensino Superior., 2005. Monografia (Bacharel em Informática), URCAMP (Universidade da Região da Campanha), Bagé, Brazil.

WATSON, J. F.; PATERSON, N. C.; DORRELL, D. G. The Use of Finite Element Methods to Improve Techniques for the Early Detection of Faults in 3-phase Induction Motors. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, v. 14, p. 655–660, 1999.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS: ESTUDO DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

*SIMULATION AND ANALYSIS OF ELECTRIC
MACHINES: STUDY OF DRIVING OF
INDUCTION MOTORS*

François de Souza Martins¹

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.6

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8269-5149>

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar a simulação de uma máquina de indução trifásica (MIT) utilizando a teoria dos eixos de referência, o método de Runge-Kutta de 4º ordem e adotando a linguagem de programação Python. Aplicando tensão senoidal pura é possível verificar a resposta dinâmica no tempo do torque e da velocidade angular. Assim, é possível compreender a natureza das respostas das máquinas indução elétricas trifásicas em condições de partida até atingimento do estado de regime permanente, assim como prover informações suficientes para proposição de melhorias em aplicações minimizando o estresse sofrido pela máquina e auxilia na investigação e problemas de operação ou manutenção.

Palavras-chave: Acionamento de máquinas elétricas, sistema elétrico de potência, harmônicos, teoria dos eixos de referência.

ABSTRACT

This work aims to carry out the simulation of a three-phase induction machine (MIT) using the theory of reference axes, the 4th order Runge-Kutta method and adopting the Python programming language. Applying pure sinusoidal voltage, it is possible to verify the dynamic response in time of torque and angular velocity. Thus, it is possible to understand the nature of the responses of three-phase electric induction machines in starting conditions until reaching the steady-state state, as well as providing enough information to propose improvements in applications, minimizing the stress suffered by the machine and assisting in the investigation and problems of operation or maintenance.

Keywords: Drive of electric machines, electrical power system, harmonics, theory of reference axes.

1 INTRODUÇÃO

Indústrias contribuem muito para inserir distorções na rede, pois acionam motores (principalmente motores de indução) via conversores de frequência, que operam com elementos não lineares como tiristores e IGBTs, resultando em um grande conteúdo harmônico. As ferramentas de simulação são uma grande ajuda na resolução de problemas, principalmente os que envolvem grandes investimentos financeiros, pois em um ambiente virtual é possível testar diversas possibilidades sem impacto de custos físicos. Portanto, este trabalho foi desenvolvido através de um ambiente de simulação criado em Python, modelado matematicamente pela teoria dos eixos de referência e resolvido por um método Runge-Kutta de quarta ordem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Pátios industriais detêm grande contribuição para a inserção de distorções na rede por possuírem acionamentos de máquinas elétricas (em sua maioria são motores de indução) através de conversores de frequência que utilizam elementos não lineares como Tiristores e IGBTs para operarem, gerando grande conteúdo harmônico (Rashid, 2006).

Ferramentas de simulação são grandes aliadas em soluções de problemas, especialmente aqueles que envolvem grandes investimentos financeiros pois em um ambiente virtual pode-se testar diversas possibilidades não havendo impactos físicos. Portanto, esse trabalho é desenvolvido através de um ambiente de simulação criado em Python (Python Brasil, 2020), modelado matematicamente pela teoria dos eixos de referência (Krause, 2002) e solucionado através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem (Sterza e Brandi, 2016).

3 METODOLOGIA

3.1 TEORIA DOS EIXOS DE REFERÊNCIA

Para realizar a simulação dinâmica da máquina de indução trifásica, utilizou-se a teoria do eixo de referência. As equações de tensão, corrente e fluxo das máquinas assíncronas e síncronas compreendem indutâncias em função da posição ou da velocidade do rotor. Com o intuito de diminuir a complexidade dessas equações e facilitar a análise dessas máquinas se aplica o teorema de eixos de referência.

Os eixos de referência consistem em eixo de quadratura (Q), eixo direto (D) e o eixo zero (0). Os eixos de quadratura e direto são ortogonais e giram na velocidade ω defasado de θ do eixo ABC. A velocidade angular ω do eixo qd0 pode assumir valores arbitrários, porém é comum adotá-la como sendo igual a zero, igual a velocidade do rotor ω_r , ou velocidade da rede elétrica ω_s (Krause, 2002).

Para realizar as transformações do *eixo^{abc}* para o *eixo^{qd0}*, necessário aplicar a equação (1). Para realizar o caminho inverso, ou seja, do *eixo^{qd0}* para o *eixo^{abc}*, faz-se necessário aplicar a equação (2). A matriz K_s é chamada de matriz de transformação.

$$\mathbf{f}_{qd0} = \mathbf{K}_S \cdot \mathbf{f}_{abc} \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_{abc} = (\mathbf{K}_S)^{-1} \cdot \mathbf{f}_{qd0} \quad (2)$$

Onde:

$$\mathbf{f}_{qd0} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}, \mathbf{f}_{abc} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_S = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{K}_S)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Para realizar a simulação da máquina de indução trifásica, foram aplicadas no Python as equações (3) à (21).

$$\frac{d}{dt} \Psi_{qs} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\Psi_{mq} - \Psi_{qs}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{ds} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \Psi_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\Psi_{md} - \Psi_{ds}) \right] \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{0s} = \omega_b \left[v_{0s} - \frac{r_s}{X_{ls}} \Psi_{0s} \right] \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi'_{qr} = \omega_b \left[v'_{qr} - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \Psi'_{dr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\Psi_{mq} - \Psi'_{qr}) \right] \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi'_{dr} = \omega_b \left[v'_{dr} - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \Psi'_{qr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} (\Psi_{md} - \Psi'_{dr}) \right] \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi'_{or} = \omega_b \left[v'_{or} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} \Psi'_{or} \right] \quad (8)$$

$$\Psi_{mq} = X_{aq} \left(\frac{\Psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\Psi'_{qr}}{X'_{lr}} \right) \quad (9)$$

$$\Psi_{md} = X_{ad} \left(\frac{\Psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\Psi'_{dr}}{X'_{lr}} \right) \quad (10)$$

$$X_{aq} = X_{ad} = \left(\frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lr}} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\Psi_{qs} - \Psi_{mq}) \quad (12)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\Psi_{ds} - \Psi_{md}) \quad (13)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \Psi_{0s} \quad (14)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\Psi'_{qr} - \Psi_{mq}) \quad (15)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\Psi'_{dr} - \Psi_{md}) \quad (16)$$

$$i'_{or} = \frac{1}{X'_{lr}} \Psi'_{or} \quad (17)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_b} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) [SI] \quad (18)$$

$$T_e = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds} = \Psi'_{dr} i'_{qr} - \Psi'_{qr} i'_{dr} [pu] \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{p}{J} [T_e - T_L] \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{p}{2H} [T_{e(pu)} - T_{L(pu)}] \quad (21)$$

3.1 Simulação

Para a presente simulação utilizou-se uma máquina com os parâmetros seguintes 20 HP; 460 V; 60 Hz; 4 polos; trifásica; $r_s = 0,276 \Omega$; $r_r = 0,164 \Omega$; $X_{ls} = 0,826 \Omega$; $X_{lr} = 0,826 \Omega$; $X_M = 28,7 \Omega$; $J = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

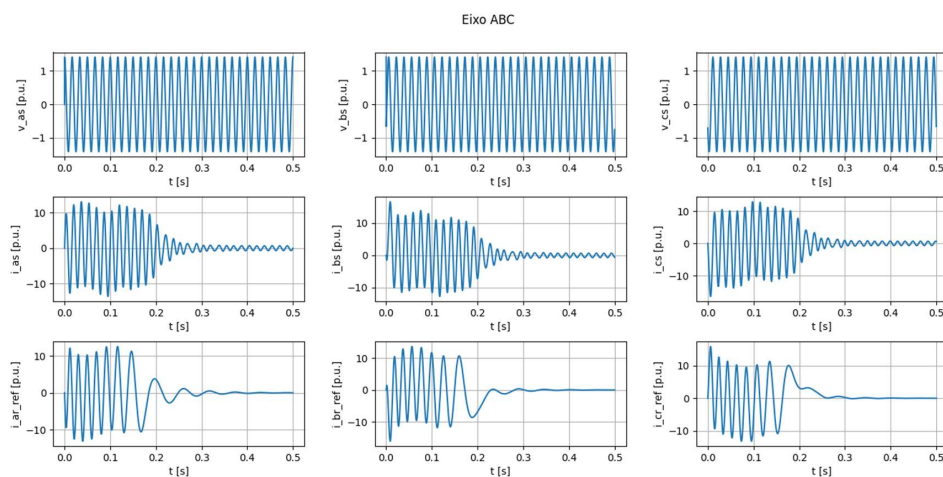
Aplicando a forma de onda senoidal apresentada na Figura 1, onde para as fases b e c há somente o deslocamento de fase. As correntes para torque de carga nulo no estator e no rotor no eixo abc são apresentadas na Figura 1. Nesses gráficos contém os transitórios e o regime permanente. Analisando as figuras, é possível verificar que

na partida da máquina, as correntes tanto no estator quanto no rotor superam 10 pu, as correntes de estator no regime permanente possuem menor amplitude sendo próximas de 1 pu, as correntes de rotor no regime permanente são próximas de zero.

As tensões e correntes no estator e no rotor no eixo de referência arbitrário são apresentadas na Figura 3. Observando as tensões no eixo qd0 para a forma de onda senoidal, percebe-se que são tensões contínuas, onde no eixo de quadratura a tensão v_{qs} é igual a 1 pu, no eixo direto e no eixo zero, a tensão é de 0 pu. A corrente de estator no eixo de quadratura apresentado na Figura 3, observa-se que na partida a corrente supera 6 pu e no regime permanente é 0 pu, no eixo direto a corrente de partida supera 10 pu e no regime permanente pouco acima de 0 pu. No eixo zero, não apresenta nenhum valor transitório sendo o valor constante e igual a zero pu. No rotor da máquina de indução, a corrente de quadratura e direta apresentam sentido contrário às correntes do estator, sendo elas superior a 6 pu e 10 pu, respectivamente, é possível observar que no regime permanente as correntes são iguais a zero pu. O eixo zero não apresenta nenhum transitório, sendo igual a zero pu.

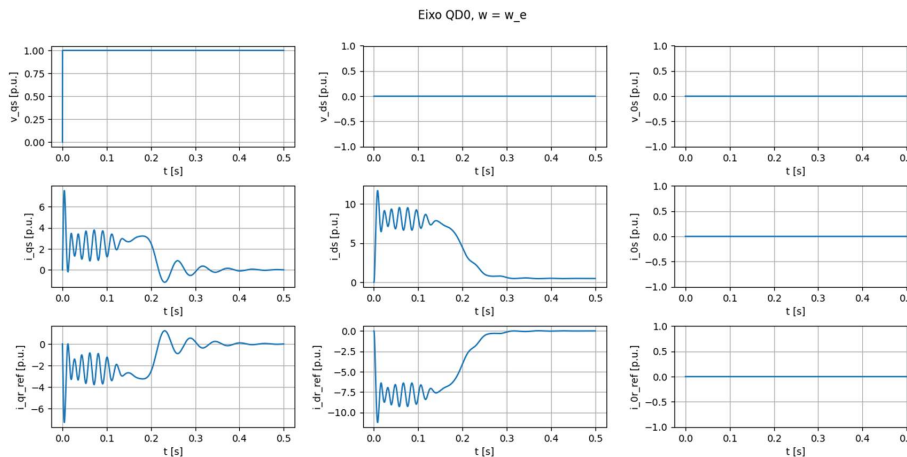
A Figura 3 apresenta o torque elétrico e o torque de carga em função do tempo, nesta imagem observamos o transitório do torque da máquina elétrica, na partida, o torque elétrico supera 3 pu e em regime permanente seu valor é igual a zero. Para essa máquina não foi aplicado torque de carga. Comparando a Figura 3, nota-se que os gráficos possuem formas parecidas, o que nos leva que a corrente de quadratura tem estreita relação com torque elétrico (em $\omega = \omega_r$ com ponto de operação próximo à ω_{sinc}), a corrente de eixo direto não apresenta qualquer semelhança significativa para o torque pois esta é ortogonal ao eixo q. Ainda na Figura 3 tem-se a apresentação a velocidade angular do rotor em função da velocidade angular de base e o torque elétrico em função do escorregamento.

Figura 1 – Simulação eixo ABC para alimentação puramente senoidal



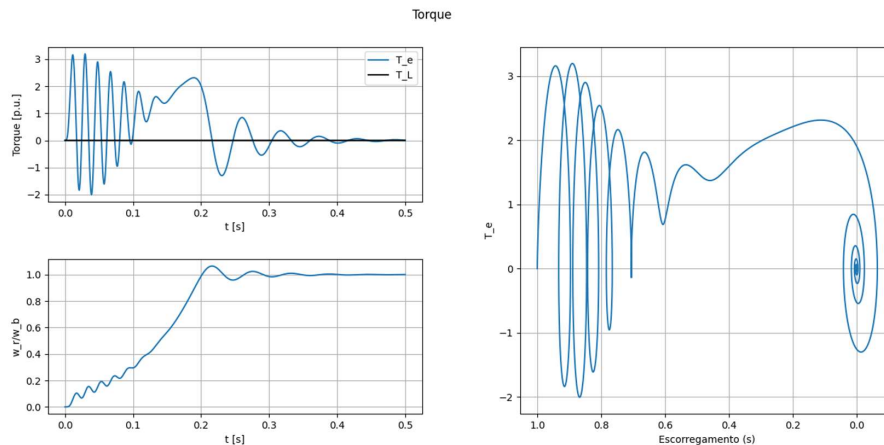
Fonte: Do autor, 2021.

Figura 2 – Simulação eixo QD0 para alimentação puramente senoidal.



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 3 – Simulação da característica de torque e velocidade para alimentação puramente senoidal.



Fonte: Do autor, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do simulador proposto é possível verificar respostas dinâmicas no tempo de máquinas elétricas de indução como detalhes de oscilações de partida e estabilização de regime permanente, revelando comportamentos importantes para projetos de máquinas, manutenção e resolução de problemas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dada a facilidade de construção e simulação através da teoria dos eixos de referência e a velocidade de execução dos casos propostos, assim como a qualidade das respostas obtidas, entende-se que este trabalho atingiu seu objetivo fornecendo uma aplicação capaz de realizar os objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

RASHID, Muhammad. **Power electronics handbook**: Devices, circuits and applications. 2. ed. California: Academic Press, 2006.

“**Python Brasil**,” [Online]. Disponível em: <https://python.org.br/>. [Acesso em 15 dezembro 2020]

R. d. L. Sterza e A. C. Brandi, **Comparação entre métodos numéricos**: Runge-Kutta de quarta ordem e previsor-corretor, Revista Eletrônica Paulista de Matemática, vol. 7, nº ERMAC, 2016.

P. C. Krause, O. Wasynczuk e S. D. Sudhoff, **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 2º Ed, New Jersey: IEEE Press Series on Power Engineering, 2002.

CAPÍTULO 7

ESTUDO SOBRE HARMÔNICOS GERADOS PELOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

STUDY OF HARMONICS GENERATED BY THE MAIN DRIVING METHODS OF INDUCTION MOTORS

François de Souza Martins¹

DOI: 10.46898/rfb.9786558893479.7

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8269-5149>

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar a simulação de uma máquina de indução trifásica utilizando a teoria dos eixos de referência, o método de Runge-Kutta de 4º ordem e adotando a linguagem de programação Python. Aplicando tensão senoidal pura, PWM, PWM Multinível, retangular de 6 pulsos e de 12 pulsos, realizou-se a comparação das ondas de tensão aplicadas no sentido de apontar as que apresentam menores conteúdos harmônicos de tensão e de corrente, que são indesejáveis na maior parte dos sistemas elétricos de potência ao redor do mundo. Essa comparação se faz útil pois muito desses acionamentos se encontram diariamente nas fábricas de diversos setores.

Palavras-chave: Acionamento de máquinas elétricas, sistema elétrico de potência, harmônicos, teoria dos eixos de referência.

ABSTRACT

This work aims to carry out the simulation of a three-phase induction machine using the theory of reference axes, the 4th order Runge-Kutta method and adopting the Python programming language. Applying pure sinusoidal voltage, PWM, Multi-level PWM, rectangular 6-pulse and 12-pulse voltage, a comparison was made of the applied voltage waves to show those with the lowest harmonic contents of voltage and current, which are tolerated in the greatest part of electrical power systems around the world. This comparison is useful because many of these drives are found daily in factories in different sectors.

Keywords: Drive of electric machines, electrical power system, harmonics, theory of reference axes.

1 INTRODUÇÃO

Uma vez que se pode obter a resposta dinâmica no tempo de máquinas de indução, estimando correntes, tensões, torques e velocidade é possível determinar a influência gerada pelos acionamentos que introduzem harmônicos na rede. Em geral, tais efeitos são indesejados para o sistema elétrico de potência uma vez que distorce a forma ideal (puramente senoidal).

A verificação em máquina de todos esses resultados é custosa, complexa e dispendiosa. Assim, uma ferramenta virtual que obtenha resultados de simulação se faz de grande valor para a área de acionamento de máquinas elétricas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Pátios industriais detêm grande contribuição para a inserção de distorções na rede por possuírem acionamentos de máquinas elétricas (em sua maioria são motores de indução) através de conversores de frequência que utilizam elementos não lineares como Tiristores e IGBTs para operarem, gerando grande conteúdo harmônico (Rashid, 2006).

Harmônicos, por sua vez, são indesejáveis no sistema elétrico de potência (SEP) uma vez que causam alterações nas formas de onda presentes na rede, aumentando as perdas, gerando sobreaquecimento e reduzindo a vida útil dos componentes (Möllerstedt, 2000). Assim, faz-se necessário o estudo e compreensão deste fenômeno a fim de se determinar condições de funcionamento menos agressivas para a saúde elétrica do sistema.

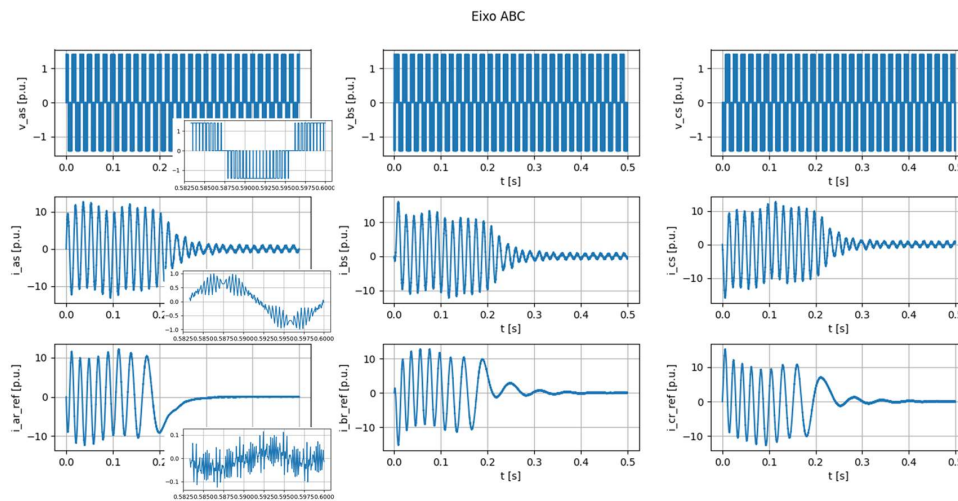
Ferramentas de simulação são grandes aliadas em soluções de problemas, especialmente aqueles que envolvem grandes investimentos financeiros pois em um ambiente virtual pode-se testar diversas possibilidades não havendo impactos físicos. Portanto, esse trabalho é desenvolvido através de um ambiente de simulação criado em Python (Python Brasil, 2020), modelado matematicamente pela teoria dos eixos de referência (Krause, 2002) e solucionado através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem (Sterza e Brandi, 2016).

3 METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta a forma de onda aplicada, a corrente de estator da fase α é possível ser visualizada, um zoom foi aplicado no regime permanente onde é possível constatar ruídos na forma de onda, essas oscilações ocorrem devido a onda modulada aplicada.

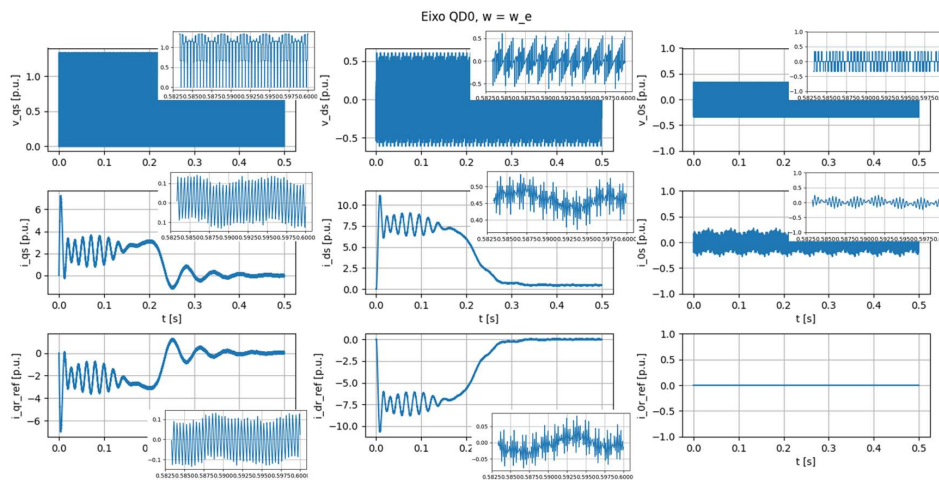
Na Figura 2, onde na onda senoidal pura a tensão v_{qs} era contínua, a tensão SPWM resulta em uma tensão pulsante, o mesmo ocorre para a componente de eixo direto onde tensão era contínua e igual a zero e na alteração da onda aplicada torna-se triangular. Ainda, na Figura 3 note que existe um ruído na característica de torque e velocidade da máquina.

Figura 1 - Simulação eixo ABC para alimentação PWM Senoidal (SPWM)



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 2 - Simulação eixo QD0 para alimentação PWM Senoidal (SPWM)



Fonte: Do autor, 2021.

Foram realizadas as mesmas simulações supracitadas para os demais sinais de alimentação (PWM Multinível, retangular de 6 pulsos e de 12 pulsos). Os resultados de maior relevância estão presentes na próxima seção.

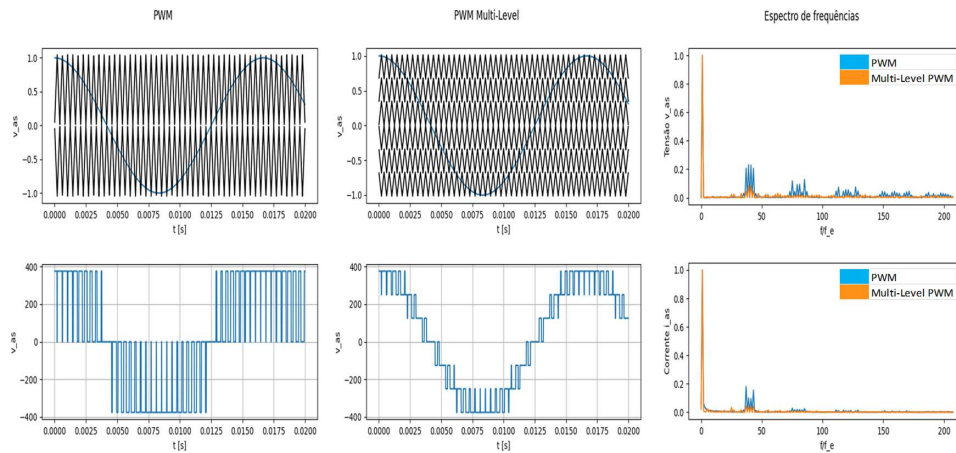
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Da Figura 4 à Figura 5, foram plotados gráficos para fins de comparações, note que as harmônicas de tensão para a tensão PWM são mais pronunciadas do que PWM Multinível, a primeira possui cerca de 20% da tensão fundamental e a segunda aproximadamente 7%, para as harmônicas próxima de 50° ordem. O mesmo ocorre nas harmônicas de corrente onde a corrente no PWM para as harmônicas próximas de 50° ordem possui 20% em relação a fundamental e a PWM Multinível com cerca de 5%. Na Figura 5, o torque de carga quadrático é empregado e é possível analisar o torque

elétrico. Nota-se que o PWM Multinível possui resposta mais rápido e torque elétrico em PU superior ao PWM, percebe-se um descompasso das duas entradas de tensão aplicada. O mesmo ocorre para a velocidade angular, onde o PWM Multinível alcança o regime permanente primeiro.

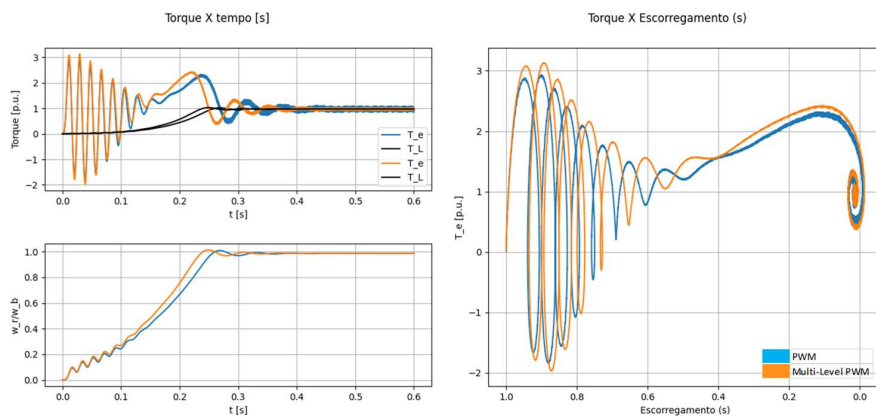
O torque elétrico em função do escorregamento, novamente nota-se valores em pu superiores para o PWM Multinível.

Figura 4 - Comparação do espectro de frequências das alimentações SPWM e SPWM multinível



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 5 - Comparação das curvas de torque e velocidade para as alimentações SPWM e SPWM multinível



Fonte: Do autor, 2021.

Como desenvolvido para o PWM e PWM Multinível, da Figura 6 à Figura 7 é realizada a comparação para a forma de onda retangular de 6 e de 12 pulsos. Diferentemente do PWM, as harmônicas de corrente e de tensão apresentam para a forma de onda de tensão retangular apresentam harmônicas de ordem inferiores.

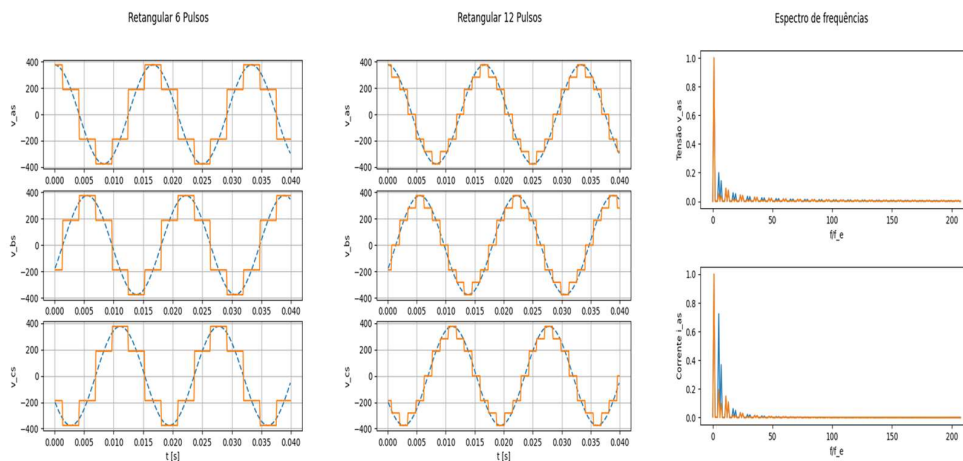
Observando a Figura 6, as harmônicas de tensão apresentam distorções de cerca de 20% da fundamental para a onda de 6 pulsos, a onda de 12 pulsos possui amplitude menor. Para as harmônicas de corrente, as distorções harmônicas da onda de 6

pulsos são bastante pronunciadas, se aproximando de 0,8 pu, a amplitude para a onda de 12 pulsos é cerca de um quarto desse valor.

Um torque de carga em rampa foi aplicado ao eixo da máquina, o comportamento da resposta do torque elétrico é mostrado na Figura 7, em que se constata que o valor de pico para a onda de 6 pulsos e o tempo de resposta é superior em relação à onda de 12 pulsos. Observa-se também que na Figura 7, a onda de 6 pulsos faz a máquina alcançar o valor de regime e a velocidade de base primeiro que a onda de 12 pulsos.

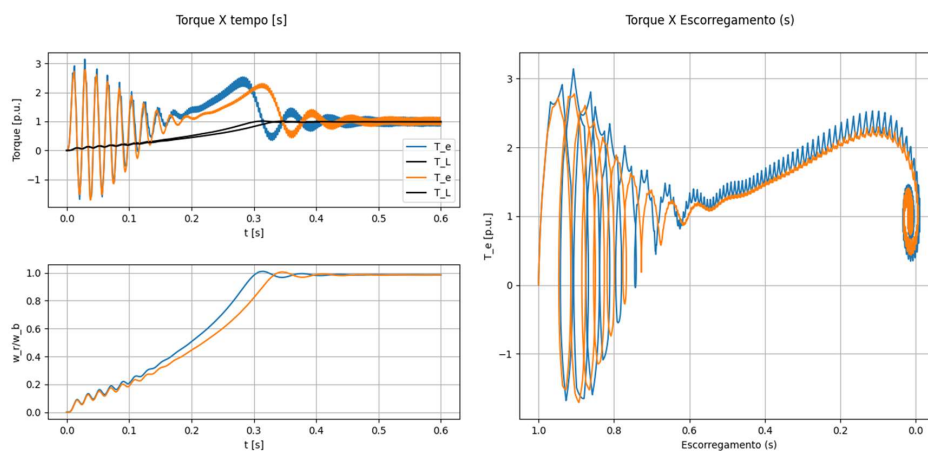
Quanto ao torque elétrico em relação ao escorregamento, vê-se que apresenta muito ruído para a onda de 6 pulsos, como já era esperado devido as distorções harmônicas apresentadas anteriormente.

Figura 6 - Comparação do espectro de frequências das alimentações retangular de 06 e 12 pulsos



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 7 - Comparação das curvas de torque e velocidade para as alimentações retangular de 06 e 12 pulsos



Fonte: Do autor, 2021.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas seções anteriores e utilizando os métodos e equacionamentos apresentados, pode-se concluir que a onda senoidal pura é a melhor onda de tensão a ser aplicado no estator das máquinas de indução trifásica, havendo a necessidade de se empregar outros tipos de tensão modulada, as que apresentam melhores curvas de corrente, tensão, torque e velocidade angular são primeiramente a onda PWM Multi-nível e a seguinte a onda retangular de 12 pulsos.

REFERÊNCIAS

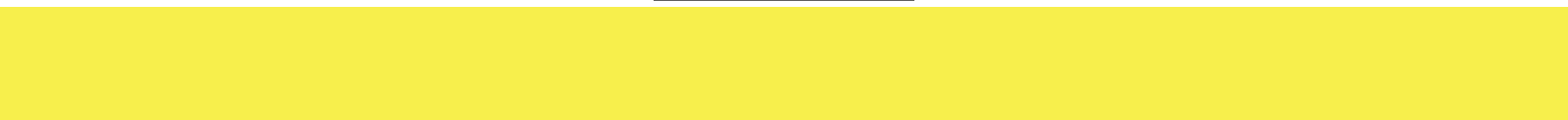
ERIK MÖLLERSTEDT, Erik. *Dynamic Analysis of Harmonics in Electrical Systems*. Lund, 2000. Tese (Control Engineering) - Lund University, Lund, 2000.

RASHID, Muhammad. **Power electronics handbook: Devices, circuits and applications**. 2. ed. California: Academic Press, 2006.

“Python Brasil,” [Online]. Disponível em: <https://python.org.br/>. [Acesso em 15 dezembro 2020]

R. d. L. Sterza e A. C. Brandi, **Comparação entre métodos numéricos: Runge-Kutta de quarta ordem e previsor-corretor**, Revista Eletrônica Paulista de Matemática, vol. 7, n° ERMAC, 2016.

P. C. Krause, O. Wasynczuk e S. D. Sudhoff, **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. 2° Ed, New Jersey: IEEE Press Series on Power Engineering, 2002.



PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS

Volume 8



PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS

Volume 8



RFB Editora
Home Page: www.rfbeditora.com
Email: adm@rfbeditora.com
WhatsApp: 91 98885-7730
CNPJ: 39.242.488/0001-07
Av. Augusto Montenegro, 4120 - Parque Verde, Belém - PA, 66635-110



9 786558 893479 >