

Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica



Edição
v.4 n.1 2022

CARTA DO EDITOR



Esta quinta edição do periódico R4EM - Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Mecânica chega a nossos leitores pesquisadores com 10 artigos publicados, sendo 4 trabalhos da área de Engenharia Mecânica e 6 da área de Engenharia Elétrica. Nesta edição, na seção ARTIGO CONVIDADO, contamos um com o texto intitulado “A IMPORTÂNCIA DA PUBLICAÇÃO DE LIVROS DE ENGENHARIA PARA A FORMAÇÃO DE NOSSOS PROFISSIONAIS”, do Dr. Ednardo Pereira Rocha, que é Professor do curso de Engenharia Elétrica da UFERSA desde 2015, ou desde 2014, contando o seu período como substituto. O Professor Ednardo é graduado em Engenharia de Energia (UFERSA, 2013), com Mestrado (UFERSA, 2015) e Doutorado (UFRN, 2020) em Engenharia Elétrica e, apesar de apenas oito anos como professor no magistério superior, já tem 7 livros de Engenharia publicados e está com mais dois no prelo. Dentre os já publicados, destacam-se um publicado internacionalmente em inglês e mais três que podem ser adquiridos gratuitamente (veja os links de acesso nas referências ao final do Artigo Convidado).

O Professor Ednardo, com essa produção bibliográfica apesar de poucos anos de docência, certamente representa uma ruptura de paradigmas, de que publicar um livro acadêmico seria somente após muitos anos de experiência docente.

Lançamos esta quinta edição reforçando o convite à comunidade acadêmica: publiquem conosco. Aos alunos de graduações, invistam em seus Trabalhos de Conclusão de Curso desenvolvendo em seus trabalhos atividades experimentais, ou de simulação computacional, ou estudos de caso, ou sobre metodologias de ensino de engenharia, a fim de atenderem aos requisitos para publicação em nosso periódico. Lembro-vos que aquelas experiências práticas – estudos de casos em seus estágios acadêmicos também podem ser publicadas em nosso periódico.

Em nome da equipe da R4EM, registro os nossos agradecimentos a todos os autores que publicaram conosco nesta edição e aos professores que colaboram na avaliação destes trabalhos. Por fim, e não menos importante, reitero os agradecimentos da direção deste periódico aos alunos do PET Mecânica & Energia que compõe a nossa equipe editorial desta edição, os maiores méritos do labor para lançar este periódico semestralmente são deles.

Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Diretor e Editor Chefe da R4EM

ARTIGO CONVIDADO

A IMPORTÂNCIA DA PUBLICAÇÃO DE LIVROS DE ENGENHARIA
PARA A FORMAÇÃO DE NOSSOS PROFISSIONAIS

PROF. DR. EDNARDO PEREIRA ROCHA
CO-AUTOR DE SETE LIVROS DE ENGENHARIA.
PROFESSOR DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFERSA



A educação é o principal meio de desenvolvimento social. Economia, saúde, meio ambiente, política e outros temas relevantes convergem para a educação como caminho para o avanço. Durante os primeiros anos da carreira de um docente fica bastante perceptível que o principal compromisso no trabalho não é apenas ensinar, tornando predominante a noção do papel da universidade pública no processo de transformação social.

Trabalhar com engenharia não é um processo fácil, pois requer domínio de diferentes áreas, imensa dedicação com os cálculos e atualização constante do conhecimento. É muito comum, no ambiente universitário, que os nomes de praticamente todos os autores dos livros utilizados sejam lembrados com muito mais facilidade que os nomes dos próprios títulos que estes escreveram. Esses autores marcam a formação acadêmica do discente, pois seus livros se tornam as ferramentas que os possibilitam enxergar o mundo de uma forma que não enxergavam, fornecendo degraus para a ascensão de seu conhecimento no ramo da engenharia. Com as ferramentas certas, não podemos deixar de ressaltar a importância dos nossos mestres da academia, que nos servem de inspiração para que possamos trilhar nossos próprios caminhos.

Em 2017, fui convidado pelos professores Ailson Moura (UFC) e Adriano Moura (UFERSA) para escrever dois livros na área de Sistemas Elétricos de Potência. Foi um desafio que, à princípio, não me senti seguro para enfrentar, mas que foi contornado através de muito planejamento, reuniões e meses de escrita e diagramação. Nos anos seguintes escrevemos mais cinco livros sobre Sistemas Elétricos de Potência e Energias Renováveis. Em 2020, conseguimos nossa primeira publicação internacional, pela CRC Press, uma das maiores editoras dos Estados Unidos. Ao todo foram sete livros publicados até então, totalizando 2.188 páginas, com mais dois livros sendo planejados para os próximos anos.

As estratégias iniciais para a elaboração dos livros foram buscar preencher lacunas dentre as referências nacionais disponíveis e trabalhar com foco em aplicações. Muitos dos temas mais aprofundados na área de sistemas elétricos estão disponíveis apenas em literaturas internacionais, que demandam altos custos de aquisição e que criam barreiras para leitores que não dominam a língua inglesa, ou que simplesmente ainda não foram escritos por ninguém. Nossos livros possuem uma base teórica que é complementada através de aplicações práticas realizadas através de softwares consolidados. Este é um



método semelhante ao que adotamos em sala de aula e que está em consonância com as diretrizes educacionais mais recentes e no escopo das metodologias ativas.

Escrever livros foi uma etapa da minha vida acadêmica que nunca será escrita em primeira pessoa, pois gerou frutos resultantes de muita dedicação e trabalho em equipe. Nosso maior objetivo e orgulho sempre foi gerar um legado que pudesse contribuir na formação de futuros engenheiros, na área de Sistemas Elétricos de Potência e Energias Renováveis, no âmbito nacional. Além disso, nossa produção é apenas parte de uma demonstração que o Nordeste, especificamente o semiárido brasileiro, detém plena capacidade técnica e científica para contribuir com esta e outras áreas.

Publicações bibliográficas dos autores (Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P.):

- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Engenharia de Sistemas de Potência: Modelos computacionais para fluxo de carga trifásico, fluxo de potência continuado e equivalentes externos**. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2020. Disponível gratuitamente em <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54530> (acessado em 06/2022).
- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Transmission of Electrical Energy: Overhead Lines**. 1. ed. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2020.
- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Geração Hidroelétrica e Eólicoelétrica**. 1. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2019. Disponível gratuitamente em <https://imprensa.ufc.br/pt/geracao-hidroeletrica-e-eolioeletrica/> (acessado em 06/2022).
- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada**. 1. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2019. Disponível gratuitamente em <https://imprensa.ufc.br/pt/transmissao-de-energia-eletrica-em-corrente-alternada/> (acessado em 06/2022)
- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Análise de Circuitos em Corrente Alternada para Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2018.
- Moura, A. P., Moura, A. A. F., Rocha, E. P. **Análise de Fluxo de Carga em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2018.
- **Engenharia de Sistemas de Potência - Exercícios de Fluxo de Carga**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2018.



EDITORES-CHEFE

Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

EDITORES-ADJUNTOS

Cláudio Gabriel Venceslau Vale
Gabriel Luiz Dantas Lopes Nogueira
Jeremy Michael Venâncio da Silva

EDITORACÃO

Cláudio Gabriel Venceslau Vale
Gabriel Luiz Dantas Lopes Nogueira
Jeremy Michael Venâncio da Silva

CONSELHO EDITORIAL

Dr. Adelson Menezes Lima (UFERSA/Campus Pau dos Ferros)
Dra. Adiana Nascimento Silva (UFERSA/Campus Caraúbas)
MSc. Danilo de Souza (IFRN/Campus Mossoró)
Dra. Fabiana Karla de Oliveira M. Varella (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (UFC)
Dr. Glauco Fontgalland (UFCG)
MSc. Herick Talles Queiroz Lemos (IFPE/Campus Pesqueira)
Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (UFERSA/Campus Mossoró)
Dr. José Hilton Ferreira da Silva (UFCG)
Dr. Kleiber Lima de Bessa (UFRN)
Dr. Taciano Amaral Sorrentino (UFERSA/C&T Mossoró)
Dr. Zoroastro Torres Vilar (UFERSA/Campus Mossoró)

DESIGN EDITORIAL

Gabriel Luiz Dantas Lopes Nogueira



APOIO

*Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva, Mossoró-RN.*

*Sistema de Bibliotecas da UFERSA
<https://bibliotecas.ufersa.edu.br/>*

*Editora EDUFERSA
<https://edufersa.ufersa.edu.br/>*

AUTOR CORPORATIVO

PET MECÂNICA E ENERGIA

*Programa de Educação Tutorial dos Cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica
Av. Francisco Mota, 572. Bairro Costa e Silva. Mossoró-RN, UFERSA Campus Leste / Centro
de Engenharias / Departamento de Engenharia e Tecnologia.
E-mail: r4em@ufersa.edu.br*



SUMÁRIO

Sinalizador sonoro de distância para deficientes visuais com sensor ultrassônico HC-SR04.....	1
<i>Thifany Kaliny dos Santos de S. Queiroz, Marinaldo Pinheiro de S. Neto e Stefany Kariny dos Santos de S. Queiroz.</i>	
Estudo da influência do método de lubri-refrigeração no acabamento da peça usinada e na vida da ferramenta de corte.....	11
<i>Amanda Beatriz Barbosa Silva e Ramsés Otto Cunha Lima.</i>	
Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045.....	23
<i>João Batista dos Santos e Ramses Otto Cunha Lima.</i>	
Influência da composição dos moldes de fundição à base de gesso sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da peça fundida em alumínio.....	35
<i>Arthur Domingos Mesquita de Moraes e Ramsés Otto Cunha Lima.</i>	
Simulação de fluxo de carga para sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica com o ATPDraw	45
<i>Adriano Aron F. de Moura, Pablo Fillype Teixeira Ferreira., Victor de Paula Brandão Aguiar, Ednardo Pereira da Rocha, João Frederico Souza de Paula e Ailson Pereira de Moura.</i>	
Estudo da interação entre nanoelementos magnéticos dispostos horizontalmente.....	57
<i>Thaysa Danielly Soares da Mota, Idalmir de Souza Queiroz Júnior e Marcos Vinícius de Mendonça Ferreira.</i>	
Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil.....	66
<i>Antonio Gabriel Fernandes Maia e Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella.</i>	
Diagnóstico energético e adequação à NR 10 e NBR 5410 em instalação elétrica comercial.....	77
<i>Guilherme Quaresma Medina e Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella.</i>	
Análise comparativa entre métodos numéricos e analíticos em circuitos transitórios	89
<i>Luiz Henrique Rodrigues Farias, Paulo Cesar Linhares Da Silva e Antônia Jocivania Pinheiro.</i>	
Comparação entre soldagem ascendente e descendente no processo MAG para obtenção de melhores propriedades na junta soldada.....	111
<i>Paulo César do Rosário Fernandes, Josivan Lopes de Moraes Júnior e Francisco Edson Nogueira Fraga.</i>	



Artigo

Sinalizador sonoro de distância para deficientes visuais com sensor ultrassônico HC-SR04

Thifany Kaliny dos Santos de Souza Queiroz^[1], Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto^[2], Stefany Kariny dos Santos de Souza Queiroz^[3]

^[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN); thif.queiroz@gmail.com

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN); marinaldo.neto@ifrn.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Rio Grande do Norte (UFERSA); st_queiroz@hotmail.com

Recebido: 25/08/2021;

Aceito: 29/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: É sabido que uma pessoa com deficiência visual enfrenta diversos impasses e dificuldades, sendo a Tecnologia Social uma oportunidade de mitigar esse problema social, atendendo ao mesmo tempo aos quesitos de simplicidade, baixo custo, fácil aplicabilidade e impacto social comprovado. O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um protótipo de um dispositivo que utiliza pulsos sonoros para advertir deficientes visuais da existência de obstáculos. Para a realização do projeto foi utilizada uma placa Arduino Uno, que possui baixo custo e de fácil programação, sensor ultrassônico, um alto-falante para os sinais sonoros, um display LCD e um LED para o sinal luminoso. Foi feita uma simulação do protótipo em software e a montagem do dispositivo previamente simulado e posteriormente foram realizados os testes com o protótipo. Dessa maneira, o sensor avisa por um sinal sonoro quando existe um obstáculo a uma distância inferior a 2 m, evitando que o deficiente visual sofra algum acidente ou não consiga desviar a tempo do objeto.

Palavras-chave: Sensor Ultrassônico. Arduino. Deficiência visual.

Abstract: It is known that the visually impaired person faces several impasses and difficulties, and Social Technology is an opportunity to alleviate this social problem, while meeting the requirements of simplicity, low cost, easy applicability and proven social impact. The present work has as general objective to develop a prototype of a device that uses sound pulses to alert the visually impaired person of the existence of obstacles. For the execution of the project, an Arduino Uno board, inexpensive and easy to program, was used, ultrasonic sensor, loudspeaker for sound signals, LCD display and LED for light signals. A simulation of the prototype in software was carried out and the assembly of the previously simulated device was carried out and, later, tests were carried out with the prototype. In this way, the sensor warns by an audible signal when there is an obstacle at a distance of less than 2 m, preventing the visually impaired person from having an accident or not being able to deviate from the object in time.

Key-words: Ultrasonic Sensor. Arduino. Visual impairment.

1. INTRODUÇÃO

A deficiência visual limita a vida do portador, além de dificultar a realização de tarefas do cotidiano, e, a Tecnologia Social pode representar um meio de amenizar alguns desses problemas sociais ao mesmo tempo em que é simples, barato e gera um impacto social positivo. Sendo assim, a tecnologia nada mais é que uma ponte para diminuir a perda de autonomia da pessoa com deficiência visual. Ao poderem ter sua autonomia em certo grau restaurada, se reduzem desvantagens significativas no processo de expressão, pois, a lacuna que a falta do sentido da visão causa, parcialmente é preenchida. Ainda há muitos impasses a serem superados, como o preconceito e o isolamento que contribuem com a exclusão social, mas, diminuindo as desigualdades e promovendo tratamento isonômico, isto é, tratando desigualmente os desiguais, na medida de suas desigualdades com o auxílio tecnológico, que permite que seja criado um ambiente mais isonômico é possível

mitigar tais impasses e dificuldades.

Uma das propostas para o auxílio da locomoção de deficientes visuais e enfrentamento de outras dificuldades expostas é apresentada no presente trabalho. Aqui, é demonstrado o desenvolvimento de um dispositivo que por meio de pulsos sonoros, o mesmo avisa ao deficiente visual a existência de obstáculos a uma distância inferior a 2m, permitindo que por meio do aviso sonoro, ocorra o devido desvio e evite acidentes e demais problemas recorrentes. Como objetivo principal tem-se, o desenvolver um dispositivo que utiliza pulsos sonoros para advertir deficientes visuais da existência de obstáculos. Para atingir este objetivo foi projetado o dispositivo, o mesmo foi simulado no TinkerCad, foi montado o protótipo e por fim, foram realizados testes de funcionamento e de performance.

2. A DEFICIÊNCIA VISUAL

Esta seção descreve os materiais, equipamentos e métodos para os procedimentos experimentais utilizados neste trabalho. Para este trabalho buscou-se entender a problemática enfrentada por deficientes visuais, após isso se procurou por uma plataforma simples que pudesse ter baixo custo e que permitisse alcançar o objetivo de forma eficaz permitindo que qualquer pessoa pudesse construir seu próprio modelo e aprimorá-lo, por fim, foi realizada uma simulação do protótipo, sua construção, programação e testes.

O problema a ser trabalhado foi definido, qual seja, auxiliar deficientes visuais a perceberem obstáculos em locais aos quais suas bengalas normalmente não atingem, que é na região acima da cintura, colocado fixado, por exemplo, em um boné ou gola de camisa. A seguir, foi definido que a plataforma microcontrolada a ser usada seria o Arduino Uno, por ter baixo custo, ser de fácil obtenção e ser compatível com diversos sensores e componentes eletrônicos. Por fim, após definição do circuito a ser construído, o mesmo foi projetado, simulado e programado, onde, através de simulações no TinkerCAD, foram realizados vários testes antes da construção do protótipo, que após ser construído e programado se mostrou bem funcional. Tanto os testes simulados quanto os testes experimentais no protótipo construído funcionaram muito bem. Este trabalho é do tipo experimental, pois consistiu em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz.

Segundo [2], a cegueira é uma deficiência visual, sendo uma limitação de uma das principais formas de reter informações do mundo externo e, por isso, esse sujeito cego tem uma percepção de mundo que segue de acordo com os outros 4 sentidos (tato, olfato, paladar e audição), enquanto o significado das coisas lhe é transmitido, em grande parte, por sujeitos que enxergam e que utilizam menos os outros sentidos que não a visão, usando-a como uma fonte de informação e conhecimento. O processo de inclusão é necessário e precisa ir além da inserção do indivíduo, é preciso que haja uma busca pelo tratamento isonômico, como pontuado por [3]: “Dar tratamento isonômico às partes significa tratar igualmente os iguais e desigualmente os desiguais, na exata medida de suas desigualdades”. Dessa maneira, com o avanço tecnológico que sempre busca facilitar a vida dos indivíduos em sociedade, deve também buscar desenvolver maneiras que incentivem e promovam a inclusão dos indivíduos. Sendo assim, de acordo com [4]: “a Tecnologia Social representa todo processo, método ou instrumento capaz de solucionar algum tipo de problema social e que atenda aos quesitos de simplicidade, baixo custo, fácil reaplicabilidade e impacto social comprovado”. Com isso, segundo dados do IBGE em [5], em 2010, a deficiência visual estava presente em 3,4% da população brasileira, sendo em disparada a que mais acomete os indivíduos, conforme apresentado na Figura 1.

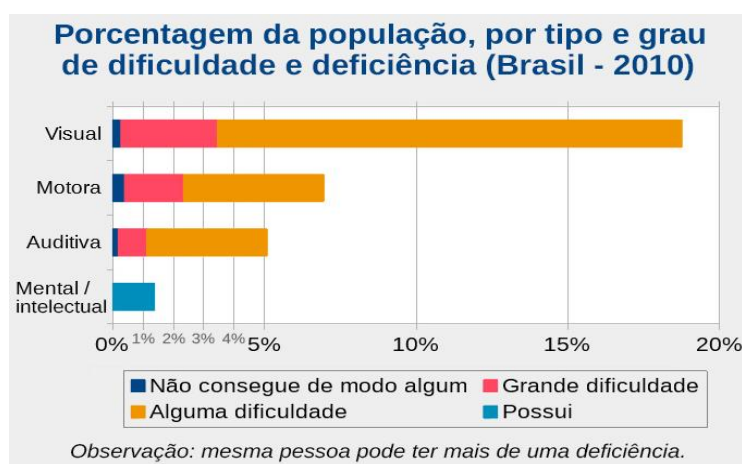


FIGURA 1. Porcentagem da população, por tipo e grau de dificuldade e deficiência [5].

Ainda, de acordo com [5], no Brasil, segundo os dados mais recentes, os de 2010, haviam mais de 6,5 milhões de pessoas com deficiência visual, sendo 582 mil cegas e 6 milhões com baixa visão. Além disso, a

Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que, nos países em desenvolvimento, de 1 a 1,5 por cento da população é acometida pela deficiência visual. Então, no Brasil, poderia se estimar que cerca de 1,6 milhão de pessoas possuem alguma deficiência visual, a maioria delas portando a baixa visão e que a cada 3 mil crianças, uma é cega, e a cada quinhentas, uma possui a visão subnormal. Com isso, [6] nos apresenta uma percepção de que algumas pessoas cegas acabam ficando muito sensíveis a entonações ou mudanças de pronúncias, mudanças de volume, ao ritmo dos sons, a ressonância e a intensidade dos sons enquanto falas de outros indivíduos, que muitas vezes não é percebido pelos sujeitos que não possuem deficiência visual alguma. E, de acordo com [2], a linguagem e percepções táteis acabam influenciando no desenvolvimento cognitivo.

Ademais, de acordo com [7], outra dificuldade que pode ser apontada, é que a deficiência visual, em qualquer grau, compromete a capacidade da pessoa de se orientar e de se movimentar no espaço com segurança e independência. Com isso, a pessoa que perde a visão precisa aprender a executar tarefas cotidianas e deslocar-se sem o estímulo visual, sendo primordial aprimorar os outros sentidos. Perante o exposto, a tecnologia demonstra uma saída promissora para a falta de acessibilidade e inclusão que enfrentamos na sociedade. Além disso, [7] também defende a ideia acerca da dificuldade que o portador de deficiência encontrava com as poucas opções de trabalho, no entanto, com o crescente desenvolvimento tecnológico, principalmente nas áreas de microeletrônica e informática, houve a criação de uma ampla variedade de profissões e empregos para os deficientes visuais. Demonstrando a viabilidade e necessidade dos desenvolvimentos tecnológicos para simplificar e facilitar a vida do indivíduo, além de incluir o portador de deficiência de uma maneira mais isonômica no meio social.

3. O ARDUINO UNO E O SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04

O Arduino, apresentado na Figura 2, é um dos componentes básicos e essenciais no desenvolvimento do presente projeto, e, segundo [8], trata-se de uma plataforma muito versátil de prototipagem eletrônica, sendo open software. Sendo assim, [9] introduz que o Arduino é basicamente um computador de pequeno porte, sendo possível programar para ocorrer o processamento de entradas e saídas entre o Arduino e os componentes conectados a ele externamente. Ainda, é um sistema passível de interação com o seu ambiente através de hardware e software.



FIGURA 2. (a) Arduino UNO e (b) IDE do Arduino. (autoria própria).

O modelo de Arduino utilizado no presente trabalho é o Arduino UNO, o mesmo apresenta 14 pinos, que pode tanto ser utilizados como entradas, quanto saídas digitais, os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11 podem também utilizar sinais PWM (*Pulse Width Modulation*, do inglês, Modulação por Largura de Pulso), que gera valores inteiros entre 0 e 255. Além disso, os pinos que correspondem às entradas analógicas são os pinos de A0 e A5, e recebem uma tensão entre 0 e 5V, havendo ainda os pinos 3,3V, 5V e GND ou Terra, que servem para a alimentação dos componentes conectados ao dispositivo. A placa de Arduino Uno utiliza o ATmega328 que é um microcontrolador tipo chip único criado pela Atmel na família megaAVR. Para que o Arduino seja programado se usa o IDE do Arduino, que significa *Integrated Development Environment* ou ambiente de desenvolvimento integrado em português, como mostrado na Figura 2, que é basicamente um software onde se

escreve o código em uma linguagem baseada na linguagem C, permitindo que seja escrito um programa de computador.

Outra parte muito importante do projeto é o sensor ultrassônico. A utilização do sensor ultrassônico HC-SR04 foi devido a sua ótima precisão regulável e seu baixo custo. O HC-SR04 permite que sejam feitas leituras de distâncias entre 2cm e 4m com uma precisão de 3mm. Tem como funcionamento básico o envio de sinais ultrassônicos, que aguardam o retorno (ECHO) do sinal, se baseando no tempo entre o envio e o retorno, a partir disso é feito o cálculo da distância entre o sensor e o objeto que se deseja detectar. Como apresentado na Figura 3.

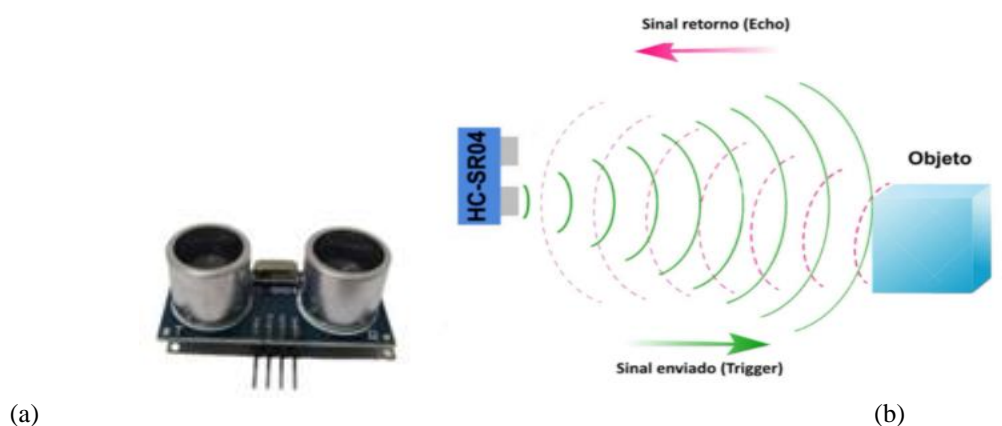


FIGURA 3. (a) Sensor ultrassônico HC-SR04. (b) Funcionamento do HC-SR04. (<https://www.filipeflop.com/blog/sensor-ultrassonico-hc-sr04-ao-arduino/>)

O HC-SR04 tem 4 terminais, dois são para o fornecimento de energia, denominados de VCC e GND, que devem ser ligados em 5V e GND do Arduino e os outros dois são a entrada, o TRIG, que solicita a medição e a saída, e o ECHO, que vai nos dar a resposta da medição. Esse sensor usa o controle por meio do envio de pulsos, com uma duração específica e a resposta é dada também em pulsos, cuja duração varia de acordo com a distância que é medida. Esse pulso vai ser dado em uma onda quadrada e tem o estado LOW em 0 e o HIGH em 5V. O HC-SR04 é ativado através de um pulso HIGH de 10 μ s ao pino TRIG, que vai provocar o envio do pulso ultrassônico que vai refletir em um obstáculo. O ECHO por sua vez, vai ser recebido pelo sensor que mede esse intervalo de tempo entre envio e recebimento. O pulso HIGH tem uma duração que é proporcional à distância e é enviado para o ECHO. A figura 8 representa o pulso enviado para a entrada TRIGGER para que seja disparada a medição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os componentes principais do circuito representados na Figura 4 são: 1 (um) Arduino UNO, 1 (um) Sensor Ultrassônico, 3 (três) resistores, sendo 2 (dois) de 220 Ohms e 1 (um) de 1 kOhm, 1 (um) potenciômetro de 10 kOhms, 1 (um) display LCD, 1 (um) cabo USB para fazer a conexão entre o Arduino e o Computador (PC), além disso, foram utilizados 1 (um) *proto-board*, cabos tipo *jumpers* e 1 (um) alto-falante pequeno, enquanto que na simulação feita no TinkerCAD foi utilizado um *buzzer*, ambos desempenhando a mesma função.

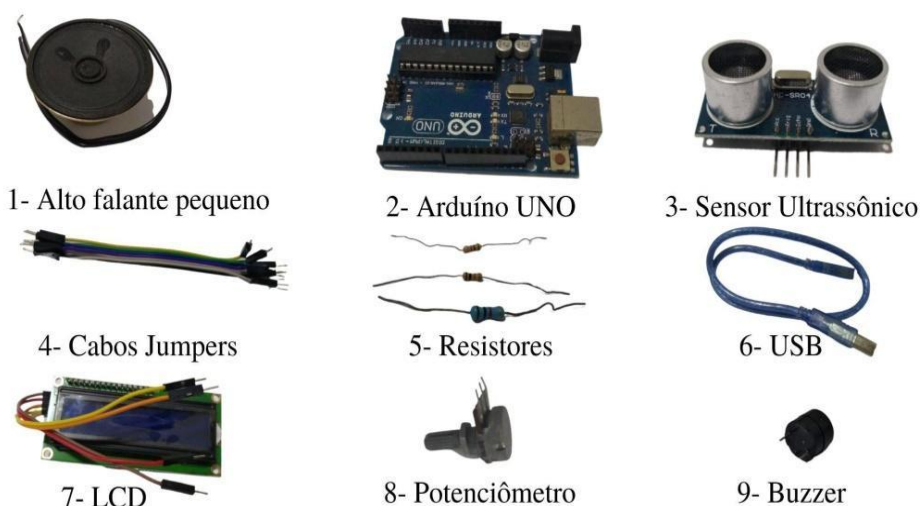


FIGURA 4. Componentes, placas, sensores, cabos e atuadores do Circuito (autoria própria).

Inicialmente o circuito foi montado no TinkerCAD, como demonstrado na Figura 5. Foram feitas as devidas conexões entre os componentes anteriormente descritos, acrescentando o buzzer no lugar do alto-falante, para realizar o impulso sonoro.

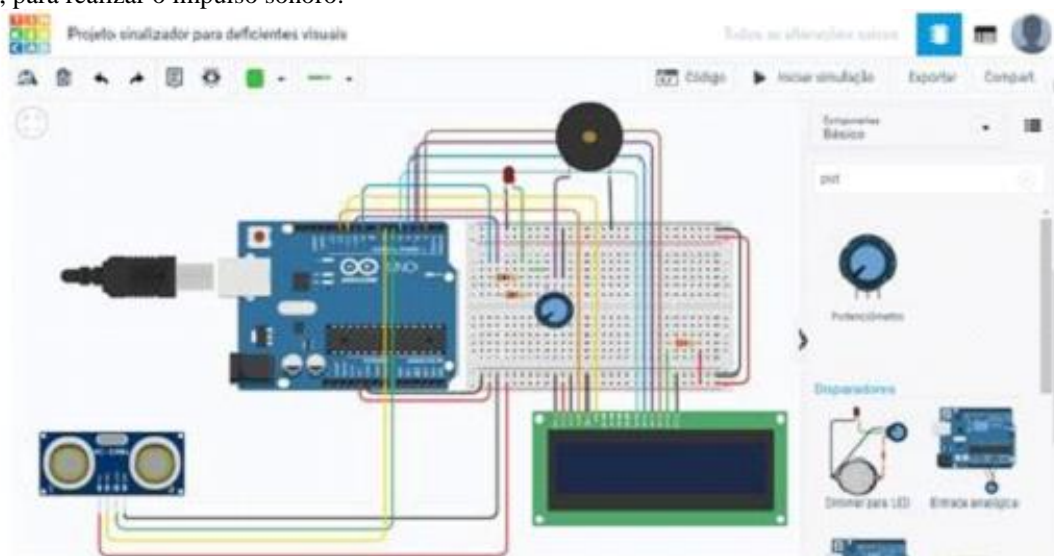
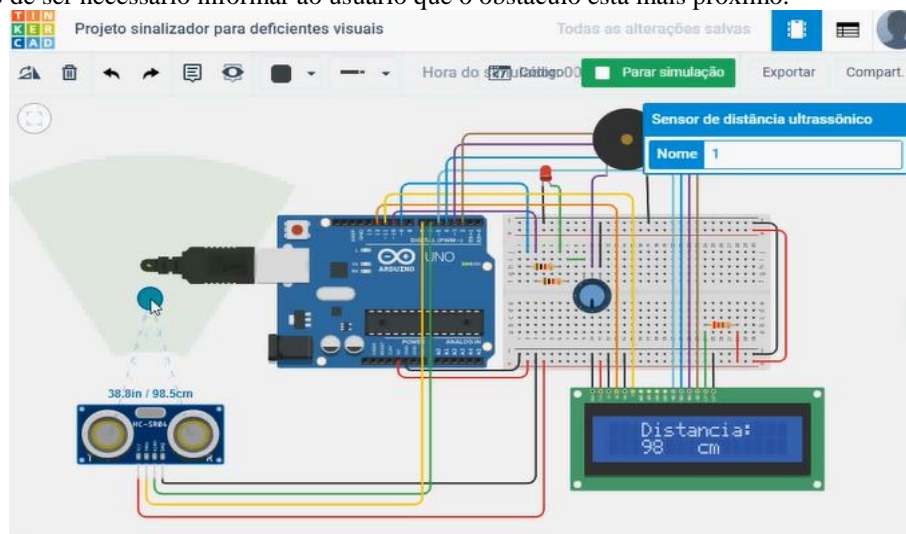


FIGURA 5. Montagem do Circuito no TinkerCAD (autoria própria).

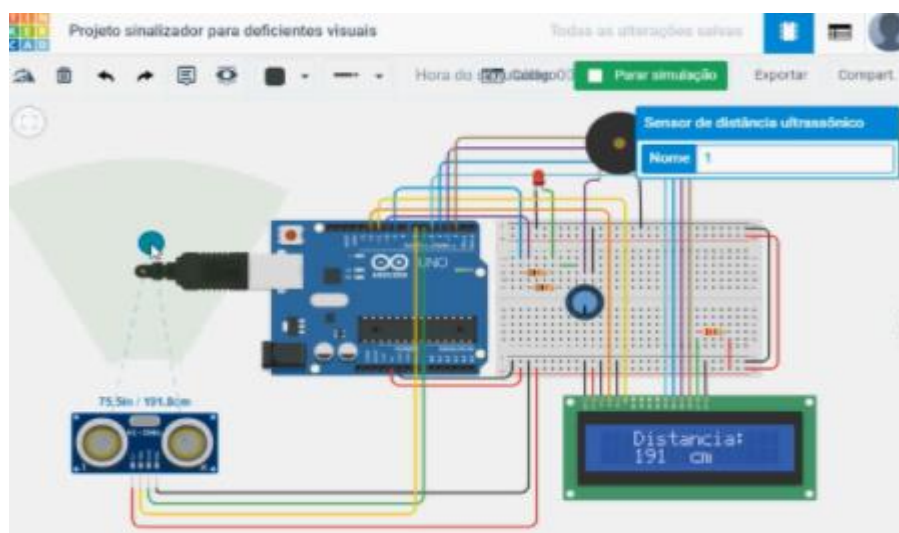
Para montar o circuito foi feita a ligação do sensor ultrassônico para medir a distância. Foi utilizado um LED para indicar o funcionamento quando não está gerando pulsos de som. Na simulação no TinkerCAD foi utilizado um buzzer. Para ocorrer o ajuste da distância foi utilizado um Display LCD. Ainda, foi conectado o potenciômetro, para o ajuste da intensidade sonora. Foram ainda acrescentados resistores para limitar a intensidade de corrente no LED, no LCD e no autofalante ou *buzzer*.

5. RESULTADOS

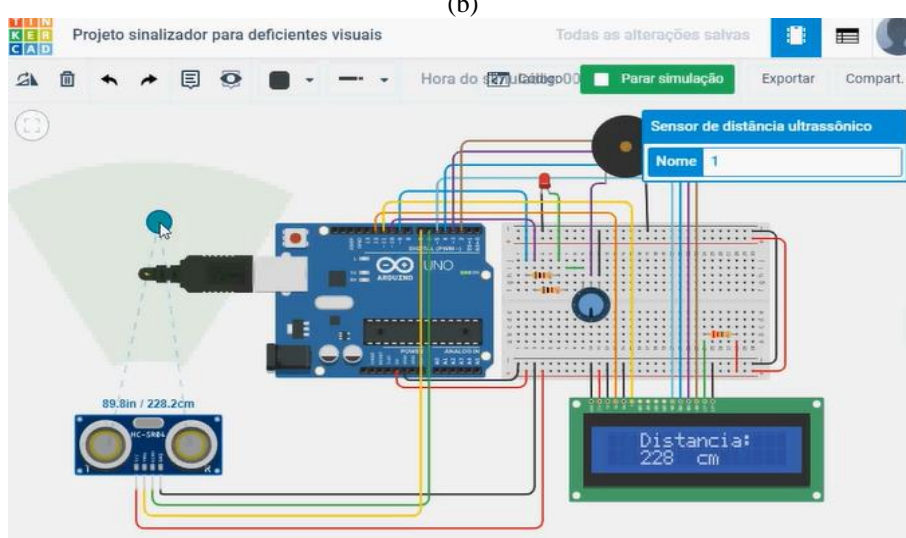
Após a montagem do circuito foi iniciada a simulação no TinkerCAD e identificou-se que o circuito funcionou como o esperado, ou seja, a partir de 2 m o som disparava e o display LCD realizava o ajuste de distância. Após iniciada a simulação, conforme se pode observar na Figura 6, utilizou-se o potenciômetro para o ajuste do volume. À medida que as distâncias foram alteradas, como mostrado pelo LCD da Figura 6 (a), 6 (b) e 6 (c), o som também alterava-se, a distâncias mais próximas, o som tornava-se agudo e incômodo, a distâncias mais longas, o som tornava-se mais grave e mais agradável. Esta alteração na frequência sonora se deve ao fato de ser necessário informar ao usuário que o obstáculo está mais próximo.



(a)



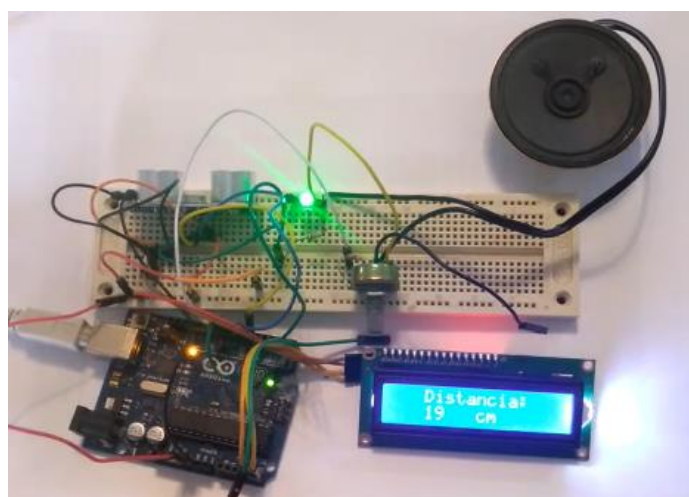
(b)



(c)

FIGURA 6. Simulação informando visualmente (a) 98 cm e gerando com um som médio, (b) 191 cm e gerando com um som grave, e (c) 228 cm e sem aviso sonoro. (autoria própria).

O protótipo, apresentado na Figura 7, foi construído semelhante ao que foi simulado no Tinkercad. Os componentes eletrônicos, o sensor ultrassônico, o Arduino UNO, *jumpers* e *proto-board*, foram facilmente adquiridos, podendo ser comprados pela internet ou algumas lojas especializadas. A montagem foi simples e rápida, observando-se os pinos corretos para conexão no Arduino, no sensor ultrassônico e no LCD.



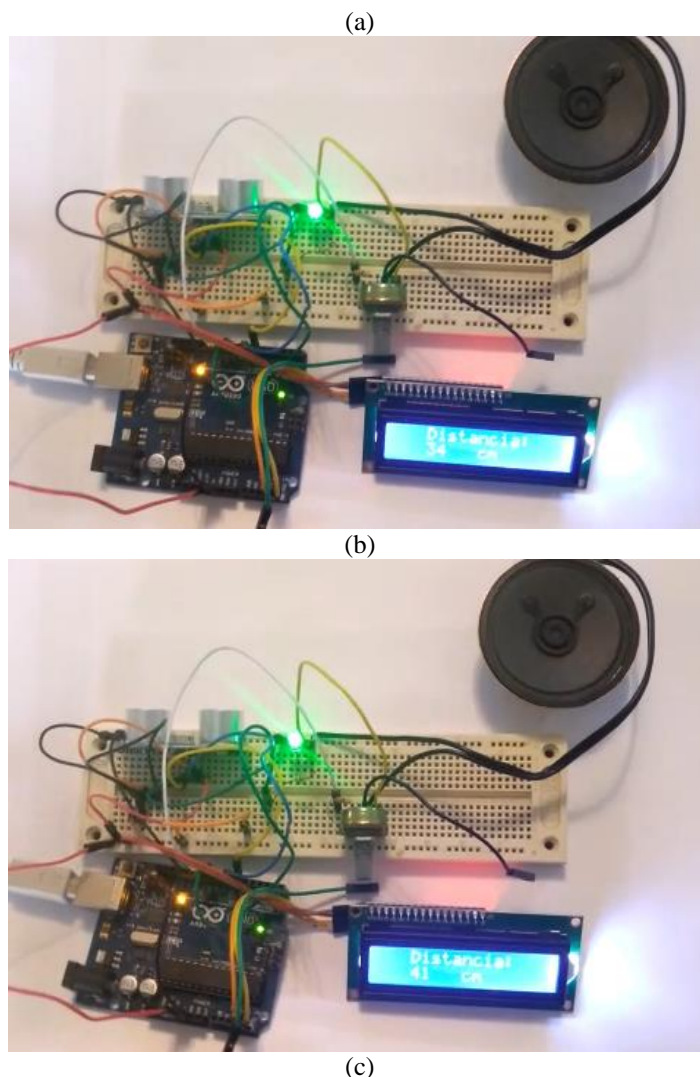


FIGURA 7. Protótipo construído informando visualmente (a) 19 cm e apresentando um som agudo, (b) 34 cm e informando com um som menos agudo, e (c) 41 cm e com som menos agudo ainda. (autoria própria).

O protótipo funcionou muito, como esperado, a distância apresentada pelo LCD foi medida com uma trena para efeito de comparação e apresentou concordância muito boa, além disso, o aviso sonoro se mostrou muito útil ao avisar da proximidade de um obstáculo e usar sons agudos e graves para indicar distâncias até 2m. Acima da distância de 2 m, o som não foi apresentado para que o usuário não fosse alertado desnecessariamente. Além disso, essa distância pode ser modificada facilmente a partir da mudança do valor de “*distmax*” no programa apresentado no Anexo A.

O custo do protótipo foi levantado em uma pesquisa na internet, usando como base a loja virtual Filipeflop (<https://www.filipeflop.com/>). O custo de cada componente é apresentado na tabela 1, a seguir.

TABELA 1. Custo unitário e total dos componentes usados no projeto, pesquisado na loja virtual Filipeflop (<https://www.filipeflop.com/>), no dia 25/08/2021.

<i>Componente</i>	<i>Custo Unitário (R\$)</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Subtotal (R\$)</i>
Arduino UNO com cabo USB	87,90	1	87,90
Sensor ultrassônico HC-SR04	13,90	1	13,90
Display LCD 16x2 I2C com luz de fundo azul	28,90	1	28,90
Módulo buzzer passivo de 5V	7,40	1	7,40
Protoboard de 830 pontos	19,90	1	19,90
Resistores (pacote de 20 unid.)	2,90	1	2,90
Potenciômetro de 19 kOhms	2,90	1	2,90
Total			163,80

O custo total do protótipo foi de R\$ 163,80, podendo ser alterado com a aquisição de um Arduino Nano no lugar de um Arduino UNO e uma placa de *protoboard* menor, podendo o valor cair para R\$ 110,00, que é um valor bem mais razoável.

6. CONCLUSÃO

O uso de uma placa Arduino e um sensor ultrassônico puderam fornecer um dispositivo de grande ajuda para deficientes visuais, funcionando como um alerta em locais nos quais a bengala normalmente não é usada, que é acima da cintura até a altura da cabeça. O projeto se tornou muito promissor, tanto a simulação usando o TinkerCAD, quanto a construção do protótipo físico funcionara muito bem, conforme esperado. O funcionamento basicamente se dá através de um sinal sonoro para obstáculos mais próximos que 2 m de distância. O som gerado iniciava grave, e se tornava mais agudo à medida que o objeto se aproximava, alertando o usuário da distância cada vez menor do obstáculo. Visto que o obstáculos que se desejam evitar estão localizados acima da cintura sugere-se que o dispositivo seja colocado fixado, por exemplo, em um boné ou gola de camisa, para tanto, o uso de um Arduino Nano e uma placa de *protoboard* menor podem permitir o acondicionamento do dispositivo em uma pequena caixa com alguma presilha para fixação.

Testes mais demorados e minuciosos com usuários portadores de deficiência visual, para melhoria do protótipo, ainda são necessários. Outra possibilidade interessante seria substituir o buzzer ou alto-falante por um motor de vibração, como um vibracall de celular, também seria útil a implementação de um sistema que funcionasse via bluetooth, que pudesse enviar mensagens de voz, informando possíveis obstáculos à frente do usuário. Isso pode tornar o dispositivo mais agradável ao usuário, ou ainda fazê-lo se comunicar com um celular e um aplicativo de voz para informar a distância falando pelo celular. Sendo assim, o projeto aqui desenvolvido apresenta vantagens de baixo custo, praticidade por possuir poucos componentes e ainda por ser um projeto simples mas com uma gama diversificada de variações, podendo ser utilizado em uma bengala, em um boné, preso à camisa etc. Além disso, projetos desse gênero apresentam apoio à sociedade, o que é de uma importância imensurável.

REFERÊNCIAS

- [1] GIL, A.C.. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- [2] NUNES, S.; LOMÔNACO, J.F.B. O aluno cego: preconceitos e potencialidades. *Revista Semestral da Associação Brasileira de Psicologia Escolar e Educacional*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 55-64, jan. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pee/a/YKv7sx5Zp6557RQvrBQ66gp/?format=pdfelang=pt>. Acesso em: 02 ago. 2021.
- [3] NERY JR, N. *Princípios do processo civil à luz da Constituição Federal*. São Paulo: Revista dos Tribunais, 1999.
- [4] PENA, J.O.; MELLO, C.J. Tecnologia social: a experiência da Fundação Banco do Brasil na disseminação e reaplicação de soluções sociais efetivas. In: BRASIL, Fundação Banco do. *Tecnologia social: uma estratégia para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Cip-Brasil, 2004. Cap. 3. p. 84-87.
- [5] IBGE. *Pessoas Com Deficiência*. Senso Demográfico 2010. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/20551-pessoas-com-deficiencia.html>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- [6] RABÊLLO, R.S. Análise de um experimento de teatro-educação no Instituto de Cegos da Bahia: possibilidades de utilização da linguagem teatral por um grupo de adolescentes. Tese de Doutorado, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
- [7] GIL, M. *Cadernos da TV Escola: deficiência visual*. Brasília: Mec. Secretaria de Educação A Distância, 2000. 80 p. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seed/arquivos/pdf/deficienciavisual.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- [8] OLIVEIRA, C.L.V.; ZANETTI, H.A.P.; NABARRO, C.B.M.; GONÇALVES, J.A.V. *Aprenda Arduino: uma abordagem prática*. Duque de Caixas: Katzen Editora, 2018. 181 p.
- [9] MCROBERTS, M. *Arduino básico*. São Paulo : Novatec Editora, 2011.

ANEXO A – Programa usado no Arduino com as biblioteca usada e código adaptado pelos autores

```

/*
Programa: Sinalizador auditivo para deficientes visuais
Adaptação: Thifany Kaliny dos Santos de Souza Queiroz
Este programa foi adaptado para o uso do sensor de distância, buzzer e do LCD como um meio de auxiliar
deficientes visuais para desviar de obstáculos em alturas acima da cintura até a cabeça
*/

// Chamada à biblioteca do LCD
#include <LiquidCrystal.h>

//Definições de pinos para o uso do sensor ultrassônico
#define pino_echo 6 // Define o pino para o echo
#define pino_trigger 7 // Define o pino para o trigger

//Definições de pinos para o uso do LED e do buzzer
#define pino_led 9 // Define o pino para o led
#define pino_buzzer 10 // Define o pino para o buzzer

//Definições de pinos para o LCD
#define rs 12 // Define o pino para o LCD RS
#define enable 11 // Define o pino para o LCD enable
#define d4 5 // Define o pino para o LCD d4
#define d5 4 // Define o pino para o LCD d5
#define d6 3 // Define o pino para o LCD d6
#define d7 2 // Define o pino para o LCD d7

//Definições da distância mínima a partir da qual o sinal sonoro é emitido
#define distmax 200

// Configuração dos pinos usados pelo LCD
LiquidCrystal lcd(rs, enable, d4, d5, d6, d7);

/*
Função de acesso ao sensor ultrassônico obtido e adaptado de:
https://github.com/OmarGabrielRamirez/ArduinoProjects/blob/master/Project%205.-
%20Using%20Ultrasonic%20Sensor%20and%20Led%20Indicator.ino
*/
long readUltrasonicDistance(int triggerPin, int echoPin)
{
// Esta função limpa o pino trigger, emite um sinal e lê o retorno
// depois calcula o tempo gasto pela onda usando a velocidade do som no ar
pinMode(triggerPin, OUTPUT); // Coloca o pino trigger como saída
digitalWrite(triggerPin, LOW); //Coloca trigger em LOW
delayMicroseconds(2); //Espera 2 microsegundos
// Ativa trigger
digitalWrite(triggerPin, HIGH); //Coloca trigger em High
delayMicroseconds(10); //Espera 10 microsegundos
digitalWrite(triggerPin, LOW); //Coloca trigger em LOW
pinMode(echoPin, INPUT); // Coloca o pino echo como entrada
// Lê o pino echo e devolve o tempo em microsegundos * 0.01723
return (pulseIn(echoPin, HIGH)*0.01723);
}
void setup()
{
// Acessando o serial terminal
Serial.begin(9600);
// Acessando o led como uma saída
pinMode(pino_led, OUTPUT);
// Acessando o LCD 16 colunas x 2 linhas

```



```

    lcd.begin(16, 2);
}

void loop()
{
// Criação de variáveis usadas no programa
    long distancia = 0;
    long brilho = 0;
    long nota = 0;

//Medição da distância com o sensor ultrassônico
    distancia =readUltrasonicDistance(pino_trigger, pino_echo);

// Envio de informação para o serial terminal
    Serial.print(distancia);
    Serial.println(" cm");

// comando para transformar valores - map(value, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh)
    brilho = map(distancia, 10, 300, 255, 0);

// Acendimento do led com brilho variável
    digitalWrite(pino_led, brilho);

//Acessando o LCD coluna 3 e linha 0 (primeira linha)
    lcd.setCursor(3, 0);

// Escrevendo mensagem
    lcd.print("Distancia: ");

//Acessando o LCD coluna 3 e linha 1 (segunda linha)
    lcd.setCursor(3, 1);

// Escrevendo mensagem
    lcd.print(distancia);

//Acessando o LCD coluna 8 e linha 1 (segunda linha)
    lcd.setCursor(8, 1);

// Escrevendo mensagem - unidade em cm
    lcd.print("cm");

//Se a distância for menor que 2m o buzzer irá soar em uma frequência que depende da distância
    if (distancia < distmax) {
        nota = map(distancia, 10, 200, 800, 200);

// Liga o buzzer
        tone(pino_buzzer, nota);
// Espera um tempo maior quando o obstáculo está mais perto
        delay(nota);

// Desliga o buzzer
        noTone(pino_buzzer);
    }

    // Espera alguns milissegundos
    delay(500);
}

```



Artigo

Estudo da influência do método de lubri-refrigeração no acabamento da peça usinada e na vida da ferramenta de corte

Amanda Beatriz Barbosa Silva ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; aluno; amandabeatrizbs@outlook.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; orientador; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 03/12/2021;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: Na indústria metal-mecânica é interessante que exista um gerenciamento envolvendo sustentabilidade, produtividade e qualidade, considerando sempre que o produto final deve ter um padrão de qualidade aceitável. No que diz respeito ao processo de usinagem, os fluidos de corte hoje são essenciais, pois desempenham algumas funções consideradas indispensáveis. Além disso, deve-se dar a devida importância a grande quantidade de calor desenvolvida durante o corte, o qual, precisa ser reduzido. Nesse contexto, considera-se uma alternativa promissora, a redução da utilização de fluidos. Como consequência do que foi exposto, será realizado a usinagem do aço carbono ABNT 1045 utilizando insertos de metal duro como ferramenta, tendo como principal objetivo atender a uma exigência de rugosidade superficial e aos padrões básicos para esse tipo de operação. A partir disso, uma avaliação será feita de maneira a discutir qual dos três métodos de lubrificação é mais adequado: a seco, fluido abundante e MQF (Mínima Quantidade de Fluido) e em como adequar o uso do fluido de corte para verificar a influência desses recursos na vida da ferramenta e no acabamento da peça, sempre considerando que os parâmetros de corte utilizados serão fixos para os três processos.

Palavras-chave: Fluidos de corte, MQF, usinagem, desgaste, rugosidade.

Abstract: In the metal-mechanic industry, management involving sustainability, productivity and quality is necessary, always considering that the final product must have an acceptable quality standard. Regarding to the machining process, cutting fluids are essential, as they perform some functions considered indispensable. In addition, Much importance must be given to the large amount of heat developed during cutting, which needs to be reduced. In this context, reducing the use of cutting fluids is considered a promising alternative. In this research, the machining of carbon steel ABNT 1045 will be carried out using carbide inserts as a tool, with the main objective of meeting a requirement for surface roughness and the basic standards for this type of operation. Therefore, an evaluation will be made in order to discuss which of the three lubrication methods is more suitable; dry, abundant fluid and MQF (Minimum Quantity of Fluid) and on how to adapt the use of cutting fluid to verify the influence of these application on the tool life and on superficial quality of workpiece, always considering that the cutting parameters used will be fixed for the three processes.

Key-words: Cutting fluids, MQF, machining, wear, roughness.

1. INTRODUÇÃO

O grande avanço tecnológico na indústria metal mecânica vem gerando altas demandas de diversos produtos, estimulando a competitividade no mercado, exigindo, portanto, uma maior qualidade no produto final. Em contrapartida, a sustentabilidade continua sendo uma das principais barreiras para a indústria fabricar peças de qualidade, e ambientalmente amigável [1]. Em se tratando de qualquer esforço para aumentar a produtividade e reduzir custos, deve-se considerar estudos com alternativas disponíveis e viáveis tanto nessa quanto em qualquer outra área. Na usinagem, o uso dos fluidos de corte, quando utilizados adequadamente, trazem benefícios, considerando que um dos fatores que influenciam diretamente na integridade da superfície de uma peça são as altas temperaturas durante o processo, necessitando, portanto, de um líquido refrigerante e/ou lubrificante [2].

Dessa maneira, muito se tem estudado para restringir a utilização dos fluidos de corte e reaproveitá-los de alguma forma, tentando manter tanto a qualidade da peça quanto a vida da ferramenta. Em virtude disso, assim como em qualquer processo, não se deve descartar a possibilidade de alguns inconvenientes, com o uso dos fluidos de corte não seria diferente. Entre alguns desses problemas causados pode-se citar a dificuldade de reciclagem do fluido de corte e dos cavacos molhados por ele, a poluição ambiental gerada, além de doenças causadas aos operadores das máquinas.

Ainda assim, de um modo geral, o tratamento dos óleos usados durante o processo quando associado com o método da Mínima Quantidade de Fluido (MQF) acabam se tornando aliados, já que o óleo ao final da sua vida útil seja por capacidade de lubrificação, por desenvolvimento de bactérias e fungos ou por excesso de contaminações devem ser tratadas para reciclagem dos seus componentes, descarte ou tratamento ambiental [5].

Essa técnica de diminuição do fluido de corte é conhecida também como MQF, que se trata basicamente de pulverizar uma pequena quantidade de fluido na zona de corte da peça afim de diminuir a quantidade de calor gerada devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, aumentando assim a vida da ferramenta e consequentemente um melhor acabamento/qualidade da peça usinada [3]. Sendo assim, o investimento em pesquisas busca desenvolver óleos com vida mais longa de forma que a aplicação dos métodos contribuam para diminuir o descarte e consequentemente causar um menor dano a saúde do operador ainda mantendo sua eficiência. Fundamentando-se nisso, as condições de usinagem e as variáveis envolvidas no processo são importantes para o estudo da influência dessa aplicação [2].

Considerando isso, o presente estudo discutirá os três modos de lubrificação diferentes existentes; a seco, fluido abundante e MQF, afim de verificar influência desses métodos na vida da ferramenta e no acabamento da peça, como também minimizar as agressões causadas por esse processo, já que o objetivo é minimizar o descarte e utilização desses óleos e ao mesmo tempo manter os ganhos alcançados com relação a vida útil da ferramenta e a qualidade da peça.

1.1 Revisão da Literatura

É interessante estudar a viabilidade de cada método de lubrificação, de forma a considerar fatores importantes que justifiquem a utilização de um determinado processo. O intuito dessa seção é principalmente esclarecer, conceituar e caracterizar componentes importantes que estão relacionados a usinagem, de forma a exemplificar com estudos, confrontar parâmetros aplicados e as possíveis melhorias de cada método. A necessidade de gerenciamento incluindo planejamento do processo, sustentabilidade e preservação da saúde do ser humano são temas que estão diretamente relacionados a indústria metal-mecânica, e por isso, também serão tratados como variáveis importantes em todo sistema.

1.1.1 Desgaste de ferramentas de corte

Existem diversos tipos de desgastes e avarias que podem ocorrer em uma ferramenta de usinagem. No que diz respeito ao desgaste, trata-se da perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta durante o processo de corte [2]. Esse fenômeno [2] geralmente ocorre até a ferramenta perder sua capacidade de corte e normalmente desgasta-se mais na área com maior duração de solicitação térmica e mecânica na região de corte, ou seja, possui uma relação direta com a velocidade de corte além do avanço e da profundidade durante esse procedimento.

Na região de corte a grande quantidade de calor gerada é devido as elevadas pressões necessárias ao cisalhamento, esse excesso de aquecimento deforma a peça e produz imperfeições no trabalho. Além disso, a perda contínua de fragmentos se torna um problema quando a temperatura aumenta e as mesmas se soldam à parte cortada [6].

Sabendo disso, um dos motivos que diminuem a proporção do desgaste da ferramenta é o controle da temperatura na área mais afetada, nesse caso ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Essa diminuição da temperatura, geralmente, é feita através da utilização de auxiliares: os fluidos de corte, sendo assim analisado diversas variáveis para melhor escolha em uma determinada usinagem [2,4]. Como dito anteriormente, existem áreas específicas nas ferramentas que se desgastam mais rapidamente que outras, mas deve-se atentar que nesse setor tudo pode variar. Nesse caso, pode depender da forma da solicitação térmica, mecânica e química da região de corte. Por isso, a aplicação do fluido de corte a áreas previamente analisadas que, de certa forma são mais afetadas, é essencial.

À medida que a ferramenta é utilizada, o desgaste ocorre e, consequentemente, altera as dimensões da peça e conduz a um pior acabamento. Em alguns casos, durante o processo de corte, normalmente quando a ferramenta já se encontra com seu nível de desgaste bem elevado ocorre a geração de faíscas tornando a superfície usinada defeituosa. De modo geral, quando esse fenômeno ocorre, ela já extrapolou as medidas de desgaste que estabelecem o seu critério de fim de vida. Inteirando-se de fatos como esse, foram desenvolvidos critérios que definem o fim de vida de uma ferramenta, dentre eles tem-se: a exatidão dimensional e geométrica, o estado da ferramenta e a textura superficial [4].

1.1.2 Aplicação de fluidos de corte

Tendo conhecimento sobre as consequências que o desgaste pode causar e a forma como isso pode afetar a produtividade de uma indústria é interessante buscar o aprimoramento de qualquer processo sempre almejando o seu bom desempenho. Assim, busca-se utilizar produtos e meios que auxiliem no resultado desejado. Nesse sentido, no que diz respeito ao sistema de usinagem, existem diversos fluidos de corte que sustentam tanto um melhor acabamento quanto uma melhoria na vida útil da ferramenta. Isso também significa que, as exigências básicas desse processo são produzir peças dentro de tolerâncias exigidas e acabamentos dimensionados dentro do padrão, ao menor custo possível. A classificação desses fluidos conduz a uma escolha mais confiável acerca dos parâmetros, que são levados em consideração na hora de executar essa técnica, já que cada fluido possui características específicas [4,8]. Sabendo disso [2], os fluidos de corte podem ser definidos a partir de diferentes fluidos básicos, e ainda dividi-los em três tipos: oleosos, aquosos e gasosos.

Existem diversas formas de aplicação dos fluidos e é importante analisar as estratégias para cada caso e processo separadamente, significando que a escolha do método de como o fluido será aplicado está relacionado a máquina que está sendo utilizada, a ferramenta, peça e o processo. Tomando como exemplo e base os fluidos emulsionáveis considerando que será o componente utilizado no estudo [2,5] pode-se caracterizar como sendo a composição de uma pequena quantidade de óleo em água acompanhado pelo uso de agentes emulsificantes.

Acrescido a isso, pode-se mencionar também que são substâncias facilitadoras que contribuem para a dispersão do óleo na água, o que mantém disperso como uma emulsão estável. Dessa forma, esse fluido possui um alto poder refrigerante e é bastante utilizado no processo de usinagem a altas velocidades de corte, aliado ainda a fatores de lubrificação e retirada de cavaco, ou seja, a fase oleosa, por assim dizer, é responsável pela lubrificação e a água vai promover o resfriamento do local [2,5]. Essas características [5] podem ser balanceadas de acordo com a concentração de cada elemento que vai variar de acordo com a operação mecânica que será realizada.

Desse modo, a presença de óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e inibidores da corrosão, se sobressaem às desvantagens do uso da água, que apesar de remover parte do calor gerado durante o processo de corte, possui ação corrosiva e baixo poder de umedecimento dos metais. Esses anticorrosivos, são aditivos que evitam os efeitos nocivos da água presente na emulsão. Portanto, apesar da água já ter sido muito utilizada como uma forma de resfriar a ferramenta, esse método foi sendo substituído com os anos devido ao desenvolvimento das pesquisas ao longo do tempo [2].

Não obstante, as emulsões possuem também desvantagens, dentre elas pode-se destacar o crescimento bacteriano nesse tipo de fluido, que conseqüentemente resulta em uma quebra das emulsões devido ao não tratamento periódico recomendado de biocidas adequados [6]. Além disso, existem situações específicas em que os fluidos emulsionáveis não são adequados, resultando na consideração de outros meios. Um grande exemplo são os óleos integrais que são conhecidos também como óleos puros. Dentre algumas dessas situações pode-se citar principalmente operações de desbaste pesado em condições mais críticas, podendo ser óleos minerais ou vegetais. A preferência desses auxiliares a situações mais particulares, está relacionada ao calor específico do fluido, considerando que a capacidade de refrigeração é muito menor do que os fluidos aquosos [2].

Em contrapartida, as qualidades lubrificantes são melhores o que acaba resultando em uma quantidade de calor menor a ser gerada na zona térmica. Aos óleos de características viscosa, é preferencialmente utilizado em situações em que a velocidade de corte seja menor e o avanço e a profundidade maiores. Considerando que a baixa velocidade de corte contribui para a penetração do fluido nas interfaces do processo [2].

Apesar das vantagens dos óleos, sua utilização tornou-se inviável devido ao alto custo e a rápida deterioração, porém, ainda são muito utilizados como aditivos, nos fluidos minerais, com objetivo de melhorar as suas propriedades lubrificantes [1]. É necessário compreender que mesmo com o melhor produto se o método de aplicação não for eficaz, ou seja, não alcançar efetivamente a região de corte, o produto não terá um bom desempenho e conseqüentemente não cumprirá as vantagens que são atribuídas ao seu uso.

1.1.3 Métodos de Lubri-refrigeração

As autoridades sindicais e ambientais referindo-se a indústria de transformação metal mecânica a partir da década de 1970, firmaram uma legislação mais rígida no controle de produtos utilizados na área de usinagem dos materiais [7]. Esses produtos, os fluidos de corte já não podem ser descartados deliberadamente, devido a busca constante pela redução dos danos ambientais causados. Por isso, surge a necessidade de aumentar a vida útil do fluido de corte de forma a cumprir a legislação vigente de controle ambiental. O principal objetivo é reduzir o descarte prematuro do fluido e controlar os fatores que afetam o seu desempenho [6]. Para isso, a associação do método MQF e a reciclagem ou tratamentos utilizados durante o processo acaba se tornando uma solução viável para obtenção de uma relação mais amigável entre o meio ambiente e a indústria metalúrgica.

Apesar da proposta acima como forma de amenizar o problema, uma parte desse produto ainda é descartada no próprio ambiente de trabalho por emissões e evaporação gerado devido ao contato entre as peças e cavacos. Além disso, durante a realização da limpeza do chão fabril com água o risco de poluição do solo, ar e água são

altos. Devido a esses problemas surge o conceito MQF, seguido do método a seco e a necessidade de um estudo mais detalhado acerca disso [7].

1.2.1 Fluido abundante

Considerando a responsabilidade ambiental que vem sendo constantemente cobrada nas últimas décadas pelas autoridades sindicais e ambientais, esse método de lubrificação é um pouco complicado de se utilizar, já que a intenção é evitar o descarte deliberado do fluido no ambiente assim como preservar a saúde do operador e esse processo como o próprio nome já diz ‘fluido abundante’, utiliza o fluido de corte ostensivamente. Apesar disso, [2] não se pode esquecer os inúmeros benefícios do uso desses auxiliares na usinagem. A lubri-refrigeração permite uma redução do coeficiente de atrito entre o cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, facilitando o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte e consequentemente, a temperatura. Por esse motivo ainda é um dos métodos mais utilizados na indústria metalúrgica.

Em operações com baixas velocidades de corte a lubrificação é essencial já que evita a formação da aresta postiça de corte, nesse tipo de operação é recomendável utilizar um fluido a base de óleo, enquanto em operações com altas velocidades, é mais interessante o uso de um fluido a base de água, o que garante uma melhor refrigeração [11]. Além disso, deve-se considerar também que a resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar, boas propriedades antifricção e antisolantes são algumas das características essenciais para que um fluido seja um bom lubrificante.

Nesse contexto [12] pode-se apresentar com a intenção de esclarecer, um estudo realizado recentemente utilizando o método de fluido abundante, também conhecido como usinagem inundada. Consistia basicamente em analisar o desgaste progressivo e a rugosidade, após o torneamento de um material específico (15-5 PH SS) com uma vazão preestabelecida de 3,75 L/min de fluido de corte. Esse produto utilizado foi preparado com uma mistura de 5% da concentração de óleo mineral em água. A partir disso, concluiu-se que a progressão do desgaste é mais estável no fluido abundante seguido do método da mínima quantidade de fluido, fazendo com que o método a seco se destaque de maneira negativa devido as altas temperaturas atingidas no experimento.

Sabendo disso, analisando de forma geral e relacionando os custos necessários para manter os fluidos pronto para uso e em quantidade considerável, logicamente é mais interessante que nessa indústria específica (metal-mecânica), essa técnica seja substituída por métodos e processos mais viáveis que atendam de forma mais ampla, considerando todos os requisitos com cuidados ambientais necessários.

1.2.2 Mínima Quantidade de Fluido (MQF)

Apesar da exigência na redução da problemática do uso do fluido de corte, assim como a usinagem a seco, o método MQF está entre os temas de maior estudo na área de usinagem, pelo motivo que essa técnica de usinagem ecológica também possui atrativos econômicos no que diz respeito a redução das despesas associadas [7]. Nessa técnica, a função de lubrificação é feita pelo óleo e a refrigeração principalmente pelo ar comprimido, apesar de existir várias outras vantagens, apenas essas duas já conduzem a um avanço nesse setor e consequentemente leva a obtenção de bons resultados. Existem três diferentes e importantes tipos de sistemas de aplicação com mínimo volume de óleo, são eles: baixa pressão, bombas dosadoras e pressão.

Na primeira forma de aplicação os sistemas de pulverização a baixa pressão, em que o refrigerante é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa como uma mistura. Esse processo se distingue por um fluxo volumétrico de refrigerante, podendo variar a quantidade com o tempo. O segundo tipo, utiliza bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma quantidade de lubrificante previamente definida para a superfície ativa, sem ar. Geralmente, utiliza-se esse método quando os processos são descontínuos, ou seja, não existe um sequenciamento de procedimentos. O terceiro e mais comumente utilizado é o de pressão, em que o refrigerante é bombeado para o local através de um componente de suprimento que está separado. Ali ele é misturado com o ar comprimido fornecido separadamente, de maneira que as quantidades de ar e lubrificante podem ser ajustadas independentemente [8].

É interessante salientar que existe uma diferença entre usinagem com quantidade reduzida de fluido e com mínima quantidade de fluido. A utilização desse auxiliar envolve diretamente o sistema como um todo; máquina, ferramenta, peça e processo. Assim, tanto os benefícios quanto os inconvenientes gerados pelo processo são alterados de acordo com a mudança dos parâmetros de usinagem [4].

A furação é um processo que exige um certo cuidado e possui particularidades, por isso pode-se tomar como exemplo esse recurso sendo realizado em um material como o alumínio, de forma a entender que esse esquema não pode ser realizado a seco já que o alumínio possui problemas com aderência e por isso, recomenda-se neste caso o uso da usinagem a mínima quantidade de fluido. Nesse sentido, o método de MQF destaca-se em alguns casos e a usinagem de alguns materiais específicos acaba se tornando mais viável através desse método, considerando os recursos e o acabamento exigido. Assim, devido a casos como esse o método de lubri-refrigeração varia de acordo com o material usinado, as dimensões exigidas da peça e a ferramenta escolhida [4]. Já no caso do aço, o desempenho da furação vai variar de acordo com as propriedades do material, por exemplo, a adição de

alguns elementos de liga desfavorece a aplicação dessa técnica na usinagem. Aços sem elementos de liga e de médio carbono apresentam bons resultados quando usinados tanto a seco quanto a MQF.

Através de análises realizadas em laboratório [14] verificou-se que a quantidade de calor gerada durante a usinagem com mínima quantidade de fluido é menor quando equiparada a usinagem a seco e maior quando relacionada a usinagem por inundação. Os testes foram realizados a operações de torneamento com ligas de alumínio (6061) a 5000rpm, utilizando pastilhas de metal duro, variando o fluido em duas taxas de 50 mL/h para 100 mL/h, com profundidade de corte e taxa de avanço fixadas em 1,0mm e 0,15mm/rev. Considerando que a variação do fluido é específica para o método abordado nesse tópico. Observou-se também que a rugosidade da superfície pode ser melhorada com aplicação de refrigeração, essa melhora é atribuída a redução na transferência de material para a superfície usinada.

Além disso, em outro estudo, através de ensaios experimentais foram encontrados resultados positivos com a utilização dessa técnica visando a viabilidade ambiental no processo através da mínima quantidade de fluido utilizada. Como por exemplo, pode-se citar um ensaio conduzido em um centro de torneamento utilizando o aço AISI 1045 com a ferramenta CNMG 432 com revestimento CVD, velocidade de corte de 225m/min, taxa de alimentação de 0,1mm/rev e profundidade de corte de 1,2mm. Os resultados mostram que não ter aplicação de fluido de corte tende a produzir maiores tensões residuais de tração. A aplicação de MQF para o mesmo processo reduziu consideravelmente a magnitude das tensões residuais [10].

1.2.3 Usinagem a seco

Os custos referentes aos fluidos de corte utilizados durante o processo de usinagem podem ser superiores a 15% dos custos de fabricação, além do perigo direcionado ao operador e a severidade imposta pela legislação a respeito dos descartes ambientais. Tais despesas referem-se à aquisição do produto, ao armazenamento, manutenção e despejo. Assim, considerando esses fatores, uma das soluções estudadas para reduzir estes inconvenientes é a usinagem a seco que pode ser considerada a tecnologia mais limpa e de baixo custo já que os fluidos de corte são eliminados do processo [8].

Para usufruir desse método é necessária uma análise específica para cada situação, já que a não utilização do fluido significa, conseqüentemente, a ausência das suas vantagens [8]. Apesar do estudo particular de cada caso, [2] pode-se otimizar as condições de corte e tornar mais adequado o corte a seco, estabelecendo condições como: o aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte. Apenas esses dois parâmetros podem manter o volume de cavaco removido na unidade de tempo constante e assegurar aproximadamente a mesma quantidade de calor gerado na unidade de tempo.

Em estudos recentes, [13] observaram que a usinagem a seco apresenta o maior número de ocorrências para mecanismos de desgaste em ferramentas. Para comprovar foram realizados ensaios, utilizando uma liga de titânio Ti-6Al-4V como material, o qual, todos os experimentos foram realizados em uma fresadora a altas velocidades de corte; 50 m/min. Deve-se considerar também a variação de parâmetros como; avanço e profundidade de corte, sendo 0,1; 0,3; e 0,5 (mm/rev) e 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 (mm) respectivamente. Assim, após a análise das ferramentas concluiu-se que, como não existe lubrificação fornecida para reduzir as forças de corte, o desgaste nesse caso, acaba sendo maior quando comparados a usinagem por fluido abundante e MQF.

Uma das maiores vantagens desse método é com relação a saúde do ser humano, o contato entre operador e fluido de corte não vai existir, já que o processo não utiliza esse auxiliador. Além de que o cavaco que é gerado já está seco o que facilita a sua venda ou reciclagem, diferente de um cavaco molhado que requer processamento e filtração. A usinagem a seco resolve parte desses problemas, porém, cada técnica possui vantagens e desvantagens. Após estudos acerca dos materiais de ferramentas que podem ser utilizados de forma a não prejudicar a qualidade superficial de uma peça a ser produzida, concluiu-se que: ferramentas de aço rápido são inadequadas já que a partir de 400°C começam a perder dureza e nesse caso, a ferramenta deve apresentar elevada dureza para suportar o aumento intenso da temperatura na área da aresta de corte da ferramenta [8].

A usinagem sem fluido de corte na maioria das vezes não é possível ou não é viável, é muito restrito a situações bem específicas. Por exemplo: materiais cerâmicos para ferramentas apresentam boa dureza mas sua utilização é limitada pela baixa tenacidade, devido a tendência de lascamentos e quebras [8]. No que diz respeito a geometria da ferramenta de corte recomenda-se a utilização de um ângulo de saída menor, ou seja, positivo, no entanto, existem certas situações que devem ser analisadas com cautela. No torneamento do aço endurecido, por exemplo, não recomenda-se geometria positiva, já que fragiliza a aresta de corte tendendo a lascamentos e quebras [8].

Com a ausência do fluido de corte deve-se considerar também que o calor produzido pelos cavacos pode aquecer componentes específicos da máquina-ferramenta causando mudanças no dimensionamento da peça. Por esse motivo, a máquina deve possuir um sistema específico de transporte de cavacos eficiente [9]. Em todo caso, cada método deve possuir o seu planejamento, de forma a tentar prever situações que possam vir a ocorrer considerando que uma falha ou erro pode acarretar em uma grande perda tanto financeira quanto na diminuição do processo produtivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção foram caracterizados todos os materiais e equipamentos utilizados durante o experimento, com o objetivo de detalhar o procedimento. Esse processo foi realizado no Laboratório de Usinagem do Centro de Engenharias da UFERSA campus Mossoró-RN.

2.1 Materiais

Para os ensaios de usinagem, utilizou-se o torno da marca Nardini e modelo NODUS 220, com rotação máxima de 2360rpm e avanço de 0,042mm/rot, disponível no laboratório.

O material utilizado foi o aço carbono ABNT 1045 laminado, no qual, foram obtidos corpos de prova por tarugos redondos, com diâmetro inicial de 36mm, sem acabamento superficial. Em seguida, antes do procedimento, em si, realizou-se um desbaste prévio de 2mm, afim de padronizar a superfície do material removendo a camada de óxido e descartando qualquer problema de desbalanceamento que interfira nos dados que serão coletados. Como critério de padronização a primeira análise de desgaste da aresta de corte foi observada após 14 passes e em seguida estabeleceu-se um padrão de análise a cada 5 passes até que o desgaste atingir um valor de 0,3mm conforme [1,2].

Para monitorar o desgaste e a vida da ferramenta utilizou-se um microscópio óptico com Câmera Digital USB 1000x com resolução máxima de 640 x 480, fabricante Nova Digital. O equipamento foi conectado ao computador pelo software AmScope. Em seguida, foi verificado se a câmera do microscópio estava calibrada com o auxílio de um paquímetro de modo a obter imagens do desgaste dos insertos de corte.

Assim, o processo de usinagem foi dividido em três fases, cada fase com sua respectiva condição de lubrificação: a seco, fluido abundante e MQF. Para cada condição foi destinado 1 aresta de corte do inserto. A medição da rugosidade do corpo de prova só foi realizada quando o desgaste de cada aresta atingiu no mínimo 0,3mm como estabelecido anteriormente, ocasionando, a sua substituição para continuação do processo das condições seguintes.

Utilizou-se para verificar a rugosidade da superfície um rugosímetro portátil com sensor destacável ISRC300 da marca INSIZE, com faixa de mensuração do parâmetro Ra, variando de 0,005 μ m à 32 μ m e uma mesa de desempenho de fabricante Mitutoyo.

A temperatura do sistema foi medida com o auxílio de um termômetro digital infravermelho com mira a laser – 50 a 800°C – MINIPA- MT – 350A. Assim, para a mensuração adequada da temperatura convencionou-se utilizar uma emissividade de $\epsilon=0,77$, Conforme [23].

Os tarugos possuíam em média 150mm de comprimento. No qual, para diminuir a inflexão do tarugo durante a usinagem e as vibrações do sistema foi realizado o desbaste longitudinal até que o tarugo atingisse 25mm de diâmetro. A partir disso, pode-se selecionar a ferramenta utilizada, nesse caso, insertos de metal duro com ângulo reto de 90 graus de marca e referência Iscar TNMG 160404 - TF e um suporte de ferramentas fabricado pela Masterfer, tipo MTJNR 2020 K16. Considerando que o torneamento é um processo contínuo e que a ferramenta necessita ter uma dureza maior do que o material utilizado.

O fluido selecionado foi uma emulsão composta de 95% água e 5% óleo, feita no próprio laboratório, utilizando o óleo lá disponível de marca e referência Lubrax 148145/357173 para as três condições (A seco, MQF e Abundante).

Com base na escolha do material, a ferramenta de corte selecionada, do conhecimento adquirido através da fundamentação teórica e da comparação entre parâmetros utilizados com a literatura base, pode-se estabelecer que serão fixados os seguintes parâmetros: Profundidade de corte de 1mm, avanço de 0,19mm/rot e uma rotação de 1500rpm, de forma que existe a necessidade de buscar valores compatíveis com que a máquina que será utilizada dispõe.

2.2 Métodos

Nesta seção, serão detalhados os métodos para a realização dos ensaios, como por exemplo, a vazão do fluido (emulsão) utilizada durante a usinagem mediante a duas das três condições (Fluido Abundante e MQF). No que diz respeito ao MQF o torno não possui nenhum mecanismo que realize a lubri-refrigeração. Assim, realizou-se alguns testes afim de determinar a vazão mais adequada, ou seja, que se aproximasse da literatura empregada, já que não existe uma faixa de fluxo pré-definida.

Para esses testes, foi utilizado uma proveta para medir a quantidade correta de óleo e água da emulsão (95% água e 5% de óleo), o fluido foi colocado dentro de um recipiente de plástico com borrifador em spray. Nesse sentido, um becker e um cronometro foi utilizado para auxiliar na coleta das amostras. A medida que o fluido ia sendo borrifado dentro do becker tentava-se controlar a velocidade do fluxo com que o fluido estava sendo borrifado para que fosse determinado a média do fluxo do fluido no momento da usinagem. Esse processo foi repetido durante um minuto e repetido 10 vezes para coletar amostras suficientes e calcular a média do fluxo de MQF.

Essa verificação foi amparada pela comparação entre a literatura e os testes de vazão realizados em laboratório. Sendo assim, obteve-se 0,01 l/min, considerando as limitações de um procedimento realizado manualmente.

Na etapa de Fluido Abundante, o próprio torno já possui um mecanismo que realiza a lubri-refrigeração no processo de usinagem, ou seja, a vazão já foi pré-definida considerando a disposição dessa ferramenta. Assim, a vazão considerada é de 38 L/min, operando com o mesmo fluido utilizado no MQF (emulsão). Na usinagem a seco como o próprio nome já sugere, não foi necessária definição de vazão, pois nenhum fluido foi utilizado.

2.2.1 Rugosidade

Para avaliação da rugosidade média (Ra), os tarugos foram inicialmente limpos e preparadados com o auxílio de uma flanela de maneira que não fosse possível observar nenhum resquício de pelos na superfície. Em seguida, utilizou-se um rugosímetro portátil da empresa INSIZE, modelo ISR - C300, no qual, foram dispostos em uma mesa de desempenho. As medições foram realizadas longitudinalmente à peça em quatro pontos equidistantes de 35mm no comprimento do corte e que facilitasse o movimento do apalpador, considerando o parâmetro de amplitude Ra e o comprimento de medição cut-off de 2,5mm.

É importante e interessante salientar que apesar da medição da rugosidade ser um processo aplicável e adequado a maioria dos processos de fabricação também possui algumas desvantagens. Uma delas, é aparentar uma imagem errônea da superfície, ou seja, avalia erros que muitas vezes não representam a superfície como um todo. Porém, ainda sim a rugosidade da superfície usinada é um dos principais parâmetros para determinar a qualidade da superfície usinada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da vida útil da ferramenta tem um impacto notável na produtividade, esse fato acaba suggestionando a questionar quais métodos de lubrificação se tornam mais viáveis, considerando algumas variáveis, como: produtividade, descarte dos fluidos de corte e acabamento. Por isso, nessa seção foi analisado em cada condição os seguintes critérios: temperatura, desgaste da ferramenta e a média da rugosidade (Ra).

3.1 Análise da temperatura

A Tabela 1 a seguir apresenta as temperaturas máximas e mínimas coletadas durante os ensaios de usinagem para as três condições. Além disso, foi calculada a média e o desvio padrão para uma análise mais descritiva e aprofundada.

TABELA 1. Temperaturas máximas, mínimas, média e desvio padrão das três condições (A seco, MQF e abundante) (autoria própria).

Condições	Temperatura	Temperatura	Média (°C)	Desvio Padrão
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		
<i>A seco</i>	69	42,7	51,4	5,13
<i>MQF</i>	56,4	40,7	47,85	3,04
<i>Abundante</i>	56,3	34,9	44,84	8,02

Com relação a análise da temperatura na condição a seco, coletou-se as temperaturas a cada passe até atingir os 24 passes, no qual, se deu o fim de vida da ferramenta. Em seguida calculou-se a média da temperatura durante os ensaios, obtendo-se assim 51,4°C. A temperatura foi examinada como sendo um dos principais fatores que influenciam no desgaste sendo, conseqüentemente, um causador que limita a vida da ferramenta. Considerando a ausência do fluido de corte nesse método, pode-se dizer que nessa fase o processo irá atingir temperaturas mais elevadas quando comparado ao MQF e ao abundante, já que não há nada que proporcione a diminuição da temperatura nas 3 principais zonas geradoras de calor: contato da peça-ferramenta, cavaco-ferramenta e a deformação plástica do cavaco. Nessa etapa, a temperatura máxima atingida ainda durante a usinagem a seco foi de 69°C, tornando-se necessário controlar ao máximo o processo para que a peça final esteja dentro da tolerância geométrica desejada e com o acabamento desejado. Destaca-se que durante as verificações das temperaturas o termômetro foi direcionado no sentido da direção do corte, de maneira a tentar estabelecer a mesma distância para todas as análises, o que pode ter ocasionado uma variação nas obtenções das temperaturas.

Em um estudo comparativo observou-se analisando as três condições de usinagem (a seco, MQF e abundante) que a adesão do material de trabalho a ferramenta durante um processo de torneamento era mais elevada durante o corte a seco (atingindo temperaturas maiores), especialmente quando se é aumentada a velocidade de corte de 250

para 400 m/min. Bem como as forças de corte também foram maiores devido ao efeito de adesão. O material utilizado foi uma liga de alumínio 6061 e os parâmetros de profundidade (0,5 a 1,5mm) e avanço (0,2 a 0,8) variaram [21].

Já a temperatura média e máxima atingida durante a condição MQF foi de 47,85°C e 56,4°C respectivamente. Nesse sentido, pode-se observar que tanto a temperatura máxima atingida quanto a média calculada são menores quando comparadas com a condição a seco. A redução da média e da temperatura máxima foram de 6,91% e de 18,27%, respectivamente.

Através de análises realizadas em laboratório, [12] na usinagem com MQF em uma operação de torneamento a condição é menos severa em contraste com a usinagem a seco devido as partículas do fluido na interface ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, o que conseqüentemente, reduz o atrito e uma menor quantidade de calor é produzido na região de corte. Nesses ensaios foi utilizado uma ferramenta de metal duro com profundidade, velocidade de corte e avanço de respectivamente, 1mm, 24m/min e 0,22 mm/rev.

A viabilidade dessa condição propicia a redução de custos, não somente de aquisição, mas também de armazenamento e movimentação de resíduos. Também é facilitado o atendimento às legislações ambientais e os danos à saúde dos trabalhadores, são reduzidos significativamente além dos operadores passarem a trabalhar em um ambiente mais limpo [20].

Na análise de usinagem com fluido abundante, calculou-se a temperatura médias e coletou-se a temperatura máxima atingida durante os ensaios. Assim, obtém-se 44,84°C e 56,3°C respectivamente.

Estudos corroboram que a presença do lubri-refrigerante promove a redução da força de usinagem e de suas componentes (força de corte e força passiva). Isso pode aumentar a vida útil da ferramenta, o que conseqüentemente, gera uma redução de custos principalmente com relação ao ferramental utilizado. Para esses ensaios de torneamento foram coletadas 24 amostras com as condições dos parâmetros de corte variando $v_c=1$ e 2, $V_c=240$ e 290m/min e $f=0,1$ e 0,2mm/volta [19].

Nesse sentido, análises feitas em laboratório em uma operação de torneamento confirmam que a combinação ideal para minimizar a temperatura de corte é a da condição abundante quando comparada com o método a seco e MQF. Para isso, foi utilizado uma velocidade de corte a 1100rpm, taxa de avanço a 0,2mm/rev, profundidade de corte a 0,5mm e com uma ferramenta revestida por PVD. Apesar disso, a diferença é muita pequena relacionando com a condição MQF [21].

4.2 Análise do Desgaste

A Figura 1 a seguir mostra o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a seco (Figura 1a, b e c).

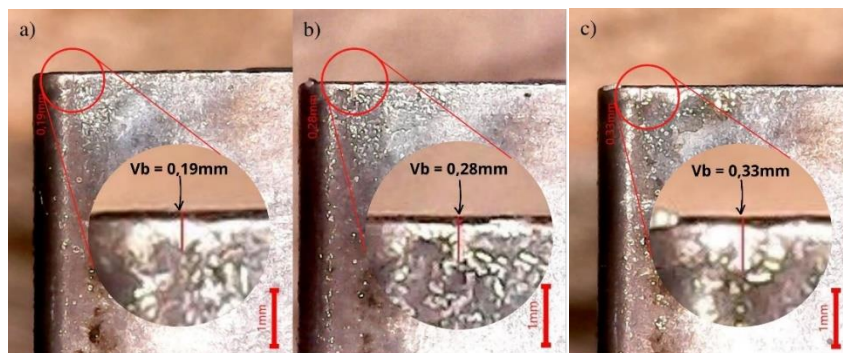


FIGURA 1. Acima pode-se verificar o desgaste progressivo da ferramenta, ou seja, após 14 passes já se podia verificar um desgaste de 0,19mm (a). Em seguida, foi possível encontrar 0,28mm (b) e 0,33mm (c) respectivamente (autoria própria).

Nessa condição o desgaste ultrapassou o limite pré-estabelecido e o fim da vida útil dessa aresta se deu após 24 passes. Assim, tomando como exemplo um processo de usinagem mais longo, em que se deve realizar várias vezes o desbaste longitudinal, pode entender-se que a troca da ferramenta será feita com uma frequência maior, devido o desgaste da ferramenta ocorrer mais rapidamente e o tempo de usinagem por peça resultará em uma produtividade reduzida.

A partir da quantidade total de passes em que se deu o fim de vida da aresta de corte e com o comprimento do tarugo que corresponde a 150mm, obtém-se um L_f de aproximadamente 3600mm.

A Figura 2 a seguir apresenta o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a MQF (Figura 2a, b, c e d).

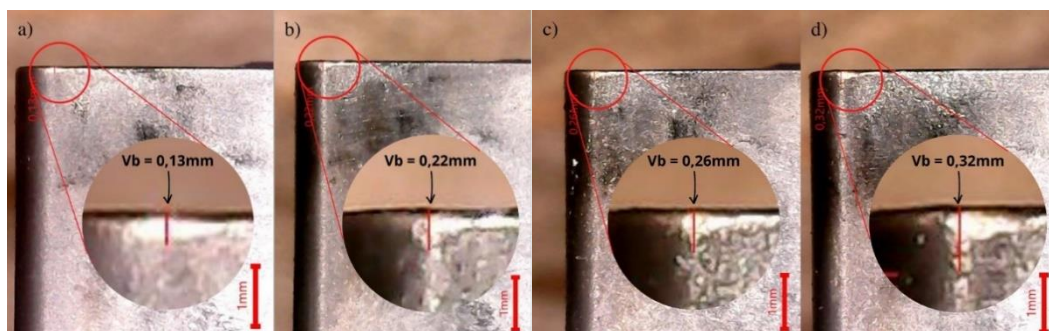


FIGURA 2. Análises do desgaste da ferramenta na condição MQF, após os 14 passes verificou-se um desgaste de 0,13mm (a). Em seguida, foi possível encontrar 0,22mm (b); 0,26mm (c) e 0,32mm (autoria própria).

As preocupações ambientais juntamente com a necessidade de eficiência ecológica são normalmente associadas a redução dos fluidos de corte utilizados durante o processo de usinagem. Assim, o MQF se torna uma parte importante na diminuição dos impactos ambientais [17].

Na Figura 2 a aresta destinada ao MQF, a emulsão foi direcionada no sentido da região de corte, sendo borrifado uma vez a cada 5 segundos durante o tempo que durasse a usinagem. Nesse ponto, pode-se afirmar que é a etapa mais complexa, devido o processo ter sido feito manualmente não se pode afirmar com certeza que durante a usinagem o fluido atingiu a região desejada. Assim como na usinagem a seco o desgaste limite pré-estabelecido foi ultrapassado e o fim de vida da ferramenta foi determinado após o passe de número 59, obtendo-se um Lf de 8850mm. Quando comparado essa etapa com a condição a seco, bem como com a literatura, a durabilidade da ferramenta foi maior, constatando-se que a danificação da ferramenta ocorreu de forma progressiva e estável, já que a principal causa do desgaste rápido é a temperatura elevada gerada na zona de corte devido à ausência de refrigerantes e/ou lubrificantes.

A Figura 3 a seguir apresenta o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem a fluido abundante (Figura 3a, b, c e d).

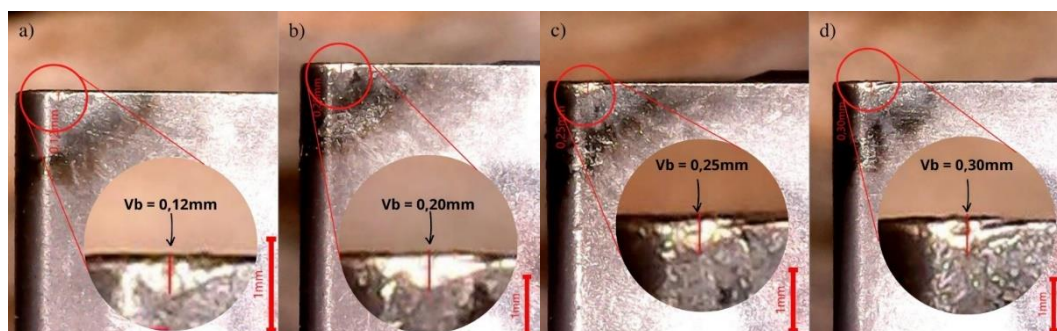


FIGURA 3. Análises do desgaste da ferramenta na condição a fluido abundante : (a) após 14 passes constatou-se um desgaste de 0,12mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,25mm; (d) e em 114 passes, 0,30mm (autoria própria).

Observa-se na Figura 3 que com aplicação de maior quantidade de fluido e, conseqüentemente, a redução do calor na zona de cisalhamento obtém-se um desgaste lento e progressivo como se pode observa nas Figuras 3 a,b,c e d. Diferente das outras condições nessa etapa o desgaste não ultrapassou o limite. Como pressuposto inicialmente, nesse método a vida útil da ferramenta seria prolongada devido a lubri-refrigeração, no qual, foram necessários 114 passes para que a ferramenta atingisse o limite de 0,3mm pré-estabelecido na literatura. Nessa circunstância a condição fluido abundante apresenta um valor de Lf superior, ou seja, 17100mm.

O Figura 4 a seguir apresenta o desgaste em milímetros ao longo do tempo mediante as três condições estudadas.

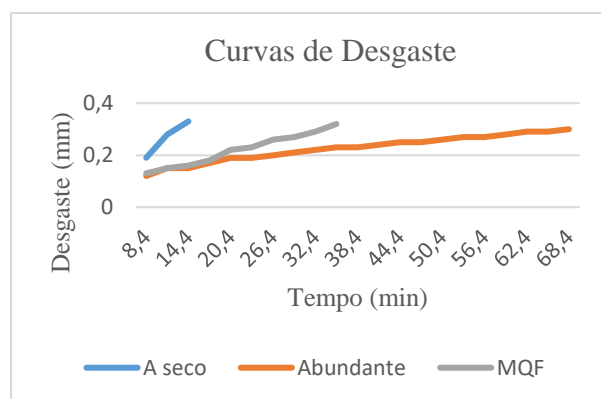


FIGURA 4. Desgaste ao longo do tempo das três condições (autoria própria)

Na Figura 4 observa-se que apesar das três condições serem executadas com os mesmos parâmetros de usinagem a condição a que o processo está submetido tem uma influência significativa na vida útil da ferramenta. A aresta que foi destinada a condição de fluido abundante esteve em operação por mais tempo com um desgaste mais estável e destaca-se das outras duas condições. Porém, a quantidade de fluido utilizado foi maior e a condição MQF acaba se tornando promissora em relação a redução dos fluidos de corte utilizados durante o processo.

4.3 Análise da Rugosidade

A Tabela 2 a seguir apresenta 4 amostras da rugosidade (R_a) coletadas para cada condição (A seco, MQF e Abundante).

TABELA 2. Média das rugosidades coletadas para as três condições (autoria própria).

Amostras	Condição 1 A seco (μm)	Condição 2 MQF (μm)	Condição 3 Abundante (μm)
1	13,233	12,465	9,231
2	11,231	9,649	8,608
3	9,641	7,987	8,130
4	8,551	7,742	7,354
Média (R_a)	10,664	9,460	8,330

Na Tabela 1 é possível notar que apesar das três condições estarem submetidas aos mesmos parâmetros de usinagem (rotação, avanço e profundidade de corte) a condição 3 apresentou a menor média de rugosidade ($8,33\mu m$), ou seja, possui um melhor acabamento. Isso ocorre principalmente devido a presença da emulsão em abundância utilizada no processo o que, conseqüentemente, acarreta na diminuição da temperatura na área de cisalhamento da peça com a ferramenta. É importante considerar que o aumento do desgaste progressivo da ferramenta impacta negativamente no acabamento da peça [22].

Já na condição 1, considerada a mais severa devido a ausência de fluido, observa-se a maior média de rugosidade ($10,66\mu m$), ou seja, comparado com as duas outras condições é a que possui o pior acabamento. Nesse sentido, as altas temperaturas atingidas durante a usinagem desse método é um dos principais fatores que ocasionam esse tipo de resultado. Além disso, a medida que o desgaste da ferramenta evolui a rugosidade apresenta uma tendência maior a aumentar [22].

Em relação a condição 2, observa-se que ela apresenta o valor da média calculada bem próximo a da condição 3 ($9,46\mu m$) o que se torna um ponto positivo, já que nessa condição especificamente se é utilizada uma quantidade mínima de fluido de corte e se obteve um acabamento razoável. É importante salientar que fatores da máquina, como por exemplo, problemas de vibração influenciam tanto no desgaste quanto no acabamento da peça.

4. CONCLUSÃO

Considerando as informações apresentadas é possível afirmar que o uso do MQF é viável em um processo de torneamento para o aço ABNT 1045. O sistema MQF apresenta valores de rugosidade promissores quando comparados aos valores obtidos com fluido abundante utilizando uma quantidade mínima de fluido, o que possibilita um processo de corte estável, além de proporcionar vantagens econômicas e uma redução significativa nos impactos ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, força de vontade e dedicação que me possibilitou chegar até aqui. Ao meu orientador, Dr. Ramses Otto Cunha Lima, pela paciência, conhecimento compartilhado e orientação. A minha família e namorado pelo apoio, paciência e compreensão, eu amo vocês.

REFERÊNCIAS

- [1] MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2012. 397 p.
- [2] DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.
- [3] GARCIA, Ubirajara. Estudo da aplicação de mínima quantidade de fluido no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V. 2015. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Guaratinguetá, 2015.
- [4] CASTRO, Pablo Ricardo Amarante de. Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com Mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal. 2001. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [5] MARIA, Débora Aline Soares et al. Fluidos de Corte: Novas formulações e recuperabilidade: grupo de pesquisa em separações por adsorção. 2007. 10 f. Artigo - Curso de Engenharia Mecânica, Campus do Pici - UFC, São Paulo, 2007.
- [6] MUNIZ, Cláudia Alves de Sousa. Novas formulações dos fluidos de corte: otimização, propriedades e recuperação do óleo usado: programa de pós-graduação em química. 2008. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [7] ZEILMANN, Rodrigo Panosso. Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínima quantidade de fluido de corte: pós graduação em engenharia mecânica. 2003. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [8] TEIXEIRA FILHO, Fernando. A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH: usinagem. 2006. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [9] MIRANDA, Gilberto Walter Arenas. Uma contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN: comissão de pós graduação em engenharia mecânica. 2003. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, De Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [10] RAKURTY, CS. et al. Efeitos da aplicação alvo de fluido de quantidade mínima (MQF) em integridade da superfície. 2013. Artigo (ScienceDirect, publicado por: Elsevier) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Utah, Salt lake city, 2013.
- [11] TOMAZ, Ítalo do Valle. Estudo das Tensões Residuais e forças de usinagem no fresamento de topo de aço maraging 300: pós graduação em engenharia mecânica. 2019. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
- [12] Análise comparativa de seca, inundação, MQL e cocriogênico 2 técnicas durante a usinagem da liga SS 15-5-PH: Tribology International - Volume 146, 106196. Índia, jun. 2020.
- [13] KHATRI, Ashutosh; JAHAN, Muhammd P. Investigating tool wear mechanisms in machining of TI-6AL-4V in flood coolant, dry and MQL conditions: Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Miami University, Oxford, OH 45056, USA. Texas - Usa, abr. 2018.
- [14] SREEJITH, Ps. Usinagem de liga de alumínio 6061 com MQL, condições de lubrificante seco e inundado: sciencedirect. 2007. 3 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Ciência e Tecnologia de Cochin, Kerala, Índia, 2007.
- [15] KHAN, M. M A., MITHU, M A. H., DHAR, N., 2009, "Effects of Minimum Quanty Lubrication on Turning AISI 9310 Alloy Steel Using Vegetable Oil-Based Cutting Fluid", Journal Materials Processing Tecnology, v. 209, pp. 5573-5583;
- [16] MICARONI, Ricardo. Influência do Fluido de Corte sob Pressão no Torneamento do aço ABNT 1045: materiais e processos de fabricação. 2006. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Engenharias, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- [17] ESPINDOLA, Elias Samuel Cristo. Aplicação de Técnicas de Usinagem Ambientalmente Amigáveis no Processo de Torneamento Radial do Aço SAE 1045. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [18] AMORIM, Heraldo José de. Estudo da relação entre velocidades de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro: pós-graduação em engenharia mecânica.

2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [19] SOUZA, André João de. RODRIGUÊS. et al. Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper. CONEN, Fortaleza – CE, p(1-10) 2016.
- [20] ZEILMANN, Rodrigo P. et al. Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem. 2º Congresso internacional de tecnologias para o meio ambiente, Bento Gonçalves – RS. p(1-8), 04,2010.
- [21] VISHNU, A. Venkata. et al. Comparação entre condições secas, inundadas e MQL na usinagem de ligas de aço EN 353 - uma investigação experimental. Elsevier: Sciencesirect. Índia, Departamento de Engenharia Mecânica. p(1-9), 2018.
- [22] CANDIDO, Luiz Otavio. Análise do desgaste da Pastilha de Metal duro WNMG080408-UG na usinagem do aço 1045: usinagem. 2020. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2020.
- [23] PIOTR, Kieruj. et al. Determinação do coeficiente de emissividade de super ligas resistentes ao calor e metal duro. Arquivos de tecnologia mecânica e materiais. Departamento de Engenharia Mecânica. p(1-5), 2016.



Artigo

Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045

João Batista dos Santos ^[1] e Ramses Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido; joabatista1907@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 03/12/2021;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: A indústria metal-mecânica é considerada a mais poluidora quando comparada às outras indústrias devido os rejeitos gerados durante o processo produtivo. A usinagem, de modo geral, é considerada a operação manufaturada mais amplamente utilizada, nesta indústria. A variedade de materiais e produtos envolvidos nesse processo, causa preocupação quanto ao seu descarte e a saúde do operador. Os fluidos de corte, por exemplo, desempenham um papel muito importante nesse processo, pois, estão diretamente relacionados à tribologia do sistema. Portanto, esse estudo teve como objetivo analisar a influência da utilização do óleo de coco e do óleo de soja, como fluido de corte, no processo de torneamento longitudinal externo de um tarugo de aço SAE 1045, tendo como parâmetro de referência a emulsão. Foram coletados dados da temperatura de corte, corrente consumida pela máquina, o desgaste médio de flanco das ferramentas e a rugosidade da peça. Os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes para ambos os fluidos: $ap = 1$ mm, $f = 0,19$ mm/rot, $Vc = 170$ m/min. Os dados obtidos por essa pesquisa demonstram que os fluidos vegetais podem ser usados com êxito no processo de torneamento. O óleo de coco apresentou o melhor desempenho dentre os fluidos avaliados.

Palavras-chave: desgaste de flanco; rugosidade; análises físico-químicas; óleo vegetal; análises físico-químicas.

Abstract: The metal-mechanical industry is considered the most polluting when compared to other industries due to the waste generated during the production process. Machining, in general, is considered the most widely used manufacturing operation in this industry. The variety of materials and products involved in this process causes concern regarding their disposal and the health of the operator. Cutting fluids, for example, play a very important role in this process, as they are directly related to the system's tribology. Therefore, this study aimed to analyze the influence of the use of coconut oil and soybean oil, as cutting fluid, in the external longitudinal turning process of a SAE 1045 steel billet, using the emulsion as a reference parameter. Data were collected on cutting temperature, current consumed by the machine, average tool flank wear and workpiece roughness. Machining parameters were kept constant for both fluids: $ap = 1$ mm, $f = 0.19$ mm/rev, $Vc = 170$ m/min. The data obtained by this research demonstrate that vegetable fluids can be used successfully in the turning process. Coconut oil showed the best performance among the evaluated fluids.

Key-words: flank wear; roughness; physicochemical analysis; vegetable oil; turning.

1. INTRODUÇÃO

A procura por alternativas renováveis, tornou-se uma prioridade, com o objetivo de amenizar as agressões ambientais, visto que, está cada vez mais difícil conciliar e/ou gerenciar a competitividade, produtividade, flexibilidade e qualidade com as pressões dos públicos de interesse, principalmente na indústria metal-mecânica que geram resíduos que agridem o meio ambiente, quando gerenciadas de forma inadequada. A variável ambiental tem grande importância para a situação do cotidiano, principalmente porque os aspectos ecológicos foram bastante ignorados nos processos de manufatura [1]. Dentre muitos processos, pode-se destacar a usinagem, pois, de modo geral, esse é considerado o processo de fabricação mais utilizado.

Nos processos de usinagem, às solicitações impostas à ferramenta e à peça, devido aos movimentos relativos inerentes às suas operações, o contato direto produz uma grande quantidade de energia em forma de

calor, alterando as dimensões da peça e contribuindo para o desgaste da ferramenta, reduzindo, portanto, sua vida útil. Na tentativa de eliminar ou reduzir essa quantidade de calor do processo, aumentar a vida útil da ferramenta, aumentar a produtividade e reduzir custos de produção, utiliza-se fluidos de corte [2].

Sendo assim, os fluidos de corte têm como principal objetivo lubrificar e/ou refrigerar um processo de usinagem. Logo, irão atuar diretamente nas grandezas mensuráveis, melhorando conseqüentemente o acabamento, diminuindo a força de corte e a potência exigida da máquina. Para garantir um bom desempenho, é necessário a escolha correta do fluido, levando em consideração o material da peça e da ferramenta e o tipo de operação.

Em sua obra, [2] elenca que o fluido de corte com propriedades lubrificantes contribui para reduzir o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco, e sua eficiência vai depender da habilidade de penetração na interface ferramenta/cavaco em um curto período de tempo disponível, bem como de formar um filme com uma resistência ao cisalhamento menor do que a resistência do material da peça. Em contrapartida, o fluido com propriedades refrigerantes favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo a temperatura da ferramenta e da peça, mesmo que a temperatura da interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada.

1.1. Tipos de fluidos de corte

A classificação dos fluidos de corte é de extrema importância para a indústria metal-mecânica, visto que, cada fluido possui características específicas as quais ajudam na escolha para determinada aplicação, garantindo a integridade dos componentes e alcançando, portanto, melhores resultados, tanto operacional quanto econômico. Não existe um fluido de corte com características universais, ou seja, capaz de atender todas as exigências do processo de usinagem, portanto, cabe ao usuário avaliar e decidir quais características do fluido lhe proporcionará melhor custo/benefício baseada nas exigências do projeto. Segundo [3], os fluidos de corte são definidos a partir de diferentes fluidos básicos, podendo ser divididos em três tipos, os oleosos, aquosos e gasosos.

1.1.1. Fluidos emulsionáveis

A emulsão é caracterizada por apresentar uma mistura de dois fluidos imiscíveis: um com estrutura polar (água) e outro com estrutura apolar (óleo) [2]. Esse fluido é bastante utilizado no processo de usinagem quando se utiliza altas velocidades de corte, pois, tem como principal vantagem a elevada capacidade de refrigeração na zona de corte, aliada aos fatores de lubrificação e de retirada de cavaco [4, 5]. Em seu estudo [6], afirma que fluidos emulsionáveis não são soluções de óleo em água, mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior, visto que o óleo e água não se misturam. Portanto é errôneo segundo o autor, chamar esse tipo de fluido como óleo solúvel.

Em estudos recentes [7], observaram que fluidos emulsionáveis a base de óleo de soja epoxidado possuem um maior poder lubrificante, gerando uma redução na potência de corte e menores variações nos desvios dimensionais, no processo de torneamento do aço ABNT 1045, quando comparada ao fluido biodiesel (obtido através do processo de transesterificação do óleo de girassol), à uma solução emulsionável com óleo comercial e à usinagem a seco. A velocidade de corte do processo foi determinada com base no diâmetro do tarugo a uma rotação de 1600 rpm. Utilizaram o metal duro como ferramenta de corte, profundidades de corte de 0,5 mm e 1 mm e avanço de 0,187 mm/rev.

Em seu estudo [8], argumenta que as emulsões possuem maior dificuldade de remover calor na interface ferramenta-peça quando comparadas aos óleos integrais minerais e sintéticos. Para o autor, fluidos emulsionáveis são líquidos misturados à água que possuem baixo ponto de ebulição e quando entram em contato com a superfície quente da peça, a troca de calor e a evaporação do líquido é imediata, promovendo o abaixamento da temperatura da peça, porém não há troca de calor na interface ferramenta/cavaco.

1.1.2. Óleos vegetais

Os óleos vegetais são obtidos de sementes oleaginosas que contêm frutos ou nozes, que possam ser extraídas por métodos que envolve pressão, extração, solvente ou a combinação desses. Esses óleos passam por uma série de tratamentos tanto físico quanto químico para seu refino.

Esses fluidos estão sendo um potencial substituto dos óleos minerais por serem ambientalmente amigáveis, renováveis, menos tóxicos, facilmente biodegradáveis e por fatores econômicos [9]. Além disso, esses óleos possuem excelente lubrificidade, baixa volatilidade e boas características de viscosidade e temperatura; são mais compatíveis com a pele humana, reduz a formação de vapor, fumaça e diminui o risco de incêndio nas máquinas, devido ao seu alto ponto de fulgor; suportam uma maior tensão superficial, devido o arranjo molecular que alinham a superfície do metal, facilitando, portanto, a usinagem e melhorando a vida da ferramenta [10]. Esse tipo de óleo é de interesse particular no Brasil, visto que há uma grande diversidade de óleos vegetais em terras brasileiras, tornando o país um dos maiores produtores desse tipo de óleo, principalmente o de soja [9].

O óleo de soja é obtido pelo grão da soja (*Glycine max*) que é um produto agrícola, originário da china, de grande interesse mundial devido ser empregado na alimentação humana e animal e ao seu valor econômico nos mercados nacional e internacional. As propriedades dos fluidos são de suma importância para determinar a qualidade do mesmo e conseqüentemente a susceptibilidade à oxidação quando exposto ao ar, bem como a sua capacidade lubrificante/refrigerante [10]. O teor de ácidos graxos insaturados e ácidos linolênico são elevadas neste tipo de óleo, tornando-o susceptível às reações de oxidação [11]. A composição e o teor de ácidos graxos presentes no óleo de soja podem ser afetados pelos vários fatores geográficos e do meio ambiente, principalmente pelas condições climáticas e do solo [11,12].

Desde o século passado, estudos na área da usinagem se intensificaram na busca de métodos eficientes e eficazes para os processos, no que diz respeito a qualidade e segurança. Portanto, o uso de produtos oriundos de fontes renováveis e/ou naturais nos processos de usinagem tornou-se uma medida, até então, satisfatória e ecologicamente correta, segundo alguns autores.

Em seu estudo, [13] fez um comparativo entre o óleo dendê e óleo de soja. A autora descobriu, por meio de análises químicas, que o óleo de soja apresenta uma maior tendência à oxidação, devido aos seus altos índice de iodo e índice de acidez. Além disso, por meio da análise de viscosidade à 40°C ([14] *apud* [13]) foi observado que o óleo de soja apresenta uma viscosidade inferior.

Resultados contrários foram encontrados por [15]. Os autores compararam a influência do óleo a base de amendoim e a base de algodão no processo de usinagem de ligas a base de cobre utilizando ferramenta de aço rápido (*High Speed Steel* - HSS). A pesquisa objetivou examinar as conseqüências desses fluidos na intensidade da força de corte e no acabamento superficial. Os parâmetros usados foram rotação de 835 rpm, velocidade de corte de 80,89 m/min, avanço de 0,0916 mm/rot e profundidade de corte de 1,5 mm. Os pesquisadores concluíram que o óleo a base de amendoim apresentou melhores resultados nos parâmetros avaliados, além disso, propiciou um aumento na retirada de material.

Embora seja vasta a quantidade de óleos vegetais estudados como possibilidade de ser um fluido de corte no processo de usinagem, existem ainda óleos que são poucos difundidos pelos pesquisadores. Pesquisas envolvendo o óleo de coco neste contexto, por exemplo, necessitam de uma especial atenção. O óleo de coco é obtido pelo coco propriamente dito, pertencente à família *Cocos Nucifera L.*, que é uma árvore cultivada por proporcionar múltiplas utilidades, principalmente por seus valores medicinais e nutricionais [16].

Em sua obra [17] estudaram a influência de diferentes fluidos de corte, especialmente de origem vegetal, no processo de torneamento do aço ABNT 1045. O trabalho objetivou avaliar a corrente elétrica consumida no eixo da árvore e a temperatura do sistema em função da velocidade de corte. Os parâmetros de usinagem foram: avanço de 0,4 mm/rev e profundidade de 0,5 mm. O material da ferramenta foi metal duro. Os autores concluíram que o fluido a base de óleo babaçu apresentou melhores resultados nos parâmetros avaliados, quando comparado ao fluido de corte emulsionável.

Em seus estudos, [18] fizeram uma investigação experimental de lubrificação por quantidade mínima de fluido a base de óleo de coco. Os autores utilizaram o aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço suave como corpo de prova e o metal duro T9325 como ferramenta de corte no processo de torneamento. Segundo os autores, o óleo de coco usado nas condições supracitadas apresentou uma melhor absorção de calor durante o processo de usinagem e dentre os métodos utilizados obteve um menor desgaste de flanco da ferramenta.

Estudo semelhante foi realizado por [19], porém, com resultados contrários. Os autores investigaram o desgaste da pastilha de metal duro e a rugosidade dos corpos de prova feitos do aço AISI 4340 endurecido, no processo de torneamento utilizando a técnica de aplicação de fluido de corte por mínima quantidade de lubrificante (*Minimum Quantity of Fluid* - MQL) com diferentes fluidos de cortes a base vegetal (canola, coco e soja) comparando com o óleo sintético e a usinagem a seco. O óleo de canola de modo geral obteve os melhores resultados nos parâmetros avaliados. Foi observado ainda, que em altas velocidades o uso de óleo sintético com MQL mostra uma vida útil mais longa da ferramenta [20].

Diante de tudo o que já foi exposto, este trabalho de pesquisa discutirá a viabilidade do uso de fluidos sustentáveis como fluido de corte alternativo para diminuir o impacto direto com o meio ambiente e melhoria no processo tribológico. Este estudo consiste na avaliação de 2 óleos vegetais, soja e coco, extraídos de sementes oleaginosas, no processo de torneamento longitudinal externo de um tarugo de aço SAE 1045. Ambos os fluidos passaram por análises laboratoriais para identificar as características anteriormente expostas, as quais serão capazes de rotulá-los como um potencial fluido de corte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta a descrição de todos os equipamentos, insumos e materiais utilizados, bem como os procedimentos e planejamentos utilizados durante a experimentação. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Usinagem do Centro de Engenharias da UFERSA campus Mossoró/RN.

2.1. Materiais utilizados

O material utilizado para o procedimento experimental foi o aço carbono ABNT 1045 sem tratamento térmico e sem acabamento superficial.

A ferramenta de corte usada na operação de desbaste foi um inserto fabricado em metal duro da marca Iscar e referência Tnmg 160404 TF IC907.

O suporte da ferramenta foi fabricado pela *Masterfer*, tipo MTJNR 2020 K16.

Para os ensaios de usinagem, foi utilizado o torno da marca *Nardini* e modelo NODUS 220, com rotação máxima de 2360rpm e avanço de 0,042mm/rot, disponível no laboratório de usinagem na UFERSA. A vazão da bomba do torno para jorrar o fluido foi de 38 L/min.

Foram utilizados aproximadamente 10 litros de óleo de soja, da marca Soya, comprados em supermercados em vasilhames de 900ml; 10 litros de óleo de coco extravirgem prensado a frio, da marca Fillovita, comprados no site da fabricante e 15 litros de emulsão, feita no próprio laboratório, conforme orientação do fabricante (5% de óleo e 95% de água). O óleo utilizado para a emulsão foi o *Lubrax* 148145/357173.

Utilizou-se um multímetro digital do tipo alicate da marca *Kita* e modelo AOV 1000.

Para auxiliar na mensuração do desgaste médio de flanco, utilizou-se um microscópio óptico com câmera Digital USB, 1000X com resolução máxima de 640 x 480, fabricante NovaDigital.

A densidade dos fluidos estudados foi obtida por um densímetro: *Automatic density meter* DDM 2911 plus da empresa *Rudolph Research Analytical*.

Para medir a rugosidade da superfície, foi utilizado um rugosímetro portátil com sensor destacável ISR-C300 da marca INSIZE, com faixa de mensuração do parâmetro Ra, variando de 0,005µm à 32 µm; e uma mesa de desempenho, com número de série 0139911 da fabricante *Mitutoyo*.

A temperatura do sistema foi obtida por um termômetro digital infravermelho da marca Minipa e modelo MT-350A com mira a laser -50 a 800°C.

2.2. Métodos

Os corpos de prova foram obtidos a partir de tarugos redondos laminados com diâmetro inicial de 1 1/2 e comprimento de 200mm, sendo que 50mm foi utilizado para fixação na placa autocentrante com 3 castanhas.

Antes da usinagem de cada peça foi realizado um desbaste prévio de 2 mm, a fim de padronizar a superfície do material, retirar a camada de óxido e eliminar possíveis desbalanceamentos que poderiam interferir nas medições da potência de corte. Após retirada da camada de óxido o diâmetro trabalhado foi 36mm.

Com o objetivo de diminuir a inflexão do tarugo durante o processo de usinagem bem como as vibrações no sistema, eles foram usinados até que seu diâmetro atingisse um valor de 25 mm.

Estabelecendo uma comparação entre as recomendações do fabricante e a literatura [7, 8], foi decidido os seguintes parâmetros de usinagem: profundidade de corte $a_p = 1$ mm, avanço $f = 0,19$ mm/rot, rotação $r = 1500$ rpm o que leva a se trabalhar inicialmente com uma velocidade de corte de $V_c = 170$ m/min, porém, sabe-se que a velocidade de corte tende a mudar ao longo do processo devido a alteração no diâmetro da peça, e por se tratar de um processo de torneamento em torno convencional existe uma limitação por parte da máquina para manter esse parâmetro constante; utilizou-se um percurso de avanço inicial de $L_f = 150$ mm.

Para cada tipo de fluido destinou-se 1 aresta de corte do inserto. Sempre que o desgaste de uma aresta chegasse a um valor igual a 0,3 mm, era feita a sua substituição e realizada a medição da rugosidade do corpo de prova, conforme recomendações da ISO 3685 de 1993.

A primeira análise de cada aresta de corte foi realizada após 14 passes, em seguida, estabeleceu-se um padrão de análise a cada 5 passes até que o desgaste médio de flanco (V_b) chegasse a um valor de 0,3 mm conforme [2, 6, 8].

O Microscópio óptico foi conectado ao computador pelo *software AmScope*, de modo a obter imagens reais do desgaste dos insertos de corte. Nas análises realizadas foi aplicado um aumento de 100 vezes.

A temperatura do sistema foi obtida por um termômetro infravermelho usando uma emissividade de 0,77, a mesma foi usada por [21, 22]. A mira do laser estava apontada a uma distância de aproximadamente 12 cm do plano de cisalhamento, ou seja, da interface ferramenta-peça.

A corrente da máquina foi monitorada por um multímetro do tipo alicate, conectado à um dos fios de alimentação da máquina. A tensão obtida foi de 223 V.

2.2.1. Potência de usinagem

A potência de usinagem pode ser medida, experimentalmente, por meio da tensão e da corrente elétrica consumida. É um parâmetro de corte que nos auxilia a estabelecer o quanto podemos exigir de uma máquina-ferramenta para um máximo rendimento, sem prejuízo dos componentes dessa máquina, obtendo-se assim uma eficiente usinabilidade. Conforme [2] a potência instantânea pode ser calculada pela Equação 1:

$$P_i = V(t) \times I(t) \quad (1)$$

Onde, P_i = Potência instantânea; $V(t)$ = tensão medida no tempo e $I(t)$ = corrente medida no tempo

2.2.2. Análises Físico-químicas

A caracterização das amostras dos óleos foi realizada em termos das seguintes análises físico-químicas: densidade, índice de acidez e índice de saponificação. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Petróleo do Centro de Engenharias da UFERSA, campus Mossoró/RN.

2.2.2.1. Índice de acidez

O índice de acidez é definido como o número de mg de hidróxido de potássio (KOH) necessário para neutralizar um grama da amostra [23]. Para análise de índice de acidez, pesou-se aproximadamente 2 g da amostra em um Erlenmeyer e adicionou-se 25ml de solução de éter-álcool (2:1) previamente neutralizada com uma solução de hidróxido de sódio 0,1M. Em seguida, adicionou-se duas gotas do indicador fenolftaleína e titulou-se com solução de hidróxido de sódio 0,1M até o aparecimento da coloração rósea que deve persistir por 30 segundos. Este procedimento foi determinado segundo [23], que é compatível com a [24]. A Equação 2 é indicada por [23] para obter o valor do índice de acidez.

$$\text{índice de acidez} = \frac{V \cdot f \cdot 100}{P \cdot c} \quad (2)$$

na qual, V é o volume de KOH, em ml, gasto na titulação; f é o fator de solução; P é o peso da amostra e c é a correção para solução, [21] recomenda utilizar 10 para solução de hidróxido de sódio 0,1M.

2.2.2.2. Índice de Saponificação

Para obter o índice de saponificação (Equação 3) pesou-se aproximadamente 2,0g de amostra em um balão de destilação, adicionou 50ml da solução alcoólica de KOH 0,5N. O balão foi colocado em um sistema de refluxo por uma hora para completa saponificação da amostra. Uma amostra de referência (branco) foi preparada nas mesmas condições descritas acima. Após o resfriamento do frasco, lavou-se a parte interna do condensador com um pouco de água. Desconectou-o do condensador e adicionou 1,0ml do indicador (fenolftaleína 1%) e titulou-se com a solução de ácido clorídrico (HCL) 0,5M até o desaparecimento da cor rósea. Este procedimento é baseado na metodologia de [23].

$$\text{índice de saponificação} = \frac{(V1 - V2) \cdot f \cdot 28,06}{P} \quad (3)$$

Onde, $V1$ é o volume em ml do ácido utilizado na titulação da prova em branco; $V2$ é o volume em ml do ácido utilizado para titular o excesso de KOH; f é o fator do HCL e P é o peso da amostra.

2.2.2.3. Densidade

A determinação da densidade foi realizada utilizando um densímetro, que foi primeiramente limpo injetando água nos canais de entrada do equipamento. Fez-se o ajuste da temperatura para a análise (25,0°C) e realizou-se a calibração o equipamento obtendo a densidade da água com esse parâmetro de entrada. Em seguida a amostra foi adicionada cuidadosamente com uma seringa, para prevenir a formação de bolhas de ar. Após, aproximadamente, 2 minutos o resultado da análise foi apresentado no visor do equipamento.

2.2.2.4. Rugosidade

Para a medição de rugosidade, os tarugos foram previamente limpos com uma flanela, sempre observando para que não ficasse fios de algodão na superfície. Em seguida, foram preparados em uma mesa de despenho para facilitar o deslocamento do apalpador. A rugosidade foi definida pelo parâmetro de amplitude R_a de acordo com a norma DIN 4776 (1990) [9], e o comprimento de medição *cut-off* utilizado foi de 2,5mm. As medições foram feitas com um rugosímetro portátil da empresa INSIZE, modelo ISR – C300. A rugosidade foi medida em quatro posições longitudinais e equidistantes à 35mm. Posteriormente foram calculados a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos.

3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados de todos os ensaios realizados, inicialmente com as análises físico-químicas dos fluidos e a capacidade lubrificantes dos fluidos estudados e em seguida com os ensaios de usinagem (corrente consumida, temperatura do processo, vida útil da ferramenta e acabamento superficial).

3.1. Análises físico-químicas dos fluidos

A caracterização de análises físico-químicas visa selecionar dentre os fluidos vegetais estudados aquele que apresenta propriedades semelhante às da emulsão. Essa semelhança favorece sua utilização como fluido de corte no processo de torneamento. A Tabela 1 mostra os resultados da pesquisa das análises físico-química dos óleos estudados.

TABELA 1. Análises físico-química dos óleos estudados (autoria própria).

<i>Tipo de fluido</i>	<i>Índice de saponificação (mg.KOH.g⁻¹)</i>	<i>Índice de acidez (mg.KOH.g⁻¹)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
Óleo de coco	245,68 ± 2,55	1,114 ± 0,126	0,918985 ± 0,000025
Óleo de soja	191,81 ± 4,52	0,370 ± 0,124	0,916603 ± 0,000013
Emulsão	61,25 ± 26,10	1,084 ± 0,107	0,994305 ± 0,000010

Observa-se na Tabela 1 que o maior índice de saponificação é para o óleo de coco, estando para tanto, (considerando o desvio padrão) dentro da faixa recomendada (248-265 [(mg.KOH.g)⁻¹]) pela [25] que estabelece faixas de parâmetros de qualidade para gorduras e óleos utilizados para fins alimentícios. Segundo [9, 26], um alto índice de saponificação indica uma maior probabilidade de oxidação e uma maior propensão a formar borra. O óleo de soja também está dentro da faixa recomendada (189-195 [(mg.KOH.g)⁻¹]) pelo órgão regulamentador. E o óleo mineral (usado para fazer a emulsão) teve seu índice de saponificação ligeiramente reduzido, acredita-se que a presença de água em sua composição tenha contribuído para essa redução, pois, devido a mistura não ser completamente homogênea a probabilidade das amostras não serem iguais é muito alta e por isso obteve-se um alto valor para o desvio padrão dessa análise. O autor [9] encontrou um índice de 190 [(mg.KOH.g)⁻¹] para o óleo mineral.

Em relação ao índice de acidez, pode-se observar que o óleo de soja é aproximadamente 3 vezes menos ácido do que os outros óleos estudados. Já o óleo de coco, segundo as análises, é o mais ácido. Porém, ambos estão dentro do limite máximo recomendado pela [25], a qual fixa que o índice de acidez máximo para o óleo de soja é 0,6 mg KOH/g e 4 mg KOH/g para o óleo de coco. Altos índices de acidez indica maior probabilidade de corrosão da peça, pois, o fluido tende a se deteriorar e oxidar com maior velocidade, perdendo suas propriedades iniciais.

A densidade de ambos os fluidos também está dentro da faixa recomendada pela [25] sendo 0,908-0,921 g/cm³ para o óleo de coco e 0,916-0,922 g/cm³ para o óleo de soja. Em sua obra [9] afirma que esse parâmetro é um bom indicativo para monitoramento de fluido de corte, pois, quanto maior for seu peso molecular mais alto será o seu grau de insaturação.

Os resultados dessas análises são muito próximos daqueles encontrados por [9, 13, 16, 27], as diferenças obtidas são variações que podem ser provenientes da própria região de cultivo do grão, com diferenças de solo, umidade e insolação da região de plantio [13].

3.2. Análise da temperatura e corrente do sistema

Na Figura 1, estão representadas as curvas da temperatura ao longo do tempo durante a usinagem utilizando diferentes fluidos de corte. Os valores apresentados referem-se às análises de desgaste das arestas de corte de acordo com o critério pré estabelecido na metodologia, iniciando após 14 passes. Na Tabela 2 encontram-se as médias e desvio padrão dessas temperaturas.

TABELA 2. Média e desvio padrão das temperaturas (autoria própria).

<i>Tipo de fluido</i>	<i>Média da temperatura</i>	<i>Desvio padrão</i>
Óleo de coco	42,7	± 2,4
Óleo de soja	43,8	± 3,4
Emulsão	44,4	± 4,7
A seco	51,4	± 7,8

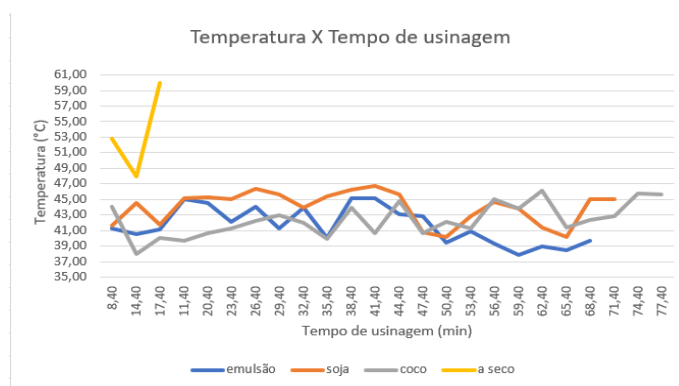


FIGURA 1. Influência da temperatura no processo de usinagem (autoria própria).

As temperaturas registradas durante o processo apresentaram valores mais baixos do que os valores encontrados por outros autores [18, 21], além disso, os valores de desvio padrão foram altos e próximos quando utilizados diferentes fluidos de corte. Porém, os autores [19] utilizando óleo de coco com a técnica MQL e variando a velocidade de corte até aproximadamente 110 m/min, registraram temperaturas de corte inferior a 40°C. Considera-se que esses valores tenham sido influenciados pela distância focal da mira, pois, o movimento relativo entre ferramenta e peça, bem como a aplicação do fluido de corte e a saída do cavaco impossibilitaram a aplicação da distância focal recomendada pelo fabricante resultando em alguns erros nas leituras.

Mas, como todos os fluidos estavam submetidos à uma mesma distância focal, mesmo que não fosse aquela recomendada pelo fabricante do equipamento, as temperaturas registradas ao longo do processo mantiveram a coerência com as temperaturas observadas por outros supracitados. Como já era esperado, as maiores temperaturas foram encontradas para a usinagem a seco. O fato dessa elevada temperatura é devido à ausência de um meio refrigerante e/ou lubrificante em contato direto com aresta de corte e a peça, portanto, a temperatura nessa região é aumentada progressivamente ao passo que a ferramenta avança longitudinalmente, resultando, no fim de vida prematuro da aresta cortante. Esses resultados também foram observados por [7, 17].

Observa-se na Figura 1, que aproximadamente nos 47 primeiros minutos de usinagem, ou seja, mais da metade da vida útil da ferramenta, a temperatura do processo, de forma geral, foi mais baixa quando utilizado o óleo de coco como fluido de corte e depois se manteve dentro de uma faixa, a qual não teve muitas variações quando comparada aos outros óleos estudados, obtendo tanto uma média como um desvio padrão baixo, como mostra na Tabela 2. Apresentando, portanto, características de um fluido refrigerante. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por [17], com a diferença no tipo do coco, pois, o autor em sua pesquisa utilizou o coco de babaçu. E está de acordo também com [18] mesmo que este tenha utilizado a técnica MQL.

O óleo de soja durante quase todo o tempo de usinagem obteve a maior temperatura dentre os fluidos estudados como mostra a Figura 1, apresentando um baixo poder refrigerante quando comparado aos outros fluidos estudados. A emulsão possui características tanto refrigerante quanto lubrificante, devido sua composição. A média da temperatura, apresentada na Tabela 2, para a emulsão foi a mais alta, quando comparada às usinagens com utilização de fluido de corte, acredita-se que essa média foi afetada pelas oscilações da temperatura durante o processo, pois, segundo [8] as emulsões tem uma maior dificuldade em remover o calor na interface ferramenta-cavaco.

É possível observar ainda, na Figura 1, que a temperatura sofreu um aumento nos últimos minutos de usinagem, independentemente do tipo de fluido utilizado, devido ao desgaste progressivo da ferramenta ao longo do tempo.

Na Figura 2, estão apresentadas as curvas da corrente consumida na máquina ao longo do tempo no processo de torneamento, seguindo o mesmo padrão de tempo da Figura 1. Na Tabela 3, estão representadas as médias e desvios padrão dessas correntes, bem como, as potências de usinagem obtidas pela Equação 1 e seus respectivos desvios padrão.

TABELA 3. Média e desvio padrão da corrente consumida pela máquina (autoria própria).

Tipo de fluido	Média da corrente (A)	Desvio padrão	Média da Potência (W)	Desvio Padrão
Óleo de coco	5,0	± 0,2	1115,0	± 34,3
Óleo de soja	5,0	± 0,1	1115,0	± 31,4
Emulsão	5,1	± 0,1	1137,3	± 32,0
A seco	5,0	± 0,1	1115,0	± 22,2

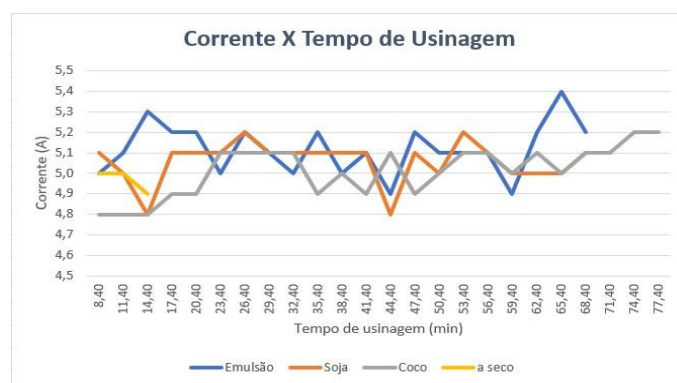


FIGURA 2. Influência da corrente no processo de usinagem (autoria própria).

O consumo de corrente na máquina, diferente da temperatura, apresentaram valores de média e desvio padrão mais baixo para a usinagem a seco (Figura 2) quando comparada à utilização de fluidos, principalmente a emulsão. Isso ocorre por que esse parâmetro está relacionado com a força de usinagem e quanto mais aquecida for a região de contato ferramenta-peça, menos força será requerida da máquina para cisalhar o material da peça. Pode-se observar na Tabela 3 que as potências médias não tem diferenças significativas por apresentarem corrente iguais para: a usinagem a seco, com óleo de coco e com óleo de soja. Esses resultados corroboram com [7], pois os autores constataram que a potência requerida para a usinagem a seco é muito próxima da potência requerida quando utilizados óleos vegetais.

Conforme [2] o fluido de corte para ser efetivo na sua ação lubrificante tem que se fazer presente na interface peça-cavaco-ferramenta, além de ter a capacidade de interagir com o material da peça para formar um filme lubrificante eficiente.

O contrário acontece com a emulsão. Segundo a Tabela 3, a emulsão apresenta a maior média da corrente e conseqüentemente requer mais potência da máquina. Acredita-se que por ser considerado um fluido com alto poder refrigerante, o resfriamento na região de corte tenha contribuído negativamente para o aumento da corrente, pois, será exigido uma maior potência da máquina para cisalhar a mesma quantidade de material. Em conseqüência disso, a potência requerida foi levemente alterada.

3.3. Análise do desgaste da ferramenta

A Figura 3 apresenta as curvas de desgaste das arestas de corte para diferentes fluidos de corte.

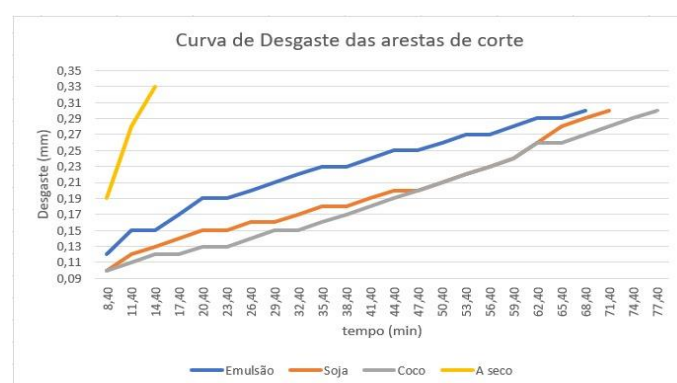


FIGURA 3. Curvas de desgaste das arestas de corte (autoria própria).

Na condição a seco, o calor gerado é distribuído entre a peça, ferramenta e cavaco. Por isso, a ferramenta está sujeita a uma intensa temperatura que favorece a retirada de material, pois, o aquecimento na zona de corte promove diminuição da dureza do material da peça, facilitando o corte. Porém, dentre as condições impostas à mesma ferramenta, essa foi a que apresentou uma usinagem mais brusca e que resultou em um menor tempo de vida útil da ferramenta. Pode-se observar na Figura 3 que a curva de desgaste da aresta de corte para a condição a seco, apresentou um comportamento quase exponencial, isso pode ser confirmado pela Figura 4, que apresenta o avanço de desgaste dessa aresta de corte no decorrer da usinagem a seco, chegando a seu fim de vida com $V_b = 0,33\text{mm}$, ou seja, foi registrado um desgaste excedente ao recomendado pela literatura, portanto, essa aresta de corte chegou ao fim de sua vida, antes de um $L_f = 3600\text{mm}$, que representa 24 passes ($T = 14,40\text{ min}$).

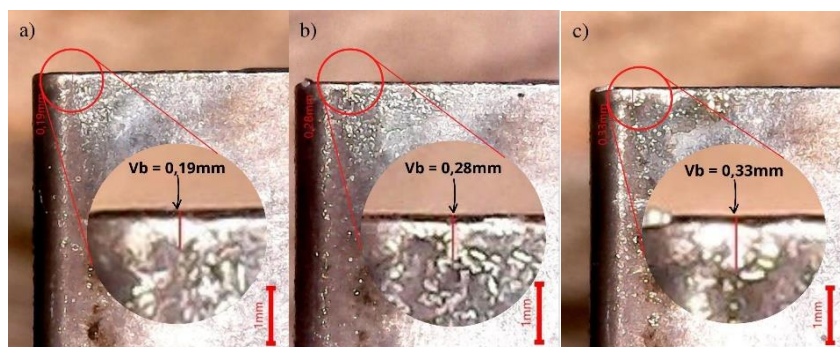


FIGURA 4. Avanço do desgaste da aresta de corte na usinagem a seco: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,19mm; (b) após 19 passes, o desgaste foi de 0,28mm; (c) após 24 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,33mm (autoria própria).

As Figuras a seguir apresentam o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem utilizando a emulsão como fluido de corte (Figura 5); utilizando óleo de soja como fluido de corte (Figura 6) e utilizando óleo de coco como fluido de corte (Figura 7).

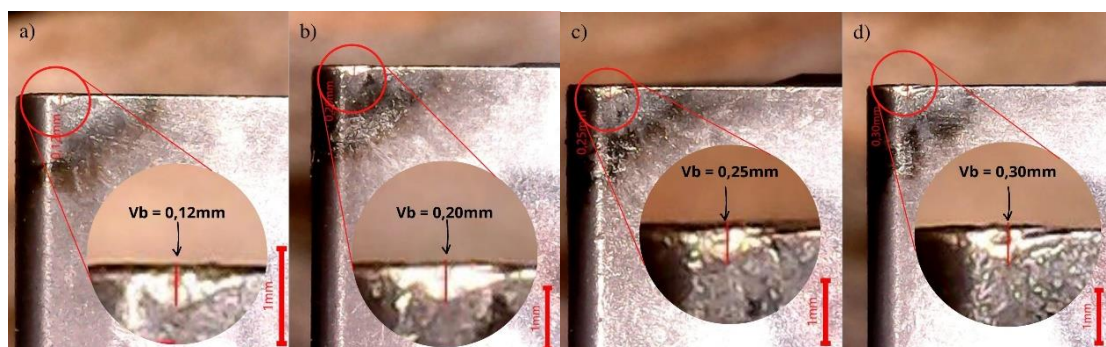


FIGURA 5. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando a emulsão: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,12mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,25mm; (d) após 114 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

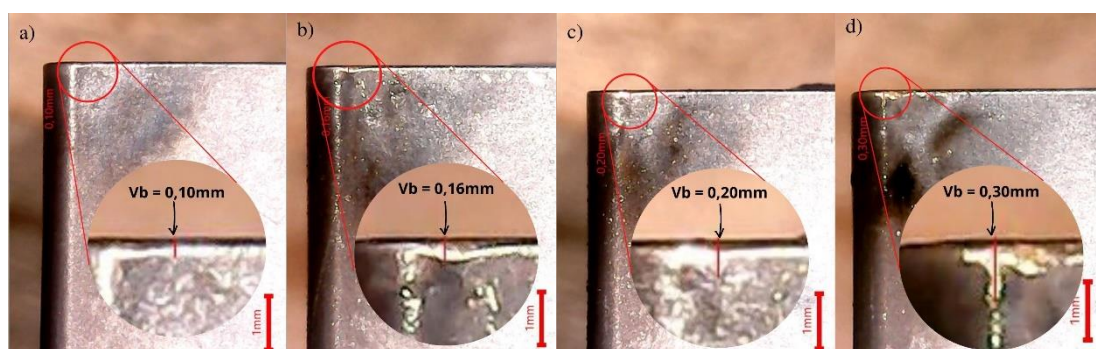


FIGURA 6. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando óleo de soja: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,10mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,16mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (d) após 119 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

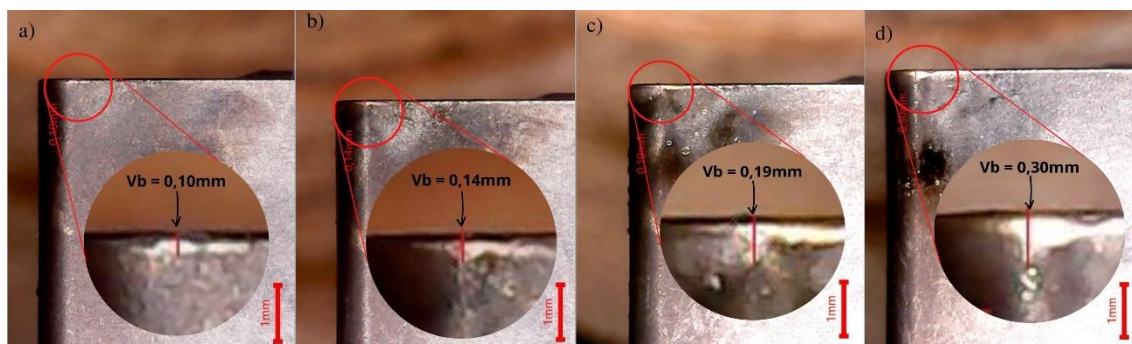


FIGURA 7. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando o óleo de coco: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,10mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,14mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de; (d) após 129 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

As análises das Figuras 5 a 7 confirmam a eficiência na utilização de fluidos de corte no processo de torneamento, pois, a presença de fluidos em abundância no processo indicam maior vida da ferramenta e retardo no desgaste desta, gerando uma redução nas tensões e geração de calor, favorecendo o processo de desgaste por parte da ferramenta de corte devido as suas propriedades lubrificantes.

Os óleos vegetais estudados possuem uma taxa de desgaste muito parecida, chegando a serem iguais entre o intervalo de tempo $T = 47,40$ min à $T = 62,40$ min. Embora apresentem comportamento muito parecidos, o óleo de coco se destaca por sempre está com um V_b mais abaixo do que os outros fluidos estudados. Para a mesma quantidade de passes, com $L_f = 6600$ mm ($T = 26,40$ min), pode-se observar diferentes valores para V_b , baseado no tipo de fluido: utilizando emulsão $V_b = 0,20$ mm; óleo de soja $V_b = 0,16$ mm e óleo de coco $V_b = 0,14$ mm, a usinagem a seco não chegou a atingir essa quantidade de passes.

Observa-se ainda nas Figuras 5 a 7, que o critério de fim de vida (0,30mm) foi atingido em tempos e em valores de L_f distintos, possibilitando uma fácil percepção do desempenho dos fluidos vegetais em comparação à emulsão. A Figura 5, mostra que a aresta de corte quando utilizada emulsão como fluido de corte, chegou ao seu fim de vida no $L_f = 17100$ mm ($T = 68,40$), enquanto, o para os fluidos vegetais o fim de vida das arestas foi obtido para $L_f \geq 17850$ mm. Esses resultados estão condizentes com os resultados obtidos por [18], mesmo que o autor tenha utilizado a técnica MQL, foi observado um menor desgaste da ferramenta quando utilizado o óleo de coco.

Com o emprego de fluidos vegetais no processo, percebe-se um retardo no desgaste da ferramenta quando comparados à emulsão. As análises em destaque nas Figuras 5 a 7 nos mesmos intervalos de tempo deixam perceptível essa diferença. Portanto, segundo [9, 12] pode-se afirmar que os fluidos vegetais estudados, principalmente o óleo de coco possui características de um fluido lubrificante por apresentar um menor desgaste na aresta de corte para o mesmo intervalo de tempo e com os mesmos parâmetros de usinagem.

3.4. Análise da rugosidade

Na Tabela 4, estão apresentadas as medições do parâmetro R_a em 4 seções dos tarugos usinados com diferentes fluidos de corte.

TABELA 4. Valores de R_a para os tarugos usinados com diferentes fluidos de corte (autoria própria).

Tipo de fluido	Amostra 1 (μm)	Amostra 2 (μm)	Amostra 3 (μm)	Amostra 4 (μm)	Média (μm)
Óleo de coco	7,897	7,232	7,460	7,378	7,492
Óleo de soja	10,984	9,190	7,381	8,018	8,893
Emulsão	9,231	8,608	8,130	7,354	8,331
A seco	13,233	11,231	9,641	8,551	10,475

Como já era esperado, a rugosidade da usinagem a seco foi a que obteve maiores valores para o R_a , pois, a ausência de um fluido no processo favorece o desgaste rápido da ferramenta (conforme foi apresentado nas Figuras 3 e 4), portanto, a rugosidade da superfície apresenta uma tendência de aumentar à medida que se aumenta o desgaste da aresta de corte.

Observa-se na Tabela 4 que, para os mesmos parâmetros de usinagem foi obtido diferentes valores para R_a . O óleo de coco obteve um melhor desempenho desse parâmetro apresentando um R_a médio de $7,492 \mu\text{m}$ representando uma diferença percentual de 10% de melhoria na rugosidade da peça em relação ao fluido de referência para esse estudo (emulsão). Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por [18].

Já o óleo de soja apresentou valores de Ra médio mais próximos ao Ra médio da emulsão, com uma diferença de 6,74% de piora na rugosidade da peça. Resultados semelhantes foram encontrados por [19], mas, acredita-se que a negativa desse resultado obtido por ele seja explicada pela técnica utilizada, pois, o autor analisou a influência da temperatura, desgaste da ferramenta e rugosidade da peça pela técnica MQL.

4. CONCLUSÃO

Na usinagem do aço SAE 1045, aplicando óleo de coco e óleo de soja como fluido de corte no processo de torneamento, foi observado uma melhoria como um todo ao final do processo quando comparado à emulsão e a usinagem a seco. O óleo de coco apresentou características de um fluido lubrificante e refrigerante, por apresentar uma menor temperatura durante a usinagem, um maior tempo de vida para a aresta de corte e um menor valor de Ra para a peça usinada. Além disso, os óleos vegetais estudados apresentaram um baixo valor de densidade quando comparado à emulsão, ou seja, possui menor probabilidade de oxidação. Porém, é necessário fazer um estudo de custo-benefício para avaliar se esse é o fluido mais recomendado para determinada aplicação.

REFERÊNCIAS

- [1] DIAS, A. M. de P. Avaliação Ambiental de Fluidos de Corte Utilizados em Processos Convencionais de Usinagem. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil, 2000.
- [2] MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M.B. Fluidos de Corte. Teoria da Usinagem dos Materiais, 2ª Ed.; Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 2011; p. 175-192.
- [3] HILSDORF, J. W. Química Tecnológica. 1ª Ed. Cengage Learning. São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- [4] TAYLOR, C.; HERNANDEZ, S. G. A.; MARSHALL, M.; BRODERICK M. Cutting fluid application for titanium alloys Ti-6Al-4V and Ti-10V-2Fe-3Al in a finish turning process. Elsevier Ltda: 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018), 2018.
- [5] GAJRANI, K. K.; RAM, D.; SANKAR, M. R. Biodegradation and hard machining performance comparison of ecofriendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and minimum quantity cutting fluid techniques. Elsevier Ltda: Journal of Cleaner Production 165 (2017) 1420-1435. 2017.
- [6] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Fluidos de Corte. Tecnologia da usinagem dos materiais, 7ª Ed.; Artliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2010; p. 173-187.
- [7] ESPINDOLA, E. S. C.; KLAFKE, A. L. Análise comparativa da utilização de fluidos de corte na usinagem do aço ABNT 1045 em operação de desbaste. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 10 a 15 de agosto de 2014.
- [8] SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. Aspectos tribológico da usinagem dos materiais. Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- [9] MORAIS, H. L. O. DE. Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluidos de corte integral utilizando vegetais no processo de retificação. Dissertação (Mestrado), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2014.
- [10] ARAUJO JUNIOR, A. S. Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQL no fresamento frontal de aço ABNT 1045. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG, 2013.
- [11] FUENTES, P. H. A. Avaliação da qualidade de óleos de soja, canola, milho e girassol durante o armazenamento. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2011.
- [12] CARDOSO, K. P. Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificantes. Dissertação (Mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP, 2012.
- [13] BELINATO, G. Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivados com antioxidantes para uso em tratamentos térmicos de têmpera. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2010.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 10441 – 10/02. Produtos de petróleo – Líquidos transparentes e opacos – Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica. Rio de Janeiro: 2002.

- [15] SAIKIRAN, M.; KUMAR, P. An investigation on the effects of vegetable oil based cutting fluids in the machining of copper alloys. Elsevier Ltda: Materials Today: Proceedings. Warangal, India, 2010, p. 455-461.
- [16] STINGELIN, F. DE SOUZA; DE BARROS, G. V. P.; SANTOS L. A. B.; CRUZ I. S.; DO NASCIMENTO, J. V. S.; BARBOSA, S. A. Caracterização do óleo de coco a ser utilizado na produção de biodiesel via rota etílica. Anais. I Congresso Nacional de engenharia de petróleo, gás natural e biocombustíveis, Campina Grande/PB, Brasil, 13 a 15 de maio de 2015.
- [17] BEZERRA, R. P.; SANTO, C. R. do E.; ALMEIDA, R. S. de; RODRIGUES, J. R. P. Aplicação do fluido de corte de origem vegetal no processo de torneamento do aço ABNT 1045. XVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Erechim, RS, Brasil, 21 a 24 de novembro de 2011.
- [18] W. L. R. Fernando, N. Sarmilan, K. C. Wickramasinghe et al., Experimental investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) of coconut oil based Metal Working Fluid, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.079>
- [19] SHRIKANT U. G.; NILESH G. P. Experimental Investigations Into Turning Of Hardened Aisi 4340 Steel Using Vegetable Based Cutting Fluids Under Minimum Quantity Lubrication. 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering. India: Elsevier Ltda, 2018.
- [20] ANSHUMAN DAS; PATEL, S.K.; BISWAL, B. B.; SAHOO, N.; PRADHAN, A. Performance evaluation of various cutting fluids using MQL technique in hard turning of AISI 4340 alloy steel. Elsevier Ltda: Measurement 150 (2020) 107079. 2020.
- [21] PIOTR, K.; DAMIAN, P.; TADAEUSZ, C. Determination of the emissivity coefficient of heat resistant superalloys and hard metal. Poznan University of Technology. Polônia. 2016.
- [22] MASOUDI, S.; GHOLAMI, M.A.; JANGHORBAN I., M.; VAFADAR, A. Infrared Temperature Measurement And Increasing Infrared Measurement Accuracy In The Context Of Machining Process. Advances in Production Engineering & Management. Iran, dez. 2017. pp 353-362.
- [23] LUTZ, A. Métodos físico-químicos para análise de alimentos, 4ª Ed.; Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, SP, Brasil, 2008; p. 595–629.
- [24] ASTM D 974-97. Test method for acid and base number by color – indicator titration. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. 1997.
- [25] ANVISA. Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais. Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999. Disponível em: https://freitag.com.br/files/uploads/2018/02/portaria_norma_499.pdf (acesso em 15/10/2021).
- [26] SOUZA, Ester Carvalho de. Estudo da oxidação do óleo de soja com diferentes concentrações de aditivos anti-oxidantes, para uso em tratamentos térmicos de têmpera. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [27] G. S. Araujo; R. H. R. Carvalho; E. M. B. D. de Sousa. Produção de Biodiesel a partir de Óleo de Coco (Cocos nucifera L.) Bruto. Key Elements For A Sustainable World: Energy, Water And Climate Change. São Paulo – Brazil – May 20th-22nd – 2009.



Artigo

Influência da composição dos moldes de fundição à base de gesso sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da peça fundida em alumínio

Arthur Domingos Mesquita de Morais ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido; arthurdomingos28@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 05/12/2021;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: De maneira a simplificar e baratear o processo de shell molding, sem deixar de obter suas vantagens, o gesso, com a adição de materiais refratários, é aplicado em substituição à areia. Assim, tem-se como proposta estudar a influência das proporções do material utilizado para confeccionar moldes feitos de uma mistura de gesso e cimento refratário sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da peça fundida. A peça fundida para os ensaios foi um corpo de prova de tração segundo a norma ASTM –E8, utilizando um molde com as dimensões 140x326x400 mm. Para a análise foi usada uma proporção, levando –se em conta a porcentagem segundo a massa do molde, inicialmente com 100% de gesso e 20% de cimento refratário e, posteriormente, com 80% de gesso e 20% de cimento refratário. Foi usado o alumínio 6063 em um forno com uma temperatura máxima de trabalho e temperatura de vazamento de 854 °C e 750 °C, respectivamente. Verificou-se um aumento da resistência e dureza nas peças dos moldes com o cimento refratário. Além disso, pela análise de microscopia, verificou-se uma redução no número de poros e microporos quando comparados às peças produzidas com o molde de 100% de gesso, em contrapartida essas apresentaram uma qualidade superficial melhor.

Palavras-chave: Shell molding, Molde de gesso, Cimento refratário, Tração, Microscopia.

Abstract: To simplify and cheapen the shell molding process, while still obtaining its advantages, plaster, with the addition of refractory materials, is applied to replace sand. Thus, it is proposed to study the influence of the proportions of the material used to make molds made of a mixture of plaster and refractory cement on the mechanical properties and microstructure of the casting. The casting for the tests was a tensile specimen according to the ASTM -E8 standard, using a mold with dimensions 140x326x400 mm. For the analysis, a proportion was used, considering the percentage according to the mold mass, initially with 100% gypsum and 20% refractory cement. 6063 aluminum and an oven with a maximum working temperature and pouring temperature of 854 °C and 750 °C, respectively, were used. There was an increase in strength and hardness in the mold parts with the refractory cement, in addition, by microscopy analysis, there was a reduction in the number of pores and micropores when compared to parts produced with the mold of 100% plaster, on the other hand these had a better surface quality.

Keywords: Shell molding, Plaster Mold, Refractory Cement, Tension, Microscopy

1. INTRODUÇÃO

A fundição em areia é o processo de fundição mais largamente utilizado, respondendo pela maioria significativa da tonelage total de produtos fundidos. Dentre suas variantes, o processo de moldagem em casca (*shell molding*) é caracterizado por seu molde ser uma casca fina confeccionado em areia, cujos grãos são unidos por uma resina aglomerante termofixa [1].

Dentre as principais vantagens do *shell molding* para a fundição destacam-se: a superfície da cavidade do molde (casca), que é menos rugosa, o que facilita o fluxo de metal líquido durante o vazamento e a melhor qualidade superficial de peças pequenas e complexas [4] e boa acurácia dimensional em peças de dimensões médias [3]. Esses fatores, muitas vezes, eliminam a necessidade de usinagem adicional mais pesada e a colapsibilidade do molde é, em geral, suficiente para evitar tensões internas e trincas na peça fundida [3].

De maneira a simplificar e baratear este processo, sem deixar de obter suas vantagens, muitas vezes o gesso é aplicado em substituição à areia [4]. Um dos fatores determinantes para a qualidade superficial e exatidão dimensional das peças produzidas por fundição é a granulometria do material usado para a fabricação do molde. A fundição em casca caracteriza-se por ser um processo em que um molde é produzido com material refratário de baixa granulometria [5], assim o gesso se mostra um excelente material para a confecção dos moldes para fundição uma vez que possui uma granulometria numa faixa de 1,6 até 12,5 μm [6]. Foi observado que areias com grãos mais finos possuem uma maior resistência aos esforços sofridos durante o processo de fundição [7]. Uma maior resistência dos moldes evita a formação de trincas nas peças.

Além disso, materiais refratários podem ser aplicados como aditivos, a fim de melhorar as propriedades térmicas do molde, objetivando um produto final com melhores propriedades mecânicas [4]. Entre as funções dos materiais usados na confecção dos moldes para fundição duas se destacam: permitir a acomodação, da melhor maneira, do material lingotado evitando a formação de rebarbas metálicas e uma melhor exatidão da peça final e promover uma boa troca térmica, permitindo uma solidificação uniforme da peça, a fim de diminuir os defeitos na estrutura cristalina do material [4]. A taxa de transferência de calor, o tamanho do grão e suas propriedades são fatores que influenciarão a qualidade das peças fundidas [8]. Assim, analisar o material constituinte dos moldes é fundamental para garantir a fabricação de peças com as propriedades mecânicas e dimensionais exigidas.

Ao entrar em contato com o molde, o metal resfria devido à resistência de contato que é influenciada por fatores como: afinidade físico-química entre o metal e o molde, o material a ser solidificado, a concentração do metal e a expansão do molde [9]. A temperatura de resfriamento do metal é influenciada por diversos fatores tais como: as propriedades termofísicas tanto do metal quanto do material do molde, a geometria do molde e do negativo da peça, a rugosidade das paredes do molde, a presença de inclusões e a temperatura inicial do molde [10].

Estudos foram feitos para avaliar as propriedades das peças de alumínio e suas ligas fabricadas a partir da fundição. Foram avaliadas as propriedades mecânicas da liga de alumínio 6063 quando fundida em diversos tipos de moldes [11]. Assim, para moldes de cimento, CO_2 , metal e moldes de areia, encontraram os seguintes valores para resistência última a tração, alongamento e dureza, respectivamente: 118 MPa, 0,066mm/mm e 21,80HB, 125MPa, 0,070mm/mm e 33,70HB, 90MPa, 0,034mm/mm e 26,40HB, 130MPa, 0,01mm/mm e 23,80HB. Além disso, concluíram que os moldes que eram formados por areia e cimento possuíam uma qualidade superficial menor do que aqueles formados por metal e CO_2 , devido a irregularidade e maior tamanho dos grãos que apresentavam baixos níveis de permeabilidade.

Outro estudo caracterizou peças fundidas utilizando a liga de alumínio 6063 e a técnica de areia verde com a adição de pó de ferro na fabricação do molde variando a proporção de areia e pó de ferro [12]. Os resultados encontrados mostraram que com a adição de pó de ferro a resistência a tração compreende uma faixa entre 70 e 112 MPa.

Estudou-se o efeito da porosidade nas ligas de alumínio fundido sobre as propriedades de tensão e ductilidades [13]. Para isso, foi fundida a liga de alumínio 380 utilizando molde de areia, em uma temperatura de fundição de 750 ± 5 °C. Ao final, concluiu-se que a porosidade presente nas peças de alumínio fundido causa uma grande redução em suas propriedades mecânicas, porosidade essa advinda da velocidade de vazamento e da baixa liberação dos gases durante a solidificação.

Porém, mesmo sendo um processo simples e de fácil aplicação na indústria, erros podem surgir durante o processo, sobretudo durante a fabricação dos moldes. A escolha inadequada do material, bem como das proporções deles para a fabricação dos moldes pode levar a produção de peças sem as propriedades mecânicas desejadas acarretando sua falha durante os ciclos de operação, levando a perdas financeiras ou até de vidas.

No presente trabalho tem-se o desenvolvimento de atividade experimental, com levantamento de propriedades mecânicas e microestruturais do alumínio solidificado em moldes com proporções variadas de gesso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Equipamentos

Foi comprada e utilizada para a fundição a liga de alumínio 6063, sua composição química está apresentada na Tabela 1. Tal liga apresenta dureza de 25HB e tensão última de tração de 89,6 MPa [14].

Para fundição foi utilizado um forno que possui temperatura máxima de 854 °C, a temperatura usada para o vazamento foi cerca de 750°C, tais temperaturas foram monitoradas por um termopar tipo K e uma placa Arduíno®.

Tabela 1 - Composição Química da liga de alumínio 6063 [14].

Elemento	Al	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ti	Ca
(%) Comp.	98,64	0,5141	0,5351	0,0013	0,0283	0,2108	0,0035	0,0007	0,0114	0,051

Os moldes foram fabricados variando a quantidade de cimento refratário, possuindo uma granulometria de 50 até 500 μm [15], com composição, fornecida pelo fabricante da massa refratária, Gabriella®, apresentada na Tabela 2, e gesso. Foram então fabricados dois moldes com diferentes composições, um molde com 100% de gesso e outro com 80% gesso e 20% de cimento refratário.

Tabela 2 - Composição química do cimento refratário (Gabriella Refratários).

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PF
(%) Comp.	53,73	35,08	1,63	0,32	2,46	3,24	2,74	1,12	0,26

O modelo foi projetado a fim de produzir quatro corpos de prova (CP), seguindo a norma ASTM –E8 [16], Figura 1. Foi feita a impressão do modelo, utilizando uma impressora 3D, o material utilizado para a impressão foi o Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG), com preenchimento de 17% e orientação de ângulo de 45°.

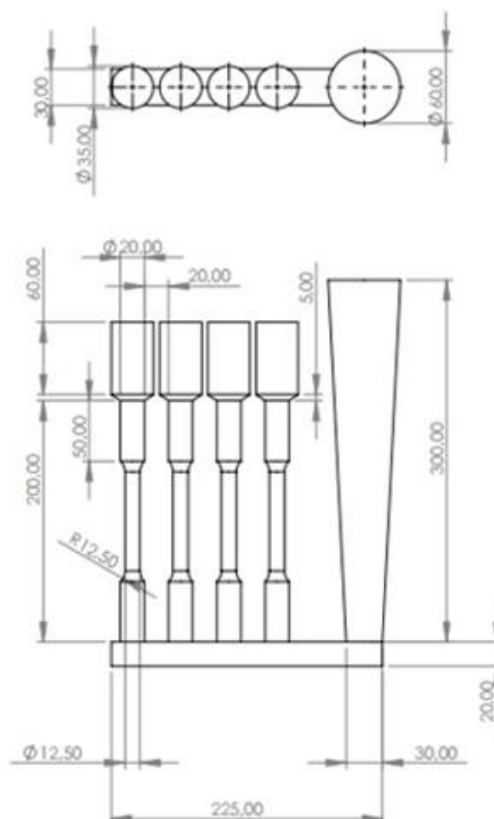


Figura 1 – Projeto do modelo para fundição (Autoria Própria).

Para a usinagem e rebarbação das peças para os ensaios foram utilizadas a serra-fita e esmerilhadeira, respectivamente, para o polimento foi utilizado lixas e politriz. Para a análise das propriedades mecânicas e microestruturais foram utilizadas a máquina de tração universal, microscópio óptica, microscopia de varredura eletrônica (MEV) e rugosidade.

2.2 Procedimento Experimental

Primeiramente foi feita a preparação do material a ser utilizado para a fabricação dos moldes, que apresentam dimensões de 140x326x400 mm. Foi pesado cerca de 12 kg de gesso para a fabricação do molde de 100% gesso e utilizado cerca de 2 litros de água, já o segundo molde foi feito utilizando uma proporção de

80% gesso e 20% massa refratária, segundo a massa total do molde, logo foram pesados e misturados manualmente cerca de 9,6 kg de gesso e 2,4 kg de massa refratária e foi utilizado cerca de 2,5 litros de água. Após a fabricação ambos os moldes foram colocados ao sol por cerca de 24 horas para cura do gesso e remoção da umidade.

Foram adicionados machos para garantir um melhor encaixe das duas partes, o molde foi vedado, utilizando massa epóxi, para evitar possíveis vazamentos de material e preso com elásticos e ripas de madeira para evitar aberturas, Figura 2.



Figura 2 - Preparação do molde para o vazamento do alumínio (Autoria Própria).

O Alumínio foi então fundido e vazado a uma temperatura de cerca de 10% maior que a temperatura de fundição, cerca de 750 ± 10 °C, tal temperatura foi medida com um termopar tipo K e Arduino®, a fim de garantir uma boa fluidez durante o vazamento e evitar possíveis solidificações antecipadas. Após 12 horas do vazamento do alumínio em cada molde, para garantir que as peças tinham solidificado corretamente, o material fundido foi desmoldado.

2.3 Caracterizações

2.3.1 Ensaio de tração

Para os ensaios de tração foi utilizado um corpo de prova para tração segundo a norma ASTM-E8 [16], com uma velocidade de 3 mm/min. A preparação se deu inicialmente pela usinagem dos CP's dos fundidos e então foram rebarbados.

2.3.2 Ensaio de dureza

Foram usinadas uma amostra cilíndrica de 35 mm de diâmetro e 40 mm de altura e uma prismática com 30 mm, 20 mm e 80 mm de altura das peças geradas pelos moldes de 100% de gesso e 80% de gesso e 20% cimento refratário, respectivamente, Figura 3. Para o preparo das peças foi utilizada a politriz com uma sequência de lixas, variando de forma crescente a granulometria dessas, assim utilizou-se as lixas de 180, 220, 320 e 400.

O ensaio de dureza foi feito de acordo com a norma ASTM E18 [17] para materiais macios, assim foi usado um endentador com ponta esférica de aço com 0,5 polegadas, pré-carga de 10 kgf, carga de 60 kgf, por 10 segundos, para uma melhor análise da dureza foram feitas cerca de cinco marcações em cada peça aplicando a carga na direção transversal em ambos os CP's.

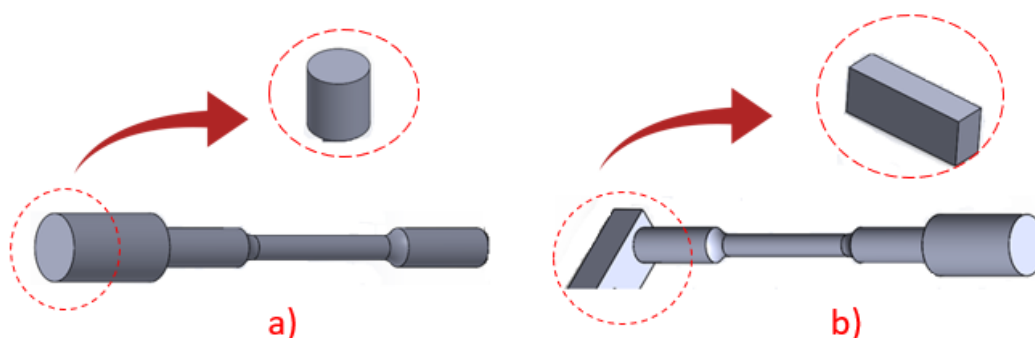


Figura 3- Croqui das amostras usadas para o ensaio de dureza a) fabricado com o molde de 100% de gesso, b) fabricado com o molde de 80% de gesso (Autoria Própria).

2.3.3 Microscopia Óptica

Para a análise da microscopia óptica, foi tirada uma amostra do corpo útil dos CP's de tração de cada um dos produtos fundidos pelos moldes com 100% de gesso e 80% de gesso, ambos com diâmetro de 12,5 mm e altura de 20 mm, Figura 4.

Para o preparo das peças foi utilizada a politriz com uma sequência de lixas na seção transversal da amostra, variando de forma crescente a granulometria dessas, assim utilizou-se as lixas de 180, 220, 320 e 400 e o polimento foi finalizado com uma mistura de água e alumina, para assim poder fazer o ensaio de microscopia com a ampliação de 100 vezes.

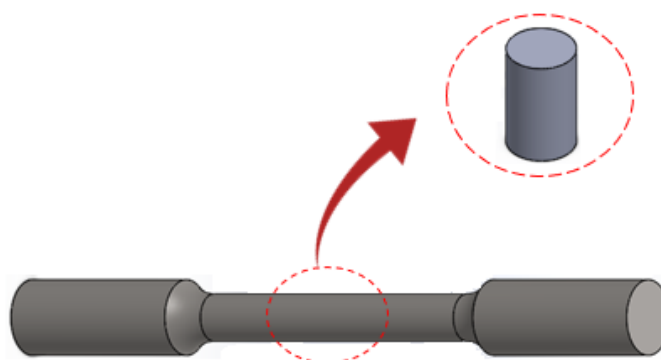


Figura 4- Croqui da amostra usada para os ensaios de microscopia óptica, MEV e rugosidade (Autoria Própria).

2.3.4 Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV)

As amostras para o ensaio do MEV foram usinadas das partes úteis dos CP's gerados pela fundição (Figura 4) e então lixadas com a mesma sequência de lixas usadas no ensaio de microscopia óptica e polidas com uma mistura de alumina e água. Após o polimento foi feita uma limpeza ultrassônica utilizando álcool 70% e, após o tempo de secagem, foi necessária à aplicação de elétrons de ouro para a realização do ensaio. Foi então aplicada uma aproximação de 50 vezes para gerar a imagem.

2.3.5 Rugosidade (Ra)

A rugosidade foi medida com o auxílio do rugosímetro, modelo ISR C300, que tem uma faixa de medição de 0,05 – 32 μm e o auxílio da norma ABNT NBR ISO 4288:2008 [18]. Foi usado um *cut-off* (λ_c) de 0,8 mm, com um comprimento de amostragem de cinco e uma faixa de $\pm 40,00\text{mm}$. A amostra ensaiada foi usinada da parte útil do CP de tração, (Figura 4) que foi presa com o auxílio da morsa para evitar movimentos relativos e garantir o paralelismo, (Figura 5). Foram feitas cerca de 12 medições, variando a posição do CP, para verificar o nível de rugosidade de cada parte.



Figura 5- Configuração usada para o ensaio de rugosidade (Autoria Própria).

3. RESULTADOS

Após a fabricação dos moldes notou-se que o molde com 80% de gesso e 20% cimento refratário estava mais frágil e possuía mais trincas superficiais, quando comparado ao molde fabricado com 100% de gesso, Figura 6 (b). Tal fragilidade é decorrente da maior granulometria do cimento refratário presente na mistura tornando o molde mais frágil, como explica [7]. Além disso, corroborando [3], devido à baixa granulometria do material de ambos os moldes foi possível atingir uma boa acurácia dimensional.

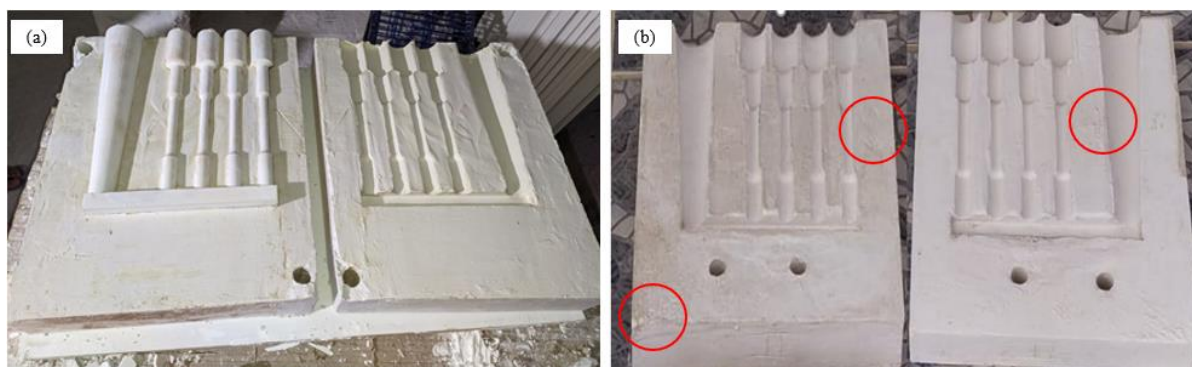


Figura 6- Moldes fabricados a) 100% de gesso b) 80% de gesso e 20% massa refratária (Autoria Própria).

Posterior ao vazamento e solidificação houve a desmoldagem e retirada das peças fundidas. Observou-se que a parte interna de ambos os moldes tinha sido queimadas, além de uma grande erosão das paredes internas do molde, sendo impossível a reutilização de tais moldes.

Constatou-se que quatro dos oito corpos de provas, dois de cada um dos moldes, apresentaram rechupes e vazios, visíveis a olho nu estando aptos apenas quatro CP's, dois de cada um dos moldes, além disso ambos os fundidos apresentaram uma grande quantidade de rebarbas, decorrentes da junção imperfeita entre as metades de cada molde, (Figura 7). Assim, apenas dois CP's ficaram aptos para os ensaios, (Figura 8).

Após a usinagem de algumas secções do fundido notou-se a presença de partículas de óxido, decorrentes da não remoção da camada de óxido superior formada durante a fundição do alumínio, assim sendo necessária a retirada de amostras de diferentes partes para a análise de dureza, a fim de evitar possível erros durante o ensaio.

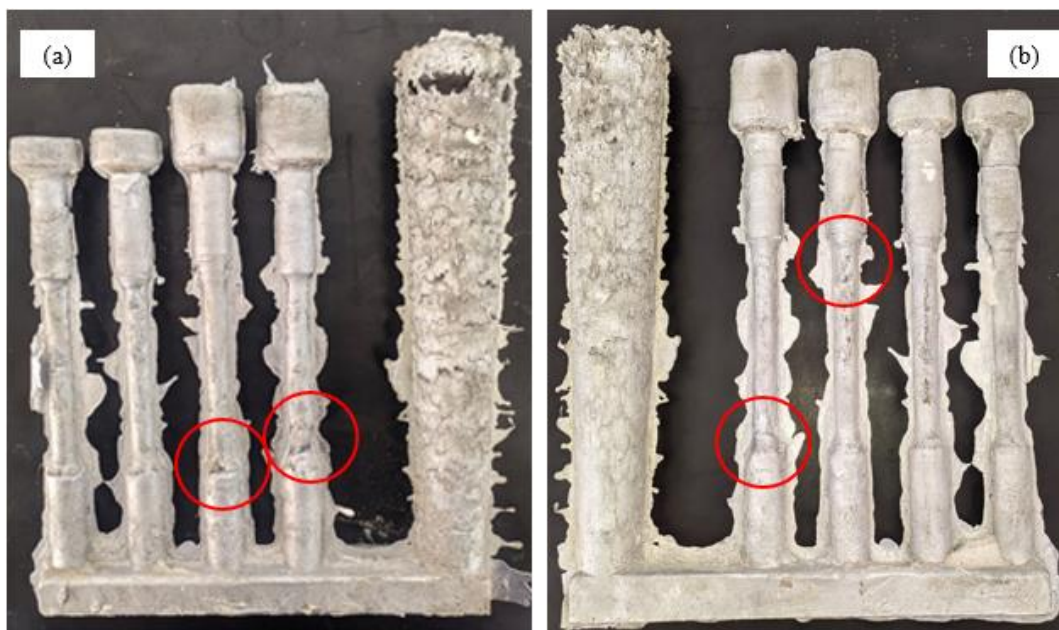


Figura 7- Fundidos gerados pelo a) Molde de 100% gesso b) Molde de 80% gesso e 20% cimento refratário (Autoria Própria).

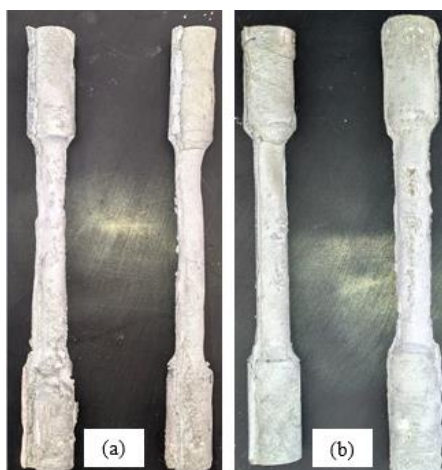


Figura 8 - a) CP produzidos pelo molde com 100% de gesso b) CP produzidos pelo molde com 80% de gesso (Autoria Própria).

A Tabela 3 e os gráficos da Figura 9 mostram os resultados obtidos após o ensaio de tração dos corpos de prova.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de tração (Autoria Própria).

Amostra	CP 100% Gesso		CP 80% Gesso e 20% Cimento Refratário	
	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)
1	59,74	0,02	81,57	0,03
2	61,8	0,02	74,85	0,02
Média	60,76	0,02	78,2	0,025
Desvio Padrão	1,45	0	4,75	0

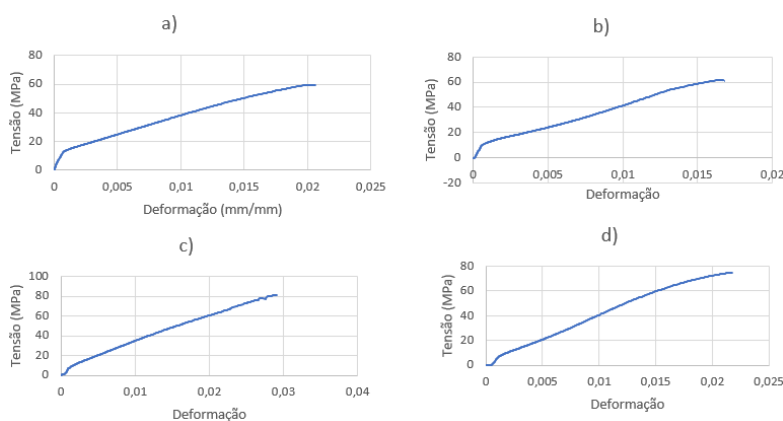


Figura 9 - Gráfico tensão x deformação a) CP1 molde de 100% gesso, b) CP2 molde de 100% gesso, c) CP1 molde de 80% gesso, d) CP2 molde de 80% gesso (Autoria Própria).

Foi observada uma deformação e tensão de ruptura médias de 0,020 mm/mm e 60,76 MPa, para os CP's gerados pelo molde de 100% gesso, e 0,027 mm/mm e 78,20 MPa, para os CP's gerados pelo molde de 80% gesso, tais valores condizem com a faixa de resultados encontrados por [12, 13].

A Tabela 4 apresenta os valores medidos para as durezas das amostras obtidas de cada um dos moldes.

Tabela 4 - Valores encontrados pelo ensaio de dureza em cada uma das amostras (Autoria Própria).

	CP 100% Gesso	CP 80% Gesso e 20% Cimento Refratário
Medição	Dureza (HRR)	Dureza (HRR)
1	95	116
2	111,3	115
3	110,6	114,1
4	108,1	113,5
5	107,7	113,4
Média	108,1	114,1
Desvio Padrão	6,63	1,10

Assim, conclui - se que para os moldes com 100% gesso as amostras possuem uma dureza média de 108,1HRR, já os moldes de 80% gesso a dureza média encontrada foi de 114,1HRR. Os resultados medidos das propriedades mecânicas mostraram, assim como afirma [9, 10], a influência do cimento refratário nas propriedades das peças fundidas.

Devido a presença do cimento refratário o molde de 80% de gesso atendeu melhor aos requisitos, exposto em [6], necessários aos moldes para fundição, assim sendo capaz de gerar peças com propriedades mecânicas melhores. A falta de um material refratário no molde de 100% faz com que esse não tenha uma boa troca de calor na interface material/molde, impedindo assim a formação de núcleos mais refinados, como explica [10].

A análise de microscopia óptica, Figura 10, e do MEV, Figura 11, revelou que para as peças fundidas utilizando o molde de 100% de gesso apresentaram uma quantidade muito maior de porosidade e microporosidades, devido à velocidade de vazamento incorreta, sendo esta muito rápida, e pela troca de calor ineficiente durante o processo de solidificação do alumínio dos moldes de 100% de gesso houve o surgimento de porosidades e microporosidades [10, 24].

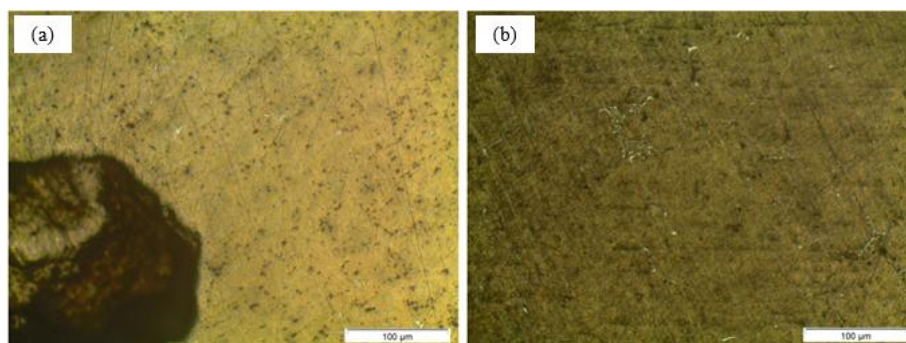


Figura 10- Resultados da microscopia a) amostra gerado pelo molde de 100% gesso b) amostra gerado pelo molde de 80% gesso (Autoria Própria).

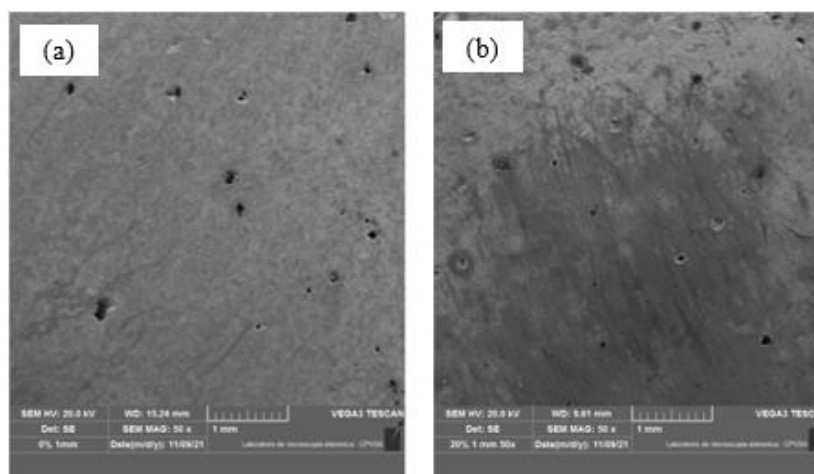


Figura 11- Resultados da microscopia a) amostra gerado pelo molde de 100% gesso b) amostra gerado pelo molde de 80% gesso (Autoria Própria).

A presença maior de porosidades e microporosidades na amostra gerada pelo molde de 100% de gesso, bem como a redução das propriedades mecânicas quando comparadas às amostras geradas pelo molde de 80% de gesso, estão de acordo com Mugica *et al* [14], pois a presença de poros nas peças fez com que houvesse uma redução na tensão de ruptura última e dureza.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos após a medida da rugosidade de cada amostra.

Tabela 5 - Resultados das medições de rugosidade de cada lado da amostra (Autoria Própria).

Medição	CP 100% Gesso		CP 80% Gesso e 20% Cimento Refratário	
	Metade 1(μm)	Metade 2(μm)	Metade 1(μm)	Metade 2(μm)
1	1,69	1,28	3,11	5,3
2	1,65	1,15	3,17	3,94
3	1,64	1,31	2,99	5,11
Média	1,65	1,38	3,11	5,29
Desvio Padrão	0,03	0,08	0,09	0,14
Média Total	1,466		4,196	

Os resultados revelaram que o corpo de prova feito com o molde de 100% de gesso teve uma rugosidade média total de 1,466 μm , já o molde com 80% de gesso foi medido resultados divergentes entre cada uma das metades, uma delas apresentando uma rugosidade média de 4,196 μm . Assim é confirmado [6], uma vez que a sua menor granulometria os moldes com 100% de gesso são capazes de gerar peças com uma melhor qualidade superficial ao longo de toda a peça.

Além disso, houve a influência do precipitado do cimento nas paredes internas, sendo o responsável pela diferença da qualidade superficial, evidenciada pela diferença da granulometria.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que devido a presença do cimento refratário, os moldes com 80% de gesso são capazes de gerar peças com melhores propriedades mecânicas. Para o molde de 100% de gesso mediu-se uma tensão de ruptura e dureza médias de 60,76 MPa e 108,1 HRR, respectivamente, já para o CP gerado pelo molde de 80% gesso e 20% cimento refratário apresentou uma tensão de ruptura e dureza médias de 78,2 MPa e 114,1 HRR, respectivamente.

Além disso foi constatado uma menor presença de poros e microporos nas amostras fundidas com o molde que possui o material refratário na sua composição

Porém, notou-se que a presença do cimento refratário acaba por introduzir uma maior quantidade de precipitados nas paredes internas do molde durante sua cura, assim tais precipitados acabam por gerar uma maior quantidade de defeitos nas peças fundidas e, além disso, uma maior presença de cimento refratário torna o molde mais frágil, acarretando trincas e rachaduras.

REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER JUNIOR, Willian D; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 817 p.

- [2] FILHO, Paulo José Carvalho Mascarenhas Filho. Fundição em areia a verde: uma abordagem experimental. / Paulo José Carvalho Mascarenhas Filho. – Cruz das Almas – BA, 2016
- [3] GROOVER, Mikell P. Introdução aos Processos de Fabricação. Rio de Janeiro: Ltc, 2014. 737 p
- [4] GUIMARÃES, José Rubson de Sousa. Desenvolvimento de um molde refratário para produção de peças metálicas pelo processo de fundição de precisão. 2019. 34 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- [5] BEELEY, Peter. Foundry technology. 2.ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001
- [6] PASTIRČÁK, R.; SLÁDEK, A.; KUCHARČÍKOVÁ, E.. The Production of Plaster Molds with Patternless Process Technology. Archives of Foundry Engineering, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 91-94, 1 jun. 2015. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/afe-2015-0045>.
- [7] Ikushima T., and Mitsui T., 'Influence of Sand Grains Distribution on Green Properties of Bentonite bonded sands compacted at high pressure', IIFS, vol- 42,1970,
- [8] VINOTHRAJ, D.; RAGAVANANTHAM, S.; SARAVANAKUMAR, M.; VIVEKANANTHAN, M.; SIVAGNANAMANI, G.s.. Heat dissipation and inter-relationship between physical properties of moulding sand. Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 37, p. 1809-1812, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.398>.
- [9] ROCHA, Otávio Lima et al. COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INTERFACE METAL/MOLDE E VARIÁVEIS TÉRMICAS NA SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL HORIZONTAL DA LIGA Al-6%Cu. HOLOS, [S.L.], v. 5, p. 28-39, nov. 2013. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1483>>. Acesso em: 02 jul. 2021. doi:<https://doi.org/10.15628/holos.2013.1483>.
- [10] SANTOS, C.A; QUARESMA, J.M.V; A GARCIA,. Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings. Journal Of Alloys And Compounds, [S.L.], v. 319, n. 1-2, p. 174-186, abr. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0925-8388\(01\)00904-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0925-8388(01)00904-5).
- [11] Ayoola, W.A., Adeosun, S.O., Sanni O.S. and Oyetunji A. (2012). Effect of casting mould on mechanical properties of 6063 aluminium alloy. Journal of Engineering Science and Technology Vol. 7, No. 1 (2012) 89 - 96.
- [12] ADEOSUN, S. O.; AKPAN, E. I.; SEKUNOWO, O. I.; AYOOLA, W. A.; BALOGUN, S. A.. Mechanical Characteristics of 6063 Aluminum-Steel Dust Composite. Isrn Mechanical Engineering, [S.L.], v. 2012, p. 1-9, 8 ago. 2012. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.5402/2012/461853>.
- [13] MUGICA, Gustavo Waldemar; TOVIO, Daniel Oscar; CUYAS, Julio César; GONZÁLEZ, Aulio César. Effect of porosity on the tensile properties of low ductility aluminum alloys. Materials Research, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 221-229, jun. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392004000200002>.
- [14] MatWeb material property, 2021. Disponível em: <[Aluminum 6063-O \(matweb.com\)](http://matweb.com)>. Acesso em: 04, Nov e 2021.
- [15] SILVA, R.D.s. da; BRAGANÇA, S. R.. Avaliação de reutilização de resíduos de tijolos refratários mgo-c em massas refratárias secas. 2012. 12 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, Curitiba, 2012
- [16] ASTM E8 / E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, www.astm.org
- [17] ASTM E18-20, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- [18] Associação de Brasileira de Normas Técnicas, 2008, ABNT NBR ISO 4288, "Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade", ABNT, Rio de Janeiro



Artigo

Simulação de fluxo de carga para sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica com o ATPDraw

Adriano Aron F. de Moura^[1], Pablo Fillype Teixeira Ferreira^[2], Victor de Paula Brandão Aguiar^[3],
Ednardo Pereira da Rocha^[4], João Frederico Souza de Paula^[5] e Ailson Pereira de Moura^[6]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido: adrianoaron@ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido: pablo.ferreira@alunos.ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semiárido: victor@ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semiárido: ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[5] Universidade Estadual de Campinas: joaofredericosp@gmail.com

^[6] Universidade Federal do Ceará: ailson@ufc.br

Recebido: 19/01/2022;

Aceito: 29/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: No fluxo de carga, a obtenção do estado da operação de redes elétricas de potência, tem como base matemática métodos numéricos como Newton-Raphson com as variações dos métodos desacoplado e desacoplado rápido. Dentre as principais ferramentas as quais utilizam estes métodos numéricos, são programas de modelagem computacional. Mesmo que tais programas sejam ótimas ferramentas de análise, as demandas atuais precisam de programas velozes e de simples modelagem para os sistemas de transmissão/distribuição e operação de redes elétricas de potência. A utilização do software ATPDraw deve-se pela simplificação e praticidade com a construção de suas simulações baseadas nos métodos já consagrados no estudo de fluxo de carga, sendo uma excelente ferramenta para tais estudos. O presente trabalho aborda a modelagem de um sistema de transmissão de duas barras, com barras PQ e PV e do sistema de distribuição IEEE de quatro barras. As simulações dos sistemas de duas barras e do sistema IEEE 4 barra permitiram observar as tensões elétricas nas barras do sistema e os fluxos de potência nas linhas de transmissão e distribuição, comprovando a eficácia do ATPDraw na análise da rede elétrica em regime permanente.

Palavras-chave: Fluxo de Carga, Transmissão de Energia Elétrica, Distribuição de Energia Elétrica, ATPDraw

Abstract: In the load flow, obtaining the state of operation of electrical power networks is mathematically based on numerical methods such as Newton-Raphson with variations of the decoupled and fast decoupled methods. Among the main tools that use these numerical methods are computational modeling programs. Even though such programs are great analysis tools, current demands need programs that are fast, and that simplify the modeling for transmission/distribution systems and operation of the power grid. The use of ATPDraw Software is due to the simplification and practicality with the construction of its simulations based on the methods already established in the study of load flow, the ATPDraw is an excellent tool for such studies. The present work presents the modeling of a two-bus transmission system, with PQ and PV buses, and of the four-bus IEEE distribution system. The simulations of the two-bus systems and the IEEE 4-bus system made it possible to observe the electrical voltages in the system buses and the power flows in the transmission and distribution lines, thus proving the effectiveness of ATPDraw in the analysis of the electrical network on a permanent basis.

Keywords: Load Flow, Electric Power Transmission, Electric Power Distribution, ATPDraw

1. INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico pode ser visto como três segmentos: geração, transmissão/subtransmissão e distribuição. A geração é planejada e programada levando-se em conta os recursos primários de energia. No caso do sistema de energia brasileiro, possui sua geração hidrelétrica em domínio no setor, seguida de

termelétricas e, atualmente, o destaque na geração eólica e solar [1]. É notório o crescimento no consumo de energia elétrica no país para suprir as demandas atuais e futuras. O planejamento e a operação de sistemas de elétricos têm como finalidade atender ao crescimento contínuo do consumo de energia elétrica. Indústrias de grande porte, redes de distribuição de energia elétrica ou o Sistema Interligado Nacional (SIN) são exemplos de sistema de potência. Para analisar o fluxo de potência no atendimento de cargas, necessita a disponibilidade de ferramentas adequadas e de confiança, principalmente quando o sistema é de grande porte. O estudo do fluxo de potência consiste em calcular o estado da rede elétrica, utilizando ferramentas matemáticas baseadas na matriz Y e na matriz Z. Os métodos de Newton-Raphson, Newton Desacoplado e Desacoplado Rápido são os aplicáveis para o estudo de fluxo de potência, sendo o método de Newton-Raphson empregado pelo ATP-EMTP para o fluxo de carga, pois o *software* trabalha com os mismatches de potência ativa e reativa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Fluxo de Carga

O estudo do fluxo de potência em uma rede energia elétrica depende essencialmente do estado da rede, de suas grandezas e da distribuição desse fluxo. Na representação do sistema tem seus valores estáticos, significando que é representada por conjunto de equações e inequações algébricas. Em geral, o estudo do fluxo de potência é realizado utilizando métodos computacionais desenvolvidos de forma específica para a resolução do sistema de inequações e equações algébricas que constituem o modelo estático da rede. Na formulação mais simples do problema, a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas [2]:

- V_k – Módulo da tensão nodal (barra k);
- θ_k – Ângulo da tensão nodal;
- P_k – Geração líquida (geração menos consumo) de potência ativa;
- Q_k – Injeção líquida de potência reativa.

As barras dos tipos *PQ* e *PV* representam as barras de carga e barras de geração. A barra V_θ , ou barra de referência, tem uma dupla função: como o próprio nome indica, fornece a referência angular do sistema [2].

- PQ* – São dados P_k e Q_k , e calculados V_k e θ_k ;
- PV* – São dados P_k e V_k , e calculados Q_k e θ_k ;
- Referência – são dados V_k e θ_k , e calculados P_k e Q_k .

Esses três tipos de barras que aparecem na formulação básica são os mais frequentes e importantes. O conjunto de equações do problema do fluxo de carga são formados por duas equações para barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes. Isso corresponde à Primeira Lei de Kirchhoff [2]:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

Em que:

- $k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;
- Ω_k - Conjunto das barras vizinhas da barra k;
- V_k, V_m – Módulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;
- θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;
- P_{km} - Fluxo de potência ativa no ramo $k - m$;
- Q_{km} – Fluxo de potência reativa no ramo $k - m$;
- Q_k^{sh} - Componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k ($Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2$, sendo b_k^{sh} a susceptância shunt ligada à barra k).

Nessas equações os ângulos θ_k e θ_m aparecem sempre na forma $\theta_k - \theta_m$, significando que uma mesma distribuição de fluxos da rede pode ser obtida se for somada uma constante arbitrária a todos os ângulos nodais, ou seja, o problema do fluxo de carga é indeterminado nas variáveis θ , o que torna necessária a adoção de uma referência angular. O conjunto de inequações, que fazem parte do problema do fluxo de carga, é formado pelos módulos das tensões nodais das barras *PQ* e pelos limites nas injeções de potência reativa das barras *PV* [2]:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (2.3)$$

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max} \quad (2.4)$$

2.2 Método de Newton-Raphson

A dedução do método de Newton é realizada na forma geométrica e, segue usando a expansão da série de Taylor. Desse modo, é feito a aplicação do método para o problema do fluxo de carga [3]. Considerando a seguinte representação gráfica de uma função f presente na Figura 1, para uma aproximação x_{k-1} , é traçada uma reta tangente ao ponto $((x_{k-1}), f(x_{k-1}))$. O ponto em que esta reta corta o eixo x é a nova aproximação x_k [3]. A partir do mesmo gráfico, pela tangente expressa a partir do ângulo da reta de inclinação em termos da derivada, obtemos a função de iteração do método.

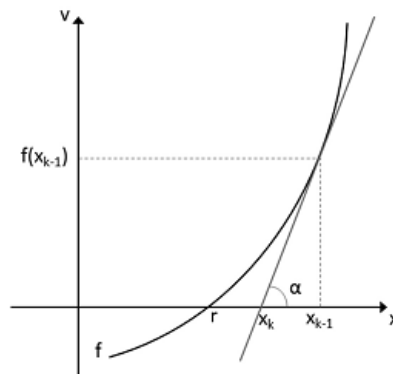


FIGURA 1. Método de Newton-Raphson para uma equação não linear. (MOURA. et al., 2018)

Considerando o gráfico da Figura 1, é possível escrever a equação que constitui a função de iteração do método de Newton.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\alpha) &= \frac{f(x_{k-1})}{(x_{k-1} - x_k)} = f'(x_{k-1}) \\ (x_{k-1} - x_k) &= \frac{f(x_{k-1})}{f'(x_{k-1})} \\ x_k &= x_{k-1} - \frac{f(x_{k-1})}{f'(x_{k-1})} \\ F(x_{k-1}) &= x_{k-1} - \frac{f(x_{k-1})}{f'(x_{k-1})} \\ F(x) &= x - \frac{f(x)}{f'(x)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Esse conjunto de equações, simbolizado por (2.5) se aplica a uma função de uma variável. Caso a função seja de várias variáveis e considerando o sistema de equações não lineares a seguir, na equação (2.6):

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

De forma que a expansão de uma função f pela série de Taylor, colocada de uma forma geral para n variáveis temos:

$$f(x_1 + \Delta x_1, \dots, x_n + \Delta x_n) \approx f(x_1, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (2.7)$$

É importante complementar que, se $(x_i + \Delta x_i)$ é uma nova aproximação, para x_i teríamos a convergência obtida quando $\Delta x_i \rightarrow 0$, ou seja, quando $|\Delta x_i| \leq \varepsilon$, onde ε é a tolerância, ou precisão desejada [3].

Assim, o sistema não linear ficaria da seguinte forma:

$$\begin{cases} -f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n \\ -f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ -f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n \end{cases} \quad (2.8)$$

Pode ser usado a notação matricial $[J][R] = [B]$, onde:

$[J]$ é a matriz jacobiana;

$[R]$ é o vetor solução ($r_i = \Delta x_i$);

$[B]$ é o vetor de termos independentes ($b_i = -f_i$).

Sendo a matrizes $[J]$, $[R]$ e $[B]$ dados por:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_i \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} -f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ -f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ -f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Sabendo que $[J][R] = [B] \Rightarrow [R] = [J]^{-1}[B]$, podemos obter a forma iterativa para o método de Newton para sistemas de equações não lineares, da seguinte forma:

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [J]^{-1}[B]^{(k)} \quad (2.10)$$

Onde a inversa do jacobiano $[J]^{-1}$, em $[X]^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}]^T$.

O algoritmo para resolução do sistema de equações $f(x) = 0$ pelo método de Newton é:

1. Fazer $k = 0$ e escolher uma solução inicial $x = x^{(k)} = x^{(0)}$.
2. Calcular $f(x^k)$.
3. Testar convergência: se $|f_i(x^k)| \leq \varepsilon$, para $i = 1, n$, o processo convergiu para solução x^k , caso contrário, passar para 4.
4. Calcular matriz $J(x^k)$.
5. Determinar nova solução $x^{(k+1)}$:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.11)$$

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [J]^{-1}[B]^{(k)} \quad (2.12)$$

6. Fazer $k + 1 \rightarrow k$ e voltar para o passo 2.

Para o método de Newton-Rapshon é formulada conforme apresentado a seguir [3]: Na forma polar, a tensão V_i da barra i de uma SEP é dada por $V_i = |V_i|e^{j\theta_i}$. A equação básica do fluxo de potência para barra i de um sistema é dado pela equação (2.13) a seguir:

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.13)$$

Colocando as potências no primeiro membro, temos:

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^N V_i^* Y_{ik} V_k \quad (2.14)$$

Usando a notação polar:

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^N |V_k| |V_i| e^{j(\theta_i - \theta_k)} Y_{ik}^* \quad (2.15)$$

Sendo que:

$$e^{j(\theta_i - \theta_k)} = \cos(\theta_i - \theta_k) + j \text{sen}(\theta_i - \theta_k) \quad (2.16)$$

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

Substituindo em (2.16) em (2.15), onde $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$, podemos reescrever (2.15) da seguinte forma:

$$\Delta P_i = P_i^G - P_i^C = \sum_{k=1}^N |V_k| |V_i| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.17)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^G - Q_i^C = \sum_{k=1}^N |V_k| |V_i| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.18)$$

As equações (2.17) e (2.18) são funções matemáticas, representando os resíduos (*mismatches*) de potências ativas e reativas nas barras da SEP [3]. Neste método também deve ser considerado os tipos de barras PV, PQ e referência, uma vez que o sistema das equações que está sendo resolvido é o mesmo. Portanto, as seguintes considerações podem ser feitas [3]: O valor da tensão em módulo e ângulo são conhecidos na barra de referência. Por esta razão, não é necessária nenhuma equação para essa barra; nas barras do tipo PQ, tanto o módulo como o ângulo da tensão são desconhecidos. Portanto, são necessárias as equações de mismatches de potência ativa e reativa (ΔP_i e ΔQ_i); no caso nas barras do tipo PV, especifica-se a potência ativa da barra e o módulo de tensão, então, as incógnitas são o ângulo de tensão da barra e a potência reativa. A equação da potência ativa é a mesma da barra do tipo PQ, sendo que a segunda equação a restrição ao módulo da tensão da barra, que deve permanecer constante.

Neste caso em que o sistema de equações a ser resolvido possui o vetor $[g]$, que engloba todas as equações do fluxo de potência, esse vetor é definido pelo vetor das equações de potência ativa para todas as barras da SEP ($[\Delta P]$), exceto a barra de referência. E pelo vetor das equações de potência reativa, escritas por todas as barras PQ do SEP ($[\Delta Q]$) [3]:

$$[g] = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

O vetor $[x]$ contendo todas as incógnitas do SEP pode ser definido pelo vetor dos ângulos de tensões em todas as barras ($[\theta]$), exceto da barra de referência. E pelo vetor dos módulos de tensão para todas as barras do tipo PQ ($[|V|]$) [3].

$$[x] = \begin{bmatrix} \theta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

A matriz jacobiana é composta na representação de quatro submatrizes:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial |V|} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Sendo que $\Delta P = P^{esp} - P(V, \theta)$ e $\Delta Q = Q^{esp} - Q(V, \theta)$, lembrando que P^{esp} e Q^{esp} são constantes, a matriz jacobiana pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$J(x^k) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Onde:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial P}{\partial \theta}; \\ N &= \frac{\partial P}{\partial |V|}; \\ M &= \frac{\partial Q}{\partial \theta}; \\ L &= \frac{\partial Q}{\partial |V|}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

As componentes das submatrizes jacobianas H, N, M e L são dadas por:

$$H = \begin{cases} H_{ki} = \frac{\partial P_k}{\partial Q_i} = V_i V_k (G_{ki} \sin \theta_{ki} - B_{ki} \cos \theta_{ki}) \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial Q_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{i \in k} V_i (G_{ki} \sin \theta_{ki} - B_{ki} \cos \theta_{ki}) \end{cases} \quad (2.24)$$

$$N = \begin{cases} N_{ki} = \frac{\partial P_k}{\partial V_i} = V_k (G_{ki} \cos \theta_{ki} + B_{ki} \sin \theta_{ki}) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{i \in k} V_i (G_{ki} \cos \theta_{ki} + B_{ki} \sin \theta_{ki}) \end{cases} \quad (2.25)$$

$$M = \begin{cases} M_{ki} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} = -V_k V_i (G_{ki} \cos \theta_{ki} + B_{ki} \sin \theta_{ki}) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + \sum_{i \in k} V_k (G_{ki} \cos \theta_{ki} + B_{ki} \sin \theta_{ki}) \end{cases} \quad (2.26)$$

$$L = \begin{cases} N_{ki} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} = V_k (G_{ki} \sin \theta_{ki} - B_{ki} \cos \theta_{ki}) \\ N_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{i \in k} V_i (G_{ki} \sin \theta_{ki} - B_{ki} \cos \theta_{ki}) \end{cases} \quad (2.27)$$

Os elementos H_{kk} , N_{kk} , M_{kk} e L_{kk} podem ser colocados em função das injeções de potência ativa e reativa na barra k , conforme as expressões deduzidas em [3]:

$$\begin{aligned} H_{kk} &= -Q_k - V_k^2 B_{kk} \\ N_{kk} &= V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \\ M_{kk} &= P_k - V_k^2 G_{kk} \\ L_{kk} &= V_k^{-1} (Q_k + V_k^2 B_{kk}) \end{aligned} \quad (2.28)$$

A partir das expressões pode-se concluir que, se $Y_{ki} = G_{ki} + jB_{ki}$ for nulo, então os elementos H_{ki} , N_{ki} , M_{ki} e L_{ki} também serão nulos [3]. O método de Newton-Raphson aplicado à resolução do subsistema é descrito a seguir:

1. Fazer $v = 0$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ($\theta = \theta^0$), e as magnitudes das tensões das barras PQ ($V = V^0$).
2. Calcular $P_k = (V, \theta)$ para as barras PQ e PV, e $Q_k = (V, \theta)$ para as barras PQ, e determinar os resíduos ΔP_k e ΔQ_k .
3. Testar convergência: se $\text{Max}\{|\Delta P_k|\} \leq \varepsilon_P$ e $\text{Max}\{|\Delta Q_k|\} \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (V, θ) ; caso contrário passar para 4.
4. Calcular a matriz jacobiana.

$$J(V, \theta) = \begin{bmatrix} H(V, \theta) & N(V, \theta) \\ M(V, \theta) & L(V, \theta) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

5. Determinar a nova solução (V^{k+1}, θ^{k+1}) :

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \quad (2.30)$$

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \quad (2.31)$$

Sendo $\Delta \theta^k$ e ΔV^k determinados resolvendo-se o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(V^k, \theta^k) \\ \Delta Q(V^k, \theta^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V^k, \theta^k) & N(V^k, \theta^k) \\ M(V^k, \theta^k) & L(V^k, \theta^k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\Delta P(V^k, \theta^k) = H(V^k, \theta^k) \Delta \theta^k + N(V^k, \theta^k) \Delta V^k \quad (2.33)$$

$$\Delta Q(V^k, \theta^k) = M(V^k, \theta^k) \Delta \theta^k + L(V^k, \theta^k) \Delta V^k$$

6. Fazer $k + 1 \rightarrow k$ e voltar para o passo 2.

O método de Newton-Raphson apresenta as seguintes características: Convergência rápida, mas sensível às condições iniciais das tensões, podendo levar a divergência; a convergência não é sensível a outros fatores que podem causar problemas a outros métodos, como a escolha da barra de referência, elementos *shunt* e presença de capacitores série; necessita formar e inverter a matriz jacobiana a cada iteração; no método de Newton-Raphson tipicamente há três a cinco iterações, para tolerâncias de 0,1 a 0,001 MW, para uma base de 100 MVA; os gastos em memória de Newton-Raphson são proporcionais ao número de barras do SEP; e a programação do método é mais elaborada, em comparação com o método de Gauss-Seidel.

2.3 Método Desacoplado

Como já demonstrado, as submatrizes H , N , M e L são indicadores da sensibilidade entre as potências ativa e reativa e as tensões (módulo e ângulo). Observando as submatrizes, nota-se que as sensibilidades entre $[P$ e $\theta]$ e entre $[Q$ e $V]$ são maiores que aquelas entre $[P$ e $V]$ e $[Q$ e $\theta]$. Dessa forma, existe um acoplamento forte quando a sensibilidade é grande, e um acoplamento fraco, ou desacoplamento, em caso contrário. Este

tipo de relação em geral é verificado para redes de transmissão em extra-alta tensão (EAT; valor acima de 230 kV) e ultra alta tensão (UAT; valor acima de 750 kV) [3].

Com base nas afirmações anteriores, chega-se ao método de Newton desacoplado com as submatrizes jacobianas N e M sendo feitas iguais a zero, já que seus valores bem menores que os de H e L . A introdução de aproximações na matriz jacobiana altera o processo de convergência, isto é, muda o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução, mas não altera a solução final, pois o problema resolvido permanece o mesmo [$\Delta P(V, \theta) = 0$; $\Delta Q(V, \theta) = 0$] [3].

O algoritmo básico desenvolvido do método de Newton pode ser colocado na seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta P(V^k, \theta^k) = H(V^k, \theta^k) \Delta \theta^k \\ \theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \end{cases} \quad (2.34)$$

$$\begin{cases} \Delta Q(V^k, \theta^k) = L(V^k, \theta^k) \Delta V^k \\ V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \end{cases} \quad (2.35)$$

O esquema de solução alternado dado em (4.42) e (4.43), constitui a meia iteração ativa e conseqüentemente reativa, através das quais, é feita a atualização dos ângulos de fase das tensões em relação aos *mismatches* de potência ativa, e a atualização das magnitudes das tensões em relação aos *mismatches* de potência reativa. Portanto, tem-se uma atualização de variáveis de estado a cada iteração. Essas aproximações alteram o processo de convergência, com diferentes caminhos percorridos entre o ponto final e a solução, mas sem alterar a solução final, que depende das tolerâncias ε_P e ε_Q [3].

As equações do método de Newton desacoplado podem, finalmente, ser colocadas na forma:

$$\begin{aligned} \Delta P/V &= H' \Delta \theta \\ \Delta Q/V &= L' \Delta V \end{aligned} \quad (2.36)$$

2.4 Método Desacoplado Rápido

O método desacoplado rápido tem o mesmo algoritmo básico que o método de Newton desacoplado. Seja V a matriz diagonal cujos elementos não-nulos são os módulos das tensões das barras PQ do sistema. Com a ajuda dessa matriz V , as submatrizes jacobianas H e L podem ser postas na forma [2]:

$$\begin{aligned} H &= VH' \\ L &= VL' \end{aligned} \quad (2.37)$$

Em que as componentes das submatrizes jacobianas H' e L' são dadas por:

$$\begin{aligned} H'_{km} &= V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H'_{kk} &= -Q_k/V_k - V_k B_{kk} \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} L'_{km} &= G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km} \\ L'_{kk} &= Q_k/V_k^2 - B_{kk} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Nas expressões (2.38) e (2.39) podem ser introduzidas as seguintes aproximações [2]: a) $\cos \theta_{km}$ é muito próximo de 1. Esta aproximação é válida em sistemas de transmissão em EAT e UAT, e para sistemas de distribuição; b) B_{km} é, em magnitude, muito maior que $G_{km} \sin \theta_{km}$. Essa aproximação é válida especialmente para EAT e UAT. Em EAT, para a relação B_{km}/G_{km} de ordem 5, e podendo atingir ordem 20 em UAT; c) $B_{kk} V_k^2$ é, em magnitude, muito maior que Q_k . Isso indica que as reatâncias shunt (cargas, reatores, capacitores, shunts de linha) são na maioria dos casos, maiores que as reatâncias série (linhas e transformadores).

Implementando as aproximações a, b e c nas expressões (2.38) e (2.39), obtêm-se [2]:

$$H'_{km} \cong -V_m B_{km} \text{ e } H'_{kk} \cong -V_k B_{kk} \quad (2.40)$$

$$L'_{km} \cong -B_{km} \text{ e } L'_{kk} \cong -B_{kk} \quad (2.41)$$

Considerando ainda que V_m e V_k são aproximadamente unitárias, podem-se aproximar as submatrizes jacobianas H' e L' por [2]:

$$\begin{aligned} H' &\cong B' \\ L' &\cong B'' \end{aligned} \quad (2.42)$$

Em que as matrizes B' e B'' só dependem dos parâmetros da rede (impedâncias e susceptâncias dos ramos e elementos shunt), portanto, ficando independente das variáveis de estado do sistema (tensão e ângulos de fase). Essas duas matrizes são semelhantes à matriz de susceptâncias B , com a diferença que em B' não aparecem as linhas e colunas referentes às barras $V\theta$, e em B'' não aparecem as linhas e colunas referentes às barras PV e às barras $V\theta$ [2].

Portanto, essas matrizes B' e B'' são constantes ao longo do processo iterativo, diminuindo o tempo computacional e quantidade de memória antes usada para calcular e inverter H e L a cada iteração. Daí a denominação para o método desacoplado rápido, cujas equações são obtidas substituindo (2.42) em (2.36), assim [2]:

$$\begin{aligned} \Delta P/V &= B'\Delta\theta \\ \Delta Q/V &= B''\Delta V \end{aligned} \quad (2.43)$$

Essas duas equações entram no lugar das equações $\Delta P = H\Delta\theta$ e $\Delta Q = L\Delta V$.

3. SIMULAÇÕES NO ATPDRAW

3.1 O ATPDraw (Alternative Transient Program)

A ferramenta do ATPDraw é um software dedicado a estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência, servindo de plataforma de estudos na área da engenharia elétrica, com diversas aplicações e vantagens na sua modelagem, podendo ser montados conforme a necessidade do usuário. O ATP utiliza recursos para modelagem de sistemas de transmissão e sistemas de distribuição na mesma plataforma, possibilitando as análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes operações com diferentes configurações, como: Transformadores, linhas de transmissão/distribuição, motores, fontes de tensão e corrente. A formulação do ATP leva em consideração redes polifásicas, utilizando a matriz de admitâncias de barras, com a formulação matemática baseada para elementos com parâmetros distribuídos, no método das características e para parâmetros concentrados na regra da integração trapezoidal [5].

O ATPDraw usufrui da solução fasorial em regime permanente para que as condições iniciais da rede elétrica possam ser determinadas, observando as restrições de potência em um ou mais barramentos. Por analogia, com o programa no estado estacionário dominante das divisões de planejamento do sistema, ou seja, o método do "fluxo de carga" do ATP. Na verdade, é a capacidade de fluxo de carga multifásica (embora em uma forma um tanto restrita) que está disponível para o usuário ATP [6].

Cada nó monofásico de uma rede envolve quatro variáveis reais de interesse: São a injeção de potência real P_k , a injeção reativa Q_k , a magnitude da tensão do fasor V_k e o ângulo da tensão do fasor θ_k . Como há uma equação de restrição de potência ativa e uma de potência reativa para o nó, isso implica que duas dessas variáveis podem ser especificadas de forma bastante arbitrária e as outras duas podem ser determinadas por cálculo numérico [6].

Antes que o fluxo de carga se torne disponível, os usuários do ATP podem aplicar apenas a restrição especial de potência zero (com $P_k = 0$ e $Q_k = 0$, o que significa sem conexão). O controle da potência diferente de zero é apenas indireto e por tentativa e erro. Na nova versão, o usuário pode escolher entre as três restrições a seguir para um nó de origem [6]: a) Especificar P_k e Q_k no nó. O ATP então resolverá para V_k e θ_k . Esta é a modelagem de carga comum do uso do fluxo de carga monofásico convencional no planejamento do sistema; b) especificar P_k e Q_k . O ATP então resolverá para Q_k e θ_k . Esta é a modelagem de gerador comum do uso do fluxo de carga monofásico convencional no planejamento do sistema; c) especificar θ_k e Q_k . O ATP então resolverá para P_k e V_k . Esta terceira e última opção raramente é usada.

3.2 Sistemas Simulados

Todos os circuitos simulados posteriormente, tiveram seus valores gerados View LIS file (F5) do ATP, no qual é possível visualizar em um arquivo de texto os valores simulados de tensão, corrente, fluxo de potência e

perda de potência. Os valores foram transcritos em tabelas, assim, relacionando os principais valores simulados para melhor entendimento dos resultados.

As configurações do ATP nas simulações, foram estabelecidas da seguinte forma:

- Delta T (Intervalo de Tempo da Simulação em Segundos): $5E^{-5}$
- T_{max} (Tempo Máximo da Simulação em Segundos): 0.03
- X_{opt} (Indutâncias em [mH] se zero; caso contrário, indutâncias em [Ohm]): 60
- X_{opt} (Capacitâncias em [mF] se zero; caso contrário, capacitâncias em [mOhm]): 0
- Epsilon (Controla como o ATP relata problemas de singularidade da matriz do sistema. Se zero, o valor padrão EPSILN do arquivo STARTUP do ATP é usado): 0
- Freq (Frequência do sistema em Hz.): 60

O Tmax de simulação não precisa ser grande, pois antes de resolver o estado transitório da rede através da resolução numérica das equações diferenciais, o ATPDraw calcula o estado inicial da rede resolvendo o fluxo de carga.

5.2.1 Sistema de duas barras com uma barra com restrição PV

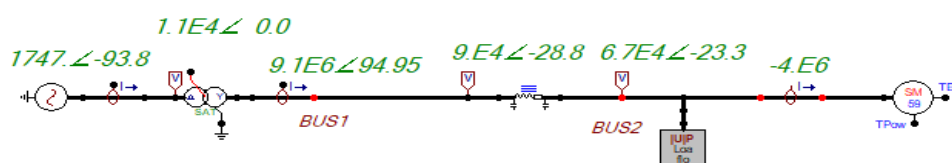


FIGURA 2. Modelo de duas barras com uma barra com restrição PV.

O sistema com duas barras da Figura 2 foi simulado tendo como base os seguintes parâmetros: Fonte de tensão AC trifásica de 13,8 kV L-L e 60Hz; transformador trifásico 13,8/69 kV em delta – estrela aterrado; linha de transmissão modelo PI trifásica de 100 metros (comprimento fictício) com resistência série de 0,2 Ohm/m, reatância série de 1 Ohm/m e a capacitância *shunt* de 0,02 uF/m; máquina síncrona representando a geração de 100 MVA, 69 kV (transformador não representado), demais parâmetros inalterados; bloco de *load flow PV* com restrição aos valores de 67 kV e 4 MW. O circuito simulado na Figura 2 gerou os seguintes resultados no *LIS file* presentes na Tabela 1.

TABELA 1. Sistema Duas Barras PV.

Barra	Fasor de Tensão(kV)	Fasor de Corrente(A)	Fluxo de Potência (MVA)	Perda de Potência (MVA)
X0007A(K)	11,2674∠0°	17474 – 93,78°	3,2 (P) -3,9 (Q)	0,13 (P) 0,79 (Q)
X0007B(K)	11,2674 – 120°	17474 146,21°	3,2 (P) -3,9 (Q)	0,13 (P) 0,79 (Q)
X0007C(K)	11,2674∠120°	17474 26,21°	3,2 (P) -3,9 (Q)	0,13 (P) 0,79 (Q)
BUS1A(K)	89,8254 – 28°	201,734 – 123,78°	-0,78 (P) 9,02 (Q)	0,55 (P) 0,40 (Q)
BUS1B(K)	89,8254 – 148°	201,734 116,21°	-0,78 (P) 9,02 (Q)	0,55 (P) 0,40 (Q)
BUS1C(K)	89,8254∠91,167°	201,734 – 3,78°	-0,78 (P) 9,02 (Q)	0,55 (P) 0,40 (Q)
BUS2A(M)	674 – 23,31°	260,414 – 122,13°	-1,33 (P) -8,6 (Q)	-
BUS2B(M)	674 – 143,31°	260,414 117,86°	-1,33 (P) -8,6 (Q)	-
BUS2C(M)	674∠96,68°	260,414 – 2,13°	-1,33 (P) -8,6 (Q)	-

A tabela 1 comprova o sistema funcionando com uma barra PV, no qual o módulo de tensão na barra 2 é mantido em 67 kV e a potência ativa da barra 2 é mantida em $1,33 \times 3 = 4$ MW de potência. A barra 7 de geração do sistema envia 3,2 MW por fase para a barra do secundário do transformador delta estrela-aterrada e recebe 3,9 MVar por fase de potência reativa do transformador. A barra 2 injeta uma potência ativa de 0,78 MW por fase na barra 1, sendo que esta injeta de volta à barra 2 uma potência reativa de 9,02 MVar por fase. O símbolo “K” se refere ao fato de no referencial de fluxo de potência a barra K estar sendo considerada como barra e origem. Já o símbolo M é usado para considerar a barra como uma barra de destino. Essa nomenclatura é seguida no restante dos resultados e segue o *LIS file* do ATPDraw.

5.2.2 Sistema de duas barras com uma barra com restrição PQ

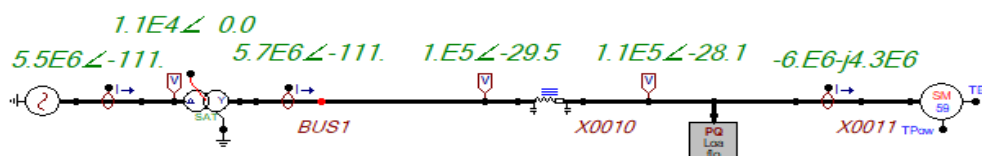


FIGURA 3. Modelo de duas barras com uma barra com restrição PQ.

O sistema de duas barras presente na Figura 3 teve como base os seguintes parâmetros: Fonte de tensão AC trifásica de 13,8 kV L-L e 60Hz; transformador trifásico 13,8/69 kV em delta – estrela aterrado; linha de transmissão modelo PI trifásica (fictícia) de 100 metros com resistência serie de 0,2 Ohm/m, reatância serie de 1 Ohm/m, e capacitância shunt de 0,02 uF/m; máquina síncrona representando a geração de 100 MVA, 69 kV (transformador não representado), demais parâmetros inalterados; bloco de load flow PQ com restrição aos valores de 6 MW e 4 MVar. O circuito simulado na Figura 3 gerou os seguintes valores que foram transcrevidos para a Tabela 2.

TABELA 2. Duas barras PQ.

Barra	Fasor de Tensão(kV)	Fasor de Corrente(A)	Fluxo de Potência(MVA)	Perda de Potência(MVA)
X0005A(K)	11,267∠0°	970,95∠111,23°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,1 (P) 0,03 (Q)
X0005B(K)	11,267∠-120°	970,95∠-8,76°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,1 (P) 0,03 (Q)
X0005C(K)	11,267∠120°	970,95∠-128,76°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,1 (P) 0,03 (Q)
BUS1A(K)	101,929∠-29,49°	112,11∠81,24°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,059 (P) -3,9 (Q)
BUS1B(K)	101,929∠-149,49°	112,11∠-38,76°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,059 (P) -3,9 (Q)
BUS1C(K)	101,929∠90,50°	112,11∠-158,7°	-1,98 (P) -5,1 (Q)	0,059 (P) -3,9 (Q)
BUS2A(M)	109,398∠-28,108°	46,17∠117,43°	-2 (P) -4 (Q)	-
BUS2B(M)	109,398∠-148,10°	46,17∠-2,56°	-2 (P) -4 (Q)	-
BUS2C(M)	109,398∠91,89°	46,17∠-122,56°	-2 (P) -4 (Q)	-

A tabela 2 comprova o sistema funcionando com uma barra PQ, no qual o módulo de tensão na barra 2 é calculado em 109,39 kV e a potência ativa da barra 2 é mantida em 2 MW de potência em cada fase. A potência reativa é mantida em 4 MVar em cada fase, comprovando assim o funcionamento do bloco de restrição de potência PQ do fluxo de carga. A barra 5 de geração do sistema recebe 1,98 MW por fase do transformador delta estrela-aterrada e recebe 5,1 MVar por fase de potência reativa do transformador. Já a barra 1 recebe da barra 2, 2 MW por fase e 4 MVar por fase de potência reativa.

5.2.3 Sistema IEEE Quatro Barras

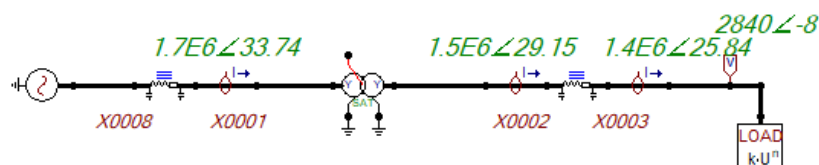


FIGURA 4. Circuito do sistema IEEE quatro barras.

O sistema com quatro barras presente na Figura 4 teve como base os seguintes parâmetros: Fonte de tensão AC trifásica de 10,2 kV Peak L-G e 60Hz; transformador trifásico 12,47/4,16 kV em estrela aterrado – estrela aterrado; linha de distribuição 1 com modelo PI trifásica com Resistência série e Reatância Indutiva série, respectivamente, de:

$$\begin{bmatrix} 0,1733 & 0,0591 & 0,0581 \\ 0,0591 & 0,1767 & 0,0598 \\ 0,0581 & 0,0598 & 0,1748 \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} 0,4083 & 0,19 & 0,1458 \\ 0,19 & 0,397 & 0,1605 \\ 0,0581 & 0,1605 & 0,4034 \end{bmatrix} (\Omega/\text{m})$$

A capacitância shunt de 0 Ohm/m, em X0008 à X0001, ambas medindo 1 metro (toda a impedância é colocada para a distância de 1m); para a linha de distribuição 2 de X0002 à X0003, tem-se para a Resistência série e Reatância Indutiva série, respectivamente, de:

$$\begin{bmatrix} 0,2167 & 0,0738 & 0,0727 \\ 0,0738 & 0,2209 & 0,0748 \\ 0,0727 & 0,0748 & 0,2185 \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} 0,5104 & 0,2375 & 0,1822 \\ 0,2375 & 0,4963 & 0,2006 \\ 0,1822 & 0,2006 & 0,5043 \end{bmatrix} (\Omega/\text{m})$$

A capacitância shunt de 0 Ohm/m, em X0008 à X0001, ambas medindo 1 metro (toda a impedância é colocada para a distância de 1m); bloco de carga PQ com restrição aos valores de 4,16 kV; 5,4 MW; 2,615 MVar e frequência em 60 Hz. O circuito simulado na Figura 4 gerou os seguintes valores que foram transcritos para a Tabela 3.

TABELA 3. IEEE quatro barras.

Barra	Fasor de Tensão(kV)	Fasor de Corrente(A)	Fluxo de Potência(VA)	Perda de Potência(VA)
X0008A(K)	10.181∠0°	328.5∠-33.9°	1387222 (P) 934023 (Q)	8233.07 (P) 12807 (Q)
X0008B(K)	10.181∠-120°	336.14∠-154.4°	1412129 (P) 966607 (Q)	5322.6 (P) 12489 (Q)
X0008C(K)	10.181∠120°	332.8∠85.1°	1389596 (P) 969183 (Q)	5670.9 (P) 14016.6 (Q)
X0001A(M)	1.009∠-0.2°	328.5∠146.04°	1378989 (P) -921215 (Q)	-
X0001B(M)	1.0113∠-120.2°	336.14∠25.6°	1406806 (P) -954117 (Q)	-
X0001C(M)	1.0105∠119.7°	332.7∠-94.8°	1383925 (P) -955167 (Q)	-
X0002A(K)	3141.8∠-4.8°	984.7∠-33.9°	1350974 (P) 753411 (Q)	92527.8 (P) 143939 (Q)
X0002B(K)	3140.5∠-124.9°	1007.6∠-154.3°	1377475 (P) 778414 (Q)	59788.36 (P) 140251.42 (Q)
X0002C(K)	3137.8∠115.1°	997.5∠85°	1355175 (P) 78952 (Q)	63650 (P) 157460 (Q)
X0003A(M)	2839.9∠-8.11°	984.7∠146°	-1258446 (P) -609472 (Q)	-
X0003B(M)	2906∠-128.5°	1007.6∠25.6°	-1317686 (P) -638162 (Q)	-
X0003C(M)	2877∠110.9°	997.5∠-94.8°	-1291524 (P) -625492 (Q)	-

Observa-se a partir da tabela 3 o cálculo do fluxo de carga trifásico a partir da modelagem interna do ATPDraw, na qual pode-se observar as tensões trifásicas desequilibradas na barra X0003, o que comprova a influência das impedâncias mútuas no sistema de distribuição. Pode-se ver que em relação aos dois casos analisados anteriormente, as tensões são desequilibradas, assim como os fluxos de potência.

4. CONCLUSÃO

O trabalho proposto utilizou o ATPDraw como ferramenta para a análise do fluxo de carga em diferentes sistemas: Duas Barras com uma barra PV, Duas Barras com uma barra PQ e IEEE Quatro Barras. Com os valores de tensão, corrente, fluxo de potência e perdas, apresentados pelo trabalho, foram obtidas as seguintes observações, considerando o sistema como equilibrado: Nos sistemas de duas barras PV e PQ, os resultados das simulações presentes nas Tabelas 1 e 2 mostram que os valores de ângulo e módulo da tensão, ângulo e módulo de corrente, fluxo de potência e perdas de potência, são praticamente iguais nas três fases, o que caracteriza a operação dos sistemas de transmissão como equilibrados. Já no sistema IEEE de quatro barras, pode-se observar a operação desequilibrada do sistema, através da observação das tensões desiguais nas três fases do sistema e das correntes também desiguais na Tabela 3. A operação dos sistemas de distribuição pode ser verificada no ATPDraw através da simulação de impedâncias mútuas diferentes entre as fases a partir das matrizes de resistência e reatância indutiva série trifásicas. Percebe-se que ao usar o ATPDraw como ferramenta do estudo do fluxo de potência, o programa torna-se um facilitador na construção dos principais elementos de estudo, como, linhas de transmissão/distribuição, fontes de geração de energia, transformadores, máquinas síncronas, entre outros elementos. Dessa forma, para estudos futuros de fluxo de potência, e outros estudo da área, o ATPDraw é uma boa ferramenta para o aprofundamento dos presentes e futuros profissionais de engenharia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] JÚNIOR, Luiz Cera Zanetta. 2005. Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência. 1. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- [2] MONTICELLI, Alcir José, A. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Edgard Blucher LTDA, São Paulo, 1983.
- [3] MOURA, Ailson P. de, Moura, Adriano Aron F. de e Rocha, Ednardo P. da. 2018. Engenharia de Sistemas de Potência: Análise de Fluxo de Carga em Sistemas de Potência. São Paulo/SP : Artliber, 2018.
- [4] MOURA, Ailson P. de, Moura, Adriano Aron F. de e Rocha, Ednardo P. da. 2020. Engenharia de Sistemas de Potência: Modelos Computacionais para Fluxo de Carga trifásica, Fluxo de potência continuado e Equivalentes externos. Fortaleza/CE : Imprensa Universitária UFC , 2020.
- [5] H. K. HØIDALEN. ATPDraw™ : The graphical preprocessor to ATP, 2021. Página inicial. Disponível em: <http://www.atpdraw.net/index.php>. Acesso em: 30 de out. de 2021.
- [6] Canadian/American EMTP User Group (1996). ATP Rule Book. Portland: Can/Am EMTP User Group.



Artigo

Estudo da interação entre nanoelementos magnéticos dispostos horizontalmente

Thaysa Danielly Soares da Mota^[1], Idalmir de Souza Queiroz Júnior^[2] e Marcos Vinícius de Mendonça Ferreira^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; thaysa_danielly@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; idalmir@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; vinicius.mendonca@ufersa.edu.br

Recebido: 02/02/2022;

Aceito: 29/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: O presente trabalho desempenhou um estudo sobre a interação entre nanoelementos magnéticos acoplados paralelamente ao eixo x, alterando suas dimensões e espaçamento, apresentando resultados para sua aplicação na construção de portas lógicas magnéticas, utilizando os materiais Ferro, Cobalto, Níquel e Permalloy. O principal objetivo é encontrar, entre os materiais escolhidos para o trabalho, aquele que possua uma melhor resposta de reversão de sua magnetização, com base nas configurações adotadas e, com isso, mostrar graficamente uma faixa de valores favoráveis para um comportamento de alinhamento ferromagnético, ponto importante para sua aplicação em portas lógicas magnéticas. Obtendo assim um comparativo gráfico entre os elementos abordados, a fim de que se tenha aquele que se configure melhor a sua aplicação. Utilizando-se de um recurso computacional autoconsistente e traçando um perfil de configuração, para cada proporção utilizada, constrói-se uma máscara da disposição desses nanoelementos e após o seu processamento, esplanam-se graficamente seus resultados com os valores obtidos. Concluindo assim, quais os materiais que conseguem, dentro das dimensões utilizadas, reverter sua magnetização e com isso conseguir um alinhamento ferromagnético, fornecendo a faixa de valores mais viáveis para essa característica.

Palavras-chave: Nanotecnologia, Nanoelementos, Spintrônica, Portas Lógicas Magnéticas.

Abstract: The present work carried out a study on the interaction between magnetic nanoelements coupled parallel to the x axis, changing their dimensions and spacing, results for their application in the construction of magnetic logic gates, using the materials Ferro, Cobalt, Nickel and Permalloy. The main objective is to find, among the materials chosen for the work, the one that has the best response for reversing its magnetization, based on the adopted configurations and, with this, to show graphically a range of favorable values for a ferromagnetic alignment behavior, important point for its application in magnetic logic gates. Thus obtaining a graphic comparison between the elements covered, in order to have the one that best fits your application. Using a self-consistent computational resource and drawing a configuration profile, for each proportion used, a mask is built of the disposition of these nanoelements and after their processing, their results are graphically expanded with the values obtained. Concluding, which materials can, within the dimensions used, reverse their magnetization and thereby achieve ferromagnetic alignment, providing the most viable range of values for this characteristic.

Key-words: Nanotechnology. Nanoelements. Spintronics. Magnetic Logic Gates.

1. INTRODUÇÃO

A busca por inovações tecnológicas que proporcionem respostas mais rápidas em sistemas já existentes e que incrementem sua capacidade de armazenamento de dados é o cenário ideal para a inserção de estudos envolvendo materiais magnéticos em escala reduzida. Tais materiais, além de serem procurados por possuírem menor tamanho e, por isso, ocuparem pouco espaço no equipamento requerido, também dispõem da possibilidade de serem controlados e projetados previamente, adequando seu funcionamento de acordo com as intenções do profissional que o está programando. Uma das primeiras grandes descobertas na área do

magnetismo foi o efeito da magnetorresistência gigante, que é um decrescimento da resistência elétrica devido à aplicação de um campo magnético externo. Essa propriedade foi observada em estruturas de filmes finos compostos por multicamadas de metal ferromagnético e não-magnético [1].

A spintrônica, ou eletrônica de spins, é uma área do estudo do nanomagnetismo que trata de estruturas magnéticas em escalas nanométricas, que possuem diversas funcionalidades. O termo “spin” significa rodar, traduzido da língua inglesa, e passou a ser utilizado pelos físicos Otto Stern e Walther Gerlach, em 1921, quando estes descobriram através de experimentos, que os elétrons podiam apresentar um movimento próprio de rotação [2]. Para a eletrônica, a manipulação dos spins do elétron e os efeitos que isso traz, abre campo para diversas aplicações, principalmente no que tange ao armazenamento de informações. O surgimento do efeito da Magnetoresistência Gigante direcionou o estudo e fabricação de materiais que evoluíssem o potencial de armazenamento de dados e processamento de informações, como as memórias de acesso aleatório magnéticas, que são memórias que utilizam células magnéticas para armazenar dados, porém a problemática em questão está no estudo da alteração causada no efeito de tamanho finito de nanoelementos nas configurações dos estados magnéticos [3].

O presente artigo tem por finalidade estudar os conceitos que regem a spintrônica, bem como a fundamentação teórica que envolve a interação existente entre nanoelementos magnéticos elíptico acoplados horizontalmente e também observar e analisar as mudanças que ocorrem em alterar algumas de suas características, visto que no estudo de propriedades em escala nanométrica, o efeito em alterar o diâmetro e a espessura é relevante, pois quanto mais o tamanho se aproxima do tamanho crítico, mais o modo de domínio único se torna predominante [4], dessa maneira se afere os resultados observando os gráficos da curva de magnetização na configuração dos momentos magnéticos e do mapa de campo dipolar, objetivando resultados de um alinhamento ferromagnético, que são resultados favoráveis à utilização desses elementos em portas lógicas nanomagnéticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método Autoconsistente

O recurso computacional autoconsistente utilizado foi desenvolvido em linguagem de programação Fortran pelo Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos da UFRN. Nesse código, cada célula de simulação possui um campo efetivo sobre ela que é dado pela soma vetorial dos demais campos apresentados anteriormente. O objetivo é ter todos os momentos de dipolo magnético alinhados com o campo magnético médio local ou o mais próximo disso para que, dessa forma, tenhamos o menor torque magnético possível. Assim sendo, o referido método se apresenta da seguinte maneira:

1. Inicia-se o sistema com uma determinada configuração magnética;
2. Calcula-se o campo magnético efetivo local sobre cada célula de simulação;
3. Compara-se o valor calculado para a configuração magnética obtida pela equação do torque magnético em relação a uma dada tolerância;
4. Se o valor do torque magnético for menor ou igual a tolerância, aceitamos a configuração;
5. Se o torque magnético for maior que a tolerância, os momentos são alinhados com o campo magnético efetivo local e retornamos ao segundo passo;
6. O cálculo é repetido até que o torque magnético seja menor que a tolerância ou até que o número de interações chegue ao seu máximo;

2.2 Células de Simulação

Para uma compreensão melhor sobre a célula de simulação, utilize-se um material cristalino do tipo cúbico de corpo centrado, de volume d^3 com a quantidade de átomos dados pela Equação 1:

$$N = n \left(\frac{d}{a_0} \right)^3 \quad (1)$$

Onde a_0 é o parâmetro de rede do material, n é número de átomos por célula unitária e a fração nos informa o número de células. Com isso, é possível o estudo das configurações magnéticas, na ordem de centenas de nanômetros, dos materiais utilizados [5], para a nossa abordagem utilizamos uma parte do volume, denominada célula de simulação, onde os momentos magnéticos estarão quase alinhados entre si e o comprimento da célula de simulação seja menor que o comprimento de troca do material magnético, para que essa interação de troca se sobre saia sobre as demais [6]. Esse comprimento de troca dado pela Equação 2:

$$l_{EXCH} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}} \quad (2)$$

A é a rigidez magnética do material, M_S é a magnetização de saturação e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

2.3 Portas Lógicas Magnéticas

A invenção do transistor trouxe uma significativa contribuição para o avanço na produção de equipamentos eletrônicos. Com isso ela mudou a maneira que se fabricava dispositivos eletrônicos e, dessa forma contribuiu com o crescimento na indústria de computadores. Estudos recentes mostram a utilização de corrente elétrica e dos transistores para a realização de operações lógicas simples ou complexas. Um desses relaciona a utilização de funções básicas como AND, OR e NOT, utilizando materiais magnéticos em substituição ao dito anteriormente [7]. Quando um dispositivo ou circuito funciona a partir de um ou mais sinais de entrada e fornece apenas uma saída, denomina-se porta lógica e essa saída dependerá da função lógica empregada no dispositivo. Esses dispositivos devem diferenciar os diferentes sinais de entrada segundo a álgebra Booleana que utiliza um sistema binário com os valores 0 e 1. Em relação aos materiais magnéticos, essa distinção dos sinais lógicos de entrada pode ser feito com a direção da magnetização resultante do material ou o sentido do campo magnético externo [8]. Dessa maneira, passou-se a utilizar nanoelementos magnéticos nas estruturas das portas lógicas, onde esse interage com o campo dipolar [9]. Na Figura 1 temos uma imagem em alta resolução dos estados de magnetização de quatro imãs, onde cada conjunto possui três imãs de entrada e um imã de saída, por microscopia de força magnética (MFM), onde vemos o sinal lógico de saída para cada conjunto de sinais lógicos de entrada expostos.

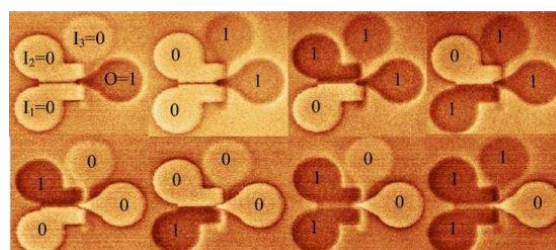


Figura 1. imagens de MFM. Estados de magnetização para todas as configurações de entrada (temporariamente após um ciclo de clock) [10].

Na Tabela 1, 2 e 3 são apresentadas as tabelas verdade das funções lógicas AND, OR e NOT, respectivamente.

Tabela 1. Tabela Verdade da função lógica AND (Autoria Própria).

Entrada A	Entrada B	Saída C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 2. Tabela Verdade da função lógica OR (Autoria Própria).

Entrada A	Entrada B	Saída C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabela 3. Tabela Verdade da função lógica NOT (Autoria Própria).

Entrada A	Saída C
0	1
1	0

2.4 Autômato Celular Quântico

O Autômato Celular Quântico (Quantum CellularAutomata – QCA) é definido como um modelo computacional que usa acoplamento local entre células idênticas biestáveis que são construídas com a finalidade de executar funções lógicas binárias. Essas células podem ser um conjunto de nanoelementos ferromagnético. Da mesma maneira que em um transistor, em microeletrônica, utiliza-se da propriedade de carga do elétron para o processamento ou armazenamento de dados. Para a construção de portas lógicas magnéticas feitas com esse conjunto de nanoelementos, utiliza-se da propriedade de spin para a mesma finalidade. Logo, um grupo de elementos que possuam a magnetização na mesma direção recebem a codificação Estado 1 e os que possuem outra magnetização, codificam-se como Estado 0 [11].

Dependendo de como esses nanoelementos estiverem dispostos, tem-se um determinado alinhamento paralelo ou antiparalelo, como pode ser visualizado na Figura 2.

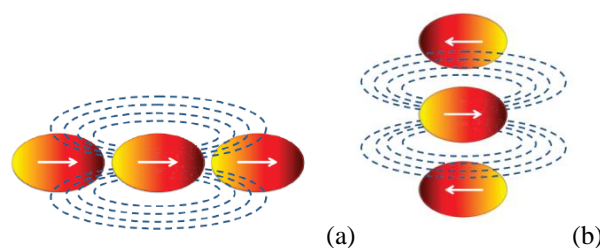


Figura 2. Representação gráfica do alinhamento paralelo (a) e antiparalelo (b) entre nanoelementos ferromagnéticos elípticos [11].

Todo esse processo nos remete a ter uma ideia mais clara de como se comporta uma porta lógica magnética, ou seja, para quais dimensões de diâmetro, raio, espaçamentos e altura, dependendo das configurações de alinhamento, os nanoelementos irão sofrer a ação do campo dipolar para terem um alinhamento ferromagnético ou antiferromagnético. Dessa maneira, são mostrados os resultados obtidos a partir da simulação de nanoelementos elípticos dispostos horizontalmente, de diferentes materiais, ocorrendo variação nas suas dimensões de altura e, principalmente, espaçamento, a fim de trazeremos as configurações adotadas que melhor se enquadram na questão do alinhamento ferromagnético para a sua utilização em portas lógicas magnéticas.

3. RESULTADOS

Inicia-se o trabalho realizando-se as simulações para nanoelementos esféricos acoplados de Cobalto (Co), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e Permalloy (Py), com altura variando em $h = 9$ nm, 12 nm, 15 nm e 18 nm e diâmetros fixos em $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm. Para cada configuração de altura e também para cada tipo de material, variou-se o espaçamento do mesmo em $E = 9$ nm, 12 nm e 15 nm. A Figura 3 mostra a disposição esquemática desses nanoelementos.

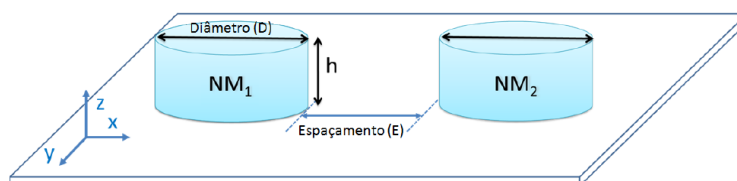


Figura 3. Representação da disposição da configuração dos nanoelementos acoplados no plano alinhado paralelamente ao eixo x [6].

Aplicando um campo externo de 10 kOe, não se obteve bons resultados com as configurações utilizadas, para que quaisquer um dos materiais utilizados tivesse um comportamento favorável a sua utilização em portas lógicas magnéticas. São apresentados os gráficos de curva de magnetização, mapa de spins e campo dipolar, para as configurações de espaçamento $E = 6$ nm, altura $h = 18$ nm e diâmetro $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm com campo externo de 10 kOe, do Ferro, que conseguiu reversão, e do Cobalto, que não conseguiu reversão. Para as demais configurações de dimensão, não houve reversão da magnetização dos materiais. As Figuras 4a e 4b mostram a curva de magnetização de ambos os materiais utilizados.

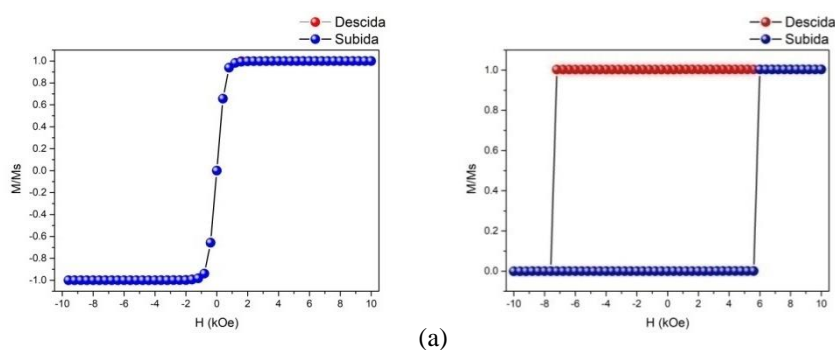


Figura 4. Curva de Magnetização dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, do Ferro (a) e do Cobalto (b) com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

As Figuras 5 e 6 mostram a configuração do Campo Dipolar para o Ferro e Cobalto, respectivamente. Atente-se ao fato de que, quanto ao passo que o Ferro consegue reverter completamente sua magnetização, o Cobalto não consegue reverter. Um ponto importante diz respeito à anisotropia desses materiais, enquanto o Ferro possui uma estrutura cristalina cúbica o Cobalto, por sua vez, possui uma estrutura hexagonal compacto, o que faz com que sua anisotropia magnetocristalina atue diferentemente nos materiais expostos a uma mesma interferência de campo magnético externo.

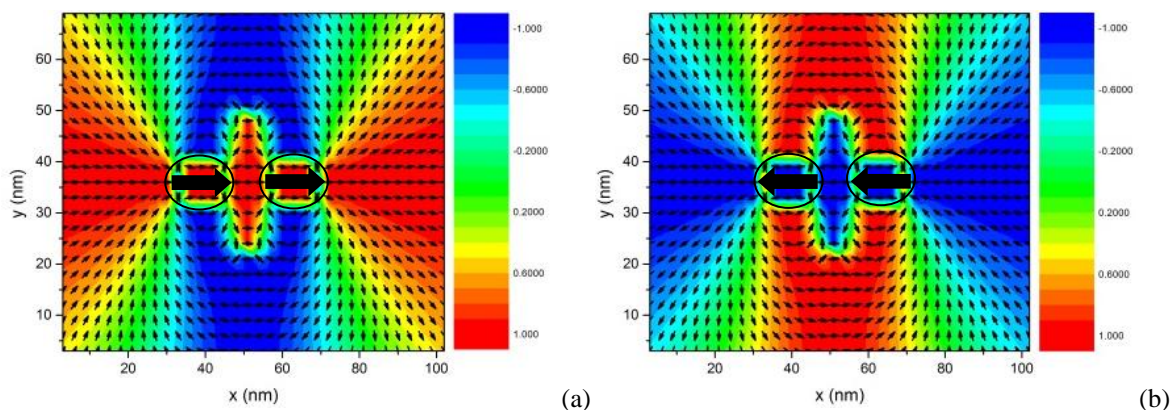


Figura 5. Campo Dipolar para o ponto de saturação (a) e para o ponto de remanência (b). Os gráficos são referentes a dois nano elementos acoplados paralelamente ao eixo x, de Ferro, com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

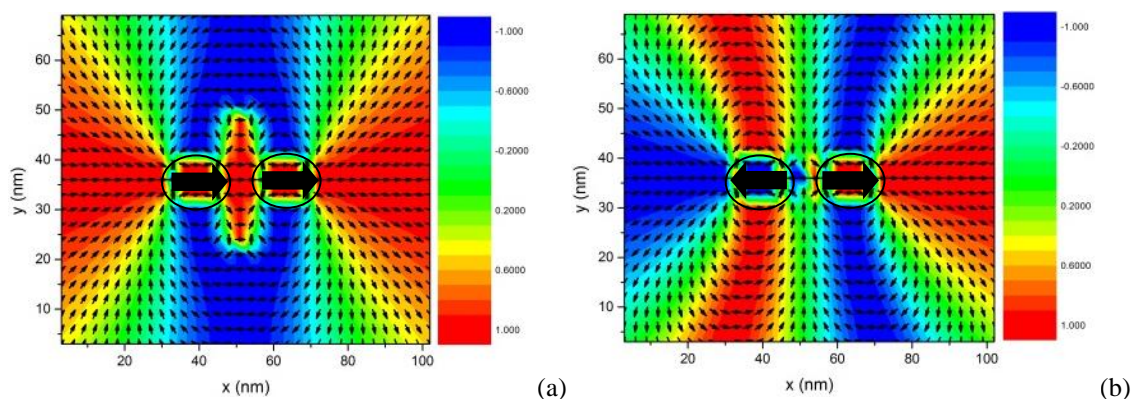


Figura 6. Campo Dipolar para o ponto de saturação (a) e para o ponto de remanência (b). Os gráficos são referentes a dois nano elementos acoplados paralelamente ao eixo x, de Cobalto, com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

Ao obter melhores resultados, optou-se pela mudança nas dimensões dos nanoelementos e em aumentar o valor do campo externo aplicado que antes era de 10 kOe e passou a ser 50 kOe. As novas dimensões adotadas são: Altura variando em $h = 15$ nm, 18 nm e 21 nm, o espaçamento variando em $E = 6$ nm, 9 nm e 12 nm e os valores de diâmetros permaneceram os mesmos $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm. Pode-se ver, nas Figuras 7, 8 e 9 a curva de magnetização, mapa de spins e mapa de campo dipolar do Ferro, Cobalto, Permalloy e do Níquel e o gráfico de reversão criado a partir dos resultados obtidos com as simulações realizadas.

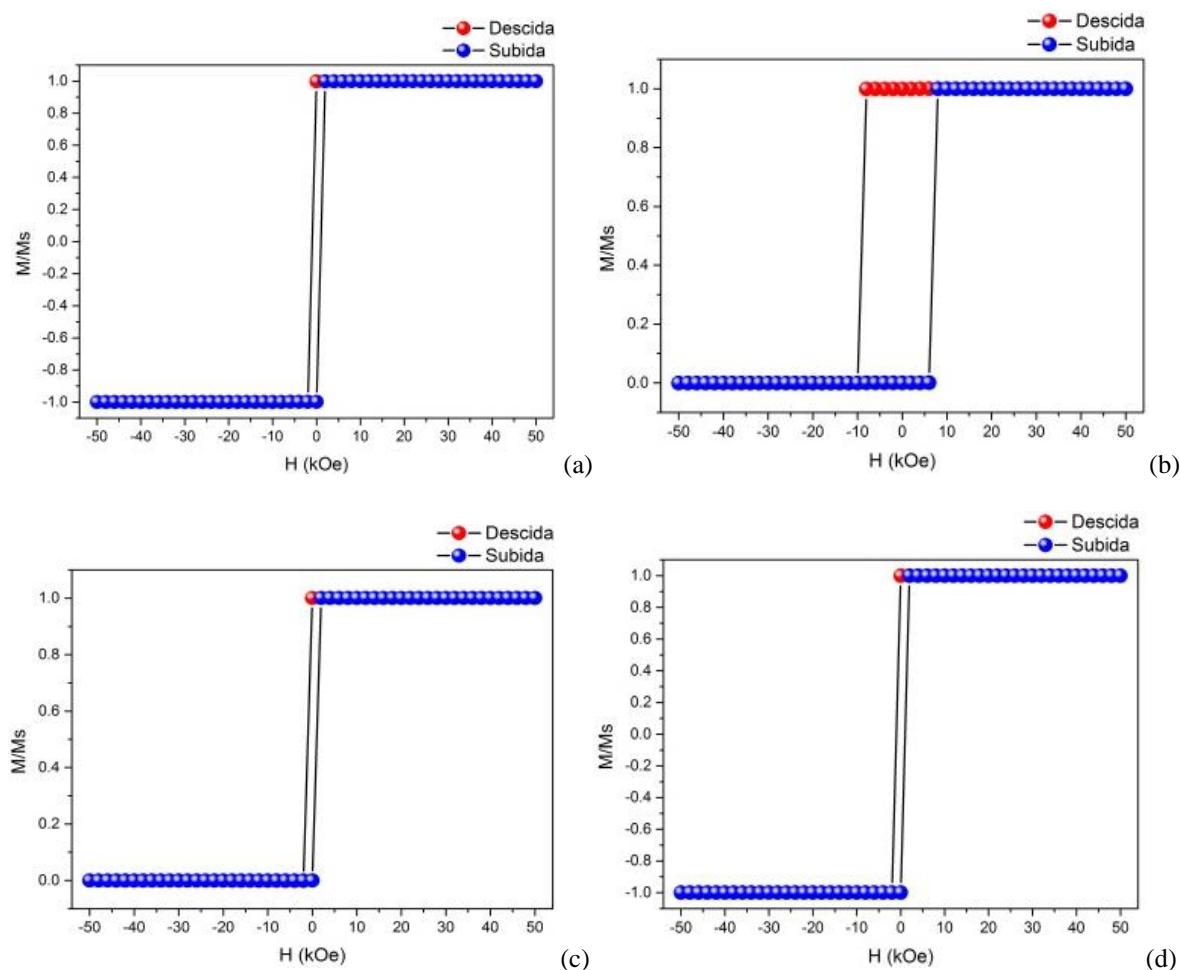


Figura 7. Curva de Magnetização dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, (a) do Ferro, (b) Cobalto (c), Níquel e (d) Permalloy para as dimensões de espaçamento $E = 6$ nm, altura $H = 15$ nm e diâmetro $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm.

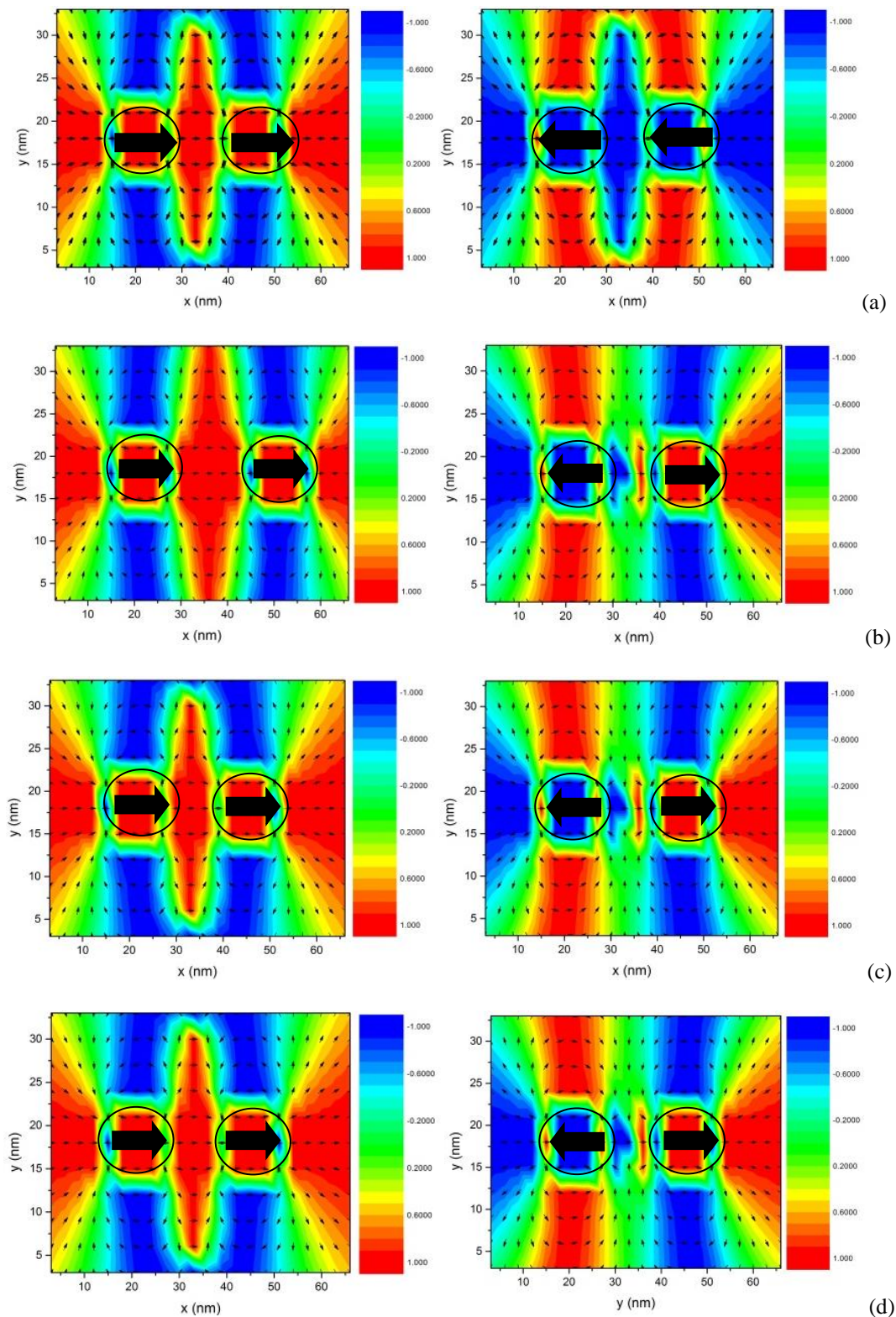


Figura 8. Mapa de Campo Dipolar para o ponto de saturação e remanência, respectivamente, dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, dos materiais (a) Ferro, (b) Cobalto, (c) Níquel e (d) Permalloy, nas mesmas dimensões utilizadas na Figura 7.

Com essas alterações, conseguiu-se uma favorável reversão da magnetização dos materiais e, com isso, para uma melhor visualização e comparativo, construiu-se um gráfico, para cada material utilizado, do

comportamento do mesmo em função da altura e espaçamento utilizados nas simulações. Os resultados gráficos estão expostos nas Figuras 9a, 9b, 9c e 9d.

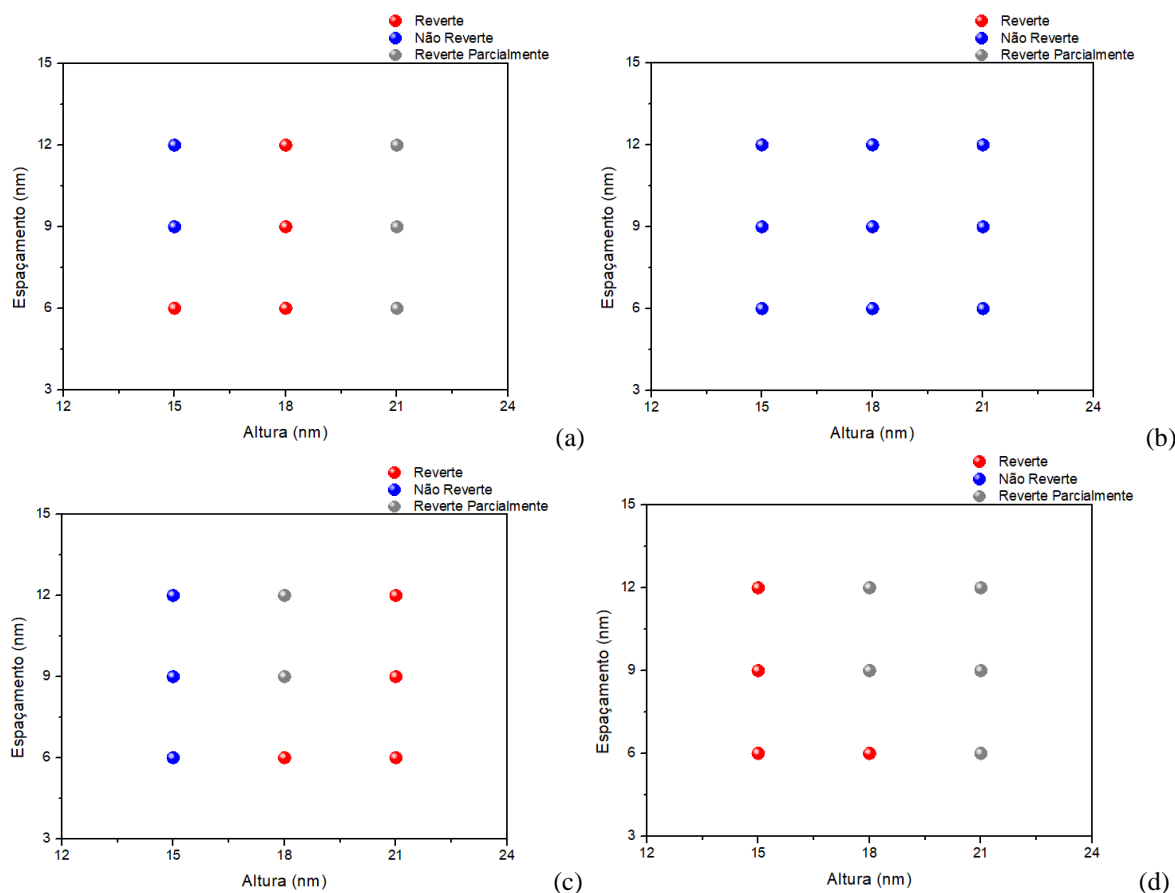


Figura 9. Gráfico da Reversão da Magnetização do (a) Ferro, (b) Cobalto, (c) Níquel e (d) Permalloy.

4. CONCLUSÃO

Nesse presente trabalho, desenvolveu-se um estudo acerca da simulação micromagnética de nanoelementos elípticos de Ferro, Cobalto, Níquel e Permalloy acoplados magneticamente via campo dipolar. Para aplicação de campo magnético externo, optou-se pela orientação paralela ao eixo x, onde a mesma não foi modificada, bem como sua anisotropia. Configurou-se a programação computacional utilizada para as dimensões do nanoelemento escolhidas, como também para o valor do campo externo aplicado e da disposição gráfica dos nanoelementos. Com base nos estudos realizados por [6], há uma dependência de reversão na direção da magnetização relacionada à altura e ao espaçamento adotado, logo, optou-se por variar os valores em ambos os parâmetros, para cada material utilizado, a fim de aprimorar mais a obtenção de resultados favoráveis a um alinhamento ferromagnético e com isso a sua aplicabilidade em portas lógicas magnéticas. Finalizou-se o trabalho mostrando os resultados através da curva de magnetização, mapa de spins e do mapa de campo dipolar. Onde o estudo apresentado, através do mapa de campo dipolar e de spins, mostra se há reversão ou não e para qual configuração de dimensões ela ocorre, construindo assim um gráfico de reversão para cada um dos elementos abordados.

Dessa maneira, finaliza-se que os materiais que possuem melhor comportamento para a reversão de sua magnetização, com base nas dimensões e nível de campo externo adotados, são o Ferro e o Permalloy. O Cobalto não conseguiu reverter sua magnetização para os valores adotados e também sua aplicabilidade não seria viável visto que este oxida facilmente em temperatura ambiente e é muito tóxico ao organismo humano [12], e o Níquel só apresenta essa configuração de reversão para espaçamentos e alturas maiores, ou seja, em nanoelementos mais extensos verticalmente. Abordagens futuras podem ser feitas a fim de se obter faixa de valores favoráveis para a boa utilização do Permalloy, bem como também o estudo da aplicabilidade dos elementos aqui favoráveis na construção das variadas portas lógicas magnéticas.

REFERÊNCIAS

- [1] BAIBICH, M. N. et al. Giantmagneto-resistance of (001) Fe/ (001) Cr magnetic superlattices. *Physical review letter*, v. 61, p. 2472, 1988.
- [2] GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. *O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história*. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n2/a19v33n2.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017, 16:30.
- [3] CHUNG, S.-H. et al. Phase diagram of magnetic nanodisks measured by scanning electron microscopy with polarization analysis. *Physical Review B*, v. 81, n. 2, p. 024410, 2010.
- [4] LIMA, Ana TA; DANTAS, Ana L.; ALMEIDA, N. S. Magnetic properties of crystalline nanoparticles with different sizes and shapes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 425, p. 72-77, 2017.
- [5] REBOUÇAS, G. de O. G. Nucleação de Vórtices e paredes de Domínio em Nanoestruturas Magnéticas. Tese (Doutorado) - UFRN, 2010.
- [6] FERREIRA, Marcos Vinícius de M. Efeito do Acoplamento Dipolar em Nanoelementos. Dissertação (Mestrado) – UERN, 2017.
- [7] EICHWALD, Irina et al. *Majority logic gate for 3D magnetic computing*. *Nanotechnology*. Vol.: 25 Number 33, 2014.
- [8] COWBURN, R. P. Where have all the transistors gone?. *SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON-*, v. 311, n. 5758, p. 183, 2006.
- [9] CARLTON, David B. et al. Simulation studies of nanomagnet-based logic architecture. *letters*, v. 8, n. 12, p. 4173-4178, 2008.
- [10] MARTINS JUNIOR, S. M. S. B. Efeito do campo dipolar em Portas Lógicas Nanomagnéticas. Dissertação (Mestrado) - UERN, 2015.
- [11] MACHADO, T. S. Portas Lógicas Magnéticas. Dissertação (Mestrado) - CBPF, Rio de Janeiro, 2004.
- [12] SARGENTELLI, Vagner; FERREIRA, Antonio P. . Nanopartículas magnéticas: o cobalto. **Eclét. Quím.** , São Paulo, v.35, n. 4, pág. 153-163, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702010000400020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 07 de outubro de 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-46702010000400020> .

Artigo

Potencial de conservação de energia a partir do descarte de módulos fotovoltaicos no Brasil

Antonio Gabriel Fernandes Maia ^[1], Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; maia gabrielmaia@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 14/03/2022;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: Dentre as tecnologias existentes na produção dos módulos fotovoltaicos, existe o predomínio dos módulos de silício mono e policristalinos (c-Si). Estes possuem vida útil limitada em aproximadamente 25 anos, em condições normais. Por possuir metais pesados em sua composição, o descarte inadequado pode causar danos ao meio ambiente. Dentre as formas de descarte dos resíduos dos módulos c-Si, a reciclagem se destaca por permitir a recuperação de parte dos materiais, que não são renováveis, e reutilizá-los. A produção de certos materiais com o uso da reciclagem possibilita redução no consumo de energia elétrica, em comparação com a utilização de matéria prima. Diante disso, o presente trabalho visa estimar o potencial de energia elétrica conservável a partir da reciclagem dos módulos FV c-Si. Além disso é estimado o quanto de energia pode ser evitada com a reciclagem de módulos descartados no Brasil. Os resultados se mostraram satisfatórios e estima-se que cada módulo FV c-Si reciclado pode-se conservar algo em torno de 43 kWh.

Palavras-chave: conservação energética, módulo fotovoltaico de silício cristalino, aproveitamento energético, reciclagem

Abstract: Among the existing technologies in the production of photovoltaic modules, there is a predominance of mono and polycrystalline silicon modules (c-Si). These have a limited lifespan of approximately 25 years under normal conditions. Because it has heavy metals in its composition, improper disposal can cause damage to the environment. Among the ways of disposing of waste from c-Si modules, recycling stands out for allowing the recovery of part of the materials, which are not renewable, and their reuse. The production of certain materials with the use of recycling allows a reduction in the consumption of electric energy, in comparison with the use of raw materials. Therefore, the present work aims to estimate the potential of conserveable electrical energy from the recycling of PV c-Si modules. In addition, it is estimated how much energy can be avoided with the recycling of discarded modules in Brazil. The results were satisfactory and it is estimated that each recycled c-Si PV module can conserve something around 43 kWh.

Key-words: energy conservation, crystalline silicon photovoltaic module, energy use, recycling

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte alternativa renovável de energia que vem se destacando no mundo nos últimos anos, e uma das formas de se utilizar da referida fonte de energia é através dos Sistemas Solares Fotovoltaicos (SFV). Através de tais sistemas é possível produzir energia sem o uso de combustíveis fósseis ou emissão de gases de efeito estufa [1].

Em razão da alta insolação incidente no Brasil que propicia um grande potencial energético, a capacidade instalada de SFV aumenta exponencialmente a cada ano, e as tecnologias existentes utilizadas neste tipo de geração possui predominância de módulos de silício mono e policristalino, com um total de participação 94,5% na produção global FV [2]. Embora possuam muitas vantagens, os módulos fotovoltaicos c-Si tem vida útil limitada. Após 25 anos de geração, os módulos apresentam redução média de 20% em sua geração. No entanto, o desgaste pode ser maior devido às condições ambientais e climáticas em que os módulos estão submetidos.

Considerando que o descarte dos módulos FV ocorrem na mesma proporção das instalações, torna-se importante estudar sobre a destinação dos módulos FV fora de uso, pois torna-se uma preocupação ambiental e energética quanto à sua destinação e reaproveitamento.

Dentre os materiais presentes nos módulos, os metais causam maior impacto ambiental em caso de descarte inadequado. O descarte indevido dos módulos FV pode ocasionar lixiviação para corpos d'água e promover a morte da fauna e flora por toxicidade [3].

Diante das alternativas de descarte de módulos FV, a reciclagem de módulos FV permite recuperar parte dos materiais, que não são renováveis, e reutilizá-los. A produção de certos materiais com o uso da reciclagem possibilita a redução no consumo de energia elétrica, em comparação com a utilização de matéria-prima [4]. No caso, os que possuem maior potencial energético são alumínio, cobre, aço, polímeros, entre outros [5].

Por todo o exposto, faz-se necessário, portanto, buscar alternativas de aproveitamento do potencial energético dos resíduos dos módulos fotovoltaicos inutilizáveis bem como analisar se é viável tal reaproveitamento. Para análise da viabilidade, é fundamental quantificar a energia aproveitada no processo como um todo. Logo, o presente trabalho tem como objetivo principal estimar o potencial de conservação de energia a partir da reciclagem de módulos fotovoltaicos de silício cristalino. E, a partir desse valor, quantificar o potencial de conservação com base na projeção de descartes dos módulos no Brasil.

2. DESCARTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Esta seção trata sobre conceito, funcionamento, composição e panorama atual dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino (c-Si). Por fim, é abordado questões sobre a vida útil dos módulos FV e estratégias de reaproveitamento dos resíduos fotovoltaicos com enfoque na reciclagem.

2.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos capazes de converter a energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. A geração ocorre sem emissão de gases do efeito estufa, podem ser constituídos de diferentes tamanhos e potências e, normalmente, necessitam de pouca manutenção [5]. Os módulos são compostos por células fotovoltaicas agrupadas em uma estrutura a fim de se obter os parâmetros mais adequados à aplicação do módulo projetado. Tais células fotovoltaicas operam com a tensão de 0,6 V aproximadamente. É comum a utilização de um arranjo de módulos fotovoltaicos para maior geração de energia elétrica, este conjunto é chamado de painel fotovoltaico [5].

A geração de corrente elétrica ocorre por meio do efeito fotovoltaico, onde, de forma simplificada, os fótons incidentes na célula fotovoltaica provocam o movimento de elétrons entre as camadas P-N do semicondutor de silício e, conseqüentemente, no circuito no qual está conectado.

Segundo [5], os módulos fotovoltaicos podem ser classificados em três gerações. A primeira geração é formada por módulos de silício cristalino (c-Si), com estrutura monocristalina ou policristalina. Estas são derivadas do mesmo material, porém, se diferem no princípio de produção e eficiência. A primeira possui eficiência média de 15 a 22% enquanto os policristalinos, que são formados por vários cristais, possuem eficiência média entre 14 e 20%. [7].

Módulos da segunda geração são compostos por filmes finos (*thin film*), produzidos por diferentes materiais, como silício amorfo (*a-Si*), cádmio-telúrio ou CIGS (cobre, índio, gálio, selênio). A terceira geração é formada por tecnologias emergentes, tais como CPV (*concentrator photovoltaics*) que utilizam lentes para concentrar a luz do sol; módulos DSSC (*dry-sensitised solar cell*) que são células solares sensibilizadas por corantes; células orgânicas e células híbridas.

A tecnologia de silício cristalino se destaca por ter maior potencial energético [5]. A Figura 1 mostra a grande predominância do silício no mercado, com um total de participação 94,5% na produção global FV [2].

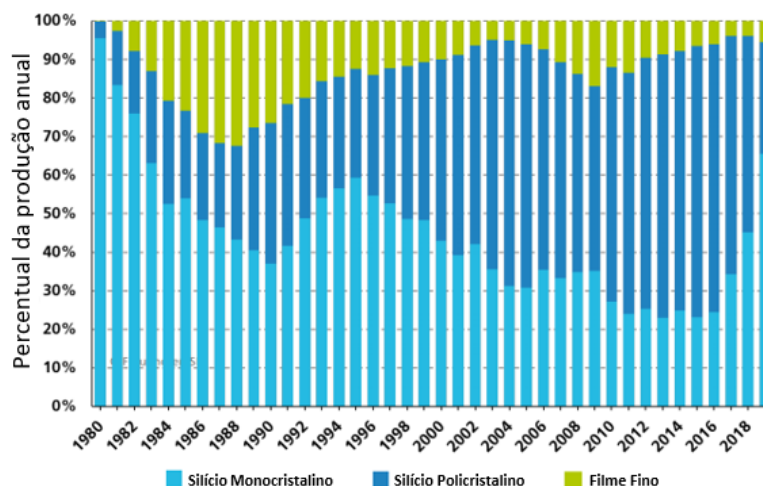


FIGURA 1. Produção anual mundial fotovoltaica por tecnologia.
Fonte: [2]

Em meio a variedade de tecnologias de módulos fotovoltaicos, o presente trabalho limita-se ao estudo do módulo FV de silício monocristalino e policristalino, pelos motivos mostrados na Figura 1, ou seja, por se tratar de uma tecnologia bastante empregada no mundo.

2.2 Módulos de Silício Cristalino

Antes de conhecer o processo de reciclagem, é necessário entender a estrutura e a composição dos módulos FV, que será explorado neste tópico. Por existir diversos fabricantes de módulos no mundo e rápidas mudanças nas tecnologias, sua construção pode variar bastante. Portanto, neste tópico, é apresentada a composição de forma geral. Na camada da célula fotovoltaica, além do silício, emprega-se diferentes contatos metálicos, que podem conter cobre e prata, para a transmissão de fluxo de elétrons. Conforme [5], a reutilização destes compostos pode significar grande economia de energia, corte de gastos e redução nos impactos ambientais, devido ao processo de extração e produção desses metais.

As células, após interligadas eletricamente, são encapsuladas a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico. Segundo [8], o encapsulamento é formado por camadas, chamado de *wafers*, onde o mesmo é composto por vidro temperado de alta transparência, acetato de etil vinila (EVA) estabilizado para a radiação ultravioleta, células fotovoltaicas, EVA estabilizado e um filme posterior isolante (*backsheet*), nesta ordem.

O EVA é uma resina polimérica transparente com a principal função de proteger as delicadas regiões da célula contra umidade, sujeira e outras condições esperadas na operação dos módulos, além de unir o vidro e o silício [9]. É desejável que o material encapsulante possua alta transparência ótica sobre o espectro solar, boa adesão e proteção contra umidade. Deste modo, o encapsulamento é fundamental para a durabilidade e manutenção do desempenho ao longo da vida útil do módulo [10]. Apesar do encapsulamento de EVA ser utilizado em mais de 85% dos módulos FV atualmente, é esperado um aumento de até 30% da participação de mercado para encapsulamento de Poliolefina [11].

O *backsheet* é a camada mais inferior do módulo, além de isolante elétrico, protege o módulo contra radiação UV, umidade, e entrada de poeira e gases [9] [4]. É normalmente composto de polímeros tais como fluoreto de polivinila (PVF ou *Tedlar*®), tereftalato de polietileno (PET), dentre outros [8]. É, então, aplicada uma moldura externa, normalmente composta de alumínio, que oferece resistência e leveza a estrutura do módulo. A selagem do vidro e a moldura de alumínio são usualmente empregados seladores de silicone ou polibutil para proteção das células contra água e partículas. No verso do módulo encontra-se a caixa de junção com as conexões elétricas de todas as células [4]. A Figura 2 ilustra as camadas de materiais de um módulo fotovoltaico cristalino.

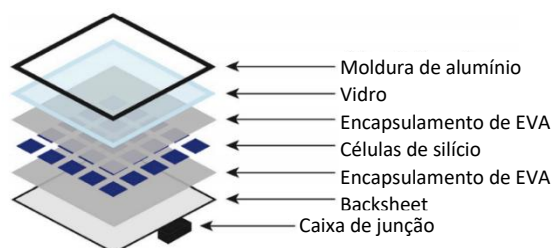


FIGURA 2. Diagrama das camadas de um módulo fotovoltaico cristalino [12]

Em média, um módulo FV c-Si tem densidade de $13,7 \text{ kg/m}^2$. Em termo da massa dos materiais do módulo FV de c-Si, o vidro tem a maior percentagem (68%), seguido da moldura de liga de alumínio (17%) [9]. A 0 ilustra a composição média das camadas de um módulo FV de c-Si.

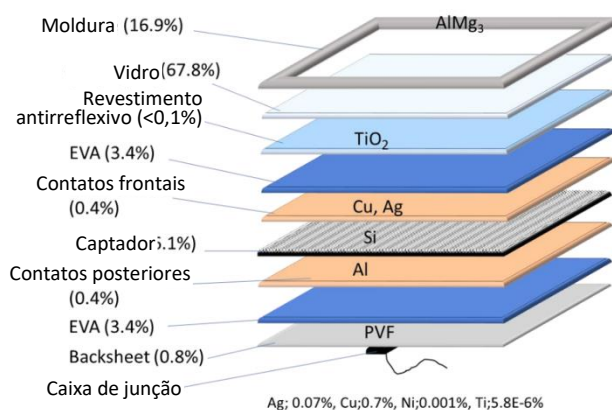


FIGURA 3. Estrutura comum de um módulo FV c-Si e composição média [9]

Conforme [13], existe uma tendência da indústria em produzir wafers mais finos e flexíveis, bem como estruturas de células mais complexas. Pesquisas em eficiência e economia dos materiais levarão a uma redução na quantidade de materiais por módulo e, conseqüentemente, menos materiais danosos ao ambiente. A Figura 4 compara a quantidade relativa de materiais presente nos módulos FV de silício cristalino em 2014 com uma estimativa para 2030. Observa-se que é previsto um aumento na utilização de vidro no módulo fotovoltaico na ordem de 4%, enquanto reduz-se o uso de silício em pouco mais de 2%, alumínio em 1% e outros metais em 0,01% [13].

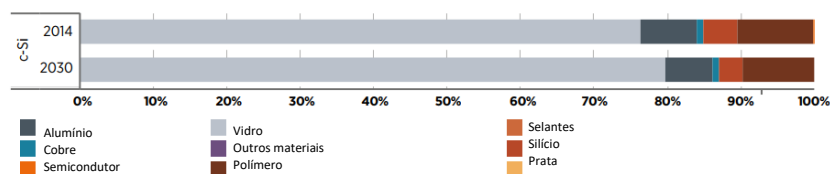


FIGURA 4. Tendência de evolução dos materiais em percentagem de massa total dos módulos FV c-Si.

Fonte: Adaptado de [13].

2.3 Vida Útil dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos de c-Si instalados, em condições normais, se degradam numa razão entre 0,5% e 1,0% ao ano [8]. Assim, após 25 anos de operação, os módulos fotovoltaicos apresentam redução de aproximadamente 20% da sua potência nominal. Geralmente os fabricantes de módulos FV de c-Si dão garantia contra defeitos de fabricação de 3 a 5 anos e garantia de rendimento mínimo durante 25 anos [8]. No entanto, o desgaste pode ser maior devido às condições ambientais e climáticas em que os módulos estão submetidos.

De acordo com [14], a temperatura, umidade, irradiação e impactos mecânicos são alguns dos principais fatores que podem degradar a performance do módulo FV. Estes fatores podem induzir degradações no módulo como corrosão, descoloração, delaminação, rachaduras e rompimento de conexões.

A umidade que entra no módulo pode provocar corrosão nas partes metálicas e na caixa de junção, causando perda de performance. Além disso, pode degradar a aderência entre a célula e a moldura metálica [14]. A degradação por delaminação é caracterizado pela perda de aderência entre a camada da célula e o encapsulamento ou com vidro superior do módulo. Este é mais frequente em climas quentes e úmidos provocando, assim, o aumento da reflexão da luz e a entrada de umidade no módulo [14].

A descoloração nos módulos é caracterizada pela mudança na cor do material, que se torna amarelado ou marrom. A causa é correlacionada com a exposição à radiação UV, resultando na degradação do encapsulamento EVA ou no material adesivo entre o vidro e as células FV, reduzindo assim a potência de geração devido a modificação da transmissividade da luz que chega as células do módulo [14].

Ainda em [14], é afirmado que rachaduras ou quebras no vidro ocorrem geralmente durante a instalação, manutenção ou transporte. Os módulos podem funcionar normalmente, porém o risco de choques elétricos e entrada de umidade aumentam.

Outros fatores de degradações dos módulos FV também são citados nas literaturas estudadas, tais como degradação induzida pelo potencial, pontos quentes e bolhas. A 05 mostra a representatividade das principais formas de degradações.

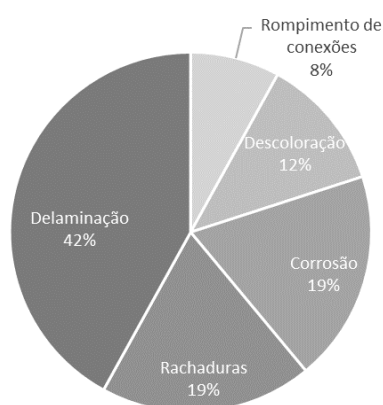


FIGURA 5. Principais tipos de degradação nos módulos fotovoltaicos.
Fonte: Adaptado de [14].

De acordo com [13], estudos estatísticos observaram que 40% dos módulos FV inspecionados possuem pelo menos uma célula com micro rachaduras. As falhas podem ser divididas em 3 fases dos módulos, que são, as falhas prematuras, as falhas meia-idade e as falhas de esgotamento. A Figura 6 fornece uma visão geral a respeito das principais causas de falhas observadas nos módulos fotovoltaicos.

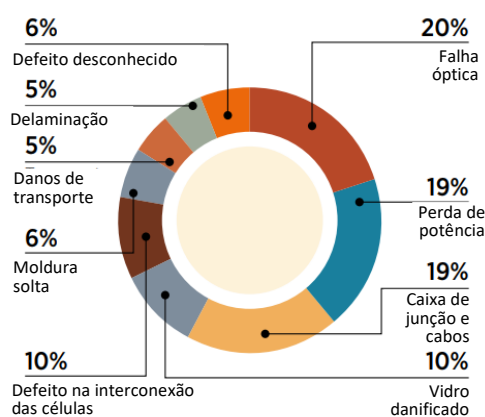


FIGURA 6. Taxas de falha de acordo com reclamações de clientes.
Fonte: Adaptado de [13].

Dentre as principais causas das falhas prematuras, nos primeiros 4 anos de operação dos módulos FV, destaca-se a degradação induzida por luz (*light-induced degradation*), erros no planejamento ou instalação e defeitos na parte elétrica [13]. Causas de falhas de meia-idade, entre 5 e 11 anos de operação, estão relacionados a degradação da camada antirreflexiva do vidro, descoloração do EVA, delaminação e isolamento das células

rachadas [13]. [13] informa que também é comum, nos primeiros 12 anos de operação, depois de muitas exposições ao ambiente, ocorrer falhas de degradação induzida pelo potencial, falhas na caixa de junção, vidro quebrado, moldura solta e defeitos no diodo e nos contatos das células.

No final da vida útil dos módulos são observadas falhas de esgotamento, os defeitos encontrados na meia-idade dos módulos acontecem de forma mais acentuada além de severas corrosões das células e suas conexões [13].

2.4 Reaproveitamento dos Módulos Fotovoltaicos

A principal vantagem da energia solar FV é ser limpa e renovável, logo, é interessante que o descarte dos resíduos seja realizado de forma adequada. Deve-se então minimizar os impactos ambientais da produção deste dispositivo no fim da sua vida útil. Cabe destacar que as células fotovoltaicas contêm metais pesados prejudiciais ao meio ambiente, logo não podem simplesmente ser descartados em aterros [15].

No fim da vida útil dos módulos fotovoltaicos, pode-se utilizar estratégias de gestão de resíduo do princípio dos 4R's: redução, reuso, reciclagem e recuperação [15]. A redução é a estratégia que de ser preferida dentre as outras citadas. Esta consiste na diminuição do uso de materiais na fase de produção. Os módulos FV possuem elementos perigosos ao ambiente em sua composição, tais como chumbo e outros metais pesados, com alto potencial de acumulação no meio ambiente. Além disso, o uso de metais raros, tais como a prata, que existe em pequena quantidade nos módulos, contribuem para a escassez do recurso. Para isso, portanto, torna-se necessário investimento em pesquisa para substituição de materiais usados na produção do módulo [15].

O reuso envolve a recuperação de sistemas, por meio de retrofit e remodelagem, ou de parte dos componentes dos módulos no fim da vida útil ou por falhas prematuras. Assim, como já existe em alguns países, onde é realizada a comercialização de sistemas FV usados recuperados ou reparados [15]. Normalmente, reparos em módulos envolvem a troca da moldura, nova caixa de junção, troca de diodos, trocas de conectores, substituição de células, entre outros [13].

Para os módulos que não podem ser reparados ou reutilizados, é preferível o tratamento e reciclagem dos resíduos. Diversas tecnologias de reciclagem de módulos são encontradas na literatura, algumas já são utilizadas comercialmente. Grande parte dos materiais, assim, seriam recuperados, reduzindo grande parte do impacto ambiental da fase de produção [15].

A estratégia menos preferível dentre as citadas é a recuperação da energia por meio do processo de interação. No qual, o calor gerado pela combustão dos resíduos não perigosos, pode ser utilizado para a geração de energia elétrica [15]. Uma boa gestão dos resíduos dos módulos FV oferece uma solução sustentável para seu ciclo de vida. Para tanto é necessário analisar a viabilidade técnica, econômica e ambientais da estratégia a ser adotada [15].

Apesar de não possuir lei específica no Brasil para descarte de módulos FV, este é enquadrado como Resíduo De Equipamentos Elétrico-Eletrônicos (REEE). Deste modo, se enquadra na Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12.305/2010, onde, é regulamentado o tratamento adequado para resíduo sólido em geral, e no Art. 33, é instituído a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes que deverão estruturar e implementar um sistema de logística reversa para retorno dos produtos e embalagens após o uso pelo consumidor. No entanto a fiscalização para REEE ainda é falha e o processo de logística reversa ainda não é objeto de controle e fiscalização [15]. Além disso, a falta de conhecimento da população às alternativas de descarte de resíduo tem grande influência, pois este tem papel fundamental para sucesso das ações de logística reversa [1].

Na União Europeia (EU), existe diretiva sobre descarte do lixo eletrônico, onde os módulos FV estão expressos no escopo desta com responsabilidade estendida ao fabricante. A diretiva entrou em vigor em 2014 e todos os países membros da EU devem ter lei que regulamenta a coleta, transporte e tratamento dos módulos FV no fim da vida. Deste modo, o fabricante será responsável pelo fim da vida dos módulos e de custear coleta e reciclagem dentro do mercado europeu [15]. A Alemanha e Reino Unido também possuem regulamentação para tratamento de resíduos dos módulos FV baseados na diretiva da EU. Acredita-se que a chave para o desenvolvimento de uma indústria FV sustentável pode estar na regulamentação e processos para reciclagem e reuso na fabricação [15].

2.5 Reciclagem dos Módulos Fotovoltaicos

Este tópico apresenta uma revisão bibliográfica de alguns métodos de processos de reciclagem dos módulos fotovoltaicos c-Si encontrados em artigos mais recentes. Observou-se que cada literatura consultada trata a reciclagem dos módulos FV de forma diferente, onde é priorizado a recuperação de determinados materiais em cada, ou também se prioriza o impacto ambiental do processo de reciclagem. *Wafers* reciclados devem ter desempenho próximo ao módulo convencional. Estudos mostraram que *wafers* reciclados possuem características elétricas próximas aos *wafers* padrões, em densidade de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, fator de enchimento e eficiência elétrica [12].

No trabalho desenvolvido por [9] são compiladas técnicas de reciclagem de módulos de diversos autores, com foco na recuperação de vidro, alumínio e silício. De forma geral, os processos utilizados na recuperação dos elementos dos módulos c-Si se resumem em métodos mecânicos, químicos e térmicos e se dividem em três etapas: remoção da moldura, delaminação e separação dos materiais. A reciclagem dos módulos de c-Si inicia-se com a remoção da borda de alumínio e da caixa de junção, frequentemente de forma manual devido aos diferentes modelos de módulos [9]. O próximo passo é a delaminação, onde o vidro e a camada de EVA são separados da célula de silício. Esta etapa é reportada como a etapa mais difícil de reciclagem dos módulos [12]. No trabalho desenvolvido por [9] encontra-se processos químicos e térmicos distintos para obtenção de diferentes saídas neste processo.

Após a delaminação, os componentes vão para o estágio de separação dos materiais pelo método da gravura química (*chemical etching*) para ajudar a separar o vidro das células de silício e os componentes metálicos. Segundo [9], os processos conseguem recuperar mais de 90% dos materiais fotovoltaicos.

Em [12] afirma que um método de separação e recuperação do vidro, da célula e do *backsheet* de módulos c-Si pode ser realizado através de um fio aquecido em aproximadamente 200°C, quando o EVA começa a derreter. No entanto este método deixa resíduos de EVA no vidro e na célula fotovoltaica. O passo seguinte, seria, então, utilizar pirólise ou tratamento químico para retirar o EVA restante. Similarmente, outro método utiliza uma espécie “faca quente” para fatar as camadas do módulo. [12] admite que a recuperação de células intactas é extremamente difícil, pois a utilização de certos processos químicos na recuperação do silício provoca rachaduras devido a inchaço. Uma inovação recente foi a inclusão de dispositivos de pressão ou fixação mecânica para suprimir o inchaço nos processos químicos de reciclagem.

Outro método citado em [12] para delaminação do módulo é a pirólise. Este processo envolve o aquecimento do módulo controladamente, para prevenir estresse térmico, em um ambiente inerte (tais como nitrogênio ou argônio). Este processo tem a vantagem de não oxidar quimicamente o módulo, ajudando na delaminação e na recuperação dos componentes, tais como as células, contatos metálicos e vidro. Além disso, a pirólise permite a utilização dos resíduos dos polímeros como fonte combustível pela queima destes. Processos térmicos permitem, portanto, uma separação rápida, simples e econômica dos módulos [12].

Quando a qualidade do produto reciclado não é suficiente para o produto original, pode-se utilizar o material em outros perfis de indústrias. Portanto, o material recuperado na reciclagem, além de servir para a produção de novos módulos FV, pode ser vendido em commodities, aumentando assim o suprimento da matéria prima no mercado.

No mundo, empresas já realizam reciclagem de módulos FV c-Si em larga escala. Deutsche Solar atua na Alemanha desde 2003 e recupera materiais como plástico, células, vidros, metais ou ligas metálicas de módulos FV c-Si [7]. A empresa italiana SASIL S.p.A. criou uma planta piloto para reciclagem de módulos c-Si, denominada FRELPA, com capacidade de 1 t/h e 8000 t/ano [3]. O órgão PV CYCLE, situado na Bélgica, oferece soluções de larga escala para coleta e gerenciamento de resíduos FV na Europa. Este também possui o projeto de reciclagem Full Recovery End-of-Life Photovoltaic (FRELPA) com foco na redução de gastos energéticos na reciclagem de módulos e um projeto de uma unidade móvel de reciclagem Photovoltaic Mobile Recycling Device (PV MOREDE) [3].

No Brasil, a empresa SUNR, localizada em Florianópolis/SC, é a primeira empresa da América Latina a atuar no setor de reciclagem FV. A empresa recebe módulos danificados através de coleta e logística reversa, solicitado por qualquer pessoa física ou empresa, de todo Brasil, independente do dano [16]. Na planta de reciclagem da SUNR, os módulos são desmontados manualmente, retirando o alumínio, o vidro e os conectores e, o restante dos materiais, são tratados quimicamente para extração de prata, cobre e silício. Os metais e vidro são vendidos, os polímeros são incinerados gerando energia para alimentar a produção da fábrica e o restante é devidamente descartado. A empresa afirma que seu processo tem eficiência média de 90% de reaproveitamento [16].

3. METODOLOGIA

A presente seção descreve os dados obtidos por meio de pesquisa bibliográfica visando o desenvolvimento desse trabalho. Para isto, inicialmente é estimada a quantidade dos módulos FV descartados no Mundo e no Brasil especificando a estimativa de módulos FV de silício descartados no Brasil. Tais informações auxiliarão

no processo de determinação da quantidade de energia conservada por meio da reciclagem dos módulos FV de silício, objetivo deste trabalho.

3.1 Estimativa de Descarte dos Módulos Fotovoltaicos

A potência instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo atingiu 603 GW em 2019 [17] e é estimado que alcance 4500 GW instalados em 2050 [13]. Na medida que se aumenta o número instalações de sistemas de geração FV, o mesmo acontecerá com o número de módulos desativados após inutilização.

Assumindo a vida útil de 30 anos de utilização dos módulos, estima-se que até 2050 serão acumulados um total de 60 milhões de toneladas de resíduos no mundo através do descarte regular. No entanto, se levar em consideração descartes antecipados, que considera falhas antes dos 30 anos de operação, seriam 78 milhões de toneladas de resíduos acumulados até 2050. O valor deste material após recuperação pode exceder o total de US\$ 15 bilhões de matéria prima, equivalente a 2 bilhões de módulos fotovoltaicos, ou 630 GW [13]. A Figura 7 mostra a estimativa da massa de resíduos acumulados dos módulos fotovoltaicos no fim da vida útil para cenário regular e considerando os descartes antecipados com a capacidade FV instalada.

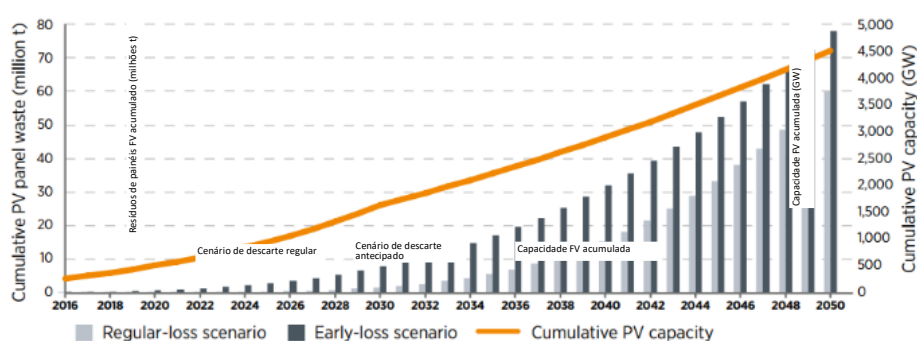


FIGURA 7. Massa de resíduos global estimados acumulados de módulos FV descartados.

Fonte: Adaptado de [13].

Segundo [13], no Brasil, considerando o descarte regular dos módulos fotovoltaicos, espera-se atingir até 2050 um total de 300.000 toneladas. A estimativa é ainda maior se considerar o caso de descartes antecipados o que totaliza 750.000 toneladas no mesmo período. A 0 mostra o total de massa acumulada, em toneladas, no Brasil anualmente.

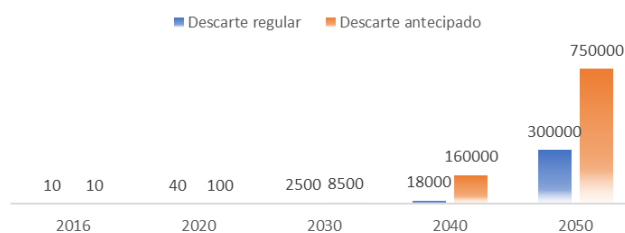


FIGURA 8. Estimativa acumulada da massa de resíduos de módulos FV descartados no Brasil.

Fonte: Adaptado de [13].

Estima-se que no Brasil serão descartados 32 milhões de módulos fotovoltaicos até 2050. [18] detalha sua estimativa da quantidade de módulos fotovoltaicos c-Si descartados no Brasil de 2013 até 2050 anualmente, considerando a vida útil de 30 anos, eventuais danificações, falhas, defeitos e tendência de uso de novas tecnologias. São estimados descartes de módulos de silício monocristalino e policristalino, totalizando mais de 5,6 e 18,8 milhões no período para cada tipo, respectivamente. Logo, nesta projeção, descartes entre 2013 e 2050 totalizariam 24.479.605 módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Estes dados incluem número de módulos descartados derivados de geração distribuída e centralizada.

Considerando o peso médio de um módulo FV de silício de aproximadamente 18,6 kg, [18] estima a massa de módulos descartados até 2050 em um total de 455.321 toneladas de material. A Tabela 1 detalha a massa descartada no mesmo período, por elementos presentes na composição dos módulos.

TABELA 1. ESTIMATIVA DA MASSA DESCARTADA ATÉ 2050 DE MÓDULOS DE SILÍCIO CRISTALINO POR COMPONENTES EM TONELADAS

<i>Materiais</i>	<i>Geração Distribuída</i>	<i>Geração Centralizada</i>
Vidro	103.824	233.842
Polímero	15.834	35.663
Alumínio	14.420	32.478
Silício	4.690	10.563
Cobre	798	1.797
Prata	14	32
Estanho	168	378
Zinco	168	378
Chumbo	84	189
Total	140.000	315.321

Fonte: Adaptado de [18].

3.2 Energia Conservada na Reciclagem

Cada material necessita de uma quantidade de energia elétrica durante seu processo de fabricação. Quando se adota um processo de reciclagem, além de reduzir o descarte de resíduos, uma quantidade de energia elétrica é evitada na produção. Deste modo, cada material agrega uma quantidade de energia elétrica [19].

Segundo [12], a reciclagem de um *wafer* retorna consideravelmente a energia utilizada na produção. Para produção de um módulo fotovoltaico são gastos, em média, 9,32 kWh/*wafer*, destes, a maior parte é proveniente da etapa da produção do silício (7,55 kWh/*wafer*). No entanto, o *wafer* reciclado exigiria 2,17 kWh em sua produção. Deste modo, é conservado 7,15 kWh de energia por *wafer* reciclado.

Conforme mostrado na seção 2 deste trabalho, a moldura geralmente é de alumínio e o cobre dos cabos da caixa de junção do módulo, eles possuem uma grande importância no processo de reciclagem dos módulos pois, além de reduzir significativamente a extração dos minérios, proporciona uma diminuição dos recursos energéticos e da quantidade de resíduos [19]. Segundo [20] os processos de extração, refinaria e fundição para a produção primária de alumínio, cobre, prata e silício, fazem uso intensivo de energia.

Ainda em [20] o autor afirma que utilizando uma planta de reciclagem de módulos FV, a cada 1000 kg de módulos FV descartados, é possível recuperar 135 kg de alumínio da moldura e 2,6 kg de cobre dos cabos na caixa de junção para processamento futuro. Nesta planta de reciclagem, o autor ainda sugere, a incineração com recuperação de energia para o polímero da caixa de junção e dos cabos, no entanto não é informado o valor energético recuperado.

Já segundo [19], cada tonelada de alumínio reciclado tem o potencial de conservação de 14,25 MWh. Metais ferrosos, tais como cobre, apresentam potencial de conservação 6,06 MWh por tonelada. Considerando o peso médio do módulo FV de 18,6 kg, anteriormente já mencionado, é possível conservar 35,78 kWh da moldura de alumínio e 293,06 Wh do cobre dos cabos da caixa de junção na reciclagem desses materiais.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através do arcabouço da literatura consultada, pesquisada e mostrada na seção 2, e através da estimativa de descarte dos módulos fotovoltaicos mostrada na seção 3, na presente seção será determinada a energia elétrica agregada aos materiais reciclados dos módulos FV. Deste modo, será possível realizar a estimativa de energia conservada na reciclagem dos módulos FV de silício mono e policristalino descartados no Brasil.

4.1 Potencial de Conservação dos Módulos Fotovoltaicos

Pelo exposto, a Tabela 2 totaliza a estimativa de energia conservada em um módulo fotovoltaico de silício cristalino reciclado.

TABELA 2. ESTIMATIVA DE POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA RECICLAGEM DE MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO CRISTALINO

<i>Parte do módulo FV</i>	<i>Potencial de conservação de energia elétrica (kWh)</i>
<i>Wafer</i>	7,15
Moldura de alumínio	35,78
Cabos de cobre na caixa de junção	0,293
Total (Energia por módulo FV)	43,22

Fonte: Autoria própria, 2021.

Com base nos dados de [13] e considerando o peso médio de um módulo FV como 18,6 kg [13], entre 2016 e 2050, supondo que essa tendência se confirme, é estimado o descarte entre 16,1 a 40,3 milhões de módulos FV, considerando o descarte regular e antecipado, respectivamente. Dados mundiais totalizam de 3,2 a 4,2 bilhões de módulos FV no mesmo período [13].

Assim, como apresentado na seção 2 deste trabalho, é estimado que 24.479.605 módulos FV de silício cristalino sejam descartados no Brasil [18] no período de 2013 a 2050. Esta quantidade de módulos c-Si equivaleria a um total 1.058 GWh de energia conservada por meio do processo de reciclagem dos materiais dentro do período analisado. Vale informar que nesta situação e para o valor obtido considerou-se apenas o potencial de conservação do *wafers*, moldura de alumínio e cabos de cobre externos. Para efeito de visualização do dado obtido anteriormente, tal valor equivaleria ao consumo residencial de energia elétrica do Estado de Tocantins somente no ano de 2019 [21].

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve seu objetivo cumprido, pois mostrou que uma quantidade considerável de energia elétrica pode ser evitada ao reciclar os materiais dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Foi possível estimar que a reciclagem dos módulos FV c-Si possui o potencial de conservar algo em torno de 43 kWh por módulo FV. Foi possível também mensurar que, conforme a estimativa de descartes de módulos c-Si no Brasil, entre 2013 e 2050, seria possível evitar o desperdício de energia na ordem de 1.058 GWh, com a reciclagem.

Cabe ressaltar, que o valor de potencial calculado abrangeu a reciclagem do *wafers*, do cobre dos cabos externos e o alumínio presente na moldura dos módulos FV c-Si e, ainda, considerando o peso de 18,6 kg médio do módulo. O valor energético, portanto, pode variar conforme eficiência da planta de reciclagem e dos tamanhos dos módulos FV avaliados.

A reciclagem dos módulos FV possui benefícios ambientais, além da redução do uso de recursos energéticos. O processo de reciclagem provoca maior aproveitamento dos materiais e redução de resíduos FV no ambiente ao evitar materiais em lixões/aterros, por exemplo. O reaproveitamento dos materiais também reduz a extração de minérios que não são renováveis.

Uma boa política de gestão dos resíduos dos módulos FV é essencial para garantir o aproveitamento dos materiais descartados e evitar o descarte inadequado, assim como, a criação ou ampliação de indústrias de reciclagem de módulos FV que também beneficia a sociedade por gerar novas oportunidades de emprego. Segundo a literatura utilizada, o processo de delaminação é a etapa mais difícil de reciclagem dos módulos fotovoltaicos de silício. Deste modo, a pesquisa e o desenvolvimento de maneiras de produzir módulos FV c-Si mais propícios a reciclagem pode permitir maior eficiência na recuperação dos materiais ocasionando menores impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- [1] KONZEN, Bárbara Anne Dalla Vechia; PEREIRA, Andrea Franco. Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1011>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- [2] ISE. Photovoltaics report. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- [3] PRADO, Pedro Forastieri de Almeida. Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2019.tde-30012019-141410. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [4] CRUZ, Fernanda Tátia; ISIDORO, Marcelo Henrique; FERNANDES, Igor Santos e. Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos. 2020. 16 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Ufop, Curitiba, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/17469>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- [5] DIAS, Pablo Ribeiro. Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [6] Universidade do Minho. Módulos fotovoltaicos características e associações. Repositorium.sdum.uminho.pt. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf. Acesso em: 30 jan. 2021.
- [7] STEINER, Kátia Helena. Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas. Riuni.unisul.br. Disponível em: <http://www.riuni.unisul.br/handle/12345/11914>. Acesso em: 27 abr. 2021.

- [8] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, [s. l.], v. 1, p. 47–499, 2014.
- [9] MAANI, THOMAS, CELIK, ILKEHEBEN, MICHAEL J. et al. Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels. *Science of The Total Environment*, v. 735, p. 138827, 2020.
- [10] FONSECA, José Eduardo Ferreira da. Avaliação da degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino em sistemas conectados à rede elétrica. Hdl.handle.net. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/206065>. Acesso em: 13 fev. 2021.
- [11] ITRPV - International Technology Roadmap for Photovoltaic. Results 2019 including maturity report 2020. Disponível em: <http://itrvp.vdma.org/download>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [12] FARRELL, C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, p. 109911, 2020.
- [13] IRENA - International Renewable Energy Agency; IEA-PVPS- International Energy Agency Photovoltaics Power Systems Programme. End of life management: solar photovoltaics panels. Report IRENA and IEA – PVPS, 2016.
- [14] NDIAYE, A. et al. Degradations evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in tropical environment. *Solar Energy* 103 (2014) 70–77.
- [15] MIRANDA, R.; LEANDRO, F.; SILVA, T. Gestão do fim de vida dos módulos fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/53355/pdf>.
- [16] SunR - Reciclagem Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.sunr.com.br/>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- [17] IEA - International Energy Agency. *World Energy Outlook 2020*. 2020.
- [18] OLIVEIRA, Denis Bergamo de; LEBENSOLD, Felipe; OLIVEIRA, Lucas Tabuso de. Destinação final das placas fotovoltaicas pós consumo no brasil. 2017. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- [19] ROCHA, Amanda Suianny Fernandes. Potencial de conservação de energia elétrica com a reciclagem de resíduos sólidos coletados na ufersa. 2016. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, UFERSA, Mossoró, 2016.
- [20] FAIRCLOTH, C. et al. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 143, p. 260-272, 2019.
- [21] Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2020.



Artigo

Diagnóstico energético e adequação à NR 10 e NBR 5410 em instalação elétrica comercial

Guilherme Quaresma Medina ^[1], Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-árido; guiqm100@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-árido; fkv@ufersa.edu.br

Recebido: 14/03/2022;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: As normas regulamentadoras NR 10:2004 e NBR 5410:2004, tem como objetivo estabelecer requisitos para implementação de medidas de controle, estabelecendo condições que devem satisfazer às instalações elétricas de baixa tensão. Adequar-se a elas além de preservar a saúde e segurança, integridade de todos envolvidos direta ou indiretamente com instalações elétricas, torna a instalação mais eficiente, durável e confiável. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo realizar um diagnóstico energético de uma instalação elétrica comercial, sintetizando as coerências e incoerências normativas encontradas, desenvolvendo soluções para adequação e posteriormente realizando a correção das mesmas. Os resultados mostraram que as medidas indicadas e executadas, sanaram todas as anomalias na instalação elétrica tornando-a eficiente e segura.

Palavras-chave: NBR 5410, NR 10, diagnóstico energético, instalação elétrica

Abstract: The regulatory standards NR 10:2004 and NBR 5410:2004, aim to establish requirements for the implementation of control measures, establishing conditions that must satisfy low voltage electrical installations. Adapting to them, in addition to preserving the health and safety, integrity of everyone involved directly or indirectly with electrical installations, makes the installation more efficient, durable and reliable. Therefore, the present work aims to carry out an energy diagnosis of a commercial electrical installation, synthesizing the normative coherence and inconsistencies found, developing solutions for adequacy and subsequently correcting them. The results showed that the measures indicated and carried out, resolved all anomalies in the electrical installation, making it efficient and safe.

Key-words: NBR 5410, NR 10, energy diagnosis, electrical installation

1. INTRODUÇÃO

As instalações elétricas compreendem a implementação física dos componentes das ligações elétricas entre a fonte geradora de energia e as cargas elétricas. Qualquer tipo de instalação elétrica, é regida por alguma norma e nas instalações elétricas de Baixa Tensão (BT), as principais normas que trazem requisitos mínimos de segurança e funcionamento dessas instalações são as NR 10 e NBR 5410, ambas do ano de 2004 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Através de um diagnóstico energético é possível chegar-se a uma maior eficiência energética, como também torna a instalação elétrica segura e durável. Com a identificação de focos de desperdício ou de mal funcionamento, os profissionais habilitados traçam as medidas corretivas evitando o desperdício de energia elétrica e problemas futuros.

Analisando a instalação e com a síntese das principais causas da ineficiência, elaborou-se medidas corretivas e adequação do projeto elétrico. Medidas pensadas não apenas em eficiência e segurança, mas que também atendam às necessidades do consumidor final.

Diante de todo o exposto, este trabalho tem como objetivo realizar a inspeção e a verificação da instalação elétrica de uma clínica na cidade de Mossoró-RN baseando-se na NR 10:2004 e NBR 5410:2004. Inicialmente será realizado um diagnóstico energético, seguido de inspeção visual e, por fim, a realização das adequações normativas necessárias serão realizadas.

2. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E NORMAS REGULAMENTADORAS

Nesta seção tem-se de forma sintética definições que estão diretamente relacionadas ao escopo do trabalho.

2.1 Diagnóstico energético

Diagnóstico energético é um trabalho de levantamento das condições e características técnicas e funcionais de uma instalação, quanto ao consumo de energia. O mesmo utiliza como base o histórico de consumo e funcionamento da instalação, descrição, levantamento dos sistemas e equipamentos energéticos, na identificação dos desperdícios e funcionamento anormal, chegando-se finalmente à elaboração de medidas corretivas [2].

2.2 Normas regulamentadoras e brasileiras

Atualmente existem 36 Normas Regulamentadoras (NR) tendo cada NR uma abordagem específica. As NR'S são de observância obrigatória pelas organizações e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos Poderes Legislativo, Judiciário e Ministério Público, que possuam empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho – CLT. As Normas Brasileiras fazem parte de um grupo de diretrizes elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Apesar de não serem exigidas legalmente, suas aplicações são utilizadas para padronização de processos produtivos, procedimentos de gestão e documentos [3].

A NR 10:2004 e NBR 5410:2004 estabelecem os requisitos e condições mínimas com o objetivo de implementar medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

As normas mencionadas aplicam-se às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, [3], incluindo a inspeção predial (análise isolada ou combinada das condições técnicas, de uso e de manutenção da edificação [4]); a inspeção visual (que sozinha não é suficiente para avaliação completa da instalação junto aos parâmetros mínimos da NR10 e NBR 5410, sendo necessário utilizar-se de equipamentos que auxiliem o diagnóstico [5]); o projeto elétrico (apresenta soluções possíveis de serem implementadas para a resolução de determinados problemas, definindo a forma que a energia elétrica será conduzida da rede de distribuição até os pontos de utilização, os circuitos terminais [6]); o quadro elétrico (equipamento formado por chaves, disjuntores e fusíveis e é responsável por distribuir a eletricidade, sendo destinado a receber a energia elétrica de uma ou mais fontes de alimentação e distribuí-las [7]) e a manutenção corretiva (consiste na atuação para adequação, correção de falha ou do desempenho menor que o esperado [8]).

3. METODOLOGIA

Nesta seção será descrita a área de estudo bem como a forma que foi analisada. Estando presente a visão dos problemas observados pelo proprietário do objeto de estudo, assim como, as informações dos equipamentos que foram utilizados para realização do diagnóstico e a forma de utilização destes. Na sequência estão presentes constatações das aferições feitas com os mesmos aqui descritos, sendo possível por meio das normas verificar e identificar as incoerências na instalação e finalmente realizar adequação.

3.1 Área de estudo

A instalação elétrica de baixa tensão objeto deste estudo, pertence a uma clínica obstétrica localizada em Mossoró-RN. A clínica existe há 7 anos e localiza-se em um andar de um edifício comercial. Neste local são vendidas salas comerciais para serem remodeladas a fim de atender o uso final. Através de observações feitas pelo proprietário, foi possível identificar inicialmente as incoerências no funcionamento e segurança da

instalação. Diante disso, o principal foco é inspecionar as instalações, verificando as informações prévias, para chegar-se as possíveis causas do funcionamento inadequado, chegando a um diagnóstico e posteriormente correção e adequação da instalação seguindo as especificações presentes nas normas NR10:2004 e NBR 5410:2004.

3.2 Principais incoerências observadas pelo proprietário

No primeiro contato com o proprietário foram repassadas as anomalias detectadas na instalação, e o principal problema informado pelo mesmo tratava-se da dificuldade em manter e ligar os dois aparelhos de ar-condicionado ao mesmo tempo, bem como foi informada a existência de oscilações de energia elétrica causadas normalmente nos primeiros 30 minutos após ligar os equipamentos simultaneamente. O segundo problema listado foram as oscilações no equipamento de ultrassom, aparelho utilizado diretamente em contato com as pacientes atendidas diariamente, e mesmo possuindo *nobreak*, para alimentar em caso de possíveis quedas de energia, o proprietário destacou a importância da certeza da proteção, tanto do equipamento quanto dos pacientes.

Foi repassado também uma possível energização das carcaças metálicas de alguns aparelhos, principalmente os de ar-condicionado. Após necessidade de manutenção dos mesmos, o técnico executor do processo de manutenção levou vários choques, situação de alto risco que não deveria acontecer, logo mostrando inconformidade com a NBR 5410:2004, onde toda edificação deve dispor de uma infraestrutura de aterramento, denominado eletrodo de aterramento o qual deve manter equipotencialização. Este eletrodo satisfaz os requisitos de segurança; conduzindo as correntes de falta à terra sem risco de danos térmicos, termomecânicos e eletromecânicos, ou de choques elétricos causados por essas correntes [5].

3.3 Inspeção in loco das instalações elétricas

A inspeção na clínica foi realizada com intuito de verificar as instalações elétricas com base nos critérios determinados pela norma NR 10, NBR 5410/2004 e nas observações e mencionadas pelo proprietário. Com base na verificação e análise utilizando da inspeção visual, alicate amperímetro e câmara termográfica foram encontradas inconformidades que serão mostradas e discutidas ao longo do artigo. Para verificação dos níveis de tensão e de corrente nos circuitos terminais, utilizou-se alicate amperímetro digital Minipa de modelo ET-3200B. Este equipamento possui display iluminado, sendo capaz de medir correntes e tensões alternadas e contínuas, resistência elétrica capacitância e continuidade. Ele é composto de duas pontas de prova que permite principalmente medir tensão e resistência, uma garra para medir corrente elétrica que passa nos condutores.

A câmara termográfica pontual com ranger de -25°C a 300°C Flir TG165-X, foi utilizada para verificação de possíveis pontos quentes no quadro elétrico. Esse equipamento auxilia na visualização dos pontos quentes e frios que podem indicar falhas elétricas e falhas mecânicas. Essa ferramenta de medição e geração de imagens sem contato, exibe anomalias de temperatura na tela, permitindo a inspeção eficiente e identificação da fonte dos problemas mais rapidamente do que com um termômetro infravermelho de ponto único [9].

3.4 Verificação da documentação existente

Na visita inicial e através de consulta, foi obtida a informação a respeito da inexistência de projeto elétrico na instalação. De acordo com o proprietário, uma remodelação alterou totalmente a instalação elétrica previamente existente fornecida pelo prédio. No caso as salas comerciais do prédio eram vendidas vazias para que os novos proprietários modelassem e fizessem a instalação elétrica necessária à sua necessidade, existindo apenas entrega geral de energia elétrica.

Em consulta realizada ao item 6.1.8.1 da NBR 5410:2004 observa-se que a instalação deve ser executada a partir de projeto específico, que deve conter, no mínimo: plantas; esquemas unifilares e outros, quando aplicáveis [5]. No caso específico desta instalação, mostrou-se inviável fazer um projeto elétrico posterior através de mapeamento, devido à dificuldade de acesso ao forro, local onde estava a maioria dos eletrodutos instalados após a remodelagem, uma vez que na remodelagem do ambiente não foi pensado em futuras intervenções elétricas, havendo um pequeno espaço para acesso com a retirada de luminárias de 30x30 cm.

3.5 Levantamento das cargas e croqui

Sendo composta de um total de cinco ambientes, conforme croqui, mostrado na Figura 1, a clínica de obstetrícia contava com dois consultórios, sala de procedimentos, recepção e banheiro totalizando algo em torno de 170 m². Na recepção encontrava-se o quadro elétrico, próximo a porta de entrada. Em seguida observa-se a Tabela 1, que mostra a síntese das áreas de cada ambiente existente na referida clínica.

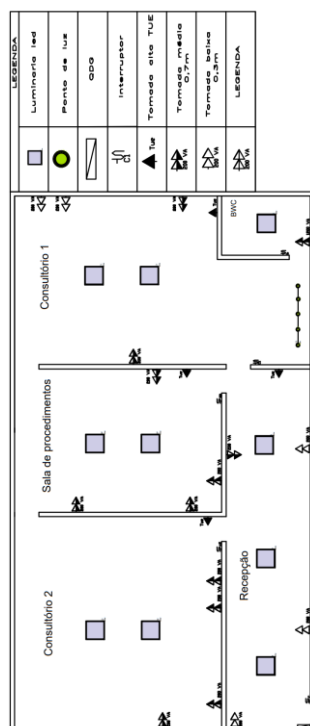


FIGURA 1. Croqui da clínica de obstetrícia
Fonte: Autoria própria, 2021.

TABELA 1. Área aproximada dos ambientes

Ambiente	Área (m ²)	Perímetro (m)
Consultório 1	39,60	25,26
Consultório 2	50,04	28,29
Sala de Procedimento	33,59	23,7
Recepção	34,60	30
Banheiro	6,00	10

Fonte: Autoria própria, 2021.

Seguindo as etapas de projeto, através da listagem dos equipamentos, verificação da quantidade de tomada de uso Geral (TUG) e Tomada de Uso Especifico (TUE) por ambiente (*vide* Tabela 2), foi possível analisar se a instalação seguia o previsto na NBR 5410:2004, que atribui o mínimo de pontos de tomadas e iluminação de acordo com o tamanho dos ambientes. Nesta etapa também foi possível analisar a carga máxima da instalação, e no caso, foram considerados os valores de potência média dos equipamentos do mesmo tipo [10].

TABELA 2. Levantamento de cargas

<i>Ambiente</i>	<i>Cargas uso geral</i>	<i>Potência aprox.</i>	<i>Cargas uso específico</i>	<i>Potência aprox.</i>
Consultório 1	Televisão 55"	350 W	Ar-condicionado	2200 W
	Computador	300 W		
	Impressora	45 W		
	Telefone	5 W		
	Frigobar	90 W		
	Ultrassom	85 W		
Consultório 2	Iluminação	105 W	Ar-condicionado	2200 W
	Laptop	70 W		
	Impressora	45 W		
	Telefone	5 W		
Sala de Procedimento	Iluminação	60 W	Ar-condicionado	2200 W
	Computador	300 W		
Recepção	Televisão 55"	350 W	Ar-condicionado	2200 W
	Telefone	5 W		
	Impressora	45 W		
	Purificador de água	200 W		
	Iluminação	90 W		
Banheiro	Iluminação	30 W		
Total geral:		11340 W		

Fonte: Autoria própria, 2021.

Por meio do levantamento aproximado de carga, foi mensurada a potência máxima média consumida da instalação registrando um total de 11.340 W, mostrando que o circuito de alimentação e disjuntor existente na instalação estava coerente, uma vez que em uma ligação monofásica a corrente nominal é dimensionada pela Equação (1), chegando ao valor de 56,02 A, sendo esta instalação alimentada por um disjuntor de 63 A. Ressalta-se que neste cálculo o valor do fator de potência considerado refere-se ao valor mínimo determinado pelas concessionárias de energia, no caso, 0,92.

$$I_p = \frac{P_n}{V * \cos \theta} \quad (1)$$

Sendo:

I_p : corrente do projeto do circuito, em ampères;

P_n : potência nominal do circuito, em watts;

V : tensão entre fase e neutro, em volts;

$\cos \theta$: fator de potência.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse dos dados já mencionados na seção 3, a referida seção tratará sobre todas as análises realizadas, incluindo também a análise da inspeção visual do quadro elétrico e dos resultados dos testes com os equipamentos, sendo possível através de consultas às normas, identificar as divergências normativas na instalação de BT da clínica analisada. Vale mencionar que partindo das dificuldades identificadas na seção 3, e sabendo da importância de seguir o mínimo estabelecido nas normas, ressaltando também que de acordo com a situação, do pouco tempo de execução das intervenções e verificações, por se tratar de uma clínica de obstetrícia com horários e agendamento de pacientes bem definidos, não seria possível e nem viável para o proprietário uma remodelação completa, sendo colocado pelo mesmo a importância de uma readequação pontual que não altere bruscamente os compromissos com os pacientes e nem as configurações existentes de maneira a impedir a realização do trabalho.

4.1 Inconformidades encontradas por inspeção do quadro elétrico e circuitos terminais

Na sequência da inspeção in loco das instalações através da observação do quadro, verificou-se a ausência de uma identificação coerente dos circuitos terminais, e também a diminuição da seção nominal do condutor de aterramento que era fornecida com seção de 16 mm² e foi reduzida para 4 mm² sendo conectado no barramento de terra do quadro como demonstrado na Figura 2.



FIGURA 2. Condutor de aterramento com diminuição da seção nominal
Fonte: Autoria própria, 2021.

Observou-se também a elevada ocupação e desorganização dos eletrodutos que saiam pelo quadro elétrico para os circuitos terminais, com total de 9 circuitos divididos em dois eletrodutos de 25 mm² e um total de 27 condutores distribuídos nos mesmos, uma vez que de acordo com a tabela 42, consultada na NBR 5410:2004, a capacidade de condução de corrente está diretamente associada a taxa de ocupação dos eletrodutos, sendo necessário correção aplicável a condutores agrupados em feixe. Além disso, observou-se incoerência no dimensionamento da seção nominal dos condutores, principalmente nos circuitos de uso específico.

As TUE'S estavam alimentadas com condutores de seção nominal de 2,5 mm², que em uma situação ideal alimentaria as potências dos aparelhos de ar-condicionado Split Inverter 24000 BTU'S. Normativamente para 2 condutores carregados conforme consulta à tabela 36 da NBR 5410:2004, condutores de seção 2,5 mm² suportam até 24 A [5]. Porém ao multiplicar pelo fator de correção 0,45, retirado da consulta realizada a tabela 42 da mesma norma, que é dado pela taxa de ocupação mencionada anteriormente, tem-se que para essa seção a capacidade de condução diminuirá para 10,8 A, não sendo capaz de entregar de forma segura as correntes necessitadas pelos aparelhos de ar-condicionado. Logo tal fato, justifica a dificuldade de utilizar os aparelhos condicionadores de ar, informações repassadas pelo proprietário no início da seção III, além disso, demonstra a insegurança e ineficiência energética da instalação [5].

Foi observado também a existência de um disjuntor diferencial residual que estava desconectado e sem utilização. A alta taxa de ocupação dos eletrodutos 2 e 3 é demonstrado na Figura 3, utilizados para circuitos terminais. Em contrapartida, no eletroduto 1 de alimentação vinda do prédio, a ocupação está coerente com a NBR 5410 onde, a taxa máxima de ocupação de eletrodutos em relação à área da seção transversal não deve ser superior a 53% para um condutor ou cabo, 31% para dois condutores ou cabos e 40% para três ou mais condutores ou cabos.

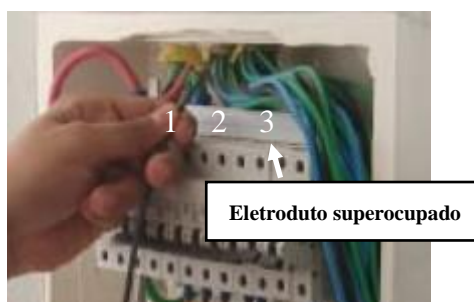


FIGURA 3. Quadro de distribuição da clínica
Fonte: Autoria própria, 2021.

4.2 Inconformidades encontradas através de testagem com os equipamentos

Iniciadas as verificações com os equipamentos, utilizou-se o alicate amperímetro para identificação dos circuitos terminais e mapeamento da instalação. Através dos testes de continuidade foi possível realizar levantamento da distribuição e agrupamento das TUG'S, bem como identificação dos circuitos de uso específico e iluminação. Os vários testes com o alicate, mostraram que o agrupamento e distribuição das TUG'S nos circuitos terminais, estavam coerentes com a NBR 5410, onde o número de pontos de tomada e potência deve ser determinado em função da destinação do local e dos equipamentos elétricos que podem ser utilizados.

A clínica possui oito pontos de tomadas para cada um dos ambientes, no caso, na recepção, sala de procedimento, consultório 1 e 2 e ainda outros dois pontos de tomada no banheiro, de acordo com a 5410:2004, com a atribuição das respectivas potências indicadas para cada ambiente específico e pela sua área como mencionado anteriormente, foi possível fazer um somatório das potências das TUG'S atribuídas, totalizando 4400 W. Utilizando a capacidade de corrente mencionada anteriormente e de acordo com a NBR 5410:2004, os dois circuitos de TUG'S existentes no quadro elétrico com seção nominal de 2,5 mm² e com capacidade de 10,8 A, estão protegidos por disjuntores de 20 A, que suprem com segurança a necessidade das cargas das TUG'S analisadas.

Embora as cargas distribuídas das TUG'S estivessem coerentes com a capacidade de corrente dos circuitos terminais das mesmas, foi possível observar, através de testes adicionais, que algumas tomadas TUG'S não estavam aterradas, logo estavam desconforme e trazendo insegurança, uma vez que todo quadro elétrico deve possuir o condutor terra instalado em todos os circuitos elétricos, inclusive nos circuitos de iluminação, quando necessário [5]. A ausência de aterramento nas TUG'S gerou instabilidade principalmente no equipamento de ultrassom e a ausência de aterramento das condensadoras e ausência de circuitos TUE'S, causou energização das carcaças chegando aproximadamente 37V. Tal identificação está de acordo com as informações passadas pelo proprietário no primeiro contato com o mesmo e comprovadas através de teste com alicate amperímetro. A Figura 4, mostra a carcaça de ar-condicionado energizada, onde na imagem retrata a medição de tensão realizada entre a carcaça de ar-condicionado e aterramento.



FIGURA 4. Energização das carcaças do ar-condicionado
Fonte: Autoria própria, 2021.

Continuando a análise, ainda em relação às cargas de uso específico, que se trata dos aparelhos de ar-condicionado, percebeu-se que além da energização das carcaças metálicas das condensadoras, mostrada na Figura 4, foi possível identificar o compartilhamento do condutor neutro dos circuitos específicos, o que gerou o principal problema no suprimento de potência durante o funcionamento dos aparelhos. A corrente no neutro estava alta, pois um único circuito de neutro estava alimentando 2 aparelhos de ar condicionado, estando totalmente desconforme com a NBR 5410:2004 e trazendo insegurança a instalação. Os circuitos terminais devem ser individualizados pela função dos equipamentos de utilização que alimentam. Em particular, devem ser previstos circuitos terminais distintos para pontos de iluminação e para pontos de tomada [5].

Quando as cargas de iluminação foram testadas foi verificada a ausência de aterramento nas mesmas, e os condutores de aterramento chegavam até aos pontos de iluminação, mas não estavam conectados. Foi identificado também que ocorriam oscilações de energia no ambiente e as lâmpadas estavam queimando com

bastante facilidade. Vale informar que tais lâmpadas em sua maioria são de tecnologia tipo LED com uma vida útil e eficiência elevada.

Na instalação elétrica da clínica não havia supressores de surto fase e neutro, sendo prevista a obrigatoriedade na NBR 5410 no item 5.3.4.2.1. Essa seção da Norma informa que as instalações devem ser providas de dispositivos que assegurem proteção contra sobrecargas em todos os pontos onde uma mudança (por exemplo, de seção, de natureza, de maneira de instalar ou de constituição) resulte em redução do valor da capacidade de condução de corrente dos condutores. Por fim, as imagens termográficas, que serão apresentadas nos resultados da intervenção, possibilitaram a observância de pontos quentes no quadro elétrico, e os circuitos de uso específico demonstraram aquecimento, aquecimento este que possivelmente estava relacionado às incoerências dos circuitos terminais, e também com seção nominal incoerentes com a NBR 5410, como mencionado anteriormente.

4.3 Medidas corretivas propostas

Após inspeção do quadro e testagem com os equipamentos, foram propostas medidas corretivas da instalação para o proprietário, com informações das inconformidades normativas e o que estas estavam gerando relacionadas com o diagnóstico previamente realizado.

- Correção dos circuitos sem aterramento e aterramento das carcaças metálicas das condensadoras dos aparelhos de ar condicionado, como também aterramento de toda iluminação.
- Desassociação de neutro compartilhado nos aparelhos de ar-condicionado, correção dos condutores das TUE'S com aumento da seção nominal de 2,5 mm² para 4 mm² e correção da alimentação invertida dos mesmos.
- Instalação de um novo circuito de uso específico para tomada que alimentava o aparelho de ultrassom.
- Identificação dos circuitos terminais através de etiquetas e marcações nos cabos dentro da tampa do quadro, e sinalização.
- Instalação de dispositivos supressores de surto neutro e fase, bem como instalação do Dispositivo Diferencial Residual (DDR).
- Correção da diminuição da seção nominal do aterramento fornecido pelo edifício com substituição da emenda de 4 mm² para 16 mm².
- Diminuição da taxa de ocupação dos eletrodutos através de instalação de um Barramento de Equipotencialização Local (BEL) para o aterramento da instalação elétrica da clínica.
- Elaboração de diagrama unifilar para representação exata dos circuitos elétricos e seus componentes.

4.4 Execução das medidas corretivas

Repasadas as medidas propostas para o proprietário e após análise do mesmo, foram iniciadas as correções da instalação em dias e horários sem atendimento na referida clínica. Na correção dos circuitos de aterramento não foram encontradas muitas dificuldades, pois a maioria possuía o condutor próximo aos pontos necessários, mas estes estravam sem conexão.

Para aterramento das carcaças metálicas das condensadoras e correção da alimentação que estava invertida, o acesso era ruim e inseguro por se tratar do quinto andar e os aparelhos estarem na parte externa do edifício, além da existência de outros aparelhos de outras salas muito próximos. Foi necessária a instalação de novos eletrodutos na parte superior do forro até as condensadoras para passagem dos novos condutores de 4 mm² terra, neutro e fase, corrigindo a seção nominal anterior e a associação de neutros irregular.

Com a nova alimentação das condensadoras, também foi possível levar a partir circuito interno das mesmas a alimentação para as evaporadoras, estando presente nesse circuito bornes necessários para a alimentação, uma vez que se tratava de ar-condicionados inverter e era a forma correta de ligação presente no manual ignorada anteriormente.

O equipamento de ultrassom que anteriormente estava sem aterramento e sendo utilizado em tomada de uso geral, foi conduzido para um circuito individual, ou seja, foi conectado à uma TUE, visando maior proteção e controle de quaisquer possíveis oscilações futuras na instalação e facilidade de manobra e identificação.

No quadro elétrico foram marcados os circuitos terminais e identificados através de etiquetas e devidamente sinalizados na parte externa. Também foram instalados supressores de surto fase e neutro e um disjuntor diferencial residual para toda a instalação.

A alta taxa de ocupação dos eletrodutos foi sanada através da criação de um BEL (Barramento de Equipotencialização Local), desafogando os eletrodutos 2 e 3 mostrado na Figura 3 que estavam sobrecarregados, sendo necessário o corte de alguns condutores que iriam ser substituídos para conseguir retirá-los. O BEL foi instalado em uma caixa secundária possuindo apenas um barramento de terra para aterramento das massas, e o mesmo barramento conectado ao principal por um condutor de 16 mm², alterando de forma insignificante a impedância do aterramento anterior.

Todas as alterações foram feitas a partir do diagrama unifilar da instalação elétrica, contendo a representação exata dos circuitos elétricos e seus componentes, o Apêndice 1, retrata diagrama unifilar seguido para readequação.

4.5 Resultados da intervenção

Realizadas as correções foi possível sintetizar os resultados das mesmas. Com a instalação dos eletrodutos para a alimentação correta dos ares-condicionados, realizado o aterramento das carcaças para desernegação e dissociação de neutro e após testagem nenhuma das ocorrências anteriores se repetiram. Os equipamentos tiveram funcionamento mútuo, fluido com carcaças em 0V e com as correntes de fase e neutro condizentes com seu consumo. Na Figura 5 é possível visualizar os novos eletrodutos instalados, e testagem da tensão nas carcaças, a testagem foi feita utilizando a grade parafusada no chão como referência 0 V em contato com a ponta de prova negativa e a positiva em contato com a carcaça da condensadora.



FIGURA 5. Eletrodutos instalados e testagem da carcaça
Fonte: Autoria própria, 2021.

A Figura 6, mostra a ligação anterior (a) incorreta e a correção feita com condutores vindos da condensadora, a remoção de emendas malfeitas e correção das cores dos condutores determinados pela norma.

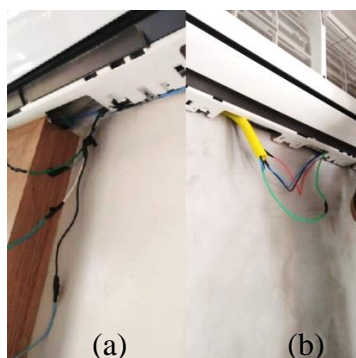


FIGURA 6. Ligação anterior (a) incorreta e dos (b) novos condutores de alimentação das evaporadoras vindos do circuito interno das condensadoras
Fonte: Autoria própria, 2021.

A especificação da tomada do equipamento de ultrassom, sendo disponibilizado para o mesmo um circuito TUE com aterramento adequado, sanou as oscilações no aparelho de ultrassom deixando o mesmo sem interferência e com uma proteção maior e satisfatória. O aterramento de toda a iluminação e a correção das outras incoerências, resultaram na diminuição da quantidade de lâmpadas queimadas e sanou as oscilações nas mesmas. A Figura 7 mostra o aterramento de todas as luminárias da clínica



FIGURA 7. Processo de aterramento das luminárias
Fonte: Autoria própria, 2021.

Os circuitos e componentes do quadro elétrico foram trocados e inseridos DPS fase e neutro e disjuntor diferencial residual, protegendo contra surto de tensão e correntes que poderiam causar choques elétricos. Os condutores de saída foram marcados e identificados de acordo com diagrama unifilar. Bem como a etiquetagem para definição de cada circuito foi feita facilitando manobras e trazendo maior segurança. A Figura 8, mostra as alterações e correções citadas.

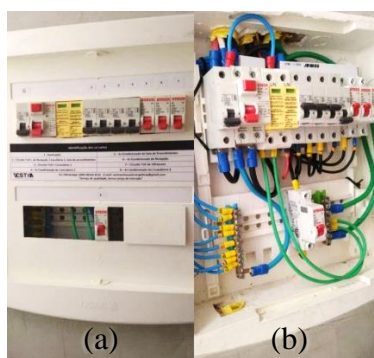


FIGURA 8. Registro da parte interna e externa do quadro elétrico (a) Identificação dos circuitos terminais
(b) Componentes e dispositivos instalados
Fonte: Autoria própria, 2021.

A instalação do BEL sanou os problemas causados devido à alta taxa de ocupação, bem como liberou a seção transversal do eletroduto prevista em norma para as configurações da instalação. A NBR 5410:2004 permite o compartilhamento de terra, medida aplicada visando melhor custo-benefício e evitando maiores intervenções civis. A Figura 9 mostra a nova taxa de ocupação e o BEL instalado.

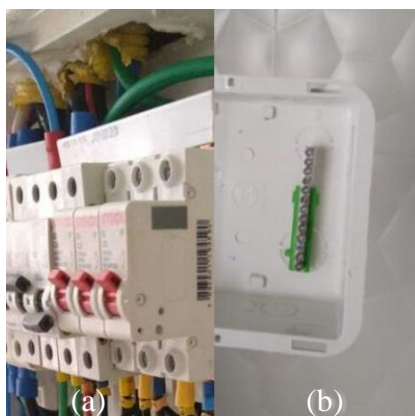


FIGURA 9. (a) Eletrodutos 1 e 2 com taxa de ocupação menor (b) Caixa de sobrepor com barramento BEL
Fonte: Autoria própria, 2021.

Através do aumento da seção do condutor terra fornecido pelo prédio de 16 mm², com a união para um de mesma seção nominal e isolamento com fita de alta fusão na junção, foi possível chegar até o ponto de conexão no barramento com a seção nominal correta, a diminuição tinha sido feita devido condutor do prédio não chegar até o barramento. Com a correção da diminuição incoerente da seção nominal do fio de aterramento, tornou o aterramento seguro e coerente com o previsto em norma, conforme mostra a Figura 10.

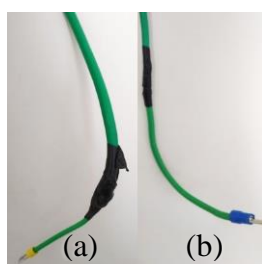


FIGURA 10. Correção da emenda do condutor de terra com seção nominal diminuída
(a) Emenda com cabo de 4 mm² e fita isolante comum (b) Emenda com fio de 16 mm² e fita de alta fusão.
Fonte: Autoria própria, 2021.

Efetuada todas as correções propostas e analisados os resultados, foi tirada a termografia do quadro corrigido para a observância da temperatura de funcionamento e pontos quentes. Após as correções propostas e executadas, a temperatura de funcionamento de toda parte interna do quadro não ultrapassou 43° C graus e não apresentando variância maior que 5° C graus. Demonstrando funcionamento sem pontos quentes, como pode ser visto na Figura 11.

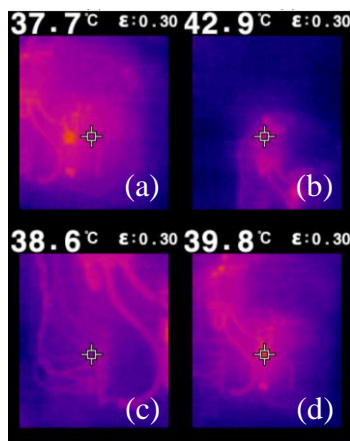


FIGURA 11. (a) Imagem térmica do barramento de terra; (b) Imagem térmica do disjuntor geral; (c) Imagem térmica do barramento de neutro; (d) Imagem térmica do disjuntor do ar-condicionado do consultório 1.
Fonte: Autoria própria, 2021.

5. CONCLUSÕES

As NR 10 e NBR 5410 trazem como principais objetivos garantir a segurança, funcionamento adequado, eficiência e durabilidade da instalação elétrica de baixa tensão. Com isso, é evidente a grande importância de seguir suas instruções. O presente trabalho teve o objetivo cumprido, uma vez que através da análise realizada foi possível sintetizar as incoerências normativas e o que estas causaram às instalações elétricas de BT da clínica, tomando como base as divergências identificadas em consulta à NR 10 e NBR 5410. Sendo assim, foi possível buscar alternativas para resolução dos problemas encontrados e sanar as divergências baseadas nos requisitos mínimos impostos pelas normas.

Através da aplicação das correções e verificação do resultado de tais correções, foi possível comprovar, mais uma vez, que a aplicação das normas desde a prospecção inicial de uma instalação elétrica são de bastante relevância para evitar readaptações futuras, que são dispendiosas e muitas vezes de difícil execução, causando prejuízos materiais e a saúde humana.

Pode-se concluir ainda que apesar do pouco tempo de existência da clínica, mesmo possuindo uma instalação elétrica relativamente nova, a mesma apresentou anomalias nas instalações, ocasionando transtornos, insegurança, ineficiência e prejuízos materiais frequentes. Logo, o presente trabalho mostrou a importância do diagnóstico energético em instalações elétricas para que através das necessidades de correção, conhecimento e experiência fosse possível chegar à soluções seguras, eficientes e eficazes para os problemas apontados.

REFERÊNCIAS

- [1] NORMA REGULAMENTADORA. NR 10: Segurança em Instalações e Serviços de eletricidade. Rio de Janeiro, 2004.
- [2] LOPES, VICTOR DE PAIVA. Uma contribuição para o diagnóstico energético da UFCG - Campus de Campina Grande. Dspace.sti.ufcg.edu.br. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/17646>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [3] NORMA REGULAMENTADORA. NR 1: Disposições gerais e gerenciamento de riscos ocupacionais. Rio de Janeiro, 2004
- [4] ALENCAR, Rodrigo Lacerda Arraes De. Inspeção predial: estudo de caso do bloco acadêmico 703 (det) da universidade federal do ceará/campus do píci. Repositorio.ufc.br. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/42329/3/2018_tcc_rlaalencar.pdf>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [5] NORMA REGULAMENTADORA. NBR-5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- [6] LIMA FILHO, Domingos Leite. Projetos de instalações elétricas prediais. São Paulo (SP): Erica, 2006.
- [7] Quadro Elétrico de Distribuição. Mceig.com.br. Disponível em: <<https://www.mceig.com.br/quadro-eletrico-distribuicao>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [8] Resumo Livro Manutenção. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM285/2015-2/Conte%FADos/Resumo%20Livro%20Manuten%E7%E3o.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [9] Teste da resistência de isolamento em cabos. Jund light. Disponível em: <<https://www.jundlight.com.br/teste-da-resistencia-isolamento-cabos>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [10] CONSUMO DIÁRIO E MENSAL DOS PRINCIPAIS ELETRODOMÉSTICOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE USO. If.ufrgs.br. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20011/Rodrigo/tabela.html>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [11] Alicata Amperímetro Digital ET-3200B MINIPA. Palácio das Ferramentas. Disponível em: <<https://www.palaciodasferramentas.com.br/produto/2112/acessorios-p-mecanicos/multimetrostermometrostacometros/alicate-amperimetro-digital-et3200b-minipa/>>. Acesso em: 22 maio 2021.
- [12] Consumidores - Tabela de Consumo dos Aparelhos - EFLUL. Eflul.com.br. Disponível em: <<http://www.eflul.com.br/consumidores/tabela-de-consumo>>. Acesso em: 22 maio 2021.



Artigo

Análise comparativa entre métodos numéricos e analíticos em circuitos transitórios

Luiz Henrique Rodrigues Farias^[1], Paulo Cesar Linhares Da Silva^[2], Antônia Jocivania Pinheiro^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; luizhenrique272725@gmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; linhares@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; vaniamat@ufersa.edu.br

Recebido: 24/03/2022;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: Os métodos numéricos e analíticos são de suma importância na análise e modelagem de problemas na engenharia. Diante deste contexto, este trabalho visa realizar uma metodologia de estudo e ensino de circuitos elétricos clássicos. Tal metodologia baseia-se em um estudo analítico e numérico das equações diferenciais que envolvem os circuitos. A programação utilizada é feita na linguagem C/C++. A equação diferencial é resolvida de maneira analítica e comparada com as soluções numéricas do método de Runge Kutta de 4ª ordem (RK 4ª) e o método das séries de potência. Foi constatado ao final das soluções um erro percentual pequeno, o que mostra a precisão e aplicabilidade dos métodos numéricos empregados.

Palavras-chave: Runge Kutta; Série de Potência; Circuitos Elétricos.

Abstract: Numerical and analytical methods are of paramount importance in the analysis and modeling of engineering problems. Given this context, this work aims to carry out a methodology for the study and teaching of classical electrical circuits. Such methodology is based on an analytical and numerical study of the differential equations that involve the circuits. The programming used is done in the C/C++ language. The differential equation is solved analytically and compared with the numerical solutions of the 4th order Runge Kutta method (RK 4th) and the power series method. A small percentage error was found at the end of the solutions, which shows the precision and applicability of the numerical methods used.

Key-words: Runge Kutta; Power Series; Electric circuits.

1. INTRODUÇÃO

No intuito de solucionar problemas que surgem no campo científico e tecnológico, foram desenvolvidos métodos matemáticos que utilizam operações matemáticas, lógicas e relacionais, além de teoremas formulados por grandes nomes da ciência. Como por exemplo, o Teorema de Pitágoras elaborado por Pitágoras e utilizado atualmente em diversas aplicações, Teorema de Pascal usado em números binomiais, elaborado por Blaise Pascal, o Teorema Fundamental do Cálculo elaborado por Isaac Barrow sendo base para as operações diferenciais e integrais do cálculo, dentre vários outros. Porém, com o desenvolvimento das novas tecnologias e a possibilidade de execução de uma quantidade enorme de operações em um pequeno intervalo de tempo, nunca visto anteriormente, verificou-se que em alguns casos a utilização de métodos e algoritmos matemáticos complexos podem ser substituídos a fim de utilizar das ferramentas tecnológicas que alavancam as análises enquanto continuam a suprir os requerimentos das soluções, sendo uma delas a rapidez da disponibilização dos dados em tempo real, no qual pequenas variações podem ser explicitadas dependendo do grau de suas relevâncias.

Logo, adaptando as necessidades dos problemas e auxiliando para uma maior eficiência, surgem os métodos numéricos que utilizam as ferramentas tecnológicas que estão a se desenvolver, dispersando a inovação tecnológica nas mais diversas áreas (elétrica, mecânica, química, entre outros) [1]. Generalizando os benefícios da utilização dos métodos numéricos podemos destacar a rapidez da disponibilização dos dados em tempo real, como mencionado anteriormente, e no alto nível de precisão, no qual é necessário dar ênfase, pois esta característica permite a adaptação das soluções para o caso abordado e suas finalidades de uso, minimizando os erros através do aumento da quantidade de iterações que o procedimento numérico executa, e/ou por uma modelagem mais adequada do problema.

O estudo da eletricidade e magnetismo, ou eletromagnetismo, possui um enorme peso na construção

tecnológica e social na atualidade [2], proporcionando o desenvolvimento de redes de transmissão de energia entre longas distancias que possibilitaram a produção de energia elétrica e abastecimento para a população, o desenvolvimento de eletroeletrônicos que auxiliam no dia-a-dia da população e o desenvolvimento da tecnologia de informação (T.I.) para a disponibilização de informação e comunicação. Porém, o conhecimento necessário para a disponibilização dessas funcionalidades empregadas no nosso cotidiano é complexo, proporcionado por pesquisas extensas que percorreram várias gerações. No entanto, estudos de circuitos transitórios fundamentais, que modificam de um estado inicial para o final em um período de transição possuindo um arranjo simples, como os circuitos resistor-capacitor (RC), resistor-indutor (RL), resistor-capacitor-indutor (RLC), facilitaram o entendimento do comportamento elétrico e magnético nas variações de tensões, correntes, cargas, auxiliando na compreensão do eletromagnetismo – sendo utilizados também na docência em livros didáticos [2].

Considerando os pontos mencionados anteriormente, este trabalho abordará as aplicações dos métodos numéricos de Runge-Kutta de 4ª ordem [1] e séries de potências [3], que será explicado posteriormente, no intuito de analisar as soluções obtidas para estabelecer o comportamento de alguns componentes nos circuitos transitórios, como corrente, tensões, e comparar, relacionar, com soluções analíticas vindas de métodos matemáticos, verificando a confiabilidade destes métodos numéricos para tais casos.

2. DESENVOLVIMENTO

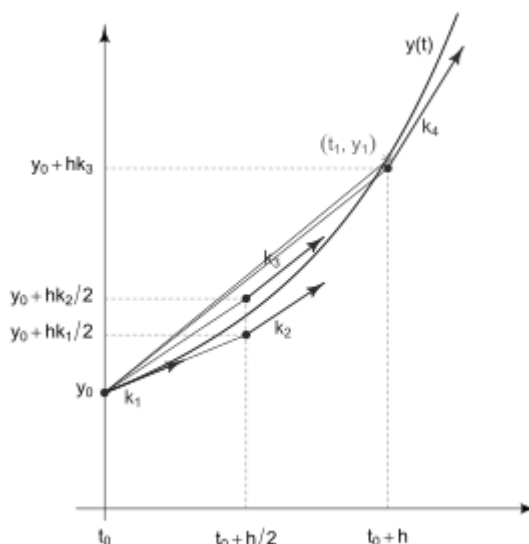
Nesta seção é abordado os métodos analíticos e numéricos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Destaca-se o uso do método de Runge Kutta de 4ª ordem com melhores resultados numéricos obtidos e também o método das séries de potência que foi aplicado para o estudo comportamental da busca das soluções das equações diferenciais que envolvem os circuitos RC, RLC e LC.

As soluções alcançadas visam representar o comportamento de alguns elementos de circuitos no período **transitório** – ou seja, em que o tempo de duração é limitado ou pouco; que é passageiro; que só dura um certo tempo -, no qual os valores de correntes, tensões, variam de condições iniciais para finais ao alcançar o chamado estado estacionário, deixando o sistema em equilíbrio. Uma das principais motivações para aplicação de métodos numéricos se dá devido ao curto intervalo de tempo, na maioria das vezes, em que ocorre o período transitório, trazendo complicações para medições em tempo real e criando a necessidade de estimativas precisas.

2.1 Método de runge-kutta de 4ª ordem

A ideia dos métodos de Runge-Kutta, é obter numericamente a solução de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) levando em consideração o cálculo das derivadas (inclinação da reta tangente) de uma função $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$, a partir de um ponto inicial $P_0 = (t_0, y_0)$.

Figura 1 – Visão Geométrica do Método de Runge Kutta de 4ª Ordem.



Fonte: Adaptado de Thaline G. Evangelista, 2018.

Esse método também se baseia na ideia da aproximação linear utilizando a primeira derivada, de acordo com a Equação 1:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{dy}{dt}h, \quad (1)$$

em que $h = t_{k+1} - t_k$ é o passo e $\frac{dy}{dt}$ é a função que representa a primeira derivada.

O método de Runge-Kutta de 4ª ordem é feito de maneira recursiva no intervalo em que a função está definida para uma quantidade limitada de iterações, segundo a equação

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4), \quad (2)$$

em que K_1, K_2, K_3 e K_4 serão calculados segundo as Equações (3)-(6) para cada ponto projetado $P_k = (t_k, y_k)$, para $k = (0, 1, 2, 3, \dots, n)$:

$$K_1 = f(t_0, y_0), \quad (3)$$

$$K_2 = f(t_0 + h/2, y_0 + K_1h/2), \quad (4)$$

$$K_3 = f(t_0 + h/2, y_0 + K_2h/2), \quad (5)$$

$$K_4 = f(t_0 + h, y_0 + K_3h). \quad (6)$$

Nesta proposta de trabalho foi utilizado o método de Runge-Kutta de 4ª ordem com as devidas condições de contorno apropriadas para o analisar o comportamento da solução das equações diferenciais ordinárias que regem os circuitos RC, RL e RLC.

2.2 Método de séries de potências

O método das séries de potência baseia-se na hipótese de que as soluções de uma equação diferencial são analíticas em alguma vizinhança de um ponto ordinário $P_0 = (t_0, y_0)$, onde são dadas as condições de contorno. Deste modo, a função possui derivadas de todas as ordens neste ponto, portanto, podem ser expressas como uma série de potências. Este método busca a solução de uma equação diferencial no formato de série de potências (Eq. 7) com os auxílios de suas derivadas dado pelas Equações (8)-(10).

$$y = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n, \quad (7)$$

$$y' = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n t^{n-1}, \quad (8)$$

$$y'' = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n t^{n-2}, \quad (9)$$

$$y^{(k)} = \sum_{n=k}^{\infty} n(n-1) \dots (n-k+1) a_n t^{n-k}. \quad (10)$$

Ao computar os primeiros termos da série e utilizando as condições de contorno Eq. (11) – (12),

$$y(0) = y_0 = a_0, \quad (11)$$

$$\frac{dy(0)}{dt} = y'_0 = a_1, \quad (12)$$

é possível encontrar os coeficientes (a_n) para uma EDO fazendo as condições de contorno, dadas em cada problema específico.

Após uma aplicação do método de séries de potências [3] nas EDOs que representam alguns dos comportamentos dos circuitos RC, RL e RLC, foram obtidas as soluções numéricas referentes à tensão no capacitor (V_C) no circuito RC em carga (Eq. 13), a corrente no indutor (i_L) no circuito RL em carga (Eq. 14) e a corrente (i_{RLC}) no circuito RLC em descarga (Eq. 15). A resistência, indutância e capacitância foram representadas nas equações a seguir, respectivamente, como R, L e C.

$$\begin{cases} a_{n+1} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{\varepsilon}{R} - \frac{a_n}{RC} \right) \\ V_C = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n t^n}{C} \end{cases}, \quad (13)$$

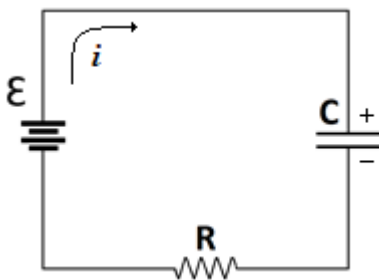
$$\begin{cases} a_{n+1} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{\varepsilon - a_n R}{L} \right) \\ i_L = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} a_{n+2} = -\frac{1}{n+2} \left(\frac{(n+1)R}{L} - \frac{a_n}{LC(n+1)} \right) \\ i_{RLC} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n \end{cases}. \quad (15)$$

2.3 Circuito rc

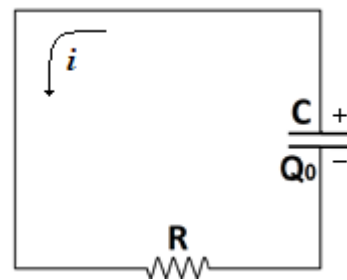
O circuito RC possui um arranjo simples composto por um resistor (R) e um capacitor (C) conectados em série. O capacitor é um componente composto por duas placas condutoras separadas por um isolante, ou imerso no vácuo [2] no qual a carga líquida ao estar em equilíbrio é igual a zero, devido a possuir cargas de módulos iguais em cada placa, no entanto, sinais opostos. No período transitório, ao transferir elétrons, as cargas são acumuladas, se o estado transitório estiver em carga (Figura 2), ou são dispersadas, se estiver em descarga (Figura 3), até a condição de equilíbrio (carga líquida igual a zero). A funcionalidade mais comum aplicada ao capacitor é acumular cargas elétricas, devido a isso, varia a corrente elétrica (fluxo de cargas) e, conseqüentemente, as diferenças de potências (ddp's).

Figura 2 – Circuito RC e fonte (ε).



Fonte: Autor, 2021.

Figura 3 – Circuito RC.



Fonte: Autor, 2021.

Para obter a equação diferencial que demonstra o comportamento dos elementos é necessário utilizar da Lei de Kirchoff (16), a relação entre *carga* (Q), diferença de *potencial do capacitor* (V) e sua *capacitância* (C) se dá através da Equação 17 e sua energia elétrica armazenada (U_E) pode ser obtida pela Equação 18.

$$\sum V = 0, \quad (16)$$

$$Q = CV, \quad (17)$$

$$U_E = \frac{1}{2} CV^2. \quad (18)$$

Aplicando a Lei de Kirchoff na Figura 2, sendo a ddp do capacitor em carga V_{CC} , a ddp do resistor V_R , é obtida a Equação 18.

$$\varepsilon - V_{CC} - V_R = 0. \quad (19)$$

Substituindo V_{CC} por $\frac{Q}{C}$, V_R por $R \frac{dQ}{dt}$ e isolando $\frac{dQ}{dt}$, tem-se

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{Q}{RC}. \quad (20)$$

A Equação 20 pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis, ou aplicando método numérico. A solução analítica provinda da separação de variáveis é

$$Q(t) = \varepsilon C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (21)$$

Sendo $i = \frac{dQ}{dt}$, tem-se

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (22)$$

Substituindo $V_R = iR = \varepsilon e^{-\frac{t}{RC}}$ na Equação 19 e isolando V_{CC} , é obtida a Equação 23,

$$V_{CC}(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (23)$$

Deste modo, as soluções analíticas para o circuito RC em carga, são as Equações 24, 25, 26:

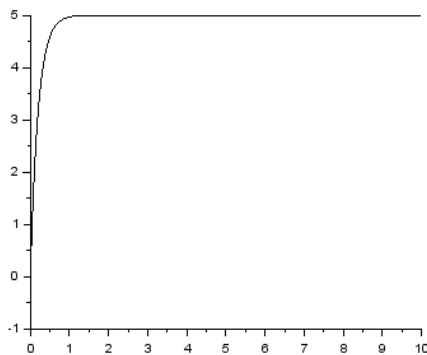
$$Q(t) = Q_F \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad \therefore Q_F = \varepsilon C, \quad (24)$$

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \therefore I_0 = \frac{\varepsilon}{R}, \quad (25)$$

$$V_{CC}(t) = \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (26)$$

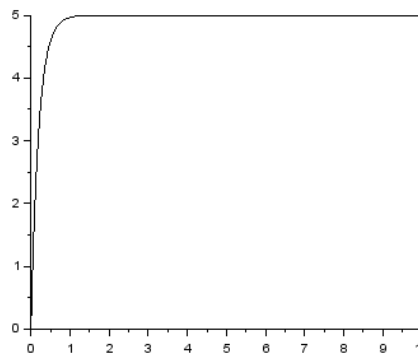
Para visualização e comparação dos resultados obtidos pelo método analítico e os métodos numéricos empregados, foram plotados nas Figuras 4 (a), 4 (b) e 4 (c).

Figura 4 (a) – Solução analítica para Eq. 26.



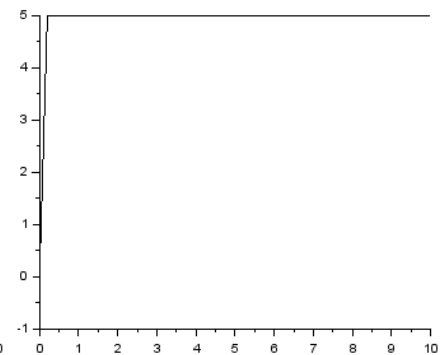
Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 4 (b) – Solução com Runge-Kutta para Eq. 20.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 4 (c) – Solução com séries de potências para Eq. 20.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Parâmetros utilizados: fonte (ε) de 5V; capacitância (C) de 2mF; resistência (R) de 100 Ω ; e foram calculados 5000 pontos no código em C++ para ambos os métodos.

Tabela 1 – Tensão no capacitor no circuito RC em carga.

Tempo (s)	Tensão (V)				
	Medida Analítica	Runge-Kutta 4ª ord.	Séries de Potências	Erro Percentual (%) – RK 4ª	Erro Percentual (%) – Séries de Potências
0,02	0,475813	0,475813	0,500000	0,000000	5,083387
0,04	0,906346	0,906346	1,000000	0,000000	10,333178
0,06	1,295908	1,295909	1,500000	7,716597e-7	15,748944
0,08	1,648399	1,648400	2,000000	6,066492e-7	21,329858
0,10	1,967346	1,967347	2,500000	5,082990e-7	27,074770

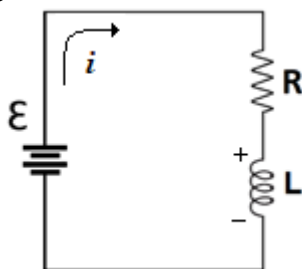
Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Tabela 1, o método de Runge Kutta de 4ª ordem apresentou soluções com melhores aproximações em relação as soluções analíticas se comparado com o método de série de potências com erros percentuais inferiores a 10^{-6} .

2.4 Circuito RL

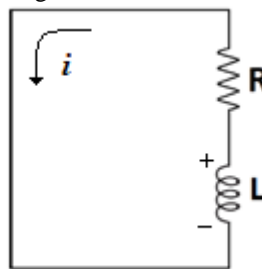
De forma semelhante, o arranjo do circuito RL é composto por um resistor (R) e um indutor (L) conectados em série. O objetivo de um indutor é fornecer uma corrente que contrarie a variação de corrente no circuito [2], logo, sua aplicação em um circuito auxilia a manter a corrente constante. Diferente do capacitor, o indutor armazena carga magnética, porém, também possui períodos transitórios de carga e descarga, demonstrados respectivamente nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Circuito RL e fonte (\mathcal{E}).



Fonte: Autor, 2021.

Figura 6 – Circuito RL.



Fonte: Autor, 2021.

A relação entre a taxa de variação da corrente (di/dt), diferença de potencial do indutor (V_L) e indutância (L) se dá através da Equação 27, e a energia magnética armazenada (U_M) pelo indutor (solenóide) com a corrente (I) pode ser obtida pela Equação 28.

$$V_L = L \frac{di}{dt}, \quad (27)$$

$$U_M = \frac{1}{2} LI^2. \quad (28)$$

Aplicando a Lei de Kirchhoff (Eq. 16) para a Figura 5, circuito RL em carga, podemos obter a equação 29:

$$\mathcal{E} - L \frac{di}{dt} - iR = 0. \quad (29)$$

Isolando a taxa de variação da corrente, tem-se

$$\frac{di}{dt} = \frac{\mathcal{E} - iR}{L}. \quad (30)$$

Utilizando o método de separação de variáveis na Equação 30, é obtida a solução analítica a seguir:

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} \left(1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right). \quad (31)$$

A taxa de variação da corrente pode ser dada desta forma por $\frac{d}{dt} [i(t)]$, derivada da Equação 31, sendo

$$\frac{di}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{L} e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}. \quad (32)$$

Ao substituir na Equação 27, será obtida a ddp do indutor, Equação 33.

$$V_L = \mathcal{E} e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}. \quad (33)$$

Deste modo, as soluções analíticas para o circuito RL em carga, são as Equações 34, 35, 36:

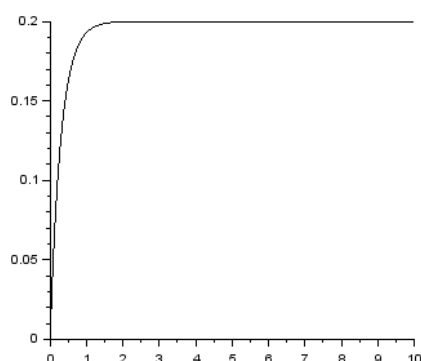
$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right), \quad (34)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}, \quad (35)$$

$$V_L = \varepsilon e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}. \quad (36)$$

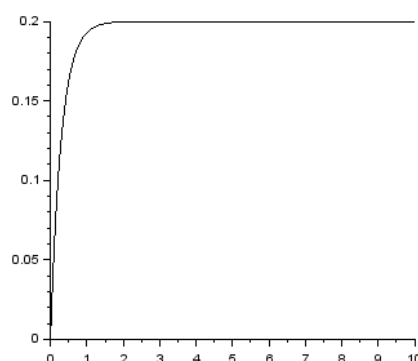
Para visualização e comparação dos resultados obtidos pelo método analítico e os métodos numéricos, foram plotados nas Figuras 7 (a), 7 (b) e 7 (c).

Figura 7 (a) – Solução analítica para Eq. 34.



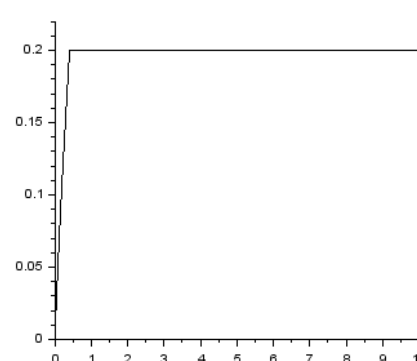
Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 7 (b) – Solução com Runge-Kutta para Eq. 30.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 7 (c) - Solução com série de potências para Eq. 30.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Parâmetros utilizados: fonte (ε) de 20V; indutância (L) de 30H; resistência (R) de 100 Ω ; e foram calculados 5000 pontos no código em C++ para ambos os métodos.

Tabela 2 – Corrente no circuito RL em carga.

Tempo (s)	Corrente (A)			Erro Percentual (%) – RK 4ª	Erro Percentual (%) – Séries de Potências
	Medida Analítica	Runge-Kutta 4ª ord.	Séries de Potências		
0,02	0,012899	0,012899	0,013031	0,000000	1,024939
0,04	0,024965	0,024965	0,025490	0,000000	2,101334
0,06	0,036254	0,036254	0,037426	0,000000	3,232051
0,08	0,046814	0,046814	0,048884	0,000000	4,420089
0,10	0,056694	0,056694	0,059907	0,000000	5,668666

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Tabela 2 e semelhante aos dados apresentados na Tabela 1 referente ao circuito RC, o método de Runge Kutta de 4ª ordem apresentou soluções com melhores aproximações em relação as soluções analíticas se comparado com o método de série de potências com erros percentuais inferiores a 10^{-6} .

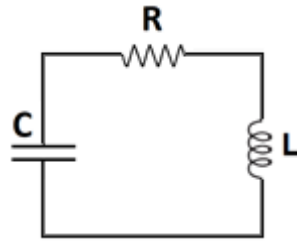
2.5 Circuito RLC amortecido

O arranjo do circuito RLC amortecido é composto por um resistor (R), um indutor (L) e um capacitor (C) conectados em série, como mostrado na Figura 8. O capacitor será responsável por acumular energia elétrica e transferir pelo circuito em forma de corrente, tendo seu comportamento de variação restringido pelo indutor, não ocorrendo de forma abrupta, além de ser convertida em parte a energia magnética e a restante dispersada em forma de calor pelo resistor. Sendo este processo repetido de forma análoga do indutor para o capacitor, e repetido continuamente infinitas vezes, convergindo os elementos do circuito a um estado estacionário, ou seja, a valores constantes.

Em diversas ocasiões, o estudo do circuito RLC tem como objetivo demonstrar seu comportamento de

amortecimento, trazendo uma maior suavidade as inclinações da função *Corrente x Tempo*.

Figura 8 – Circuito RLC.



Fonte: Autor, 2021.

Como ferramentas para auxiliar as deduções das equações diferenciais que representam o comportamento dos elementos do circuito RLC, temos a Lei de Kirchoff (Eq. 37), baseada na Lei de Conservação de Energia, e as equações que representam a diferença de potencial no indutor (Eq. 38), do resistor (Eq. 39) e a do capacitor (Eq. 40).

$$\sum V = 0, \quad (37)$$

$$V_L = L \frac{di(t)}{dt}, \quad (38)$$

$$V_R = i(t)R, \quad (39)$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int i(t)dt. \quad (40)$$

Aplicando a Lei de Kirchoff para a Figura 8, circuito RLC em descarga, pode-se obter a Equação 41.

$$V_L + V_R + V_C = 0. \quad (41)$$

Substituindo as tensões pelas Equações 38, 39 e 40.

$$L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R + \frac{1}{C} \int i(t)dt = 0. \quad (42)$$

Derivando novamente por t e depois multiplicando por $\frac{1}{L}$:

$$\frac{d^2i}{d^2t} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0. \quad (43)$$

Abordando através do método de EDO homogênea com coeficientes constantes [3], é possível adquirir as soluções associando funções do tipo e^{st} . Com,

$$\begin{cases} s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \\ s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \end{cases} \text{ onde } \alpha = \frac{R}{2L} \text{ e } \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (44)$$

Logo, existem três casos diferentes, sendo

- Super amortecido ($\alpha^2 > \omega_o^2$)

$$i(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t}. \quad (45)$$

- Criticamente amortecido ($\alpha^2 = \omega_o^2$)

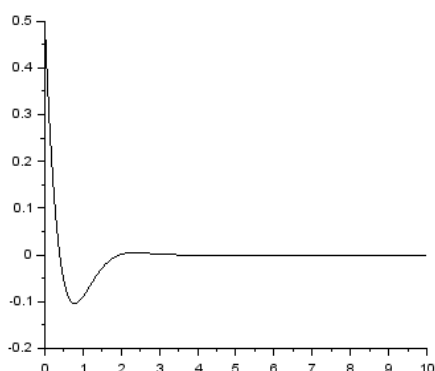
$$i(t) = C_1 e^{-\alpha t} + C_2 t e^{-\alpha t}. \quad (46)$$

- Subamortecido ($\alpha^2 < \omega_o^2$)

$$i(t) = C_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega t) + C_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega t) .: \omega = \sqrt{\omega_o^2 - \alpha^2}. \quad (47)$$

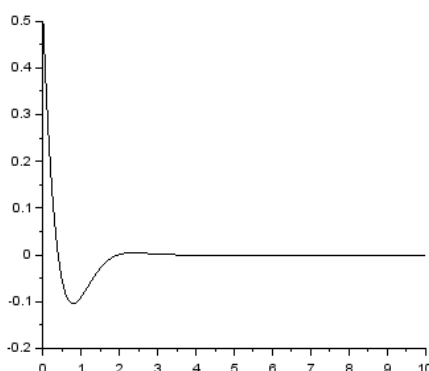
Para visualizar a comparação entre os métodos numéricos e analíticos aplicados observe as Figuras 9 (a), 9 (b) e 9 (c).

Figura 9 (a) – Solução analítica para Eq. 43.



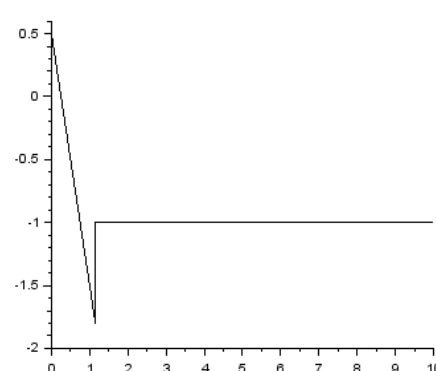
Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 9 (b) – Solução com Runge-kutta para Eq. 43.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Figura 9 (c) – Solução com série de potências para Eq. 43.



Fonte: Scilab 6.0.2, 2021.

Parâmetros utilizados: corrente inicial (I) de 0,5A; indutância (L) de 2,5H; resistência (R) de 10 Ω ; capacitância 50mF; e foram calculados 5000 pontos no código em C++ para ambos os métodos.

Tabela 3 – Corrente no circuito RLC sub-amortecido.

Tempo (s)	Corrente (A)			Erro Percentual (%) – RK 4 ^a	Erro Percentual (%) – Séries de Potências
	Medida Analítica	Runge-Kutta 4 ^a ord.	Séries de Potências		
0,02	0,460800	0,460800	0,460000	0,000003	0,173568
0,04	0,423197	0,423197	0,420000	0,000005	0,755374
0,06	0,387184	0,387184	0,380000	0,000008	1,855338
0,08	0,352749	0,352749	0,340000	0,000011	3,614137
0,10	0,319877	0,319877	0,300000	0,000013	6,213957

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Tabela 3, nota-se que houve um aumento do erro percentual das soluções alcançadas pelo método de Runge Kutta de 4^a ordem com os resultados anteriores, porém, este método ainda assim apresentou soluções mais próximas as analíticas em comparação ao método de Séries de Potências.

3. CONCLUSÃO

Mediante as simulações feitas, notou-se que o método Runge-Kutta de 4^a ordem apresentou eficiência superior ao método das series de potências na simulação de elementos dos circuitos RC e RL devido ao erro percentual inferior a 10⁻⁶, como demonstrado nas Tabela 1 e 2, obtendo assim uma maior credibilidade na sua utilização para análise de casos semelhantes destes circuitos. Lembrando, que de forma análoga, este método também pode ser aplicado na análise destes circuitos em estados transitórios de descarga.

Os resultados obtidos a partir das aplicações dos métodos numéricos no circuito RLC amortecido apresentaram maiores erros percentuais, se comparado as aplicações nos circuitos anteriores, em relação a solução analítica, no entanto, o método numérico RK 4^a ainda se torna viável, visto que seu erro percentual máximo foi inferior a 10⁻³.

O método de RK 4^a obteve os melhores resultados em todos os casos apresentados neste estudo, entretanto, o método de séries de potências demonstrou soluções que condizem com o que é proposto, lembrando que este método tem como objetivo apresentar soluções em torno de um ponto ordinário.

REFERÊNCIAS

- [1] RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lucia da Rocha. Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.
- [2] Zemansky, Sears e Freedman, Young E. Física III Eletromagnetismo, Ed. Addison Wesley 2009.
- [3] BOYCE, Willian E. Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 10. ed. Grafton, Nova York: LTC, 2015. v. 1.

ANEXOS

ANEXO A – MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM PARA CIRCUITO RC, CARGA E DESCARGA, EM C++

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double f(double t, double vc);
double k1(double tk, double vck);
double k2(double tk, double vck, double h);
double k3(double tk, double vck, double h);
double k4(double tk, double vck, double h);
double fonte, resis, cap;
double e=2.71828;
int CargaOuDescarga;

int main(void){
    int n;
    double h;

    printf("O circuito Resistor-Capacitor esta em carga, digite 1, ou descarga, digite 2:\n1 ou 2? ");
    scanf("%d", &CargaOuDescarga);

    printf("Digite a quantidade de pontos: ");
    scanf("%d", &n);

    double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * vc = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

    while(n<=0){
        printf("Digite a quantidade de pontos: ");
        scanf("%d", &n);
    }

    printf("Digite o valor inicial de t: ");
    scanf("%lf", &t[0]);

    printf("Digite o valor final de t: ");
    scanf("%lf", &t[n]);

    printf("Digite o valor inicial de vc (ddp do capacitor): ");
    scanf("%lf", &vc[0]);
    solAnal[0] = vc[0];

    if(CargaOuDescarga==1){
        printf("Digite o valor da fonte: ");
        scanf("%lf", &fonte);
    }

    printf("Digite o valor da resistencia: ");
    scanf("%lf", &resis);

    printf("Digite o valor da capacitancia: ");
    scanf("%lf", &cap);

    h = (t[n]-t[0])/n;

    for(int i=0; i<n-1;i++){

```

```

vc[i+1] = vc[i] + (h/6)*(k1(t[i], vc[i]) + 2*k2(t[i], vc[i], h) + 2*k3(t[i], vc[i], h) + k4(t[i], vc[i], h));

t[i+1] = t[i] + h;

if(CargaOuDescarga==1){
    solAnal[i+1] = fonte*(1 - pow(e, (-t[i+1])/(resis*cap)));
}
if(CargaOuDescarga==2){
    solAnal[i+1] = vc[0]*(pow(e, (-t[i+1])/(resis*cap)));
}
}

FILE * arquivo;

arquivo = fopen("ddpCapacitor-RK.dat", "w");

if(arquivo == NULL){
    printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
    return 1;
}

printf("t\tvc\n");
fprintf(arquivo, "t\tvc\n");
for(int i=0; i<n; i++){
    fprintf(arquivo, "%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], vc[i], solAnal[i]); // aqui colocar o valor da solução analítica
    printf("%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], vc[i], solAnal[i]); // printar solução analítica
}
printf("Arquivo salvo com sucesso!");
free(t);
free(vc);

//system("pause");
return 0;
}

double f(double t, double vc){
    if(CargaOuDescarga==1){
        vc = (fonte-vc)/(resis*cap);
    }
    if(CargaOuDescarga==2){
        vc = (-vc)/(resis*cap);
    }
    return vc;
}

double k1(double tk, double vck){
    return f(tk, vck);
}

double k2(double tk, double vck, double h){
    return f(tk + (h/2), vck + k1(tk, vck)*(h/2));
}

double k3(double tk, double vck, double h){
    return f(tk + (h/2), vck + k2(tk, vck, h)*(h/2));
}

double k4(double tk, double vck, double h){
    return f(tk + h, vck + k3(tk, vck, h)*h);
}

```

```
}

```

ANEXO B – MÉTODO DE SÉRIES DE POTÊNCIAS PARA CIRCUITO RC EM CARGA EM C++

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double fonte, resis, cap;
double e=2.71828;

int main(void){
    int n;
    double h, errorel, sumerro;

    printf("Digite a quantidade de pontos: ");
    scanf("%d", &n);

    double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * vc = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * a = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

    while(n<=0){
        printf("Digite a quantidade de pontos: ");
        scanf("%d", &n);
    }

    printf("Digite o valor inicial de t: ");
    scanf("%lf", &t[0]);

    printf("Digite o valor final de t: ");
    scanf("%lf", &t[n]);

    printf("Digite o valor inicial da tensao no capacitor: ");
    scanf("%lf", &a[0]);

    vc[0] = a[0]/cap;

    printf("Digite o valor da fonte: ");
    scanf("%lf", &fonte);

    printf("Digite o valor da resistencia: ");
    scanf("%lf", &resis);

    printf("Digite o valor da capacitancia: ");
    scanf("%lf", &cap);

    h = (t[n]-t[0])/n;

    solAnal[0] = vc[0];

    for(int i=0; i<n-1;i++){

        t[i+1] = t[i] + h;

        vc[i+1] = a[0]/cap;

        for(int j=0; j<n-1;j++){
```

```

    if(vc[i]<fonte){

        a[j+1]=(1/(j+1))*(fonte/resis-a[j]/(resis*cap));

        vc[i+1]+=(a[j+1]*pow(t[i+1], (j+1)))/cap;
    }
    if(vc[i]>=fonte){
        vc[i+1]=fonte;
    }
}
solAnal[i+1] = fonte*(1 - pow(e, (-t[i+1])/(resis*cap)));
}
FILE * arquivo;

arquivo = fopen("ddpCapacitor-Sdp.dat", "w");

if(arquivo == NULL){
    printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
    return 1;
}

printf("\n\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
fprintf(arquivo,"t\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
for(int i=0;i<n;i++){
    errorel = fabs((vc[i] - solAnal[i])/solAnal[i]*100);
    sumerro+=errorel;
    fprintf(arquivo,"%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], vc[i], solAnal[i], errorel);
    printf("%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], vc[i], solAnal[i], errorel);
}
printf("O erro percentual medio foi de: %lf\n", (sumerro/n));
printf("Arquivo salvo com sucesso!");
free(t);
free(vc);

//system("pause");
return 0;
}

```

ANEXO C – MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM PARA CIRCUITO RL, CARGA E DESCARGA, EM C++

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include<math.h>

double f(double t, double CorrenteIndutor);
double k1(double tk, double CorrenteIndutork);
double k2(double tk, double CorrenteIndutork, double h);
double k3(double tk, double CorrenteIndutork, double h);
double k4(double tk, double CorrenteIndutork, double h);
double fonte, resis, indut;
double e=2.71828;
int CargaOuDescarga;

int main(void){
    int n;
    double h;

    printf("O circuito Resistor-Indutor esta em carga, digite 1, ou descarga, digite 2:\n1 ou 2? ");

```

```

scanf("%d", &CargaOuDescarga);

printf("Digite a quantidade de pontos: ");
scanf("%d", &n);

double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));

double * CorrenteIndutor = (double *) calloc(n, sizeof(double));
double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

while(n<=0){
printf("Digite a quantidade de pontos: ");
scanf("%d", &n);
}

printf("Digite o valor inicial de t: ");
scanf("%lf", &t[0]);

printf("Digite o valor final de t: ");
scanf("%lf", &t[n]);

printf("Digite o valor inicial da corrente do indutor: ");
scanf("%lf", &CorrenteIndutor[0]);
solAnal[0] = CorrenteIndutor[0];

if(CargaOuDescarga==1){
printf("Digite o valor da fonte: ");
scanf("%lf", &fonte);
}

printf("Digite o valor da resistencia: ");
scanf("%lf", &resis);

printf("Digite o valor da indutancia: ");
scanf("%lf", &indut);

h = (t[n]-t[0])/n;

for(int i=0; i<n-1;i++){

CorrenteIndutor[i+1] = CorrenteIndutor[i] + (h/6)*(k1(t[i], CorrenteIndutor[i]) +
2*k2(t[i],CorrenteIndutor[i], h) + 2*k3(t[i], CorrenteIndutor[i], h) + k4(t[i], CorrenteIndutor[i], h));

t[i+1] = t[i] + h;

if(CargaOuDescarga==1){
solAnal[i+1] = (fonte/resis)*(1 - pow(e, (-t[i+1]*resis)/(indut)));
}
if(CargaOuDescarga==2){
solAnal[i+1] = CorrenteIndutor[0]*(1 - pow(e, (-t[i+1]*resis)/(indut)));
}
}

FILE * arquivo;

arquivo = fopen("CorrenteIndutor.dat", "w");

if(arquivo == NULL){
printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
return 1;
}

```

```

}

printf("\t\tCorrenteIndutor\n");
fprintf(arquivo, "\t\tCorrenteIndutor\n");
for(int i=0; i<n; i++){
    fprintf(arquivo, "%f\t%f\t%f\n", t[i], CorrenteIndutor[i], solAnal[i]);
    printf("%f\t%f\t%f\n", t[i], CorrenteIndutor[i], solAnal[i]);
}

printf("Arquivo salvo com sucesso!");
free(t);
free(CorrenteIndutor);

//system("pause");
return 0;
}

double f(double t, double CorrenteIndutor){
    if(CargaOuDescarga==1){
        CorrenteIndutor = (fonte-CorrenteIndutor*resis)/(indut);
    }
    if(CargaOuDescarga==2){
        CorrenteIndutor = (-CorrenteIndutor*resis)/(indut);
    }
    return CorrenteIndutor;
}

double k1(double tk, double CorrenteIndutork){
    return f(tk, CorrenteIndutork);
}

double k2(double tk, double CorrenteIndutork, double h){
    return f(tk + (h/2), CorrenteIndutork + k1(tk, CorrenteIndutork)*(h/2));
}

double k3(double tk, double CorrenteIndutork, double h){
    return f(tk + (h/2), CorrenteIndutork + k2(tk, CorrenteIndutork, h)*(h/2));
}

double k4(double tk, double CorrenteIndutork, double h){
    return f(tk + h, CorrenteIndutork + k3(tk, CorrenteIndutork, h)*h);
}

```

ANEXO D – MÉTODO DE SÉRIES DE POTÊNCIAS PARA CIRCUITO RL EM CARGA EM C++

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double fonte, resis, indut;
double e=2.71828;

int main(void){
    int n;
    double h, errorel, sumerro;

    printf("Digite a quantidade de pontos: ");
    scanf("%d", &n);

    double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));

```

```

double * corrente = (double *) calloc(n, sizeof(double));
double * a = (double *) calloc(n, sizeof(double));
double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

while(n<=0){
printf("Digite a quantidade de pontos: ");
scanf("%d", &n);
}

printf("Digite o valor inicial de t: ");
scanf("%lf", &t[0]);

printf("Digite o valor final de t: ");
scanf("%lf", &t[n]);

printf("Digite o valor inicial da corrente no circuito RL: ");
scanf("%lf", &a[0]);

corrente[0] = a[0];

printf("Digite o valor da fonte: ");
scanf("%lf", &fonte);

printf("Digite o valor da resistencia: ");
scanf("%lf", &resis);

printf("Digite o valor da indutancia: ");
scanf("%lf", &indut);

h = (t[n]-t[0])/n;

solAnal[0] = corrente[0];

for(int i=0; i<n-1;i++){

t[i+1] = t[i] + h;

corrente[i+1] = a[0];

for(int j=0; j<n-1;j++){
if(corrente[i]<(fonte/resis)){
a[j+1]=(fonte-a[j]*resis)/(indut*(j+1));

corrente[i+1]+=(a[j+1]*pow(t[i+1], (j+1)));
}
if(corrente[i]>=(fonte/resis)){
corrente[i+1]=fonte/resis;
}
}
solAnal[i+1] = (fonte/resis)*(1 - pow(e, (-t[i+1]*resis)/(indut)));
}
FILE * arquivo;

arquivo = fopen("CorrenteIndutor-Sdp.dat", "w");

if(arquivo == NULL){
printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
return 1;
}

```

```

}

printf("\n\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
fprintf(arquivo, "\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
for(int i=0; i<n; i++){
    errorel = fabs(((corrente[i] - solAnal[i])/solAnal[i])*100);
    sumerro+=errorel;
    fprintf(arquivo, "%f\t%f\t%f\t%f\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
    printf("%f\t%f\t%f\t%f\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
}
printf("O erro percentual medio foi de: %f\n", (sumerro/n));
printf("Arquivo salvo com sucesso!");

free(t);
free(corrente);

//system("pause");
return 0;
}

```

ANEXO E – MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM PARA CIRCUITO RLC AMORTECIDO EM C++

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double fi(double t, double corrente, double correntek);
double fk(double t, double corrente, double correntek);
double k1(double tk, double corrente, double correntek);
double k2(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double k3(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double k4(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double k1k(double tk, double corrente, double correntek);
double k2k(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double k3k(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double k4k(double tk, double corrente, double correntek, double h);
double indut, resis, cap;
double e=2.71828;
int rlcCase;

int main(void){
    int n;
    double h, errorel, sumerro;

    printf("Digite a quantidade de pontos: ");
    scanf("%d", &n);

    double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * corrente = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * correntek = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

    while(n<=0){
        printf("Digite a quantidade de pontos: ");
        scanf("%d", &n);
    }

    printf("Digite o valor inicial de t: ");
    scanf("%f", &t[0]);

```



```

printf("Digite o valor final de t: ");
scanf("%lf", &t[n]);

printf("Digite o valor inicial da corrente: ");
scanf("%lf", &corrente[0]);

printf("Digite o valor inicial da primeira derivada da corrente: ");
scanf("%lf", &correntek[0]);

printf("Digite o valor da indutância: ");
scanf("%lf", &indut);

printf("Digite o valor da resistencia: ");
scanf("%lf", &resis);

printf("Digite o valor da capacitancia: ");
scanf("%lf", &cap);

h = (t[n]-t[0])/n;

solAnal[0] = corrente[0];

if((resis/(2*indut))>(1/(pow(indut*cap, 0.5)))){
    rlcCase = 1;
}
if((resis/(2*indut))==1/(pow(indut*cap, 0.5))){
    rlcCase = 2;
}
if((resis/(2*indut))<1/(pow(indut*cap, 0.5))){
    rlcCase = 3;
}

for(int i=0; i<n-1;i++){

    corrente[i+1] = corrente[i] + (h/6)*(k1(t[i], corrente[i], correntek[i]) + 2*k2(t[i], corrente[i], correntek[i], h)
+ 2*k3(t[i], corrente[i], correntek[i], h) + k4(t[i], corrente[i], correntek[i], h));

    correntek[i+1] = correntek[i] + (h/6)*(k1k(t[i], corrente[i], correntek[i]) + 2*k2k(t[i], corrente[i],
correntek[i], h) + 2*k3k(t[i], corrente[i], correntek[i], h) + k4k(t[i], corrente[i], correntek[i], h));

    t[i+1] = t[i] + h;

    if(rlcCase == 1){ // Teste para parâmetros específicos para plotagem de graficos conforme o artigo.
        solAnal[i+1] = -0.016500895*pow(e, -1.031947467*t[i+1])+0.516500895*pow(e, -
32.30138587*t[i+1]);
    }
    if(rlcCase == 2){
        solAnal[i+1] = 0.5*pow(e, -2*t[i+1])+1*t[i+1]*pow(e, -2*t[i+1]);
    }
    if(rlcCase == 3){
        solAnal[i+1] = 0.5*pow(e, -2*t[i+1])*cos(2*t[i+1]) - 0.5*pow(e, -2*t[i+1])*sin(2*t[i+1]);
    }
}

FILE * arquivo;

arquivo = fopen("CorrenteCircuitoRLC-RK.dat", "w");

if(arquivo == NULL){

```

```

    printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
    return 1;
}

printf("\n\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
fprintf(arquivo,"t\t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
for(int i=0;i<n;i++){
    errorel = fabs(((corrente[i] - solAnal[i])/solAnal[i])*100);
    sumerro+=errorel;
    fprintf(arquivo,"%f\t%f\t%f\t%f\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
    printf("%f\t%f\t%f\t%f\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
}
printf("O erro percentual medio foi de: %f\n", (sumerro/n));
printf("Arquivo salvo com sucesso!");
free(t);
free(corrente);

//system("pause");
return 0;
}

double fi(double tk, double corrente, double correntek){
    return correntek; // Retorna a inclinação do ponto (derivada)
}

double fk(double tk, double corrente, double correntek){
    correntek = -(resis/indut)*correntek + corrente/(indut*cap));
    return correntek; // Retorna a inclinação do ponto (derivada)
}

double k1(double tk, double corrente, double correntek){
    return fi(tk, corrente, correntek);
}

double k1k(double tk, double corrente, double correntek){
    return fk(tk, corrente, correntek);
}

double k2(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fi(tk + (h/2), corrente + k1(tk, corrente, correntek)*(h/2), correntek + k1k(tk, corrente, correntek)*(h/2));
}

double k2k(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fk(tk + (h/2), corrente + k1(tk, corrente, correntek)*(h/2), correntek + k1k(tk, corrente, correntek)*(h/2));
}

double k3(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fi(tk + (h/2), corrente + k2(tk, corrente, correntek, h)*(h/2), correntek + k2k(tk, corrente, correntek, h)*(h/2));
}

double k3k(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fk(tk + (h/2), corrente + k2(tk, corrente, correntek, h)*(h/2), correntek + k2k(tk, corrente, correntek, h)*(h/2));
}

```

```
double k4(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fi(tk + h, corrente + k3(tk, corrente, correntek, h)*h, correntek + k3k(tk, corrente, correntek, h)*h);
}
```

```
double k4k(double tk, double corrente, double correntek, double h){
    return fk(tk + h, corrente + k3(tk, corrente, correntek, h)*h, correntek + k3k(tk, corrente, correntek, h)*h);
}
```

ANEXO F – MÉTODO DE SÉRIES DE POTÊNCIAS PARA CIRCUITO RLC AMORTECIDO EM C++

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

double indut, resis, cap;
double e=2.71828;
int rlcCase;

int main(void){
    int n;
    double h, errorel, sumerro;

    printf("Digite a quantidade de pontos: ");
    scanf("%d", &n);

    double * t = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * corrente = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * a = (double *) calloc(n, sizeof(double));
    double * solAnal = (double *) calloc(n, sizeof(double));

    while(n<=0){
        printf("Digite a quantidade de pontos: ");
        scanf("%d", &n);
    }

    printf("Digite o valor inicial de t: ");
    scanf("%lf", &t[0]);

    printf("Digite o valor final de t: ");
    scanf("%lf", &t[n]);

    printf("Digite o valor inicial da corrente: ");
    scanf("%lf", &a[0]);

    corrente[0] = a[0];

    printf("Digite o valor inicial da primeira derivada da corrente: ");
    scanf("%lf", &a[1]);

    printf("Digite o valor da indutância: ");
    scanf("%lf", &indut);

    printf("Digite o valor da resistencia: ");
    scanf("%lf", &resis);

    printf("Digite o valor da capacitancia: ");
    scanf("%lf", &cap);
```

```

h = (t[n]-t[0])/n;

solAnal[0] = corrente[0];

if((resis/(2*indut))>(1/(pow(indut*cap, 0.5)))){
    rlcCase = 1;
}
if((resis/(2*indut))==1/(pow(indut*cap, 0.5)))){
    rlcCase = 2;
}
if((resis/(2*indut))<(1/(pow(indut*cap, 0.5)))){
    rlcCase = 3;
}

for(int i=0; i<n-1;i++){

    t[i+1] = t[i] + h;

    corrente[i+1] = a[0] + a[1]*t[i+1];

    for(int j=0; j<n-2;j++){

        a[j+2]=-(1/(j+2))*((resis*a[j+1])/indut - a[j]/(indut*cap*(j+1)));

        corrente[i+1]+=a[j+2]*pow(t[i+1], (j+2));
    }
    if(rlcCase == 1){ // Teste para parâmetros específicos para plotagem de graficos conforme o artigo.
        solAnal[i+1] = -0.016500895*pow(e, -1.031947467*t[i+1])+0.516500895*pow(e, -
32.30138587*t[i+1]);
    }
    if(rlcCase == 2){
        solAnal[i+1] = 0.5*pow(e, -2*t[i+1])+1*t[i+1]*pow(e, -2*t[i+1]);
    }
    if(rlcCase == 3){
        solAnal[i+1] = 0.5*pow(e, -2*t[i+1])*cos(2*t[i+1]) - 0.5*pow(e, -2*t[i+1])*sin(2*t[i+1]);
    }
}

FILE * arquivo;

arquivo = fopen("CorrenteCircuitoRLC-SdP.dat", "w");

if(arquivo == NULL){
    printf("ERRO: Não foi possível abrir o arquivo\n");
    return 1;
}

printf("\nt\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
fprintf(arquivo, "t\tNumerico\tAnalitico\tErro Per.\n");
for(int i=0; i<n; i++){
    errorel = fabs(((corrente[i] - solAnal[i])/solAnal[i])*100);
    sumerro+=errorel;
    fprintf(arquivo, "%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
    printf("%lf\t%lf\t%lf\t%lf\n", t[i], corrente[i], solAnal[i], errorel);
}
printf("O erro percentual medio foi de: %lf\n", (sumerro/n));
printf("Arquivo salvo com sucesso!");
free(t);
free(corrente);

```

```
//system("pause");  
return 0;  
}
```

Artigo

Comparação entre soldagem ascendente e descendente no processo MAG para obtenção de melhores propriedades na junta soldada

Paulo César do Rosário Fernandes ^[1], Josivan Lopes de Morais Júnior ^[2] e Francisco Edson Nogueira Fraga ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; paulo.fernandes@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; josivan.junior70498@alunos.ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nfraga@ufersa.edu.br

Recebido: 30/03/2022;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: As principais vantagens da soldagem MIG/MAG comparada à soldagem com eletrodos revestidos são: alta taxa de deposição e de fator de ocupação do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis, não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória, de limpeza e exigência de menor habilidade do soldador. Na posição plana quando o sentido de soldagem é puxando pode-se observar que quando o ângulo de inclinação cresce a penetração diminui e a largura do cordão aumenta. Já na soldagem empurrando, quando o ângulo de inclinação aumenta, a penetração e reforço crescem e a largura do cordão diminui. Este trabalho foi elaborado com a finalidade de averiguar se a variação no sentido de soldagem, realizada no processo MAG, tem influência na resistência mecânica da junta. Assim, foram conduzidos experimentos para avaliar a influência do sentido ascendente e descendente de soldagem, bem como a influência da corrente de soldagem sobre esses. Os corpos de prova foram avaliados por inspeção visual, ensaios de tração e ensaios de dureza. Os resultados de tração possibilitaram constatar que em todas as condições testadas o metal de solda teve resistência superior ao metal de base. Já os ensaios de dureza permitiram demonstrar que, para as condições experimentadas, o sentido de soldagem não interfere na resistência mecânica da junta, independente dos valores de corrente testados.

Palavras-chave: Soldagem MAG; Resistência Mecânica; Vertical Descendente.

Abstract: The main advantages of MIG/MAG welding compared to welding with coated electrodes are: high deposition rate and high welder occupancy factor, great versatility in terms of the type of material and applicable thicknesses, no welding fluxes and, consequently, no of slag removal and cleaning operations and requirement of lesser welder skill. For flat position when the welding direction is pulling it, we can observe that when the angle of inclination increases the penetration decreases and the width of the bead increases, in the welding by pushing when the angle of inclination increases the penetration and reinforcement increases and the width of the bead decreases. This work was carried out with the aim of studying whether the variation in the welding direction (up and down) performed in the MAG process has an influence on the mechanical strength of the joint. Therefore, experiments were carried out to evaluate the influence of the ascending and descending direction of welding, as well as the influence of the welding current on them. The specimens were evaluated by visual inspection, tensile tests and hardness tests. The tensile results made it possible to verify that in all the conditions tested, the weld metal had superior resistance to the base metal. The hardness tests showed that, for the conditions tested, the welding direction does not interfere with the mechanical strength of the jute, regardless of the current values tested.

Key-words: MAG Welding; Mechanical Resistance; Descending Vertical.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG está presente em praticamente todas as áreas da indústria metalmeccânica, por ser um processo que tem vasta aplicação, podendo ser empregado tanto para fabricação, quanto para manutenção de estruturas e peças mecânicas.

Além de ser um processo que permite se obter um alto nível de produtividade, devido a sua grande taxa de deposição do metal de solda, ele também se mostra vantajoso pois apresenta cordões de solda com ótima geometria sem a geração de escoria. Geralmente as posições de soldagem mais utilizadas são: plana, vertical ascendente e descendente [1].

A principal limitação da soldagem MIG/MAG é a sua maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado, além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros na obtenção de um determinado conjunto de características para o cordão de solda. A determinação destes parâmetros é dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado da operação [1]. Este trabalho foi elaborado com a finalidade de esclarecer se a soldagem no sentido ascendente e descendente no processo MAG apresentam a mesma resistência mecânica da junta soldada.

Neste trabalho tem como foco em estudar o sentido de soldagem vertical ascendente e descendente, realizando ensaios em corpos de prova para analisar a influência de alguns parâmetros de soldagem ao surgimento de defeitos nos cordões de solda. Ao final foi possível constatar que não houve variação de resistência mecânica da junta para o sentido ascendente ou descendente independente das correntes usadas nos ensaios.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem o intuito investigar se o sentido de soldagem (ascendente ou descendente) tem influência sobre a resistência mecânica das juntas, como também a aparição de defeitos visuais da junta soldada. Para este estudo foram realizados experimentos testando dois níveis de corrente diferentes.

2.2 Objetivos Específicos

A meta deste trabalho é estudar a influência do sentido de soldagem na resistência mecânica das juntas soldadas no processo MAG, o estudo foi feito da seguinte forma:

- Realizar revisão bibliográfica do processo de soldagem MIG/MAG com propósito de compreender a relação dos parâmetros de soldagem e a ocorrência de defeitos de soldagem;
- Determinar se as posições de soldagem ascendente e descendente, mantidos os parâmetros velocidade de soldagem e tensão, tem influência na resistência mecânica do cordão de solda, para isso foram feitos ensaios de tração;
- Determinar se a corrente de soldagem tem alguma interação com a relação do sentido de soldagem (ascendente ou descendente) sobre a resistência da junta, para isto foram feitos ensaios de dureza do metal de base e do metal de solda.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG tecnicamente chamado de GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), caracteriza-se pela formação de um arco elétrico entre a peça a ser soldada e um consumível em forma de arame eletrodo, o arco elétrico funde o arame de forma contínua à medida que o arame alimenta a poça de fusão protegida por uma mistura de gases ativos ou inertes [2]. Esse processo de soldagem é uma das mais utilizadas na indústria devido à alta taxa de fusão, o que significa, para a indústria, uma maior produção [3]

Devido a evolução tecnológica dos últimos tempos pode-se observar que este processo está se tornando popular, pois ele permite soldagem em praticamente todos os metais comercialmente explorados, metais que tenham espessuras maiores que 0,75mm podem ser soldados em praticamente todas as posições [1].

Pode-se destacar algumas das principais vantagens desse processo de soldagem que levam o mesmo a ser um dos preferidos em indústrias de fabricação metalmeccânicas:

- A soldagem pode ser executada em todas as posições
- Não há geração de escorias
- Apresenta uma elevada taxa de deposição de metal de solda
- Geralmente o tempo de execução de uma solda e bem menor se comparado a outro tal como processo eletrodo revestido [2].

3.1.2 parâmetros que influenciam na soldagem

Quando a distância entre a ponta do eletrodo e a peça aumenta para uma dada tensão e velocidade de alimentação reguladas, há uma redução da corrente no circuito [1]. A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco, pois foi configurado, em um momento anterior à solda, a velocidade de alimentação do arame, e portanto, se há uma variação de corrente (que depende da velocidade de deposição do arame), deve haver uma variação nessa velocidade de deposição do arame. Como resultado, alterações permanentes no comprimento do arco são efetuadas ajustando-se a tensão de saída da fonte. A velocidade de alimentação do arame que o operador seleciona antes da soldagem determina a corrente de soldagem [1]. Os quatro parâmetros que mais tem influência para obtenção de uma boa soldagem estão relacionados a seguir:

Corrente de soldagem: Mais conhecido como amperagem de saída da fonte este parâmetro está diretamente relacionado com a distância bico de contato peça (DBCP), ou seja, quando se varia o DBCP (aumento ou diminuição de arame na poça de fusão) a corrente varia no mesmo sentido [1]. Também pode-se obter variação de corrente se aumentar ou diminuir a espessura do arame, levando-se também em consideração que cada tipo de arame (aço, alumínio etc.) tem suas características próprias de fusão do arame então cada um terá uma faixa de corrente diferente na soldagem [4].

DBCP: Composta da extensão livre do eletrodo (distância do bico de contato ao arco) e do comprimento do arco, a distância bico de contato-peça (DBCP) afeta o modo de transferência metálica, principalmente pela alteração da quantidade de aquecimento ôhmico ocorrendo no eletrodo [1]. Quando a distância do eletrodo for muito grande temos um excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco, podendo gerar baixa penetração e um cordão de solda com uma geometria desfavorável. Uma distância de eletrodo muito grande também pode tornar o arco elétrico menos estável, se aconselha que na soldagem por curto-circuito o operador mantenha uma distância do eletrodo e a peça entre 20 e 25 mm [1].

Tensão de soldagem: o ajuste de tensão de soldagem controla diretamente o comprimento do arco elétrico, mantendo-se uma certa faixa de tensão para se obter uma boa estabilidade do arco elétrico. A soldagem por curto-circuito requer tensões consideradas baixas, observa-se que quando se aumenta a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame, a tensão de soldagem também vai ser aumentada para se manter uma boa estabilidade [4]. A tensão de soldagem é usada para controlar a forma do cordão de solda. Quando a tensão do arco (ou o comprimento do arco) aumenta, a altura do cordão de solda diminui e sua largura aumenta. Nesse caso o tamanho total do cordão de solda permanece constante. Somente a forma ou o contorno do cordão é modificado. Aumentando-se a largura do cordão de solda, seu topo torna-se mais achatado e o metal de solda "molha" os materiais de base mais eficientemente, melhorando a fusão do metal de base [2].

Velocidade de soldagem: É a relação entre o caminho percorrido ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. Normalmente é expresso em cm/min ou mm/min. Podemos destacar três regras principais para velocidade de soldagem:[2]

- Quando a espessura da peça aumentar a velocidade de soldagem vai diminuir
- Para uma dada espessura de peça e junta, quando a corrente de soldagem aumentar, a velocidade de soldagem também aumenta
- Maiores velocidades de soldagem são alcançadas quando se usa a técnica de empurrar [2].

O tamanho do cordão de solda também pode ser modificado variando-se a velocidade de soldagem. O tamanho do cordão de solda e a velocidade de soldagem são inversamente relacionados. Uma diminuição na velocidade de soldagem, resultará num aumento da largura e da altura do cordão de solda e vice-versa [2].

Sentido de soldagem;

A inclinação da peça ou da tocha durante a soldagem pode afetar o formato do cordão de solda. A maioria das soldas é feita na posição plana. Entretanto, algumas vezes é necessário ou desejável soldar com a peça levemente inclinada para que a tocha avance em declive ou aclive. Por exemplo, em uma soldagem de alta velocidade de chapas de aço de 6 mm de espessura, consegue-se uma solda melhor quando a peça está inclinada de 15 a 18° em declive, com aumento da penetração em relação à soldagem plana. O ângulo de inclinação deve ser reduzido com o aumento da espessura para aumentar a penetração [6].

Na soldagem puxando a poça tende a escoar e pré-aquecer o metal de base, particularmente na superfície. Isto produz uma zona de fusão de forma irregular. Quando o ângulo de inclinação cresce, forma-se uma depressão no meio da solda, a penetração decresce e a largura do cordão cresce [6].

Soldagem empurrando afeta o contorno da poça de fusão e a superfície da solda. A força da gravidade faz a poça ficar defasada para trás em relação ao eletrodo e as laterais da poça de fusão se deslocam para o meio do cordão. Quando o ângulo de inclinação cresce, o reforço e a penetração crescem e a largura decresce. O ângulo limite para a soldagem em aclive com correntes até 800 A está por volta de 6°, ou uma inclinação de 10%. Se forem usadas correntes maiores, o ângulo deve diminuir. Inclinações superiores a 6° tornam a solda incontrolável [6].

3.1.3 Principais Técnicas de Soldagem

No processo MIG/MAG as técnicas de soldagem mais utilizadas na posição plana são as de puxar e empurrar, as duas tem como princípio de base a maneira como a tocha é mantida em relação ao cordão de solda. Na técnica puxando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco. O arame é adicionado ao metal de solda já depositado. Na técnica empurrando a tocha é posicionada de tal modo que o arame seja alimentado no mesmo sentido do deslocamento do arco [2].

Na posição vertical as técnicas mais utilizadas são as de progressão ascendente e descendente, em ambos os casos o arco deve ser mantido na borda da poça de fusão para assegurar uma penetração completa da solda [2].

3.1.4 Defeito de Solda

Falta de penetração: Pode-se encontrar esse tipo de defeito nos seguintes casos [2]:

- Quando o cordão de solda não penetra completamente na espessura do metal base
- Quando dois cordões de solda opostos não se interpenetram
- Quando o cordão de solda não penetra na garganta de uma junta de ângulo.

A corrente de soldagem é o parâmetro que tem maior efeito na penetração, normalmente quando não se tem uma boa penetração é por causa de se usar corrente de soldagem muito baixa. Também se tem outras prováveis causas como velocidade muito baixa de soldagem, e ângulo incorreto da tocha [1].

Falta de fusão: acontece quando não se tem a fusão entre os metais de solda e de base. A causa mais comum desse defeito pode ser uma técnica de soldagem deficiente, ou uma poça de fusão muito larga (velocidade de soldagem muito baixa), ou o metal de solda passou na frente do arco elétrico [7].

Mordedura: defeito que tem aparência de um entalhe no metal de base ao longo das bordas do cordão de solda. Pode ocorrer devido ao uso de parâmetros de soldagem inadequados, tais como velocidade de soldagem e a tensão do arco [5].

Trincas: não são encontradas com frequência mais quando aparecem podem ser de dois tipos, trincas a frio e a quente. Trincas a frio são aquelas que aparecem quando a secção reta do cordão de solda e muito pequeno para suportar as tensões atuantes, já as trincas a quente são as que ocorrem quando o cordão de solda está entre as temperaturas de fusão e de solidificação [2].

3.2 Aço ASTM A36

De acordo com a norma ASTM A36 [8], a composição química do aço ASTM A36 pode ser dividida em três tipos: Formas (Shapes); Chapas de largura maior que 380mm; Barras e chapas com largura maior que 380mm. Neste trabalho foi utilizado chapa de aço, onde os teores máximos de cada elemento são dados a seguir:

1. Carbono: 0,26% (máx.);
2. Fósforo: 0,04% (máx.);
3. Enxofre: 0,03% (máx.);
4. Silício: 0,40% (máx.);
5. Cobre: 0,20% (mín., quando especificado).

Sua densidade é de 7,85 g/cm³ e seu limite de escoamento é de 250MPa, aproximadamente, já o limite de tração ultrapassa os 400 MPa, chegando até 550 MPa. E sua dureza varia entre 130 e 150 HB.

3.3 Arame Tubular ER70S-6

O catálogo da SUMIG [9] oferece as descrições técnicas desse arame tubular para solda, com as seguintes características:

1. Carbono: 0,15% (máx.);
2. Silício: 0,80% (máx.);
3. Manganês: 1,85% (máx.).

3.4 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

O processo de soldagem, seja ele por arco elétrico, oxi-combustível ou laser, irá apresentar a ZAC (ou ZTA – Zona Termicamente Afetada), local que não ocorre fundição do material, apesar de também atingir temperaturas elevadas [6]. É a área onde está mais propensa a falhas e trincas, justamente pelas transformações microscópicas que ocorrem naquela zona que alteram as propriedades do material, transformações essas que estão ligadas a inúmeros fatores tais como velocidade de resfriamento, condutibilidade térmica do material de base, etc. Essas falhas e trincas ocorrem, pois, devido ao crescimento de grão, que reduz a ductilidade aumenta a temperabilidade do metal de base [6], fazendo com que seja possível a formação de microestrutura martensítica (extremamente frágil), caso o resfriamento seja rápido,

além de tensões térmicas que podem haver.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 *Elaboração das Juntas Soldadas*

Foi feito a comparação entre as soldagens ascendente e descendente com o processo MAG, para isso utilizou-se como metal de base chapas com as dimensões mínimas de 200mmX100mm e espessura de ¼ de polegada de aço carbono A36, como visto na Figura 1, que é o aço mais utilizado na indústria. Para o metal de adição utilizou-se o 70S6 de 1mm de espessura.



Figura 1. Junta antes de ser soldada. (Autoria própria)

4.2 *Inspeção Visual*

O ensaio visual na chapa de teste é necessário para a qualificação do procedimento de soldagem [10]. Como critério de aprovação será adotado as normas contidas em [10], as juntas soldadas foram limpas com auxílio de escova rotativa e vistoriados com a finalidade de se verificar o surgimento de alguma trinca, porosidade ou falta de penetração, se identificado alguns destes defeitos a junta seria reprovada e não seria retirados nenhum CP dela para teste. Foi reprovado a junta que apresentasse tanto um reforço como raízes excessivas (superior a 3mm), já que a transição entre o metal-base e reforço, denominada pé da solda, é considerada uma descontinuidade de forma, o que pode originar uma concentração de tensões [11].

4.3 *Ensaio de Tração*

O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA, com a ajuda de um técnico responsável pela máquina, que é uma EMIC com capacidade de até 100kN. No que diz respeito ao corpo de prova, como pode ser visto na Figura 2 e 3, é uma chapa, portanto, não possui as dimensões nem a geometria de um copo de prova padrão, mas é possível utilizar as garras da máquina para corpos de provas em formato de chapas, de modo que não ocorra deslizamento.

Para cada condição de soldagem (ascendente e descendente) foram testadas duas correntes diferentes, ou seja, variou-se a corrente de soldagem mais mantendo a velocidade e a tensão para se obter os parâmetros ideais para cada condição que mitigara os defeitos de soldagem. As juntas foram soldadas manualmente por soldador nível 3 com certificação no processo MAG, foram realizadas quatro condições de soldagem diferentes que deram um total de 12 pares de chapas (corpos de prova) distribuídos da seguinte maneira na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros adotados para cada condição de soldagem. (Autoria própria)

<i>condição</i>	<i>Corrente(A)</i>	<i>Tensão(V)</i>	<i>Velocidade De Alimentação (m/min)</i>	<i>Mistura Gasosa</i>	<i>Vazão(L /min)</i>	<i>Sentido de soldagem</i>	<i>Metal de adição</i>
1	92	15,6	4	25% Argônio 75% CO2	9	Vertical ascendente	70S6
2	92	15,6	4	25% Argônio 75% CO2	9	Vertical descendente	70S6
3	108	18,8	4	25% Argônio 75% CO2	9	Vertical Ascendente	70S6
4	108	16,8	4	25% Argônio 75% CO2	9	Vertical descendente	70S6

O corpo de prova foi escovado para se retirar qualquer impureza e ferrugem existente na superfície das chapas, logo após foi usado disco de desbaste para biselar as chapas com um ângulo de bisel de 45° e nariz de bisel com 2mm [10], também foi retirado a carepa de laminação da chapa das regiões adjacentes onde foi feita a soldagem. Em seguida, foi feita a montagem do corpo de prova onde foi obedecido uma abertura de raiz de aproximadamente 2,5mm para se obter uma boa condição de penetração de raiz sem que haja excesso de reforço ou falta de penetração dela garantindo uma boa resistência mecânica da junta soldada, todos esses padrões foram estabelecidos pelas normas de soldagem contidos em [10].

Após a soldagem das chapas, foram realizadas inspeções visuais de cada cordão, para identificar possíveis defeitos de soldagem, como porosidades ou trincas visualmente identificadas, se constatados alguns desses defeitos a junta seria reprovada. Em seguida as chapas foram usinadas para retirar amostras dos corpos de prova que foram usados nos ensaios de tração, também foi retirado amostras das juntas soldadas para ensaios de dureza. Cada chapa de teste foi retirado 3 tiras de teste medindo aproximadamente 25mm de largura com 6,35mm de espessura. As amostras foram retiradas propositalmente dos corpos de prova de regiões específicas, sendo uma do centro das chapas, a seguir vemos a Figura 2 que ilustra a região de retirada dos CPS:



Figura 2. junta soldada antes do corte (Autoria Própria) Figura 3. Junta depois do corte (Autoria Propria)

A Tabela 2 mostra os valores de propriedades mecânicas do metal de base retirados da literatura que foram utilizados como base de comparação dos resultados obtidos dos ensaios :

Tabela 2: Valores de propriedades mecânicas do metal de base.[12]

<i>material</i>	<i>Tensão de escoamento(MP)</i>	<i>Limite de resistência(MP)</i>	<i>% alongamento</i>
Aço A36	250	400	30

Os valores da Tabela 2 são usados para interpretação do gráfico tensão x deformação visto mais adiante.

4.4 Ensaio de Dureza

O Ensaio de Dureza Rockwell é o tipo de ensaio de dureza mais aplicado na indústria, isso por conta da sua facilidade de utilização, entre outros motivos. Os parâmetros para utilização da máquina de ensaio estão padronizados pela ISO 6508-01 [13]. Para o ensaio de dureza foram retiradas amostras da parte central das juntas soldadas, como visto na Figura 4 e 5. Elas foram usinadas com auxílio de uma fresa de bancada para se ter dimensões paralelas e planas, garantindo assim que a carga aplicada pela máquina de teste, seja vertical, isso nos garante resultados mais confiáveis e com menores erros. Além disso os corpos de prova bem elaborados também evitam possíveis acidentes que podem danificar a máquina de teste.

Como não se tinha a noção do nível de dureza das amostras se iniciou os testes na escala Rockwell A usando o penetrador de diamante com carga inicial de 60kgf, onde se chegou a não leitura de dureza pois o material medido era muito dúctil para se medir na escala inicialmente usada. Logo depois se trocou o penetrador pelo de esfera de aço especial e carga de 100kgf, na qual foi possível se fazer as medições. Foram feitas 3 endentações (marcações) no metal de solda e mais 3 no metal de base, onde a máquina faz a leitura de quanto foi penetrado no material e consequentemente retorna um valor de dureza para ele.

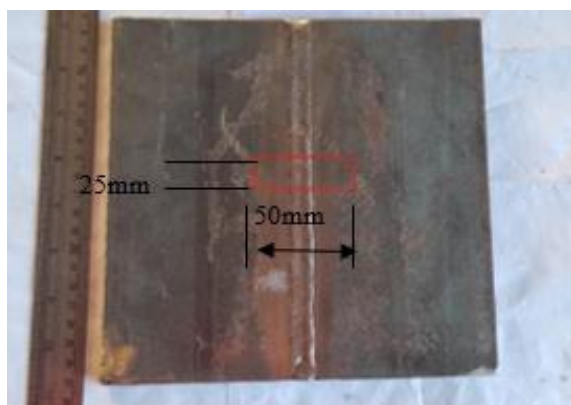


Figura 4: Local de retirada da amostra (Autoria Própria) Figura 5: Amostra a ser ensaiada. (Autoria Própria)

5. RESULTADOS

A inspeção visual e os testes de tração e dureza permitiram obter os seguintes resultados:

5.1 Inspeção visual

O ensaio visual foi realizado em toda a extensão da chapa como objetivo de se detectar algum defeito significativo. Não foram detectadas, tanto na face como na raiz, falhas como: garganta insuficiente, mordedura, dobra, perna insuficiente, porosidade, inclusão de escórias, falta de fusão, trincas, entre outras. Portanto todas as chapas foram visualmente aprovadas.



Figura 6. Inspeção visual do cordão de solda (Autoria Própria)



Figura 7. Inspeção da raiz de solda do CP (Autoria Própria)

As Figuras 6 e 7 observa-se as duas faces do CP comprovando a inexistência de defeitos que comprometam a o cordão de solda.

5.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado com o intuito de saber se tal material apresenta uma resistência adequada ao uso ao qual for destinado. O experimento tem o objetivo de analisar, se a resistência mecânica da solda pode sofrer interferência se a posição de soldagem variar.

Foram testados corpos de prova onde para cada um se recolheu os dados necessários para a plotagem e análise do gráfico tensão x deformação. Para cada condição de soldagem foram retirados valores médios de escoamento, ductilidade e limite de resistência do material testado (aço A36).

A Figura 8 mostra o comportamento dos corpos de prova testados, pode-se observar que a ruptura ocorre no metal de base, dentro do comprimento útil adotado que é de 100mm. Esse comportamento foi observado em todos os corpos de prova testados.



Figura 8. Corpos de prova após ensaio. (Autoria Própria)

De posse dos valores médios dos resultados dos testes pode-se fazer a consulta em Tabelas da literatura contidos em [12], para se comparar se o comportamento da solda e do material sofreram alterações que fogem dos valores esperados. Na Tabela 3 a seguir tem-se os valores médios obtidos dos ensaios:

Tabela 3: Resultados após ensaios de tração. (autoria própria)

condição	Valores médios obtidos dos ensaios de tração		
	Escoamento (MP)	Limite resistência (MP)	ductilidade
1	262,87	409,48	20%
2	261,42	417,20	22%
3	288,26	404,15	23%

4	285,89	408,89	20,8%
média	274,61	409,93	21,45%

Ao se comparar os valores obtidos e os de referência literária contidos em [14] é visto que são valores próximos (considerando os valores de referência como valores mínimos admitidos). Para a tensão de escoamento, a variação em relação a média das médias das condições, tem-se um aumento de aproximadamente 9,8%, já para limite de resistência, é visto o aumento de aproximadamente 2,4% e para ductilidade observou-se redução de 28,5% de porcentagem de alongamento. Como todos os corpos de prova romperam no metal de base e não no metal de solda ou em suas imediações (ZAC), o ensaio de tração não foi capaz de medir as propriedades mecânicas como escoamento e limite de resistência do metal de solda da junta soldada. A microestrutura do local e as propriedades de qualquer ponto ao longo do cordão de solda são determinadas pelo ciclo térmico sofrido no ponto em questão [14], muito provavelmente a resistência do metal de solda (MS) ficou superior à do material base (MB), isso é devido à baixa energia de soldagem usada no processo que conseqüentemente produziu uma ZAC menor e com maior dureza que o MB. Contando que a energia de soldagem durante o processo de soldagem não seja muito elevada, a resistência mecânica da junta não é significativamente alterada. Entretanto, com o aumento da energia de soldagem, a ZAC aumenta consideravelmente e promove a redução da resistência mecânica da junta soldada [14].

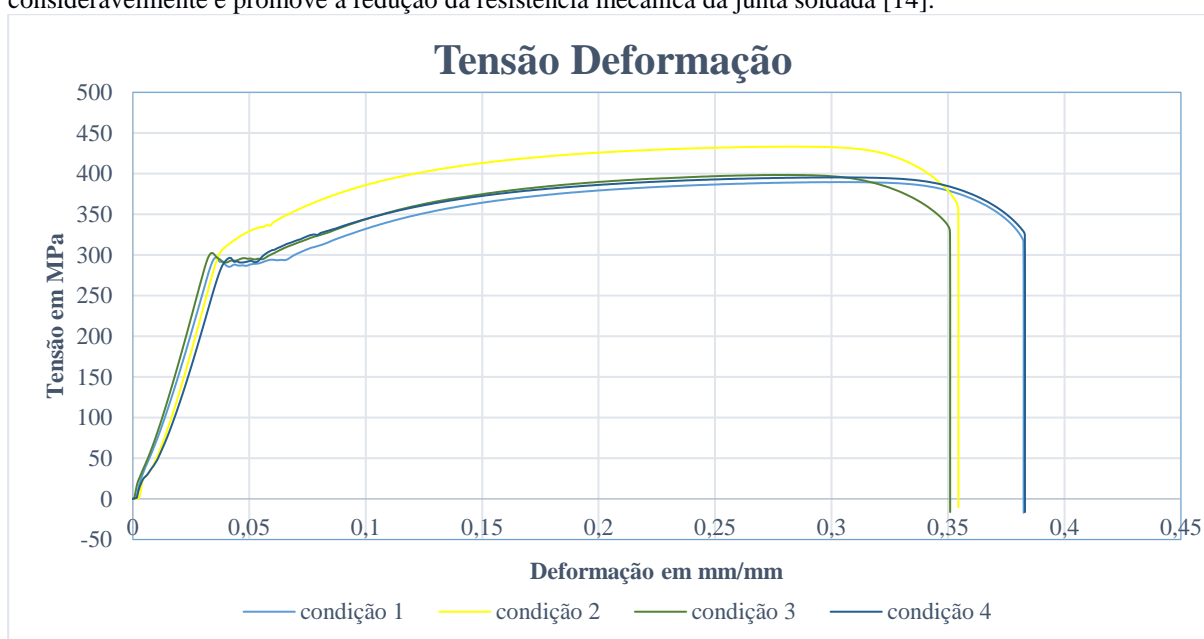


Gráfico 1. Gráficos tensão x deformação das quatro condições testadas (Autoria Própria)

No Gráfico 1, apresenta as curvas contendo os valores obtidos nos ensaios de tração, em que se pode observar todos os valores de tensão e deformação possíveis, a região elástica está delimitada até o valor limite de proporcionalidade, que nos Gráficos correspondem em média aproximadamente igual a 296 MPa, logo a seguir começa a deformar plasticamente entrando na região onde sua deformação é permanente, este valor está localizado aproximadamente em média 286MPa. A seguir pode-se observar que o material começa a deformar plasticamente, isso ocorre quando a tensão atinge o valor médio de 293MPa e vai até atingir o valor máximo de tensão do Gráfico onde este valor já é o valor de falha do material que é aproximadamente de 389 MPa em média.

5.3 Ensaio de Dureza

Considerando que os ensaios de tração não foram suficientes para inferir as propriedades da junta soldada (metal de solda), uma vez que todos os corpos de prova romperam na região do metal de base, adotou-se, portanto, a realização de ensaios de dureza a fim de avaliar a influência dos parâmetros ensaiados sobre a dureza no metal de solda e na ZAC, comparativamente com a dureza do metal de base.



Figura 9. CP's Após os testes (Autoria Própria)

Os corpos de prova foram testados como observado na Figura 8, fazendo-se 3 endentações no metal de base e 3 no metal de solda como observado na Figura 9. Em seguida foi calculado as médias e desvios padrão que serão relacionados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Valores médios de Dureza e desvio padrão obtidos (Autoria própria)

<i>condição</i>	<i>METAL DE BASE(HRB)</i>	<i>METAL DE SOLDA(HRB)</i>
1	71,8 e (1.01)	81,9 e (1.27)
2	71,0 e (0.71)	85,3 e (3.71)
3	70,2 e (1.48)	83,9 e (0.50)
4	72,2 e (0.44)	83,2 e (1.75)

Comparando-se a segunda coluna com a terceira coluna da Tabela 4, pode-se observar que a dureza média do MB ficou diferente da dureza média do MS, sendo a dureza do MS maior que a dureza do MB, o que de fato era esperado. Todavia, pode-se observar na terceira coluna da Tabela 4 que também não houve diferença significativa de dureza do MS entre as diferentes condições ensaiadas. Com isso, pode-se afirmar que as condições ensaiadas neste trabalho – variação da corrente de soldagem entre 92A e 108A e comparação entre soldagem ascendente e descendente, não causaram alterações significativas na dureza da junta soldada.

6. CONCLUSÃO

Os ensaios de tração revelaram que, para os parâmetros comparados aqui (corrente e sentido de soldagem), o limite de resistência do metal de solda foi superior ao do metal de base, uma vez que nenhum corpo de prova rompeu no metal de solda. Nenhum corpo de prova rompeu na zona termicamente afetada, o que sugere que os aportes térmicos sofridos pelos corpos de prova durante a etapa de soldagem não foram suficientes para alterar significativamente as propriedades mecânicas dessa região da junta soldada. Os resultados obtidos com os testes de dureza indicaram que a variação de sentido de soldagem (ascendente ou descendente) não causaram variação significativa na dureza do metal de solda das juntas testadas. Os resultados obtidos com os testes de dureza indicaram ainda que a variação dos níveis de corrente testados, também não causaram variação significativa no metal de solda das juntas soldadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFERSA pelos recursos necessários para realização dos ensaios neste trabalho.

À empresa NEW ENERGY TECH, por disponibilizar todo o material para os corpos de prova e soldagem.

REFERÊNCIAS

- [1] **SCOTTI, Ámerico e PONOMAREV, Vladimir.** *Soldagem MIG/MAG. Melhor Entendimento, Melhor Desempenho.* são paulo : Artliber, 2008.
- [2] **FORTES, Cleber e TURANI, Cláudio.** Apostila de Soldagem MIG/MAG. [Online] 25 de 01 de 2005. [Citado em: 04 de 11 de 2020.]
- [3] **M. Suban, J. Tušek,** Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 119, Issues 1–3, 2001, Pages 185-192, ISSN 0924-0136, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00940-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00940-2).
- [4] **COSTA, Thonson Ferreira, FILHO, Edmundo Benedetti e VILARINHO, Louriel Oliveira.** Avaliação de Processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. *Soldagem & Inspeção.* [Online] 13 de 07 de 2012. [Citado em: 20 de 12 de 2020.] <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242012000400010>.
- [5] **MARADEI, Gabriel e Liskévych, Olga.** Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. [Online] junho de 2011. [Citado em: 2 de 12 de 2020.] https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242011000200002&script=sci_arttext&tlng=pt.
- [6] **MARQUES, Paulo Villani e MODESI, Paulo José.** *SOLDAGEM FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA.* RIO DE JANEIRO : ELSEVIER, 2017.
- [7] **MARKUS, Herbert Erno.** Variação da Geometria do Cordão de Solda em juntas T. [Online] 2014. [Citado em: 14 de 11 de 2020.] <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/2214/TCC%20%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [8] **ASTM A36 / 36M.** Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2008. 4p.
- [9] **Catálogo SUMIG Arame Tubular de Aço Carbono ER70S-6, 2022.** Caxias do Sul
- [10] **OLIVEIRA, Helder Silveira Costa.** Elaboração de procedimento de soldagem e análise de desempenho de soldadores. [Online] agosto de 2012. [Citado em: 20 de agosto de 2021.] <https://nmc.webnode.com.br/files/200000100-a5ba3a601e/TRABALHO%20DE%20CONCLUS%C3%83O%20DE%20CURSO.pdf>.
- [11] **JR, William D Callister.** *fundamentos da ciencia dos materiais.* s.l. : grupo gen, 2019.
- [12] **CHARLES, Russell Hibbeler.** *resistencia dos materiais.* 7. ed. são paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.
- [13] **ISO 6508-1 2005 Metallic materials—Rockwell hardness test: part 1.** Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (Geneva, Switzerland: ISO)
- [14] **DALCIN, Rafael Luciano.** Efeitos Da Energia de Soldagem e Consumíveis Sobre a resistência á Flexão de juntas "T" Soldadas em perfis tubulares. [Online] 2016. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/141104/000991856.pdf?sequence=1>.