

# Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica



Edição  
v.4 n.2 2022

#### CARTA DO EDITOR



A Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica (R4EM) da UFRSA é um periódico semestral, com ISSN e DOI, que objetiva divulgar os trabalhos de pesquisa de professores e estudantes de graduação e de pós-graduação, bem como trabalho de profissionais do mercado de trabalho.

Entre os tipos de trabalho de divulgação temos as simulações numéricas, estudos de caso, pesquisas científicas teóricas e experimentais, além do desenvolvimento de produtos de inovação tecnológica. O artigo científico é um trabalho publicado, de autoria científica e que segue o método científico. Ele tem o objetivo de apresentar e discutir ideias, métodos, técnicas, processos, além de apresentar resultados do conhecimento produzido ou aprofundado. O artigo científico é um texto com conteúdo científico original, resultado de uma pesquisa, Trabalho de Conclusão de Curso, Monografia, estudo de caso, dissertação de mestrado ou tese de doutorado, bem como a resolução ou detecção de um problema.

O CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) divide o conhecimento em 8 áreas. Estas áreas, chamadas de árvore de especialidades do conhecimento, são: Ciências Exatas e da Terra; Ciências Biológicas; Engenharias; Ciências da Saúde; Ciências Agrárias; Ciências Sociais; Ciências Humanas; Linguística, Letras e Artes. Cada uma delas é subdividida em subáreas. As Engenharias São divididas em Engenharia Civil, Engenharia de Minas, Engenharia de Materiais, Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Engenharia Química, Engenharia Sanitária (ou Ambiental), Engenharia de Produção, Engenharia Nuclear, Engenharia de Transportes, Engenharia Naval e Oceânica, Engenharia Aeroespacial e Engenharia Biomédica. A R4EM aceita artigos das áreas de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica ou áreas correlatas que envolvam essas duas Engenharias.

Dentre essas áreas de conhecimento de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica e os tipos de trabalho de divulgação científica, destaco os estudos de caso. Estes artigos podem envolver não apenas estudantes e acadêmicos, mas também profissionais do mercado de trabalho, sendo uma excelente maneira de divulgar uma ação desenvolvida em um estágio, um projeto de Engenharia, ou uma atividade profissional, como uma perícia, prática, inspeção ou a resolução de um problema de Engenharia. Os estudos de caso são muito populares em razão do seu uso para divulgar um resultado que deu certo ou que representou uma falha. Estudar situações reais, que deram certo ou que deram errado, são ótimas maneiras de divulgar um trabalho, pois permitem seu uso em sala de aula e auxiliam outros profissionais que podem passar pelo mesmo problema. Para realizar um estudo de caso é importante definir e delimitar o caso que será estudado, obter informações detalhadas deste caso em estudo, justificar o mérito deste estudo, escolher a bibliografia adequada, o tipo de pesquisa realizada, coletar dados suficientes para comprovar a resultado obtido no estudo de caso, entre outras coisas, além de analisar os dados e tentar explicar as decisões tomadas para os acertos ou erros cometidos.



Reforçamos o convite à comunidade acadêmica e aos profissionais do mercado de trabalho que publiquem conosco seus artigos científicos advindos de TCCs, pesquisas científicas, trabalhos experimentais, teóricos, simulação ou estudos de caso, incluindo trabalhos na área de ensino de Engenharias. Em nome da equipe da R4EM, agradecemos a todos os autores que publicaram conosco nesta edição e aos professores que colaboram na avaliação destes trabalhos. Um agradecimento especial dos editores aos alunos do PET Mecânica & Energia que compõem a nossa equipe editorial desta edição, que tanto se esforçam para lançar semestralmente as edições da R4EM.

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior  
Editor Chefe da R4EM

ARTIGO CONVIDADO

O MERCADO DE TRABALHO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA PARA O ENGENHEIRO MECÂNICO E PARA O ENGENHEIRO ELETRICISTA

MSc. AFONSO PIRES FEITOZA  
MESTRE EM ENGENHARIA AERONÁUTICA E MECÂNICA  
ENGENHEIRO DE ESTRUTURAS AERONÁUTICAS - EMBRAER



Foi com muita alegria que aceitei o convite de meu amigo de longa data, Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga, para lhes escrever sobre a jornada de formação dos engenheiros com atuação na indústria aeronáutica.

A Engenharia Aeronáutica compreende áreas do conhecimento empregadas nas diferentes fases do ciclo de vida de aeronaves; desde a concepção, passando pelo desenvolvimento do produto, apoio à operação, manutenção e destinação final. Disciplinas como mecânica dos sólidos, aerodinâmica, processos de manufatura, sistemas elétrico-eletrônicos, softwares embarcados e vibro-acústica são aplicados de forma integrada a fim de garantir o atendimento de, literalmente, milhares de especificações técnicas.

No Brasil, poucas são as instituições que possuem cursos específicos de graduação e pós-graduação em Engenharia Aeronáutica, sendo ITA, UFMG, UFSCar e USP as mais renomadas. Entretanto, um engenheiro não precisa necessariamente ter graduação em Engenharia Aeronáutica para atuar na área. Egressos de cursos de graduação em engenharia mecânica, elétrica, civil, de materiais, mecatrônica e muitos outros trabalham na indústria aeronáutica. Para tanto, destaco dois possíveis caminhos: Estágio em empresas do setor e programas de pós-graduação.

No primeiro caso, sólida experiência prática pode ser adquirida ao realizar-se estágio em empresas aéreas, oficinas de manutenção e fabricantes de aeronaves. Para conseguir uma colocação de estágio em empresas do setor aeronáutico, pode ser um diferencial ter desenvolvido atividades correlatas durante a graduação (e.g., iniciação científica aplicada à área e participação na competição SAE Aerodesign<sup>[1]</sup>). Participação em competições do Aerodesign são muito valorizadas no mercado dada a exposição do aluno a um projeto multidisciplinar que aliar teoria e prática. Um bom networking também ajuda na obtenção de estágios, visto que a indicação de um profissional que atua na área pode abrir portas. Portanto, a participação em feiras de empresas do setor costuma valer a pena.

No caso de programas de pós-graduação, engenheiros das mais diversas formações podem aprofundar seus conhecimentos em aplicações específicas da engenharia aeronáutica. Tais programas podem ser de caráter acadêmico (mestrado e doutorado) ou de especialização. Um ótimo exemplo é o Programa de Especialização em Engenharia Aeronáutica (PEE)<sup>[2]</sup> da fabricante brasileira de aviões, Embraer. Trata-se de um programa de especialização em parceria com o ITA que seleciona engenheiros de todo o Brasil com até 2 anos de formados. Esse programa já formou 31 turmas nos últimos 20 anos.



Seu objetivo é justamente suprir a demanda por profissionais qualificados na área, já que não temos muitos cursos de graduação em aeronáutica. O processo seletivo consiste de uma prova técnica, dinâmicas de grupo e entrevistas. O programa é dividido em quatro etapas, a saber: Fase 1 - Fundamentos da aeronáutica; Fase 2 - Estrutura, manutenção, manufatura e sistemas; Fase 3 - Projeto conceitual completo de uma nova aeronave; Fase 4 - Dissertação de mestrado profissional.

Atualmente, o PEE é a principal porta de entrada para a Embraer, empresa de ponta que já desenvolveu mais de 40 modelos diferentes de aeronaves nos seus 53 anos de história e cujos aviões transportaram cerca de 145 milhões de passageiros por ano em todo o mundo em 2021. Um verdadeiro orgulho para todos os brasileiros.

[1] <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/aero-design-sae-brasil/>

[2] <https://embraer.com/br/pt/pee>



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*

EDITORIAÇÃO

*Davi Ferreira Chianca*  
*Francisco das Chagas Duarte Neto*  
*Francisco Everardo Queiroz de Lima Filho*  
*Michele Edneide da Costa Leitão*

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](mailto:r4em@ufersa.edu.br)*



## SUMÁRIO

Utilização de protótipo pedagógico no ensino da proporcionalidade em circuitos elétricos de corrente contínua..	1
<i>Lucas Emanuel de Oliveira Maia.</i>	
Influência da geração solar fotovoltaica no fator de potência de unidades consumidoras do grupo A: Um estudo de caso na UFERSA – Campus Mossoró.....	7
<i>Thyago Lucas Ferreira Clemente, Ednardo Pereira da Rocha, Adriano Aron Freitas de Moura, Victor de Paula Brandão Aguiar.</i>	
Árvore solar fotovoltaica: uma proposta técnica para implantação em ambientes públicos na cidade de Mossoró-RN .....	19
<i>Daniel C. C. Crisóstomo, Isaac B. T. Silva, Rafael M. Vieira, Adriano A. F. Moura.</i>	
Projeto de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica residencial na zona urbana de Almino Afonso-RN .....	29
<i>Marcos A. De Oliveira, Renato de S. A. Filho, Adriano A. F. Moura, Daniel C. C. Crisóstomo.</i>	
Influência do tempo e temperatura de recozimento sobre a tenacidade ao impacto de um aço carbono.....	42
<i>Matheus Odilon da Silva Pereira, Francisco Edson Nogueira Fraga.</i>	
Estimação de estado em redes de distribuição de energia elétrica com geração distribuída .....	52
<i>Gabriel Luiz D. L. Nogueira, Adriano Aron Freitas de Moura, Ednardo Pereira da Rocha.</i>	
Análise computacional das curvas de ciclo térmico em uma chapa de alumínio soldada com o processo TIG autógena .....	61
<i>Hugo Eduardo Tavares Vieira, Francisco Edson Nogueira Fraga.</i>	



Artigo

# Utilização de protótipo pedagógico no ensino da proporcionalidade em circuitos elétricos de corrente contínua

Lucas Emanuel de Oliveira Maia <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; lucas.manibu@hotmail.com

Recebido: 23/04/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

**Resumo:** O presente trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de protótipo pedagógico no ensino de proporcionalidade aplicada à circuitos elétricos de corrente contínua, explorando conhecimentos, métodos e abordando seu contexto. O estudo realizado foi de natureza investigativa seguida de uma prática pedagógica buscando mostrar e refletir a partir de uma prática em sala de aula, na Escola Estadual Professor Abel Freire Coelho, na série do 3º ano “A”, com o objetivo de analisar o comportamento de circuitos elétricos resistivos com arranjo em série, em paralelo e misto; Investigar a relação de proporcionalidade existente nos circuitos elétricos com seus elementos: corrente elétrica, tensão e resistência através de uma prática pedagógica, pois proporciona maior familiaridade com o tema em foco e permite o aperfeiçoamento das ideias e intuições sobre o objeto de pesquisa. Avaliar como os alunos entenderam a experimentação, tanto no que se refere a prática, quanto à aprendizagem do conteúdo. O ensino da proporcionalidade é iniciado no 7º ano do ensino fundamental, sendo dedicados um ou dois meses a esse estudo e os demais conceitos, relacionados ao ensino de proporcionalidade, apresentados de uma só vez, num só momento, os seguintes tópicos: definição de razão, definição de proporção como igualdade de razões, propriedades das proporções, grandezas diretamente proporcionais, grandezas inversamente proporcionais, regra de três simples, regra de três composta e juro simples; uma abordagem que não faz a exploração intuitiva da proporcionalidade como função.

**Palavras-chave:** Proporcionalidade; Corrente elétrica; Corrente contínua.

**Abstract:** The present work presents a study on the use of a pedagogical prototype in the teaching of proportionality applied to direct current electrical circuits, exploring knowledge, methods and addressing its context. The study carried out was of an investigative nature followed by a pedagogical practice seeking to show and reflect from a practice in the classroom, State School Professor Abel Freire Coelho, in the 3rd year grade "A", with the objective of analyzing the behavior resistive electrical circuits arranged in series, parallel and mixed; Investigate the proportionality relationship existing in electrical circuits with their elements: electric current, voltage and resistance through a pedagogical practice, as it provides greater familiarity with the topic in focus and allows the improvement of ideas and intuitions about the research object. Evaluate how students understood experimentation, both in terms of practice and content learning. The teaching of proportionality starts in the 7th year of elementary school, with one or two months being dedicated to this study and the other concepts related to the teaching of proportionality, presented at once, in a single moment, the following topics: definition of reason, definition of proportion as equality of ratios, properties of proportions, directly proportional quantities, inversely proportional quantities, simple rule of three, compound rule of three and simple interest; an approach that does not make the intuitive exploration of proportionality as a function.

**Key-words:** Proportionality; Electric current; Voltage; electrical resistance; Direct current.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho consiste em mostrar um estudo da utilização de protótipo pedagógico no ensino da proporcionalidade existente entre circuitos elétricos na corrente contínua, explorando conhecimentos teóricos e práticos, métodos e abordando seu contexto, relacionando o uso da matemática nas atribuições da física, sugerindo o estudo dos circuitos elétricos em corrente contínua, com o intuito de verificar na prática a existência da interligação entre matemática e física como uma opção de prática pedagógica lúdica para ensino de matemática no ensino médio e superior.

Nesta perspectiva, propomos buscar compreender a seguinte problemática que norteia este trabalho:

- Qual a relação existente entre proporcionalidade e corrente elétrica, tensão e resistência elétrica em circuitos elétricos de corrente contínua?

Neste contexto, o estudo realizado foi de natureza investigativa quanto aos seus objetivos e uma prática pedagógica buscando mostrar e refletir a partir de uma prática em sala de aula, na Escola Estadual Professor Abel Freire Coelho, na série do 3º ano “A”, com o objetivo de analisar o comportamento de circuitos elétricos resistivos com arranjo em série, em paralelo e misto; Investigar a relação de proporcionalidade existente nos circuitos elétricos com seus elementos: corrente elétrica, tensão e resistência através de prática pedagógica, pois proporciona maior familiaridade com o tema em foco e permite o aperfeiçoamento das ideias e intuições sobre o objeto de pesquisa. Avaliar como os alunos entenderam a experimentação, tanto no que se refere a prática, quanto à aprendizagem do conteúdo.

A turma 3º ano “A” é composta por 27 alunos, sendo 11 meninos e 16 meninas, uma turma que apresenta um quadro bastante diversificado. Na escola temos alunos pertencentes a várias classes sociais, assim distribuídos: B1, B2, C1, C2, D, e E, predominando na sua grande maioria a classe C. Residem em bairros adjacentes da escola, zona rural e cidades circunvizinhas. Estão na faixa etária dos 14 aos 18 anos. Como todos os adolescentes e jovens são inquietos, articuladores, contestadores e gostam de desafios.

O conteúdo de proporcionalidade tem como base referencial o livro Temas e problemas de Lima et al. (2010). Além disso, temos o autor OLIVEIRA (2009, p. 57) I. no seu trabalho que aborda a Proporcionalidade: estratégias utilizadas na Resolução de Problemas por alunos do Ensino Fundamental no Quebec e já o conteúdo de física tendo como base o autor SAMPAIO (2005) em seu livro Universo da física, 3: Ondulatória, eletromagnetismo, física moderna.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A prática pedagógica do professor é importante no processo ensino aprendizagem, pois o modo como se expõe os conteúdos, não deve ser visto como algo que irá ser somente adquirido para preencher um espaço vazio. Utilizar uma prática pedagógica, onde o professor valorize os conceitos matemáticos, possibilitando que o aluno construa significados e elabore seus próprios conceitos, ou seja, a sua elaboração conceitual, em relação aos conteúdos, pode ser uma solução possível para ensino matemático.

Admitindo a importância de fundamentar o ensino da matemática e da física em um processo de formação de conceitos, é sendo necessário uma metodologia que permita o professor alcançar seus objetivos, trabalhando com o abstrato, possibilitando uma mediação com o concreto e resultando assim em significações que posteriormente, serão mais abrangentes. Buscando, compreender tais fatos acima citados, partimos de uma pesquisa, desenvolvida numa abordagem quantitativa e qualitativa.

Para a confecção da placa de circuito foi feito o planejamento com objetivo de montar os três tipos básicos de circuitos elétricos de corrente contínua, num só quadro, seguindo os seguintes passos:

Material Utilizado:

1. Ferro de solda;
2. Folha de Isopor;
3. Piloto;
4. Cola de Isopor;
5. Fonte de alimentação (Pilhas);
6. Botão Pulsador;
7. Resistores Elétricos (Led' s);
8. Fita Isolante;

Para a realização da aula prática foram implementados circuitos elétricos compostos por mais de um resistor nas configurações série, paralelo e misto. Onde foram observados os efeitos da associação e a proporcionalidade existente nos circuitos elétricos para a tensão e a corrente observada nesses elementos. Para isso, é necessário o conhecimento do cálculo de corrente elétrica, tensão e resistência equivalente.

Os objetivos da aula prática foi analisar o comportamento de circuitos elétricos resistivos com arranjo em série, em paralelo e mistos; observar a relação de proporcionalidade existente nos circuitos elétricos com seus elementos: corrente elétrica, tensão e resistência.

Nesta aula foram utilizados três multímetros, resistores elétricos, fonte de alimentação e um circuito elétrico de corrente contínua composta por mais de um resistor nas configurações série, paralelo e misto. Sendo observados os efeitos da associação e a proporcionalidade existente nos circuitos elétricos para a tensão e a corrente observada nesses elementos, como segue figura 1 abaixo.



FIGURA 1. Protótipo: Circuito elétrico em Série. (Autoria própria).



FIGURA 2. Protótipo: Circuito elétrico em Paralelo. (Autoria própria).

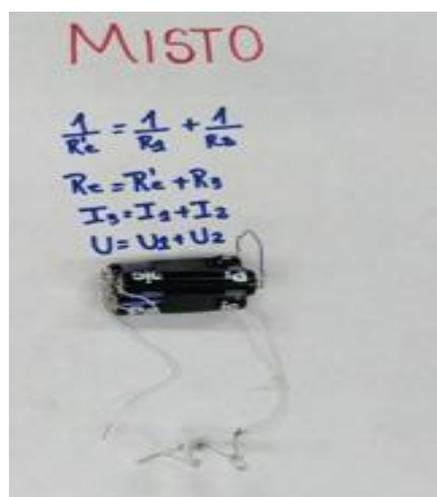


FIGURA 3. Protótipo: Circuito elétrico Misto. (Autoria própria).

Fiz uma breve apresentação do conteúdo através de slides, falando sobre os circuitos elétricos, assim como seus respectivos elementos, tais como: resistores, indutores, capacitores, diodos, linhas de transmissão, fontes de tensão, fontes de corrente e interruptores. Definiu-se corrente elétrica, tensão elétrica e resistência elétrica e suas respectivas fórmulas matemáticas e físicas, sempre mostrando a proporcionalidade em cada conceito e suas aplicações.

Os alunos eram indagados diretamente antes de cada conceito abordado, como exemplo: O que é Corrente elétrica? O que é Tensão Elétrica? E Resistência Elétrica? O que acontece com corrente, a tensão e resistência nos circuitos em série, paralelo e misto? Um dos alunos respondeu: “No circuito em série a corrente é mesma e

a tensão dividi”; A apresentação foi elaborada de uma forma eficaz, fazendo com que os alunos pudessem expressar seu entendimento e responder da maneira como aprendeu o assunto no decorrer do ano letivo. Depois explanei sobre associações de resistores em série, paralelo e misto, explicando como funciona os efeitos das associações e a proporcionalidade existente nos circuitos elétricos (a tensão, resistência e a corrente observada nesses elementos).

Antes de iniciar a prática com o circuito elétrico expliquei o que é um Multímetro e as suas diversas funções. Na prática os alunos foram orientados a começar analisando o circuito em série, onde utilizavam os multímetros para mensurar os valores de tensão, resistência e a da corrente elétrica. Nesse contexto, os alunos confirmaram que a corrente elétrica do circuito em série é a mesma que passa por todo o circuito e que é diretamente proporcional a tensão e inversamente proporcional a resistência, e que a tensão se divide proporcionalmente em cada resistor.

Abaixo estará descrito o quantitativo de acertos e erros de cada questão respondida tendo em vista o conteúdo aplicado em aula expositiva e como também na prática demonstrativa.

A questão A trabalha a associação de resistores em série, onde a corrente elétrica permanece constante em todo o circuito, mas a tensão divide em cada resistor. A questão visava o cálculo da corrente elétrica e a tensão de cada resistor, observando a proporcionalidade existente.

### 3. RESULTADOS

No final da aula, foi aplicada uma avaliação da aprendizagem, composta por três questões tendo como finalidade de analisar o comportamento de circuitos elétricos resistivos com arranjo em série, em paralelo e misto, observando a relação de proporcionalidade existente nos circuitos elétricos com seus elementos, passando assim a ser um instrumento que auxiliará o educador a atingir seus objetivos propostos em sua prática educativa. A avaliação sob essa ótica deve ser tomada na perspectiva diagnóstica, servindo como mecanismo para detectar as dificuldades e possibilidades de desenvolvimento do educando.

Abaixo estará descrito o quantitativo de acertos e erros de cada questão respondida tendo em vista o conteúdo aplicado em aula expositiva e como também na prática demonstrativa.

A questão A trabalha a associação de resistores em série, onde a corrente elétrica permanece constante em todo o circuito, mas a tensão divide em cada resistor. A questão visava o cálculo da corrente elétrica e a tensão de cada resistor, observando a proporcionalidade existente.

**QUESTÃO A** - A diferença de potencial entre os extremos de uma associação em série de dois resistores de resistências  $10\Omega$  e  $100\Omega$  é  $220V$ . Calcule a corrente elétrica e a tensão que passa pelos resistores  $10\Omega$  e  $100\Omega$ ?

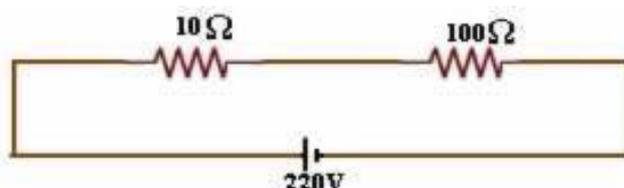


Figura 4. Associação série. (Elaborado pelo autor).



Gráfico 1. Questão A. (Elaborado pelo autor).

A questão B trabalha a associação de resistores em paralelo, onde a corrente elétrica divide em todo o circuito, mas a tensão é a mesma. A questão visava o cálculo da tensão, resistência equivalente e corrente elétrica em cada resistor, observando a proporcionalidade existente.

**QUESTÃO B** - No circuito esquematizado abaixo, determine tensão e a resistência equivalente entre os extremos A e B, a corrente elétrica em cada resistor.

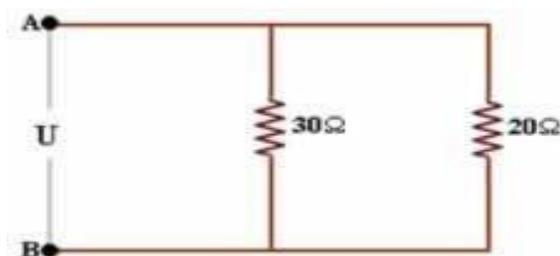


Figura 5. Associação paralelo. (Elaborado pelo autor).



Gráfico 2. Questão B. (Elaborado pelo autor).

Já a questão C trabalha a associação de resistores mista, onde faz-se necessário ter o conhecimento prévio das associações anteriores acima citada. A questão visava o cálculo da resistência equivalente, observando a proporcionalidade existente.

**QUESTÃO C** - Qual é a resistência equivalente da associação a seguir:

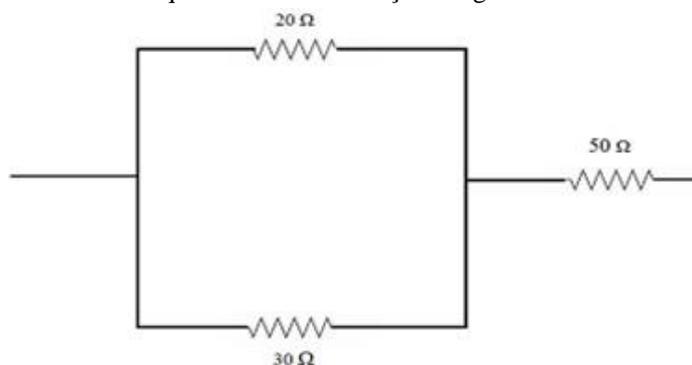


Figura 6. Associação mista. (Elaborado pelo autor).

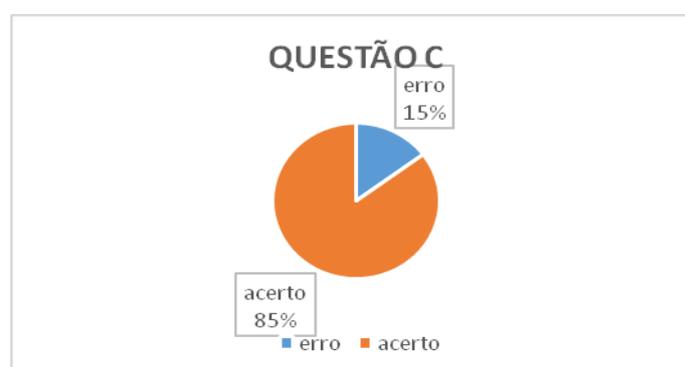


Gráfico 3. Questão C. (Elaborado pelo autor).

A discussão dos resultados consiste em confrontar os dados obtidos com a literatura a fim de demonstrar sua coerência ou comparar e contrastar com trabalhos anteriores. A discussão também consiste em versar sobre as implicações de cada conjunto de dados, bem como enfatizar achados importantes.

#### 4. CONCLUSÃO

Diante do exposto, concluiu-se que o tema abordado neste trabalho mostrou uma boa alternativa a ser utilizada pelo professor para apresentar os conceitos físicos e matemáticos através de uma prática pedagógica aplicada em turma de 3º ano de ensino médio. Foi possível mostrar a importância de conceitos como corrente elétrica, tensão e resistência elétrica através de uma abordagem matemática. O modelo utilizado simula satisfatoriamente os dados obtidos para os dispositivos. Com a análise dos aspectos práticos e teóricos utilizados nos circuitos elétricos, obtiveram-se informações relacionadas efeitos em função da corrente elétrica, tensão e resistência elétrica.

Utilizando uma prática pedagógica de simples realização, mostrou-se que o uso de experimentos é importante no processo de ensino-aprendizagem nas aulas de Física. Os conceitos utilizados na prática foram relacionados com aplicações matemáticas de acordo com estudo de caso desenvolvido no IFRN. Através deste trabalho científico, mostrou-se a importância de inserir os alunos de Ensino Médio no processo de evoluções da matemática através da apropriação de conhecimentos científicos da física para uma formação de cidadão crítico e capaz de entender seu papel no contexto científico-tecnológico e na sociedade.

Diante dos resultados aqui expostos, é importante destacarmos que o conceito de proporcionalidade está relacionado a muitos outros conceitos físico-matemáticos como porcentagem, número racional, função, corrente elétrica, tensão e resistência elétrica, requerendo a mobilização de outros conceitos, em especial, conceito de função para a sua apropriação, bem como, a interação entre os objetos de estudos.

Contudo, espera-se que o artigo venha contribuir para o ensino e aprendizagem da física e matemática, além de servir de subsídios para pesquisas futuras, com o intuito de melhorar as aulas de física e matemática no ensino brasileiro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. Parâmetros Curriculares Nacionais Matemática 5ª a 8ª série. Brasília: SEF, 1998.
- [2] BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Linguagens, códigos e suas tecnologias. Brasília: Ministério da Educação/Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2002.
- [3] IMENES, L. M. P. Proporcionalidade um tratamento funcional. 2008. Disponível em: < [https://www.fisica.ufmg.br/biblioteca/bases\\_de\\_dados/bases/](https://www.fisica.ufmg.br/biblioteca/bases_de_dados/bases/)>. Acesso em: 6 fev. 2022.
- [4] LIMA, Elon Lages. Temas e problemas. Rio de Janeiro: SBM, 2010.
- [5] OLIVEIRA, Izabella. Proporcionalidade: estratégias utilizadas na Resolução de Problemas por aluno do Ensino Fundamental no Quebec. *Bolema*, Rio Claro, ano 22, n. 34, p. 57-80, 2009. Acesso em: 6 fev. 2022.
- [6] POST, R. T.; BEHR, J. M.; LESH, R. A proporcionalidade e o desenvolvimento de noções pré-álgebra. In: COXFORD, A. F.; SHULTE, A. P. *As ideias da Álgebra*. São Paulo: Atual, 1995.
- [7] SAMPAIO, Jose Luiz. *Universo da física 3: Ondulatória, eletromagnetismo, física moderna*. 2. ed. São Paulo: Atual, 2005.
- [8] PONTE, J. P. et al. O desenvolvimento do conceito de proporcionalidade directa pela exploração de regularidades. 2010. Disponível em: < <https://periodicos.unb.br/index.php/RICI/article/view/2236>> Acesso em: 10 jan. 2022.



Artigo

# Influência da geração solar fotovoltaica no fator de potência de unidades consumidoras do grupo A: Um estudo de caso na UFERSA – Campus Mossoró

Thyago Lucas Ferreira Clemente<sup>[1]</sup>, Ednardo Pereira da Rocha<sup>[2]</sup> Adriano Aron Freitas de Moura<sup>[3]</sup> e Victor de Paula Brandão Aguiar<sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; thyagolucasfc@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; victor@ufersa.edu.br

*Recebido:* 04/06/2022;

*Aceito:* 21/12/2022;

*Publicado:* 23/12/2022.

**Resumo:** Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (On-grid) em sua maioria de geração distribuída, em que sua geração é próxima do consumo, apresentam influência sobre a rede elétrica na vizinhança do local de instalação. Com o crescimento desse tipo de geração, a implementação de uma grande quantidade de sistemas fotovoltaicos previamente não esperados pela concessionária podem sobrecarregar os transformadores de potência mais próximos, além de outros efeitos na rede elétrica de energia. Este artigo tem como objetivo a análise dos impactos no fator de potência (FP) ocasionados por sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em Unidades Consumidoras (UCs) de alta tensão (grupo A), especificadamente na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Mossoró. Também cabe ao artigo revisar conceitos importantes ligados às modalidades tarifárias existentes, a tarifação dos consumidores do grupo A e a produção e crescimento do sistema fotovoltaico na UFERSA - Campus Mossoró. Serão mostrados e avaliados os valores de fator de potência, fornecidos pela instituição através do arquivo de memória de massa de um medidor do campus e será discutido a influência na rede local e os métodos compensatórios para correção desse fator em um período de 31 dias, entre os dias 27 de setembro a 27 de outubro de 2019. Como conclusão chega-se que é fundamental o estudo de compensação de reativos para as unidades consumidoras do grupo A para que não sejam tarifados seus excedentes reativos por fator de potência abaixo de 0,92.

*Palavras-chave* Conectado à rede elétrica, influência, fator de potência, grupo A, memória de massa.

**Abstract:** Photovoltaic systems connected to the grid (On-grid) mostly of distributed generation, in which their generation is close to consumption, have an influence on the electrical grid in the vicinity of the installation site. With the growth of this type of generation, the implementation of a large number of photovoltaic systems not previously expected by the utility can overload the nearest power transformers, in addition to other effects on the power grid. This article aims to analyze the impacts on the power factor (PF) caused by photovoltaic systems of distributed generation in Consumer Units (UCs) of high voltage (group A), specifically at the Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró campus. It is also up to the article to review important concepts related to the existing tariff modalities, the pricing of group A consumers and the production and growth of the photovoltaic system at UFERSA - Campus Mossoró. The power factor values provided by the institution through the mass memory file of a campus meter will be shown and evaluated and the influence on the local network and the compensatory methods to correct this factor will be discussed in a period of 31 days, between September 27th to October 27th, 2019. As a conclusion, it is concluded that the study of reactive compensation for group A consumer units is essential so that their reactive surpluses are not charged by power factor below 0.92.

*Key-words:* On-grid, influence, power factor, group A, mass memory.

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil em setembro de 2020 totalizou 40.227 GWh, representando avanço de 2,6% em relação ao mesmo período do ano anterior. O setor residencial lidera a demanda nacional de eletricidade, em setembro, com um crescimento de +7,6%, acompanhada pelo setor industrial, com crescimento +5,7%. Já, a classe comercial sofreu um decréscimo de 8,0% se comparado com o mesmo período de 2019, resultados dos impactos do distanciamento social devido à pandemia da COVID-19 [1]. Todas as regiões do país apresentaram expansão do consumo de energia durante a pandemia [2], fator observado pela diminuição e flexibilização dos horários de trabalhos e maior tempo de permanência nas residências durante os decretos estaduais e recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS). Para compensar esse aumento no consumo, muitos consumidores estão buscando o investimento em energia fotovoltaica (ABSOLAR) [3].

O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020 – ano base de 2019 - demonstra que a energia hidráulica continua como principal fonte da matriz elétrica brasileira, correspondendo a 64,9% da geração elétrica. Este balanço também aponta o crescimento da microgeração e minigeração distribuída de energia fotovoltaica, devido às ações de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte [3].

Na expansão da capacidade instalada, as centrais hidráulicas contribuíram com 4.919 MW, ou seja 67,6% do total adicionado. Destaque para a Geração Distribuída de energia fotovoltaica, que em 2019 possuía uma potência total instalada de 1 GW, e em janeiro de 2020 dobrou para 2 GW e em junho de 2021 alcançou a marca de 3 GW [4].

A geração distribuída é definida no Decreto Lei nº 5.163/2004, como sendo “toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador”. Em 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482 que regulamentou o processo de Geração Distribuída (GD) permitindo contabilização de créditos pelas concessionárias. Em 2015, a ANEEL publicou a sua atualização, a Resolução Normativa nº 687 [5].

No Brasil, as Unidades Consumidoras são divididas em grupos, chamados de grupo A e grupo B, dependendo do nível de tensão de fornecimento. Além disso, de acordo com a Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL, os consumidores podem ser identificados de acordo sua atividade principal, ou seja, a finalidade do consumo da energia [6].

A geração distribuída, especialmente a dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (Sistemas On-Grid), trouxeram novos desafios às concessionárias de distribuição de energia, devido ao acompanhamento e controle de faturamento das unidades consumidoras [8]. As unidades consumidoras do grupo A, composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou potência total instalada igual ou superior a 75 kW.

Esses são caracterizados pela tarifa binômia, e diferentemente dos consumidores do Grupo B que são tarifados apenas pelo consumo e possuem medidores bidirecionais de potência, os consumidores do Grupo A utilizam-se de medidores de 4 quadrantes, capazes de mensurar o fluxo bidirecional da energia ativa e da energia reativa [9].

Os Sistemas fotovoltaicos On-Grid durante o dia geram parte da potência ativa necessária para o funcionamento das cargas e o excedente irá para o banco de dados da concessionária. Segundo a REN N°482/2012, a energia ativa injetada na rede da concessionária deve ser abatida do faturamento mensal ativo das unidades consumidoras, e em caso de saldo de geração, a energia injetada poderá ser redirecionada para outras UCs [10]. O faturamento ocorre pela diferença entre a energia consumida e a injetada, adicionados o crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores [6]. Quanto ao faturamento da demanda de energia ativa, do consumo reativo e da demanda reativa, a REN N°482/2012 e suas revisões estabelecem que devem ser seguidas as regras aplicadas aos demais consumidores do mesmo subgrupo.

Os consumidores do grupo A possuem uma maior demanda de potência, necessitando de maiores sistemas fotovoltaicos para suprir parte de seu consumo, com isso, maiores usinas de energia solar acabam por produzir uma maior potência energética, injetando uma maior potência ativa na rede, necessitando de uma menor quantidade de potência ativa da rede da concessionária, elevando proporcionalmente a circulação de energia reativa, piorando o fator de potência [7]. Como as usinas fotovoltaicas produzem e entregam apenas energia ativa para a rede, a energia reativa necessária para o funcionamento de alguns equipamentos continua sendo demandada da rede elétrica.

Com a redução da necessidade e fornecimento de potência ativa da rede da concessionária e a manutenção do fornecimento de potência reativa, haverá uma diminuição do FP no ponto de entrega das UCs ao longo do dia, e conseqüentemente poderá ocasionar cobranças adicionais aos consumidores do grupo A, já esses são passíveis de cobrança por descumprimento do fator de potência mínimo de 0,92.[6], diminuindo a viabilidade econômica e aumentando o tempo de retorno financeiro (Payback) do investimento realizado. Este trabalho visa a análise dos efeitos da geração solar fotovoltaica no fator de potência e na viabilidade financeira para as unidades consumidoras do grupo A, mais especificamente, na Universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Mossoró, verificando se a alteração no fator de potência implicaria em custos extras para a instituição e redução na qualidade de energia entregue pelo sistema de geração.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico apresenta aspectos relevantes das formas em que os consumidores de Grupo A são tarifados e quais parâmetros são observados, dando ênfase à disponibilização da memória de massa fornecido pela concessionária de energia.

### 2.1. Bandeiras Tarifárias

Desde o ano de 2015, as contas de energia são tarifadas de acordo com o sistema de Bandeiras Tarifárias. Esse sistema indica se haverá acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função das condições de geração de eletricidade [11]. Cada modalidade apresenta as seguintes características

- Bandeira verde: Geração de energia em condições favoráveis. Não há acréscimos na tarifa;
- Bandeira amarela: Geração de energia em condições menos favoráveis. Acréscimo de R\$ 0,01343 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos;
- Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. Acréscimo de R\$ 0,04169 para cada quilowatt-hora kWh consumido;
- Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. Acréscimo de R\$ 0,06243 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

### 2.2. Postos horários

Os postos tarifários permitem que os consumidores paguem por preços diferenciados ao longo do dia e da semana. Este período é classificado pela concessionária e está associado aos horários de maior consumo energético durante a semana [12].

- Horário de ponta: Corresponde ao intervalo de 3 horas diárias consecutivas definida pela concessionária considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, de segunda à sexta-feira.
- Horário Fora da Ponta: Corresponde às horas complementares ao horário de ponta e finais de semana.

### 2.3. Período Seco e Úmido

O período Úmido compreende o intervalo situado entre os meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte, período de maior precipitação pluviométrica. Já o período seco compreende entre os meses de maio a novembro de cada ano, período em que a disponibilidade de água fluente nos mananciais é mínima. Neste período o fornecimento de energia leva à necessidade de se construir grandes reservatórios para estocagem de água e, eventualmente, operar com usinas térmicas alimentadas por combustíveis derivados do petróleo, o que implica aumento de custos para a concessionária. Devido a estas características do comportamento da carga ao longo do dia e ao longo do ano, foi concebida uma estrutura tarifária denominada horo-sazonal [14].

### 2.4. Tarifação Grupo A

Grupo A é composto pelos consumidores atendidos com alta tensão de 2,3 kV a 230 kV. No grupo A são formados subgrupos classificados de acordo com o nível de tensão que são atendidos, mostrado na Tabela 1.

TABELA 1. Estrutura do grupo A.

Grupo A	
Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	igual ou superior a 230 kV
A2	de 88 a 138 kV;
A3	69 kV;
A4	2,3 a 25 kV;
A2	Sistema subterrâneo

Fonte: adaptado de [6].

Os consumidores do Grupo A tem tarifa binômica, isto é, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem [15]. Estes consumidores são enquadrados em uma das três alternativas tarifárias:

- Tarifação Convencional: São aplicadas às unidades consumidoras do grupo A e são caracterizadas por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia;

- Tarifação horo-sazonal azul: São aplicadas às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência.
- Tarifação horo-sazonal verde: Aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

### 2.5. Faturamento para o Grupo A

Para o suprimento de sua demanda energética, os usuários do Grupo A pré-estabelecem a potência necessária para um ciclo mensal, e cabe à distribuidora responsável em ceder a quantidade de potência de rede demandada pelo consumidor, por meio de contratos de demanda previamente adquiridos. Esses contratos com valores fixos estabelecidos e valores variáveis proporcionais à quantidade de energia elétrica efetivamente consumida.

O faturamento desses consumidores é composto de duas parcelas, na qual a primeira refere-se à demanda de potência, referente à demanda contratada previamente ou calculada através da demanda máxima aferida, como cobrança fixa. Já a segunda refere-se ao pagamento proporcional à quantidade de energia elétrica consumida [14].

### 2.6. Energia Ativa, Reativa e Fator de Potência

A energia ativa é a que se converte em trabalho e a energia reativa é a parcela que circula entre os campos elétricos e magnéticos [6]. A energia reativa está relacionada aos campos elétricos e magnéticos de equipamentos de corrente alternada [16]. De acordo com a Resolução 414, as instalações elétricas dos consumidores devem cumprir fator de potência mínimo de 0,92 (capacitivo ou indutivo) [6]. Um baixo fator de potência traz riscos e prejuízos à unidade consumidora, desde variações de tensão, condutores aquecidos, perdas de energia, reduções no aproveitamento da capacidade de transformadores e encarecimento da conta de energia. A correção desse fator é de suma importância para o consumidor de alta tensão.

A relação entre energia ativa e reativa consumidas em um sistema é o parâmetro denominada de Fator de Potência (FP), que pode ser calculado através da razão entre a potência ativa e a potência aparente, de acordo com a equação 1.

$$\text{Fator de potência} = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência Aparente}} \quad (1)$$

Assim, dentre as alterações causadas pela inserção de micro e minigeradores está a diminuição do FP no ponto de entrega. Isso acontece porque os sistemas fotovoltaicos são projetados para gerar energia ativa e injetar o excedente na rede. Logo, mesmo que as cargas continuem em regime normal de funcionamento, a parcela ativa demandada da concessionária é menor. Em contrapartida, a mesma quantidade de energia reativa continua sendo consumida da rede de distribuição. Por isso, como o cálculo do FP considera apenas as energias consumidas em determinado momento, o fator de potência no ponto de entrega está sujeito à cobranças devido ao descumprimento do valor mínimo exigido pela concessionária [17].

### 2.7. Geração fotovoltaica distribuída

A geração distribuída, especialmente a dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (Sistemas On-Grid), trouxeram novos desafios às concessionárias de distribuição de energia, devido ao acompanhamento e controle de faturamento das unidades consumidoras [8].

Os Sistemas On-Grid são compostos por módulos fotovoltaicos que produzem energia em corrente contínua e os inversores fotovoltaicos, que são responsáveis pela conversão da corrente contínua em corrente alternada. Essa conversão injeta potência ativa na rede, necessitando de um menor consumo de energia ativa da distribuidora [7].

### 2.8. Influências da geração fotovoltaica distribuída

Os sistemas fotovoltaicos produzem energia ativa e se houver saldo de geração acabam por injetá-los na rede elétrica da concessionária. Com a produção e autoconsumo simultâneo e a parcela ativa demandada da concessionária é menor, mas ainda é utilizado a mesma quantidade de energia reativa da rede de distribuição [19]. Essa injeção de potência das usinas de micro e minigeração fotovoltaica na rede elétrica ocasiona a diminuição do fator de potência no ponto de entrega [17]. Dessa forma, com um FP menor que 0,92 indutivo, cobranças sobre excedente reativo poderão ser observadas.

A presença de geradores de energia próximos aos centros de consumo é benéfica ao setor, pois diversificam as fontes empregadas para produção de energia, a economia com a expansão das linhas de

transmissão e distribuição e a melhoria do nível de tensão da rede em algumas horas do dia [10]. Porém, o aumento da GD trás dificuldades de faturamento das UCs e necessidade de adequação dos procedimentos das distribuidoras para controlar e proteger suas redes, já que a proximidade da fonte com a carga é a principal causa do aumento do nível de tensão nos barramentos [18].

### 2.9. Métodos de correção e adaptação

Para evitar tarifação sobre consumo e excedentes reativos, os consumidores de alta tensão devem estudar e implantar métodos para avaliação da situação energética demandada por sua instalação. Para isso, deve-se analisar a memória de massa da unidade consumidora para compensação do consumo reativo durante os horários de geração do sistema fotovoltaico. Nesse cenário, considera-se o ajuste dos inversores utilizados como também a necessidade de aplicação de bancos de capacitores [20].

### 2.10. Memória de Massa

A memória de massa é uma ferramenta de gestão energética das unidades consumidoras. Os medidores com memória de massa são capazes de armazenar dados mais precisos e específicos de consumo ativo e reativo de energia elétrica. Esses medidores também são capazes de mensurar a demanda e tensão, considerado o fluxo direto de energia e o fluxo inverso de energia, em intervalados programáveis [12]. Para ter acesso à esse documento, deve-se solicita-lo à concessionária, através de e-mail e pagamento de taxas referentes à esse serviço [13]. Estes arquivos de memória de massa, aliados às informações comerciais, podem prover uma análise individual dos parâmetros elétricos em uma unidade consumidora, como também os dados compostos do sistema de medição dos clientes.

## 3. METODOLOGIA

Neste tópico será discutida a metodologia utilizada para elaboração do trabalho, como a análise da memória de massa da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró (UFERSA Campus Mossoró), em um período de 32 dias, entre os dias 27 de setembro a 27 de outubro de 2019. E a composição das usinas fotovoltaicas atuais e no período estudado.

### 3.1 Usinas Fotovoltaicas UFERSA

A UFERSA Campus Mossoró dispõe atualmente de 12 usinas Fotovoltaicas, dispostas na Tabela 2. Totalizando uma potência instalada de 950,52 kWp.

TABELA 2. Composição das Usinas Fotovoltaicas da UFERSA Campus Mossoró.

USINA	POTÊNCIA [kWp]	DATA DE INSTALAÇÃO
Mossoró I	3,43	dez/2015
Mossoró II	150,80	nov/2016
Mossoró III	15,60	mar/2018
Mossoró IV	147,00	mar/2019
Mossoró V	92,83	ago/2020
Mossoró VI	92,83	ago/2020
Mossoró VII	95,18	ago/2020
Mossoró VIII	95,18	set/2020
Mossoró IX	95,18	set/2020
Mossoró X	92,83	ago/2020
Mossoró XI	92,83	set/2020
Mossoró XII	69,66	set/2020

Fonte: Adaptado [21]

Até o período compreendido entre setembro à outubro de 2019, a UFERSA Campus Mossoró era disposta apenas das usinas solares Mossoró I, Mossoró II, Mossoró III e Mossoró IV.

### 3.2 Software Elo 50

O software utilizado para análise da memória de massa utilizado foi produzido pela empresa Elo Sistemas Eletrônicos S.A. A empresa atua com a área de tecnologia da informação, e utiliza-se de equipamentos na coleta de dados para comercialização de energia elétrica, medição fiscal e combate à fraude. Aplicam-se também na

análise de rede, visando redução de perdas e ainda no gerenciamento de energia. Certificada pela norma ISO 9001:2008, a Elo também executa projetos especiais de medição, como painéis para Pontos de Suprimento e Intercâmbio, cogeração de energia elétrica, consumidores horo-sazonais ou outra aplicação similar.

### 3.3 Memória de Massa da UFERSA Campus Mossoró

O arquivo para análise da memória de massa é o LC 4713, do ano de 2019, sendo o último que foi solicitado e que está disponível. A análise será focada no fator de potência, com a influência da produção das usinas de energia fotovoltaica nos horários de seu funcionamento [22], que compreende os horários entre 6h às 18h como mostra a Figura 1.

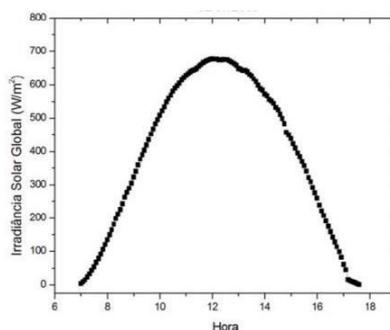


FIGURA 1. Irradiância solar global no Brasil. (ENERGÊS [22])

## 4. RESULTADOS

O presente artigo propõe uma análise em um período de 30 dias, compreendido entre 27 de setembro e 27 de outubro de 2019, através da leitura da memória de massa fornecida pela UFERSA Campus Mossoró neste período. Neste período a UFERSA contava apenas com as usinas fotovoltaicas UFERSA I, UFERSA II, UFERSA III e UFERSA IV, totalizando uma potência instalada de 316,83 kWp [21].

Para a análise é necessário frisar que o posto horário de ponta está compreendido entre as 17h30min às 20h30min. Outro fator importante de se destacar é que a temporada analisada compreendia o período seco do ano, sendo repassado aos clientes um aumento por kWh consumido. A Universidade Federal Rural do Semi-Árido é participante da tarifa horo-sazonal verde, que é caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

### 4.1 Análise Mensal de Demanda Energética

O período mensal observado compreendia uma sexta-feira como primeiro dia de análise, e um domingo como último dia. Percebe-se um comportamento padrão durante o decorrer dos dias da semana, sendo os finais de semana e feriados com uma baixa demanda energética. Também é notório um comportamento padrão durante a semana letiva, mostrado na Figura 2.

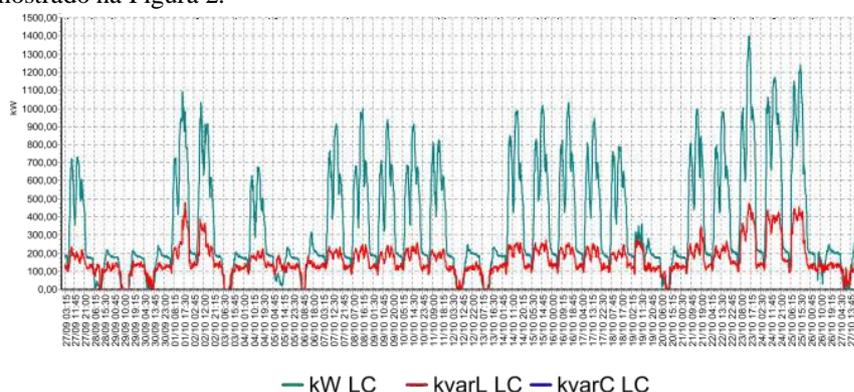


FIGURA 2. Demanda energética UFERSA entre 27 setembro a 27 outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

A demanda de potência ativa (em kW) está representada pelo gráfico de maior amplitude, já a demanda

de potência reativa indutiva (em kVAr) está representada pelo gráfico logo abaixo. Não foi possível observar a presença de potência reativa capacitiva neste período.

#### 4.2 Análise Mensal do Fator de Potência

Para o mesmo período foi observado o comportamento do fator de potência da UFERSA, em uma escala de 0 a 100, sendo os valores representados a partir de agora em casas decimais de 0,0 (para valores próximos a 0) a 1,00 (para valores próximos a 100). Percebe-se um comportamento padrão durante o decorrer dos dias da semana, em que na maior parte do período observado nota-se o FP oscilando entre 0,70 a 0,95. Também há momentos em que o FP está unitário (FP = 1,0) e zerado que serão explicados nos próximos tópicos. A Figura 3 representa a leitura do fator de potência da UFERSA no período entre 27 setembro a 27 de outubro de 2019.

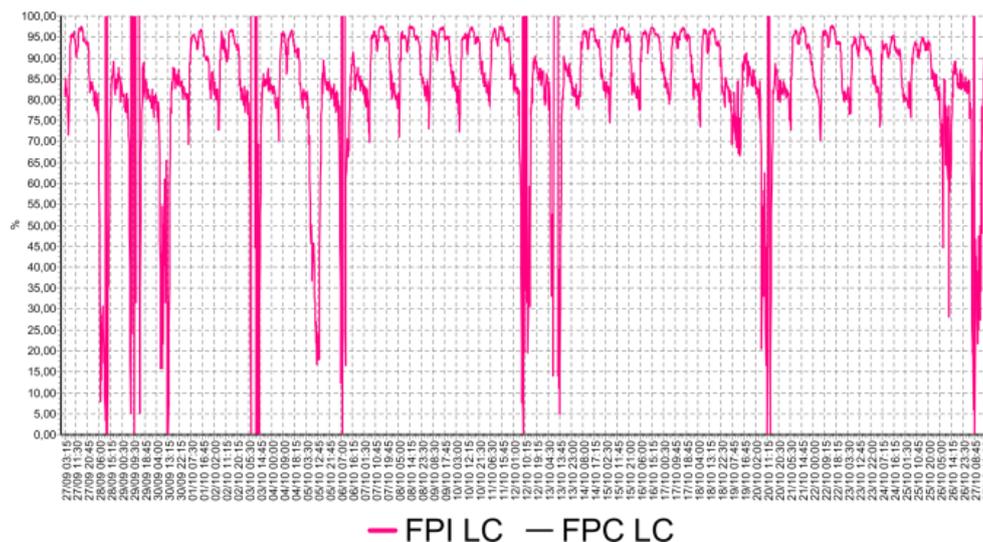


FIGURA 3. Fator de Potência UFERSA entre 27 setembro a 27 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

ELO50 - [Medidor: 15047130 Leitura: Recuperação 47130@DC.RQA]

Arquivo Janela Ajuda

Parâmetros | Faltas De Energia | Registro De Alterações | Memória De Massa | Registradores | Me

Listagem Resumo Gráfico

Energia Ativa	Energia Reativa Indutiva	Energia Reativa Capacitiva	Tarifa De Reativos	Fator Potência
Condição		Valores	Data e Hora	
Médio Geral LC		91,38L		
Médio Ponta LC		93,29L		
Médio Fora Ponta LC		91,03L		
Máximo LC		100,00	28/09/2019	11:45:00
Mínimo LC		00,00L	28/09/2019	12:00:00
Médio Geral Indutivo LC		82,89		
Médio Geral Capacitivo LC		--/--		
Médio Geral Indutivo+Capacitivo LC		82,89		
Médio Ponta Indutivo LC		92,62		
Médio Ponta Capacitivo LC		--/--		
Médio Ponta Indutivo+Capacitivo LC		92,62		
Médio Fora Ponta Indutivo LC		81,97		
Médio Fora Ponta Capacitivo LC		--/--		
Médio Fora Ponta Indutivo+Capacitivo LC		81,97		
Máximo Indutivo LC		100,00	28/09/2019	11:45:00
Máximo Capacitivo LC		--/--		
Mínimo Indutivo LC		00,00L	28/09/2019	12:00:00
Mínimo Capacitivo LC		--/--		

FIGURA 4. Resumo do Fator de Potência (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

O estudo da memória de massa também nos forneceu um resumo da situação em que se encontra o FP no período observado. Para este período o FP geral médio aferido foi de 0,9138 (91,38%), demonstrando que está muito próximo do FP mínimo exigido pela concessionária [6]. Contudo, é observado que a média geral indutiva do FP está abaixo de 0,92, e que também não há presença de FP capacitivo em nenhum momento desde período. Os dados estão resumidos na Figura 4. Para ilustrar a análise do fator de potência, alguns dias são escolhidos aleatoriamente como domingo, quarta e sexta.

#### 4.3. Análise do FP nos Domingos

Para melhor análise do comportamento do FP no período observado foi extraído a leitura dos domingos dia 29 de setembro, 6, 13 e 20 de outubro, representados pelas Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

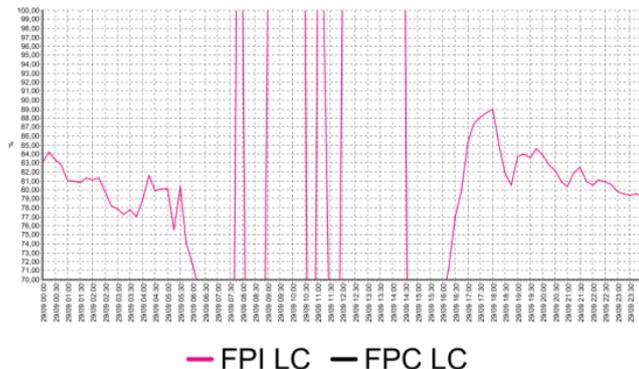


FIGURA 5. Fator de Potência 29 de setembro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

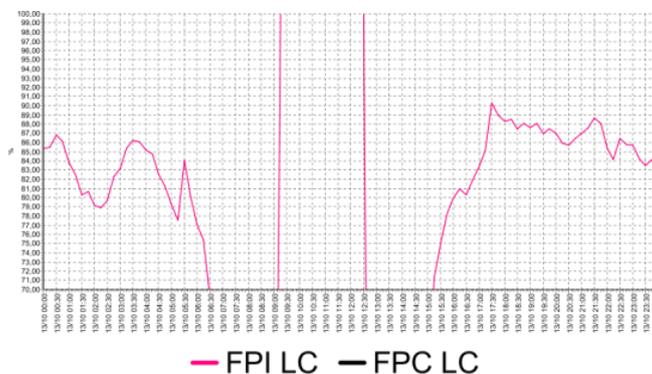


FIGURA 6. Fator de Potência de 6 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

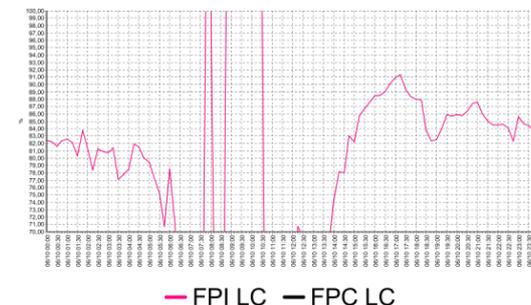


FIGURA 7. Fator de Potência de 13 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

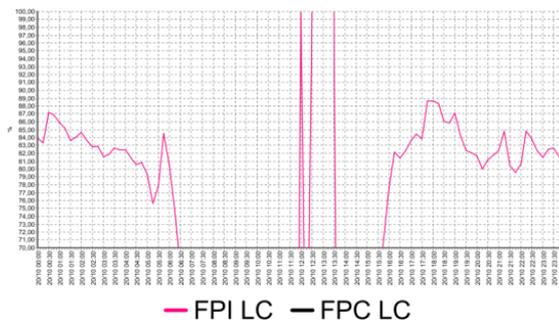


FIGURA 8. Fator de Potência de 20 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

Para os dias de domingo se observa um comportamento padrão, já que praticamente todos os processos produtivos, de serviços e ensino são dispensados na universidade. Porém alguns serviços de irrigação e de abastecimento de água são operados, utilizando-se de motores e bombas diversas no campus. Como referência observaremos o dia 13 de outubro. Nota-se que o FP varia entre o intervalo de 0,85 a 0,75, entre as 22 horas da noite às 6 horas da manhã do dia seguinte horários de demanda mínima na Universidade. Com isso a universidade é passível de cobrança referentes a multa, pelo descumprimento do fator de potência mínimo de 0,92 [6]. Esse fator é observado durante todas as noites do período analisado, sendo necessário o implante de bancos de capacitores para compensar a potência reativa indutiva do sistema elétrico nesse horário.

No amanhecer as usinas fotovoltaicas entram em operação e no período das 6 horas às 9 horas observa-se um decréscimo do FP para valores próximos de zero. Isso ocorre, devido a potência ativa produzida instantaneamente nas usinas ser superior à demanda do campus neste horário, sendo praticamente zerada a necessidade de potência ativa da rede. Contudo a energia reativa continua sendo demandada da concessionária [6], possivelmente pela necessidade de uso de bombas e motores em algumas atividades essenciais do campus, ocasionando uma baixa significativa do FP.

A partir das 9 horas ao meio dia o FP se mantém unitário devido a configuração dos inversores fotovoltaicos, que são programados para operar com FP constante e unitário, injetando apenas potência ativa no sistema, para que as chaves de comutação operem com eficiência máxima [23]. Neste período é quase nula a utilização de motores e bombas no campus, deixando de ser demandado a potência reativa da rede, elevando o FP ao valor unitário. Quando há necessidade de utilização de maquinários reativos à rede ou interferências na geração devido à sombreamentos ou atuações dos dispositivos de proteção pode haver variações no FP. Isso foi possível de ser notado pela observação nos demais domingos analisados.

O período da tarde é observado um crescimento vagaroso entre as 13h30min às 17h30min, período que a geração fotovoltaica é encerrada. A partir do anoitecer até o amanhecer o FP pouco varia e oscila novamente entre 0,75 a 0,85.

#### 4.4 Análise do FP às Quartas-feiras

Para melhor análise do comportamento do FP no período observado foi extraído a leitura das quartas-feiras dos dias 2, 9, 16 e 23 de outubro, representados pelas Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12, respectivamente.

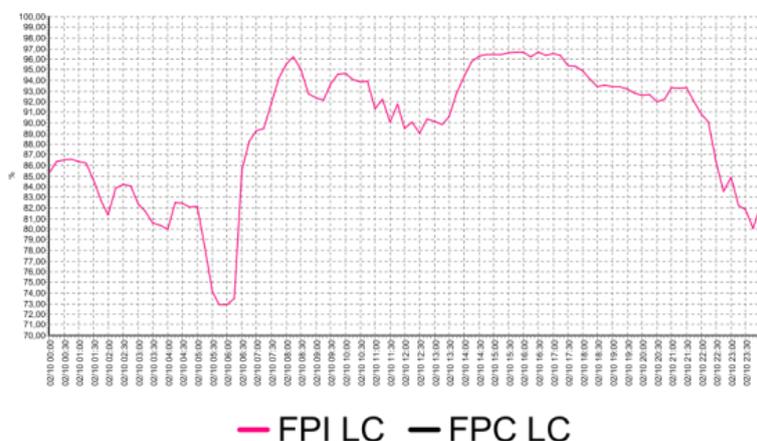


FIGURA 9. Fator de Potência de 2 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

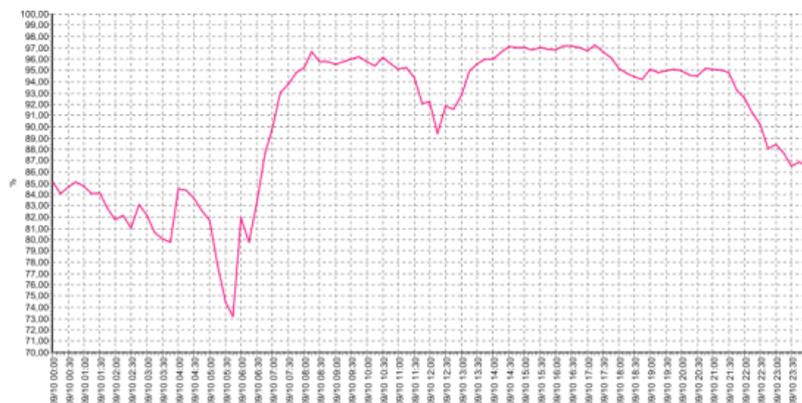


FIGURA 10. Fator de Potência de 9 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

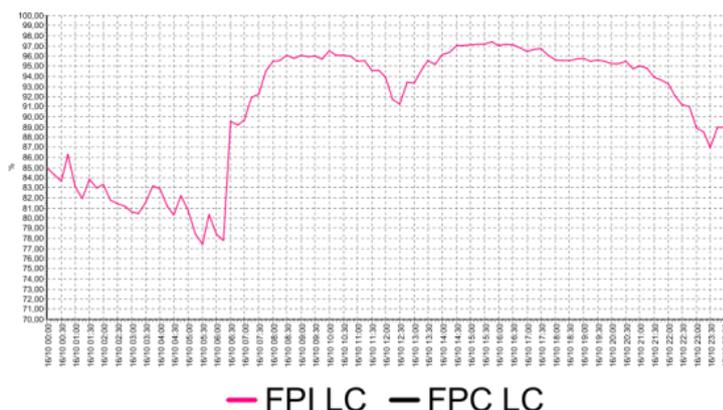


FIGURA 11. Fator de Potência de 16 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

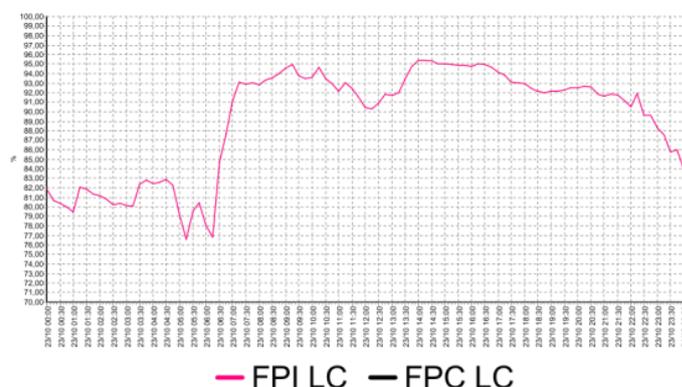


FIGURA 12. Fator de Potência de 23 de outubro de 2019 (Leitura da Memória de Massa [Arquivo LC 4713])

Para as quartas-feiras observa-se um comportamento padrão, já os horários de aulas e funcionamento são praticamente idênticos no período matutino, vespertino e noturno. Durante a madrugada o FP varia entre 0,75 a 0,85, como nos demais dias. Porém como está sendo analisado um dia letivo da semana, a demanda necessária de potência ativa é bem maior que nos fins de semana e feriados. A partir das 6 horas da manhã observa-se um aumento do FP e por volta das 7h30min o fator de potência já supera o valor de 0,92. É nesse período que os blocos laboratoriais, as salas de aula, os centros de vivência e os demais prédios administrativos iniciam suas atividades.

Deste modo, a produção energética das usinas fotovoltaicas da UFERSA não consegue suprir a demanda do campus, requerendo uma quantidade significativa de potência ativa e reativa da concessionária, mantendo o fator de potência acima de 0,92. A demanda energética do campus permanece durante todo o dia, mantendo-se acima de 0,92 até as 22h30min, onde volta a permanecer entre 0,75 a 0,85, como em todos os outros dias.

#### 4.5 Análise do FP na Sextas-feiras

Para melhor análise do comportamento do FP no período observado foi extraído a leitura das sextas-feiras dias 4, 11, 18 e 25 de outubro. As curvas de potência ativa, reativa e de fator de potência durante a semana praticamente são iguais, porém é perceptível que nas sextas-feiras a demanda energética é menor se comparado aos demais dias da semana.

#### 4.6 Fatores de Correção de Fator de Potência

Para uma instalação elétrica, principalmente de consumidores de alta tensão (Grupo A) é indicado a utilização de bancos de capacitores para correção de baixo fator de potência. Essa medida poderá ser utilizada em conjunto com as usinas fotovoltaicas para garantir uma melhor regulação da tensão nos barramentos e uma redução da potência reativa que circula nas linhas de transmissão e distribuição.

Do período da leitura da memória de massa, em setembro de 2019, até a data de escrita deste artigo, abril de 2021, as usinas fotovoltaicas da UFERSA triplicaram a potência total instalada, passando de 316,83 kWp para 950, 52 kWp, ficando para um trabalho futuro um novo estudo sobre a influência dessas usinas no fator de

potência aferida no medidor do campus.

## 5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, é possível concluir que para um melhor gerenciamento energético de uma unidade consumidora (UC) deve-se monitorar o fator de potência e outros parâmetros de qualidade de energia. Nesse estudo de caso, percebeu-se que o fator de potência está diretamente relacionado com a demanda energética ativa e reativa da UC observada, principalmente nos horários de maior produção energética das usinas fotovoltaicas, como também nos horários de maior demanda reativa da unidade consumidora.

Com a produção proveniente das usinas solares do campus estudado e sua injeção de energia ativa na rede elétrica da concessionária observa-se uma menor necessidade desse tipo de energia da rede durante os horários de produção, porém ainda será necessário o consumo da energia reativa da rede quando, ocorre a diminuição assim do fator de potência deste consumidor. Para os consumidores de alta tensão (grupo A) essa desarmonia causa prejuízos financeiros não observados para os consumidores de baixa tensão, pois estes são participantes da tarifa binômia, e são passíveis de cobrança por descumprimento do fator de potência mínimo de 0,92.

Outro fator importante está relacionado ao crescimento das usinas fotovoltaicas da UFERSA. No período da memória de massa fornecida o campus contava com apenas 4 usinas e uma potência total instalada de 316,83 kWp contra 950, 52 kWp instalado. A presença de usinas fotovoltaicas próximas aos centros de consumo é benéfica ao setor, pois, diversificam as fontes empregadas para produção de energia, propiciam a economia com a expansão das linhas de transmissão e distribuição e a melhoria do nível de tensão da rede em algumas horas do dia.

Em contrapartida o aumento da GD traz novas dificuldades em relação ao faturamento das UCs e adequação dos procedimentos das distribuidoras para controlar e proteger suas redes, já que a proximidade da fonte com a carga é a principal causa do aumento do nível de tensão nos barramentos.

Durante da análise de leitura e análise da memória de massa no medidor do campus Mossoró foi concluída a necessidade de compensar reativos. Os valores médios aferidos na Figura 4 e os gráficos de fator de potência apontam que esta grandeza medida estava abaixo do FP mínimo exigido pela concessionária, durante a madrugada inclusive. Como indicação de trabalhos futuros tem-se a análise do comportamento do fator de potência do campus com o pleno funcionamento de todas as 12 usinas do campus, assim como a análise da influência em dois períodos: da pandemia e pós-pandemia.

## REFERÊNCIAS

- [1] Resenha Mensal. O Consumo de Energia Elétrica no Brasil em Setembro de 2020 TOTALIZOU 40.227 GWH. <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-o-consumo-de-energia-eletrica-no-brasil-em-setembro-de-2020-totalizou-40-227-gwh>>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- [2] ABSOLAR. Procura por Energia Solar Cresce 45% Durante Pandemia de COVID-19. <<https://www.absolar.org.br/noticia/procura-por-energia-solar-cresce-45-durante-pandemia-de-covid-19>>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- [3] MME. Balanço Energético Nacional. 2020: ANO BASE 2019. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2020.
- [4] ABSOLAR. Geração Distribuída Fotovoltaica Cresce 230% ao Ano no Brasil. <<https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-fotovoltaica-cresce-230-ao-ano-no-brasil>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- [5] ANEEL. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abr. de 2012.
- [6] ANEEL. Resolução Normativa N° 414, de 9 de setembro de 2010.
- [7] BENEDITO, Ricardo da Silva. Análise de um Mecanismo de Compensação de Reativos Incorporado aos Inversores de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica. 131 p. Tese de Pós-graduação (Doutorado) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade de São Paulo, 2014.
- [8] VIEIRA, Cintia Vilain Viera. Análise dos Efeitos de um Sistema Fotovoltaico de Geração Distribuída no Fator de Potência de um Campus Universitário. 22 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, 2019.
- [9] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. MÓDULO 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição: Seção 3.7 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída. 2017 Brasília.
- [10] ANEEL. Cadernos Temáticos ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída. 2016.
- [11] ANEEL. Bandeiras Tarifárias. 2015.
- [12] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 5 – Sistemas de Medição. 2016.

- [13] SILVEIRA, Clodoaldo; RIBEIRO, Marcelo; GIRARDI, Eduardo. Sistema de Análise de Medição – Sistematização de uma Ferramenta de Proteção à Receita em Grandes Clientes na AES SUL. 16 p. XIX. SENDI, São Paulo, 2010.
- [14] MME. Energia Elétrica: Conceito, Qualidade e Tarifação. 130 p. Ministério de Minas e Energia, 2009.
- [15] MME. Programa Nacional De Conservação de Energia Elétrica. Manual de Tarifação da Energia Elétrica. 1ª Edição-MAIO/2001
- [16] FREITAS, Mateus Gouveia de. Custo/Benefício e Implantação de Sistema Fotovoltaico. Artigo científico. 15p, 2016.
- [17] GUSMAN, L.S.; PEREIRA, H.A.; CUPERTINO, A.F.; ANTÔNIO, A.S. Análise dos Efeitos da Utilização de um Sistema Fotovoltaico no Fator de Potência de uma Empresa Agroindustrial. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.
- [18] GONÇALVES, Rodrigo; BALLERINI, Bruna F; FREITAS, Edson L. Influência da Geração Distribuída em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. In: Brazilian Technology Symposium, Poços de Caldas - MG. 2016.
- [19] PINTO, A; ZILLES, R; BET, I. Excedente de Reativos em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. In: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, 2012, São Paulo.
- [20] TAVEIRA, Isabela Maciel. A Influência da Geração Fotovoltaica no Fator de Potência de Unidades Prosumidoras: Uma Avaliação Técnica e Financeira. 83p. Fortaleza/CE. 2019.
- [21] UFERSA. As Usinas Solares. <<https://usinasolar.ufersa.edu.br>>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- [22] ENERGÊS. 10 Mitos sobre a Energia Solar. <<https://energes.com.br/fale-energes/10-mitos-sobre-a-energia-solar/>>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- [23] ELSEROUGI Ahmed Abbas; ABDEL-KHALIK, Ayman Samy; MASSOUD, Ahmed M; AHMED, Shelab. A Simple Active-Power Control Technique for Grid-Connected Three-Phase Inverters at Unity Power Factor. in Power Engineering, Energy and Electrical Drives (Powereng), 2013 Fourth International Conference on, pp. 265-270. May 2013.



Artigo

# Árvore solar fotovoltaica: uma proposta técnica para implantação em ambientes públicos na cidade de Mossoró - RN

Daniel C. C. Crisóstomo <sup>[1]</sup>, Isaac B. T. Silva <sup>[2]</sup>, Rafael M. Vieira <sup>[3]</sup>, Adriano A. F. Moura <sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; daniel.crisostomo@ufersa.edu.br

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; isaac.barros@ufersa.edu.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; rafael.vieira@alunos.ufersa.edu.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

*Recebido:* 14/09/2022;

*Aceito:* 21/12/2022;

*Publicado:* 23/12/2022.

*Resumo:* A energia solar fotovoltaica tem sido nos últimos anos, protagonista nos números de crescimento relativo em termos de geração de energia elétrica conectada à rede. No Brasil, seguindo esta tendência, já apresenta números relevantes de inserção desta forma de energia na sua matriz, cumprindo com seu objetivo de diversificá-la. A popularização da energia solar fotovoltaica tem ocorrido na forma de incentivos fiscais governamentais que objetivam a aquisição de micro usinas geradoras para grandes e pequenas empresas, além de pessoas físicas. Este trabalho objetiva apresentar um projeto que torne acessível o uso e o conhecimento da energia solar fotovoltaica, através de uma abordagem elétrica-arquitetônica na forma de uma árvore solar, localizada em ambiente público na cidade de Mossoró/RN.

*Palavras-chave:* Energia solar, Árvore solar, tecnologia

*Abstract:* In recent years, photovoltaic solar energy has been the protagonist in the numbers of growth in terms of electricity generation connected to the grid. In Brazil, following this trend, it already considers it important to insert this form of energy in its matrix, fulfilling its objective of diversifying it. The popularization of photovoltaic solar energy has occurred in the form of government tax incentives aimed at the acquisition of micro generating plants for large and small companies, as well as individuals. This work aims to present a project that makes the use and knowledge of photovoltaic solar energy accessible, through an electrical-architectural approach in the form of a solar tree, located in a public environment in the city of Mossoró / RN.

*Key-words:* Solar power, Solar tree, technology.

## 1. INTRODUÇÃO

Em tempos atuais e de forma cada vez mais contundente, finalmente, é possível referir-se à energia solar fotovoltaica como uma alternativa energética para o suprir o também crescente consumo de energia elétrica no Brasil. O Sol é caracterizado como a fundamental fonte de energia para a Terra, além do que, a radiação solar traduz-se numa infinita fonte energética, existindo assim um gigantesco potencial para seu aproveitamento através de conversão e retenção de energia, como a elétrica [1]. Dito isto, a energia solar fotovoltaica é a energia conseguida a partir da conversão direta da luz do sol em eletricidade, conhecido como o efeito fotovoltaico, onde a célula fotovoltaica é um aparato produzido com material semicondutor, que é a unidade essencial desse método de conversão [2].

O Brasil é detentor de um território que abriga altos índices de irradiação solar, principalmente quando comparado com países localizados no continente europeu, onde a tecnologia fotovoltaica é difundida para a geração de energia elétrica. No ano de 2017 o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE publicou o Atlas Brasileiro de Energia Solar que dispõe os dados, em termos de valores, médios anuais da irradiação solar no Brasil (Figura 1).

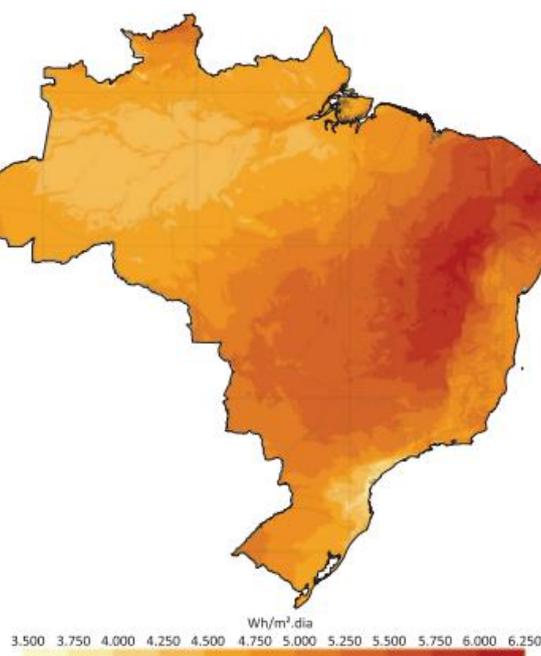


FIGURA 1: Total diário de irradiação no plano inclinado na latitude – média anual [3].

A partir desse estudo, fica evidente que a região Nordeste é a que detém as melhores características, exibindo assim, o maior nível de irradiação no plano inclinado média anual de 5,52 kWh/m<sup>2</sup>.dia) e uma das menores taxas de variabilidade interanual durante o ano, na qual, irradiação no plano inclinado se trata da taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra [3]. Dessa maneira, pode-se entender que as cidades próximas a linha do Equador têm vantagem no aproveitamento deste tipo de energia. Mossoró, localizada no Rio Grande do Norte, têm essas características que a põem como um importante expoente no potencial de uso de placas fotovoltaicas para geração de energia elétrica.

Entendendo os raios solares como ondas eletromagnéticas paralelas que chegam à Terra (modelo aproximado), ressalta-se a importância da localização de um determinado local no aproveitamento desse recurso, como ilustrado na Figura 2:

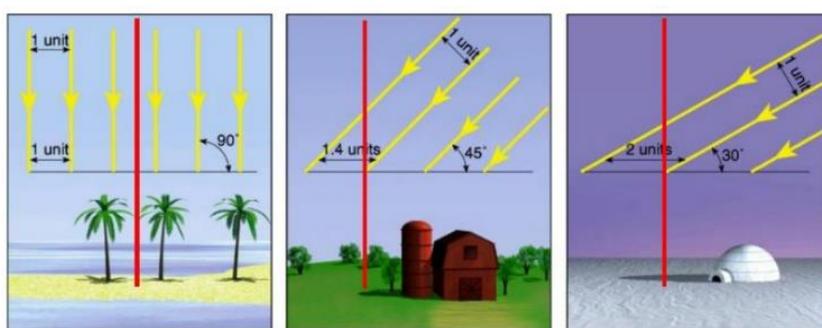


FIGURA 2. Irradiação x latitude [4].

Nestes termos, têm-se o Brasil como um país muito bem localizado em termos de absorção de irradiação solar (como foi dito anteriormente), fazendo referência clara ao maior fotoperíodo possível, pois a disponibilidade do recurso solar está intrinsecamente relacionada à conceitos astronômicos, como a posição relativa entre o Sol e uma dada localidade na Terra. Duração dos dias (fotoperíodo) e quantidade de energia incidente em um local são variantes dessa situação.

De maneira geral, ou seja, levando em conta a geração centralizada e a distribuída, em 2021 a região Nordeste do Brasil liderava com aproximadamente 38% da capacidade instalada fotovoltaica, proveniente do predomínio de projetos centralizados nesta região. E mais especificamente, dentro desses 38% que representam

a capacidade instalada fotovoltaica, o estado do Rio Grande do Norte ocupava uma parcela de aproximadamente 2,6% desse total. Atualmente esse cenário não deve ter sido alterado, em relação a liderança da região nordeste por conta dos constantes investimentos na região e do acesso facilitado a esse tipo de geração de energia em 2022, além da continua expansão desse ramo no mercado mundial.

A Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN), empresa distribuidora que atende a cidade de Mossoró, possui hoje 29276 unidades consumidoras que tem usinas de microgeração gerando energia de forma distribuída, em um total de 291.797,50 kW [5]. Sob perspectiva de popularizar o uso desta forma de geração de energia através do lúdico, eficiente, tecnológico e sustentável, este trabalho objetiva apresentar uma proposta de projeto de árvore solar a ser implantada em espaços públicos na cidade de Mossoró.

## 2. ÁRVORE SOLAR: UMA ALTERNATIVA EFICIENTE E ARQUITETÔNICA

De certa maneira, a tecnologia fotovoltaica exibe uma certa carência no quesito estético, pois é basicamente limitado a cor preta ou azul do modulo fotovoltaico; além disso, necessita de uma área considerável e que seja plana para realizar a instalação do sistema solar [6]. Em virtude disso, as árvores solares desenvolvem um processo que combina de forma integrada, o esforço técnico e tecnologia moderna, para conceber uma forma avançada de gerar eletricidade a partir da energia solar, contribuindo também no conforto humano, pois a sombra produzida tem um impacto considerável na bem-estar térmico das pessoas ao redor [7]. O fato da conversão direta da luz do Sol produzir eletricidade, além da geração de energia limpa e facilidade no uso, as árvores solares são formalmente reconhecidas como uma fonte extremamente viável de energia [8][9]. Ao comparar o sistema em questão, com o sistema solar fotovoltaico plano, fica evidente que as estruturas que compõem as árvores solares utilizam cerca de 1% da superfície e elevam a eficiência de 10% a 15%, além de fornecer um design único com alturas variáveis [10][11]. Os sistemas de árvores solares, podem ser considerados singulares, pois são elaborados para auxiliar diversas pessoas em diferentes ambientes urbanos e também naturais, podendo gerar mais de 10% de energia elétrica quando comparado com um sistema fotovoltaico plano, ou seja, tradicional [12][13].

Neste trabalho, entende-se como árvore solar, o conjunto de equipamentos, de forma fixa, que compõem de forma instalada em estrutura metálica, placas fotovoltaicas que captarão energia e disponibilização ainda nessa estrutura, pontos de energia. Tudo, com objetivo de ter layout de árvore. [14] diz que o conceito de que árvores solares são capazes de endereçar resolver os problemas a ela desafiados de forma efetiva e com elegância. [15] incrementa como uma árvore artificial geradora de energia elétrica através do Sol, que tem performance similar aos sistemas convencionais. Ou seja, exibe em sua composição uma mistura de tecnologia moderna e arte para agregar estética as cidades, abordando um cunho tecnológico ecologicamente correto.

A utilização de árvores solares no mundo, para a geração de energia não é novidade. A Figura 3 ilustra dois casos, o primeiro no Ceará, e o segundo, no Rio Grande do Sul.



FIGURA 3: Árvores solares (a) Ceará (b) Rio Grande do Sul [16].

Podem ser consideradas vantagens do uso da árvore solar [16]:

- Economia de espaço para a geração de energia, sendo possível a instalação de geradores fotovoltaicos em locais que não seria aplicável painéis convencionais. Pode servir como ponto de encontro comunitário com pontos de internet sem fio, carregador de dispositivos móveis e colocação de painéis digitais.

- Ganhos arquitetônicos e ecológicos ao projeto, servindo como um importante objeto para a educação e incentivo da comunidade acerca da geração de energia solar fotovoltaica.

Em contraponto, pode-se citar como desvantagens [16]:

- Custo pode ser mais elevado devido ao uso de materiais como aço ou ferro para a fabricação e modelagem do tronco que sustentará os painéis;
- Eventuais danos à aves e insetos e também para a visão humana, devido ao reflexo provocado pelas placas;
- Dependendo do modelo, podem haver perdas significativas de eficiência devido ao efeito de sombreamento e diferentes orientações dos módulos.

Usar protótipos de árvore solar na idéia de compor paisagem de ambientes públicos surge como uma alternativa onde há benefícios sob diversos pontos de vista. Em particular, a proposta de inserção de um modelo da árvore em praças públicas em Mossoró é salutar, se considerar um importante documento que norteia as diretrizes de desenvolvimento da cidade: o Plano Diretor do município de Mossoró/RN. Instituído pela lei complementar N° 012/2006, o documento atende o artigo 182 da Constituição Federal, do Capítulo III da Lei Federal n° 10.257, de 10 de julho de 2001 – Estatuto da Cidade – e do art. 56, inciso IX da Lei Orgânica do Município de Mossoró. Este, é o instrumento básico da política de expansão urbana e desenvolvimento social, econômico e ambiental, determinante para os agentes públicos e privados que atuam no Município [17].

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta sessão abordará toda a metodologia presente no objetivo de realizar o projeto de árvore solar a ser alocado em espaço público na cidade de Mossoró – RN. Do ponto de vista técnico, serão respeitados os critérios<sup>1</sup>:

- Altura mínima de 3 metros da base até os módulos
- On-grid
- Potência de 2,5 a 3,3 kWp;
- Indicação de parâmetros para redução de perdas;
- Chamar atenção da comunidade local sobre a utilização de fontes de energia limpa.
- Selo procel nos equipamentos;
- Certificação IEC 61730;
- Certificação IEC 61215;

Para isso, serão respeitadas e referenciadas as seguintes normas:

- DIS-NOR-031 – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição – REV 01 [18].
- ABNT -NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão [19].
- ABNT -NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas [20];
- NBR 16690 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos [21].
- Serão utilizados dois softwares em especial para o desenvolvimento do projeto, em duas frentes:
- Solarius PV - desenvolvido pela ACCA softwares.
- Sketchup – desenvolvido pela Trimble.

Dito isto, em considerando a cidade de Mossoró como de boa localização no que se refere à incidência de

---

<sup>1</sup> Os critérios utilizados para a proposta da árvore seguem argumentos técnicos e arquitetônicos: o primeiro, limitando a potência ao uso destinado a carregadores de celular e iluminação; e o segundo, considerando harmonização com o ambiente e custo benefício de materiais estruturais.

raios solares a serem aproveitados como energia, além de pólo de desenvolvimento, são destacados, do Plano Diretor, os seguintes trechos que subsidiam a argumentação pró investimento na instauração de árvores solares nos ambientes públicos [17]:

- Art. 4º. VIII – princípio da sustentabilidade ambiental
- Art. 4º. VIII – princípio da identidade arquitetônica, histórica, cultural e natural.
- Art. 10º - Sustentabilidade urbana é o desenvolvimento local socialmente justo, ambientalmente equilibrado e economicamente viável, visando garantir qualidade de vida para as presentes e futuras gerações.
- Art. 14º - IV – desenvolver programas de trabalho, por meio de ações coordenadas entre o poder público e a iniciativa privada, inclusive com estímulo ao desenvolvimento científico e tecnológico.
- Art. 15º - III – estimular a manutenção e ampliação das atividades industriais e de outras a elas associadas;
- Art. 15º - III – atrair novos setores produtivos para o Município

#### 4.1. Dimensionamento

O sistema de geração fotovoltaico será conectado à rede de distribuição de eletricidade, e contém os seguintes dados de localização [22]:

TABELA 1. Dados de localização.

<i>Dados de localização</i>	
Localidade:	Mossoró
Latitude:	5° 11' 17''
Longitude:	37° 20' 39''
Altitude:	20 m

Média de radiação solar diária por mês no plano horizontal (kWh/m<sup>2</sup>)

TABELA 2. Média de radiação [23]

Janeiro	5,79
Fevereiro	5,90
Março	6,07
Abril	5,68
Maio	5,29
Junho	4,90
Julho	5,24
Agosto	5,75
Setembro	6,02
Outubro	6,02
Novembro	6,05
Dezembro	5,71

Portanto, os valores de radiação solar anual no plano horizontal são 2 073.23 kWh/m<sup>2</sup>.

Em termos de dimensionamento, a quantidade de energia produzível é calculada com base nos dados radiométricos, conforme a fonte ATLAS BRASILEIRO, o Atlas Solarmétrico do Brasil – 2017 e o *SUNDATA*, e utilizando os métodos de cálculo descritos nas normas. As instalações atenderão às seguintes condições (a serem executadas para cada "gerador solar", entendida como um conjunto de módulos fotovoltaicos com o mesmo ângulo e a mesma orientação): na fase inicial do sistema fotovoltaico, a relação entre a energia ou a

potência produzida em corrente alternada e a energia ou a potência produzível em corrente alternada (determinada em função da radiação solar incidente sobre o plano de um dos módulos, da potência nominal do sistema e a temperatura de funcionamento dos módulos) é, pelo menos, maior do que 0,78, no caso de utilização de conversores de potência até 20 kW, e 0,8 no caso de utilização de inversores de maior potência, em relação às condições de medição e métodos de cálculo descritos no Guia EN 60904-2. Não são admitidos conjuntos de módulos em paralelos não perfeitamente idênticos uns aos outros para exposição e / ou da marca, e / ou o modelo e / ou o número e módulos utilizados; cada módulo será equipado com díodos de *by-pass*.

O sistema, identificado como "Árvore Solar", é um tipo de sistema ligado à rede e está ligado à rede principal com uma conexão de tipo monofásica em baixa tensão". Sua potência nominal é de 2.970 kW e uma produção anual de energia de 4 630.44 kWh (igual a 1 559.07 kWh/kW), resultante de 9 módulos, com uma superfície de 17.54 m<sup>2</sup>, e consiste em 1 gerador. A estimativa de geração é mostrada na Figura 4:

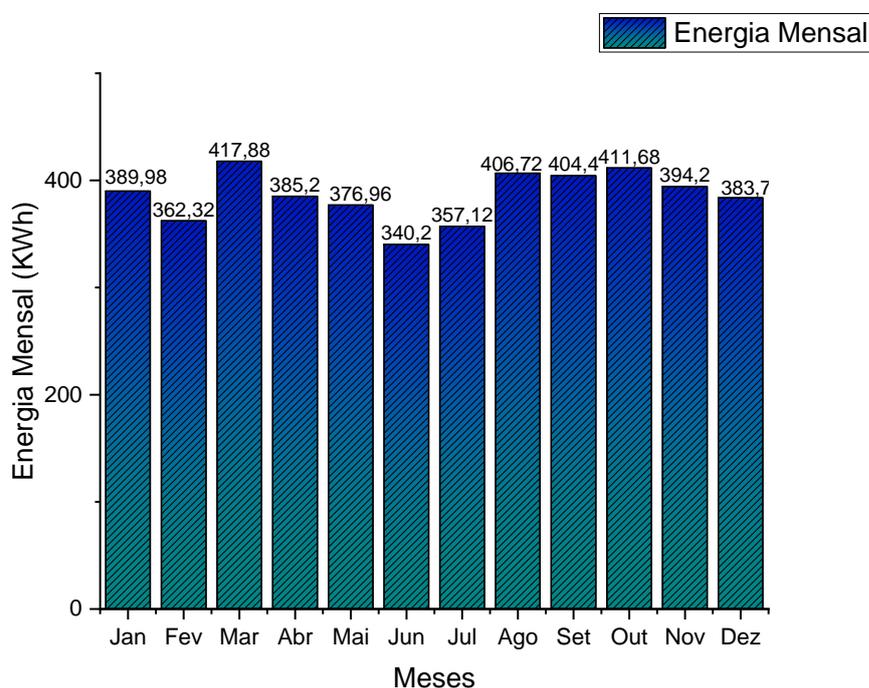
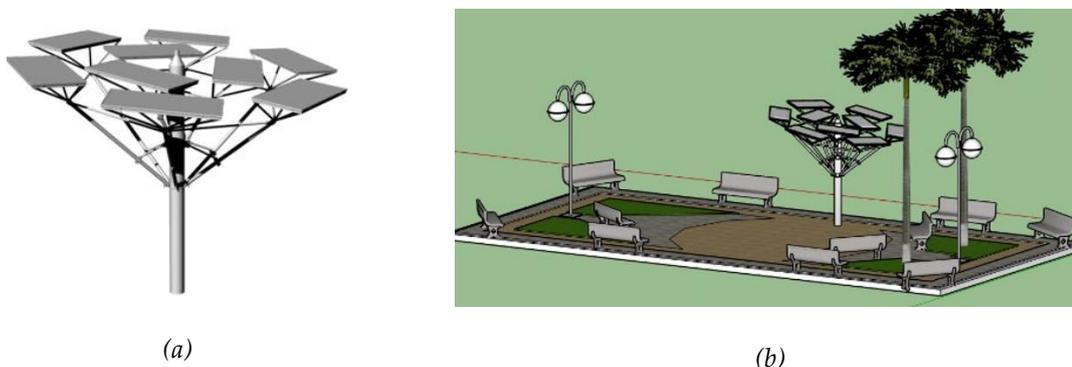


FIGURA 4: Energia gerada mensal (Autoria própria).

#### 4.2. Desenho da usina

O desenho da Usina é mostrado na Figura 5:





(c)

FIGURA 5: Layout da árvore solar proposta (Autoria própria).

As especificações do sistema são apresentadas na Tabela 3:

TABELA 3. Especificação do sistema [24] [25]

Superfície total utilizada	17,52 m <sup>2</sup>
Potência total	2,97 kW
Módulo	BYD 330PHK-36
Número total de módulos	9
Inversor	CANADIAN CSI-3K-TL
Número Total	1
Tipo de fase	Monofásico

O diagrama de blocos é apresentado na Figura 6:

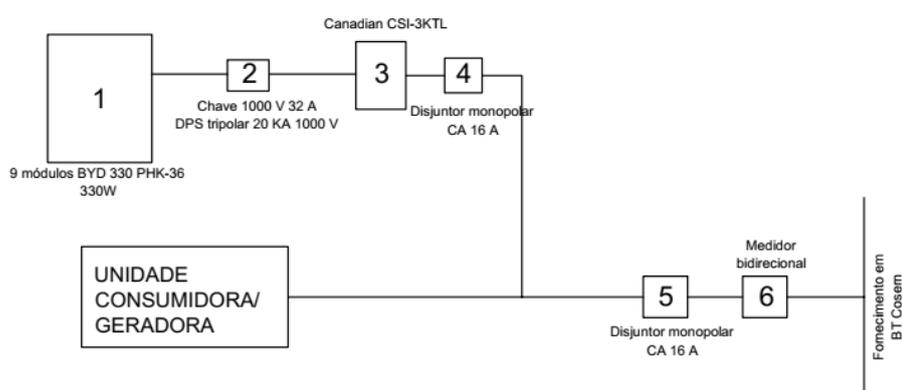


FIGURA 6: Diagrama unifilar (Autoria própria).

É previsto o isolamento galvânico entre a corrente contínua do sistema fotovoltaico e a rede. Soluções técnicas diversas podem ser utilizadas e são aceitáveis desde que respeitem as normas vigentes e de boas práticas. O sistema fotovoltaico será atendido por um sistema IT, sem o polo aterrado. Os conjuntos dos módulos serão apresentados pelo número de módulos fotovoltaicos individualmente desligáveis; o sistema possui diodos

de bloqueio e proteção contra surtos. Por razões de segurança, se alguma parte da rede não suportar uma maior intensidade de corrente, esses sistemas devem ser protegidos individualmente. A estrutura de suporte será aterrada.

Para fins de layout que inclui as ligações do sistema fotovoltaico, são detalhados na Figura 7, com destaque a sugestão de construção de uma edificação que comporte os itens a serem protegidos de intempéries como raios solares, poeira e chuva, como os quadros com dispositivos de proteção, o inversor e o medidor.

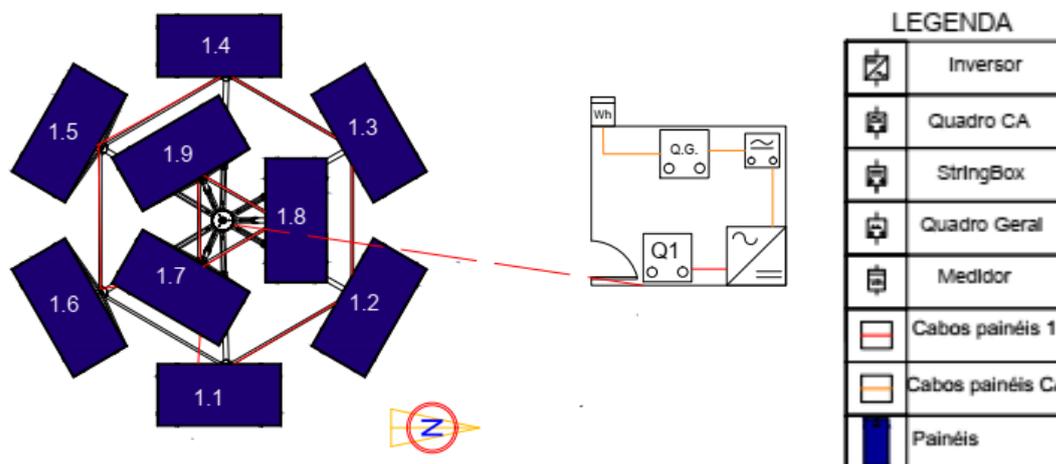


FIGURA 7: Ligações da árvore (Autoria própria).

#### 4.3. Requisitos de segurança

- Este item tem por objetivo apresentar os requisitos de segurança do projeto em consonância com a norma DIS-NOR-031 – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição – REV 01.
- Apresenta dispositivo de proteção interno ao inversor, com medição de isolamento CC, mudança do ponto de operação e limitação em caso de sobrecarga e disjuntor CC.
- Apresenta sistema anti-ilhamento segundo a ABNT NBR IEC 62116:2012 testado e aprovado pelo INMETRO.
- Sinalização de segurança: Deverá ser instalado no ponto de conexão, junto ao padrão de entrada, sinalização indicativa da existência na unidade consumidora de geração própria através de placa de advertência com os seguintes dizeres: “CUIDADO – RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO – GERAÇÃO PRÓPRIA”

## 5. CONCLUSÕES

A proposta de trazer aos ambientes públicos da cidade de Mossoró um projeto de árvore solar contempla objetivos que vão desde àqueles descritos no seu plano diretor, com destaque para a inovação tecnológica, bem como o caráter informativo sobre a energia solar fotovoltaica, estando, portanto, acessível à todos os cidadãos. Traz consigo as possibilidades de financiamento público, por estar dentro do que preconiza o plano de desenvolvimento da cidade, bem como a possibilidade de fomento de recursos privados, através de empresas do segmento de energia solar fotovoltaica que possa se utilizar do projeto para propaganda de sua marca. Uma outra alternativa, é a participação dos projetos de eficiência das distribuidoras locais. Sob o ponto de vista arquitetônico, o projeto em sua concepção buscou estabelecer uma relação entre o natural e o artificial, considerando como partido arquitetônico os galhos das árvores que se ramificam proporcionalmente, mas sem

perder sua característica tecnológica. A distribuição radial das placas solares tem como propósito a absorver o máximo de luz solar além de proporcionar sombra, assim como uma árvore natural. Em sua base possui uma estrutura feita em carretel de fio com um banco, e mesa acessíveis para carregamento de smartphone uso de *wi-fi*. Em termos de objetivos específicos, preconiza: máxima eficiência em na geração de energia, espaço para descanso com uso de internet Wi-Fi e carregamento de eletrônicos. Montagem modular de forma prática e rápida.

#### REFERÊNCIAS

- [1] CRESSEB-CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Grupo de Trabalho de EnergiaSolar. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos / Rio de Janeiro, CRESEB, 2014.
- [2] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio (organizadores). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – Cresesb. Rio de Janeiro-RJ, 2014, 529p.
- [3] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RÜTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2a. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p. Disponível em: < [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html) >. Acesso em: 08 jul. 2022.
- [4] TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- [5] ANEEL. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. 2020. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Distribuidora.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Distribuidora.asp)>. Acesso em: 6 set. 2022.
- [6] Pemula, P.D., 2017. An architectural approach for improving aesthetics of PV. 110265 (September), 110493.
- [7] de Abreu-Harbach, L.V., Labaki, L.C., Matzarakis, A., 2015. Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landsc. Urban Plan.* 138, 99–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.008>.
- [8] Hyder, F., Baredar, P., Sudhakar, K., 2018a. A novel sun tracking technique through a solar PV tree and a smart controller. In: Proc. 4th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2018. pp. 407–411. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443263>.
- [9] Kumar, M., Rana, L., Pattnaik, A., 2021. Solar tree – a sustainable energy approach for farmers. *J. Univ. Shanghai Sci. Technol.* 23 (07), 410–419. <http://dx.doi.org/10.51201/jusst/21/07150>.
- [10] Gangwar, P., Tripathi, R.P., Singh, A.K., 2021b. Solar photovoltaic tree: a review of designs, performance, applications, and challenges. *Energy Sources A* 00 (00), 1–28, <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1901802>.
- [11] Gupta, A.D., 2021. Experimental investigation for photo-voltaic power generation using the concept of solar tree. (January 2020), 0–4. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35014.80960>.
- [12] Baci, A.B., Salmi, M., Menni, Y., Ghafourian, S., Sadeghzadeh, M., Ghalandari, M., 2020. A new configuration of vertically connecting solar cells: Solar tree. *Int.J. Photoenergy* 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/8817440>.
- [13] Rajaei, M., Jalali, M., 2021. Analysis and implementation of the solar tree by determining the optimal angle in Shiraz-Iran. *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng.* x (x), <http://dx.doi.org/10.22061/jcarme.2019.4665.xxxx>.
- [14] HYDER, Farhan; SUDHAKAR, K.; MAMAT, Rizalman. Solar PV tree design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1079-1096, 2018.
- [15] CAO, Weiran et al. “Solar tree”: Exploring new form factors of organic solar cells. *Renewable energy*, v. 72, p. 134-139, 2014.
- [16] MOURA, Lucas Santos. Árvores Solares: Um Novo Conceito na Geração de Energia Solar Fotovoltaica. 2017.
- [17] PREFEITURA MUNICIPAL DE MOSSORÓ. Constituição (2006). Lei Complementar nº 012/2006, de 12 de dezembro de 2006. **Plano Diretor do Município de Mossoró**. Mossoró, RN.
- [18] **DIS-NOR-031** – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição – **REV 01**.
- [19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma ABNT NBR 5410:2004**–Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- [20] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 5419: proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.
- [21] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma ABNT NBR 16690: instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos: Requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2019.
- [22] Cidade Brasil. Mossoró. 2020. Disponível em: <<https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-mossoro.html>>. Acesso em 04 fev. 2020.
- [23] UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO (UFERSA). Usinas Solares da UFERSA: Dados meteorológicos. Disponível em <<https://usinasolar.ufersa.edu.br/dados-emas/>>. Acesso em: 31 out. 2022.
- [24] CANADIAN SOLAR. INVERSOR DE STRING MONOFÁSICO CSI-1.5K-TL | CSI-3K-TL. Disponível em: < <https://renlight.com.br/wp-content/uploads/2019/03/INVERSOR-DE-STRING-MONOFÁSICO-CANADIAN-SOLAR-CSI-3K-1.5K-TL-RENLIGHT-ENERGY.pdf> >. Acesso em 25 de jul. 2022.

- [25] BYD POLICRISTALINO HALF-CELL. PHK-36-SÉRIE-5BB. Disponível em: <[https://www.byd.ind.br/2020/wpcontent/uploads/2020/09/PHK\\_36\\_SERIES\\_5BB\\_pnl\\_solar\\_byd\\_01\\_020320.pdf](https://www.byd.ind.br/2020/wpcontent/uploads/2020/09/PHK_36_SERIES_5BB_pnl_solar_byd_01_020320.pdf)>. Acesso em 25 de jul. 2022.



Artigo

# Projeto de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica residencial na zona urbana de Almino Afonso - RN

Marcos A. de Oliveira <sup>[1]</sup>, Renato de S. A. Filho <sup>[3]</sup>, Adriano A. F. Moura <sup>[3]</sup>, Daniel C. C. Crisóstomo <sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semiárido; marcos\_marcos1996@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semiárido; renato.filho@alunos.ufersa.edu.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semiárido; daniel.crisostomo@ufersa.edu.br

*Recebido:* 14/09/2022;

*Aceito:* 21/12/2022;

*Publicado:* 23/12/2022.

**Resumo.** Devido ao crescente consumo mundial de energia e aos impactos das mudanças climáticas, faz-se necessário a busca por novas fontes de energia, na qual se destacam os sistemas solares fotovoltaicos que permitem gerar energia elétrica limpa e sustentável. Este trabalho apresenta um dimensionamento de projeto residencial fotovoltaico conectado à rede elétrica, sendo feita uma análise da viabilidade econômica do projeto por meio de uma simulação da energia produzida em comparação à consumida. Obteve-se, portanto, um sistema composto por 24 painéis fotovoltaicos, com potência nominal de 9,60 (kWp), que produz excedentes para a concessionária e permite o retorno do investimento em 60 meses. Com os resultados, foi possível demonstrar a viabilidade econômica do projeto e os potenciais do uso mais amplo da energia solar para o interior do Nordeste do Brasil.

**Palavras-chave:** dimensionamento; viabilidade; energia limpa.

**Abstract:** Due to the world's energy consumption, the search for alternative means for the generation of electricity in a clean and sustainable way was made. It is in this scenario that photovoltaic solar energy has its prominence in the market, being a technology with low cost to invest in implementation if we compare with other generating sources, in addition providing a return on investment. This work presents a dimensioning of a photovoltaic residential project connected to the electrical network, the system consists of 24 photovoltaic panels with rated power of 9.60 (kWp). An analysis of the economic viability of the project is also made through a simulation of energy produced x consumed. With the results it was possible to ascertain the behavior of the system if it really is economically viable even with its medium-term return on investment time of approximately 60 months.

**Key-words:** Photovoltaic system. Clean Energy. Viability.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas, aliada à crescente necessidade de energia e crises energéticas ao redor do mundo, tem incentivado, cada vez mais, a adoção da energia solar através de sistemas fotovoltaicos. Nessa perspectiva, compreende-se que esses sistemas agem como uma alternativa econômica e sustentável para obtenção de energia elétrica, tanto em grande e em média escala, por empresas, quanto em micro e pequena escala, por pequenos empreendedores e cidadãos com alto consumo de energia (DASSI, 2015).

Nesse contexto, o Brasil destaca-se nesse cenário devido seu grande potencial, e estar localizado, em sua maior parte, na zona tropical de maior incidência de luz solar. Além disso, aumento de preços da energia elétrica, tradicionalmente hídrica, vem sendo atingido por níveis baixos dos reservatórios, segundo ANEEL 2021 (Agência Nacional de Energia Elétrica). Portanto, essa situação reflete na produção das usinas termelétricas, cujo custo é muito superior, bem como levando a um crescimento anual médio de 300% da energia solar no país (ABSOLAR, 2019).

Além da redução dos custos associados à tarifa elétrica, os sistemas fotovoltaicos têm baixíssima necessidade de manutenção. Ao passo que permitem uma descentralização da rede, evitam problemas relacionados à escassez em grandes usinas (Shayani, Oliveira, Camargo, 2006). Sob esse vies, em 2023, é

estimado que haverá mais 160 mil instalações de sistemas fotovoltaicos operando no país (RELLA, 2017), o que corresponderá a 32% da sua matriz energética, em 2040 (ABSOLAR, 2019).

Nessa perspectiva, a produção de energia solar fotovoltaica dá-se através da conversão direta da radiação solar em eletricidade através do chamado efeito fotoelétrico ou fotovoltaico em células, chamadas células fotovoltaicas ou células solares (IMHOFF, 2007). As células fotovoltaicas mais usadas, atualmente, são células de silício do tipo monocristalino, na qual os cristais de silício são criados através de um cristal semente introduzido em silício fundido no processo denominado Czochralski (MACHADO, MIRANDA, 2015).

Segundo dados do CETEM (2007), as células de silício monocristalino têm eficácia média de 12 a 15% na conversão de energia solar, com o máximo de 25% observado em laboratório, com células disponíveis no mercado com eficiência próxima a 22,7%. Essas células são organizadas em painéis que ficam instaladas entre si e de forma conectada para gerar eletricidade (ELÉTRICA, 2018).

Esses painéis em geral, contam com uma string box, que serve como componente de proteção sendo conectado à cabos que conectam as placas solares ao inversor, proporcionando controle contra sobretensão e sobrecorrente permitindo o seccionamento do circuito (VINTURINI, 2019). Esses painéis são então conectados a um inversor que transforma a corrente contínua (CC) criada por esses painéis em corrente alternada (CA) para ser utilizada nos equipamentos ou sincronizada com a corrente da rede elétrica (PINHO & GALDINO, 2014).

Outrossim, o sistema on-grid, ou seja, conectado à rede elétrica, o qual permite receber eletricidade da rede gerando, quando necessário, ou doar, quando sobressalente, crédito descontado da tarifa de energia final. Assim, os sistemas *off-grid* são independentes da rede, para isso contam ainda com uma bateria ou sistema de armazenamento de eletricidade para momentos sem eletricidade (ALVES, 2018; SILVA, 2019).

O sistema on-grid, em geral, é preferível por ser mais barato e eficiente, devido não precisarem de sistemas de armazenamento intermediários, enquanto os sistemas *off-grid* são indicados para locais isolados ou onde o sistema de fornecimento de eletricidade pela rede é instável (SOUZA, 2018).

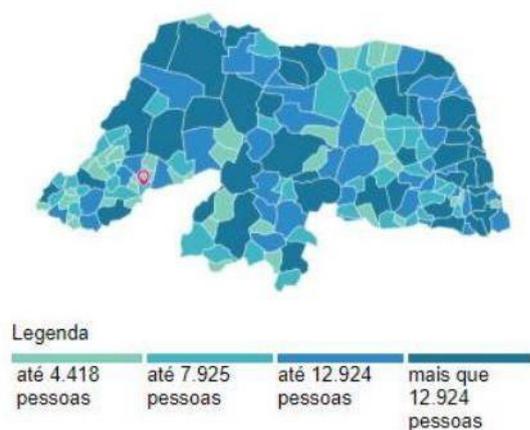
Vale pontuar, ainda, que ambos os sistemas devem cumprir as determinações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para, assim, serem executados com segurança e uma boa qualidade da energia. Reforçando essa perspectiva, a Resolução Normativa ANEEL Nº 482/12 determina que o consumidor brasileiro pode optar por gerar sua própria energia elétrica, decorrente de fontes renováveis ou por cogeração qualificada.

Além disso, essa resolução orienta que é possível compartilhar os excedentes com a rede de distribuição de sua região, e que isso refletirá em uma compensação financeira na forma de descontos na fatura elétrica. Tal processo é nomeado como micro ou minigeração distribuída e contribuem para economia financeira, sustentabilidade ambiental da energia e melhoria social, através da autonomia e descentralização da rede (ANEEL, 2016).

Assim, esse trabalho objetivou realizar o dimensionamento de um projeto solar fotovoltaico do tipo *on-grid* residencial de um consumidor da cidade de Almino Afonso – RN, visando a redução de gastos mensais, e avaliar as possibilidades e limitações que a implementação que esses sistemas têm para a realidade do interior do nordeste brasileiro, tendo em vista seus impactos econômicos, ambientais e sociais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado na cidade de Almino Afonso, situada no interior do Rio Grande do Norte (Figura 1). Conforme os dados do IBGE 2021, o município possui uma área territorial 128.038 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 4.685 habitantes. As placas solares foram instaladas na zona urbana em uma propriedade constituída por uma residência e chácara (Figura 1).



(a)



(b)

FIGURA 1. (a) Localização do município de Almino Afonso no Rio Grande do Norte [IBGE, 2021];  
(b) Localidade onde foi realizado o estudo (autoria própria).

Para o planejamento da viabilidade do projeto, levou-se em conta a irradiação solar média da localidade para o ano de 2021, expressa na Tabela 1, e o consumo de eletricidade da residência, discriminada na Tabela 2, considerando o consumo mês a mês entre maio de 2021 e abril de 2022.

TABELA 1. Irradiação Solar Diária em (Wh/m<sup>2</sup>dia) para o município de Almino Afonso [Adaptado de INPE, 2021].

<i>Anual</i>	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Maio</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>6.005</b>	6.147	6.065	6.124	5.882	5.406	5.070	5.368	6.057	6.503	6.627	6.651	6.163

TABELA 2. Consumo mensal de eletricidade na propriedade (autoria própria elaborada a partir da fatura de energia emitida pela COSERN).

<i>Chacará</i>		<i>Casa</i>	
<i>Mês</i>	<i>Consumo kWh</i>	<i>Mês</i>	<i>Consumo kWh</i>
Maio 2021	321,0	Maio 2021	579,0
Jun 2021	258,0	Jun 2021	498,0
Jul 2021	533,0	Jul 2021	457,0
Ago 2021	301,0	Ago 2021	497,0
Set 2021	505,0	Set 2021	534,0
Out 2021	704,0	Out 2021	600,0
Nov 2021	501,0	Nov 2021	1.137,0
Dez 2021	646,0	Dez 2021	1.554,0
Jan 2022	548,0	Jan 2022	1.309,0
Fev 2022	291,0	Fev 2022	664,0
Mar 2022	449,0	Mar 2022	360,0
Abr 2022	390	Abr 2022	356,0
<b>Média</b>	<b>453,91</b>	<b>Média</b>	<b>712,08</b>

A partir destes dois dados, uma irradiação horizontal anual média de aproximadamente 6,005 (kWh/m<sup>2</sup>. dia) e o consumo médio mensal da chácara, bem como a casa do proprietário de 453,91 e 712,08 (kWh), respectivamente, podem-se realizar o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica, que tem a finalidade de suprir, de forma total ou parcialmente, a demanda de energia.

Utilizando-se do indicado, por Oliveira e Crossara (2018), a realização dos cálculos para determinar o número de painéis necessário do sistema parte do valor do consumo médio e do tipo de ligação da rede de distribuição de acordo com a equação:

$$Ec = Emd - DB \quad (1)$$

Sendo:

$Ec$  = Energia de compensação

$Emd$  = Energia Média de Consumo

$DB$  = Tipo de Distribuição

Já para se obter a energia de compensação diária, utiliza-se da seguinte equação:

$$Ecd = \frac{Ec}{30} \quad (2)$$

Sendo:

$Ecd$  = Energia de compensação diária

$Ec$  = Energia de compensação

Portanto, a partir da irradiação média e do valor da Energia de compensação diária ( $Ecd$ ), encontra-se o valor necessário da potência que precisa ser gerada, como mostra equação abaixo:

$$W = \frac{Ecd}{Rad * 0,8} \quad (3)$$

Sendo:

$W$  = Potência total dos painéis

$Rad$  = Radiação nível médio

$0,8$  = Fator de Segurança

De acordo com Ribeiro (2016), o fator de segurança leva em consideração as perdas relacionadas aos painéis fotovoltaicos, as não funcionam constantemente em valor ideal devido às próprias flutuações da radiação solar em contato com a atmosfera. Esse valor costuma ser situado entre 0,7 a 0,8.

Com o valor da potência dos painéis determinado, é obtida a quantidade de painéis necessários para a realização do projeto pela equação a seguir:

$$N^{\circ}P = \frac{W}{Pp} \quad (4)$$

Sendo:

$N^{\circ}P$  = Número de painéis necessários

$W$  = Potência total dos painéis

Por fim, a equação 3 é realinhada (com  $Ecd$  em evidência) para estudar a geração a cada mês e disposta em gráficos para comparar a geração pelo consumo mensal. Nessa etapa, pode-se determinar a potência da usina e o número de painéis necessários para que a produção de energia exceda o consumo nos principais meses, conforme a equação:

$$Ecd = W * Rad * 0,8 * 30 \quad (5)$$

Sendo:

$Ecd$  = Geração de energia

$W$  = Potência total dos painéis

$Rad$  = Radiação nível médio

$0,8$  = Fator de Segurança

Tendo-se determinado o número e potência das placas, resta completar o sistema com a escolha do inversor e da *string box*. Dessa forma, o inversor deve ser dimensionado em relação a potência das placas, de modo que o inversor tenha potência máxima de 20% acima da potência total dos painéis e, mínima, de 20% a menos do valor da potência.

Com relação ao a *string box*, precisa contar com dimensionamento do DPS do lado CC, com tensão maior do que a tensão máxima do sistema fotovoltaico (V). Vale destacar, ainda, que a corrente de descarga (kA) vem embutida no aparelho escolhido. Enquanto que para o dimensionamento da chave seccionadora é necessário atender os seguintes critérios:

$$U_{ch} > V_{FVMAX} \quad (6)$$

$$I_{ch} > I_{arranjo} \quad (7)$$

$$NP > NC \quad (8)$$

Sendo:

$U_{ch}$  = Tensão máxima da chave seccionada

$V_{FVMAX}$  = Tensão máxima do sistema fotovoltaico

$I_{ch}$  = Corrente da chave seccionada

$I_{arranjo}$  = Corrente do arranjo

$NP$  = Número de polo

$NC$  = Número de contato

Já o DPS, no lado CA, necessita ter tensão maior do que a tensão de saída do inversor, e a escolha de classe determina a corrente de descarga (kA), enquanto a corrente nominal do disjuntor deve ser maior que a corrente total, conforme equação:

$$I = \frac{P}{V} \quad (9)$$

Sendo:

$I$  = corrente total para o disjuntor ( $A$ )

$P$  = Potência de saída do inversor

$V$  = Tensão de fornecimento

Ressalta-se, ainda, que de acordo com Manual de Engenharias de Sistemas Fotovoltaicos (CEPEL 2014), a equação necessária para obter a seção mínima do condutor é como a que se segue:

$$S = \frac{p \times (D \times I)}{V} \quad (10)$$

Sendo:

$S$  = Seção mínima do condutor em  $mm^2$

$p$  = Resistividade do material

$D$  = Distância total do condutor

$I$  = Corrente que passa pelo condutor

$V$  = Queda de tensão tolerada no cabeamento

Assim, pode-se determinar a instalação do projeto e ter a projeção da energia gerada, permitindo o cálculo da fatura de energia e a análise da economia gerada, podendo estimar o período para obtenção do retorno do investimento. Dessa forma, o consumidor utiliza um tipo ligação trifásica, e realiza a multiplicação da tarifa de energia pelo ICMS de 25%, direcionado a ser aplicado nas faturas de consumidores comerciais, bem como levar em consoante a energia gerada em um determinado período, segundo a seguinte equação:

$$R\$ = (E_{gp} \times Tarifa \times ICMS) \quad (11)$$

Sendo:

$E_{gp}$  = Energia gerada por um determinado período

Tarifa = Tarifa de energia

ICMS = 25%

Com isso, determina-se o payback - termo que identifica o tempo de retorno de um investimento - nesse caso o do sistema solar fotovoltaico dimensionado. Com base nos parâmetros da seguinte equação, pode-se determinar o kit voltaico a ser escolhido, tendo em vista o tempo para retorno do investimento:

$$\text{payback} = \frac{\text{Valor de investimento}}{\text{Energia gerada}} * Tarifa \quad (12)$$

Quanto a parte jurídica-normativa, para atender a realização do projeto, é necessário produzir os seguintes documentos, de acordo com PINA 2022:

- Formulário preenchido determinando uma solicitação de acesso para microgeração distribuída com potencial igual ou menor a 10 kW e também superior a esse valor;
- Memorial descritivo para microgeração fotovoltaica;
- Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico.

De acordo com Ribeiro (2016), o diagrama unifilar é uma representação gráfica que indica todos os aspectos referentes a parte do circuito elétrico conjuntamente à planta arquitetônica, a localização dos pontos que compõem o sistema e de cada equipamento do circuito, bem como o caminhamento físico para, assim, ser aprovado pela concessionária de energia elétrica. Esse documento, em conjunto com os demais anteriormente referidos, deve ser anexado no portal da concessionária.

E, para além de tudo isso, foi realizada uma inspeção no local, a fim de verificar a estrutura para fixação das placas e possíveis obstáculos atuais e/ou futuros que possam causar sombreamento. A partir da análise de todos esses fatores, foi realizada uma pesquisa de mercado, em busca dos melhores materiais para compor a usina de microgeração *on-grid* (placas fotovoltaicas, inversor e *string box*), prezando pelo melhor custo benefício.

### 3. RESULTADOS

De acordo com a metodologia que foi descrita, obteve-se os resultados necessários para o decorrer do trabalho, sendo mostrado a seguir:

### 3.1. Estimativa de consumo e produção de energia elétrica

A partir do indicado anteriormente, o consumo médio da chácara e da casa do proprietário é de 453,91 e 712,08 (kWh), respectivamente, sendo a soma das médias aproximadamente igual à 1.165,99 (kWh). Assim, pode-se realizar o dimensionamento pelo método das somas das médias, determinando o cálculo da energia de compensação do sistema, como descrito na equação:

$$\begin{aligned} E_c &= E_{md} - DB \\ E_c &= 1.165,99 - 100 \\ E_c &= 1.065,99 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (13)$$

Em seguida, foi determinado o valor equivalente aos 30 dias:

$$\begin{aligned} E_{cd} &= \frac{E_c}{30} \\ E_{cd} &= \frac{1.065,99}{30} \\ E_{cd} &= 35,53 \text{ Wh/dia} \end{aligned} \quad (14)$$

Conforme dados do INPE, a radiação solar média diária do município de Almino Afonso-RN é de aproximadamente 6,005 (kWh/m<sup>2</sup>. dia). Logo, pode-se obter a potência dos painéis fotovoltaicos:

$$\begin{aligned} W &= \frac{E_{cd}}{Rad * 0,8} \\ W &= \frac{35,53}{6,005 * 0,8} \\ W &= 7,39 \text{ kWp} \end{aligned} \quad (14)$$

Consequente, a energia produzida é demonstrada na tabela:

TABELA 3. Valores calculados para o consumo e energia produzida com base na potência e radiação solar para o sistema fotovoltaico (autoria própria).

<i>Mês</i>	<i>Potência Instalada (kWp)</i>	<i>Radiação Solar (kWh/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Consumo Mensal (kWh)</i>	<i>Energia Produzida (kWh)</i>
Maio 2021	7,39	5,406	900	958,81
Jun 2021	7,39	5,070	756	899,22
Jul 2021	7,39	5,368	990	952,07
Ago 2021	7,39	6,057	798	1.074,27
Set 2021	7,39	6,503	1.039	1.153,37
Out 2021	7,39	6,627	1.304	1.175,36
Nov 2021	7,39	6,651	1.638	1.179,62
Dez 2021	7,39	6,163	2.200	1.093,07
Jan 2022	7,39	6,147	1.857	1.090,23
Fev 2022	7,39	6,065	955	1.075,69
Mar 2022	7,39	6,124	809	1.086,15
Abr 2022	7,39	5,882	746	1.043,23
<b>Anual</b>	<b>7,39</b>	<b>6,005</b>	<b>13.992</b>	<b>12.781,09</b>

Porém, em análise conjunta ao proprietário, determinou-se que esses valores não supriam o consumo de energia elétrica do estabelecimento, de modo a compensar o sistema. Entretanto, o proprietário pretende expandir o consumo de energia da residência. Com isso, os dados utilizados vêm de um ano que não pode ser tomado como paramétrico, conforme ilustrado no gráfico:

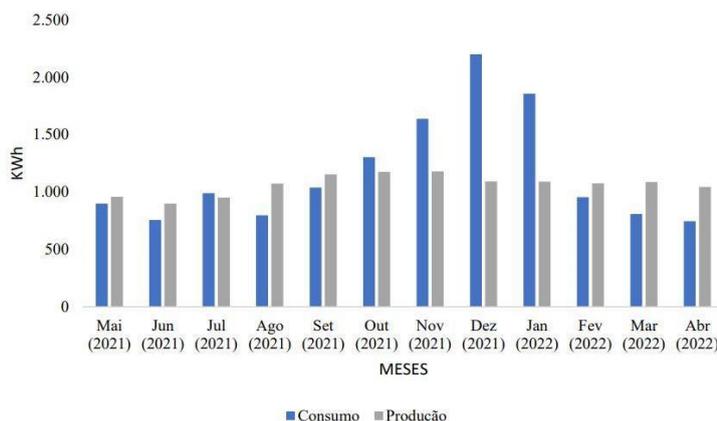


FIGURA 2. Gráfico de consumo e produção estimado do sistema fotovoltaico planejado (autoria própria).

O gráfico demonstra a não viabilidade dessa usina com essa potência, uma vez que traz um déficit anual de 1.210,91 (kWh) negativos de energia produzida em relação à consumida. Por isso, optou-se por elevar o valor utilizado na estimativa, buscando-se kits de usinas fotovoltaicas disponíveis no mercado que atendam a nova referência de valores adequados à demanda de energia simulada.

Desses, foi escolhido o kit fotovoltaico de um gerador solar 9,60 (kWp), com painéis solar da marca trina e um inversor solar FIME ABB, com características para ser instalado no solo. Cujo componentes estão discriminados na tabela a seguir:

TABELA 4. Componentes do Kit Solar Fotovoltaico escolhido [Adaptado do NeoSolar, 2021].

<b>EQUIPAMENTOS</b>
8 STAUBLI CONECTOR MC4 320016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR ACOPLADOR FEMEA
8 STAUBLI CONECTOR MC4 32.0017P0001-UR PV-KST4/6II-UR ACOPLADOR MACHO
1 INVERSOR SOLAR FIMER ABB 3N81990FS00A PVI-10.0TL-OUTD-FS 10.0KW TRIFÁSICO
100 CABO SOLAR NEXAANS 59056 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC PRETO
100 CABO SOLAR NEXAANS 40553 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC VERMELHO
1 MONITORAMENTO FIMER 3N160020000A VSN300 WIFI LOGGER CARD
24 PAINÉIS SOLAR PLACA FOTOVOLTAICA TRINA TSM0-DE15MII 400W TALLMAX 144 CEL. MONO PERC HALF CELL 19,7% EFICIENCIA
1 ABRAÇADEIRA ABB SKT200-180X-100BR ABRAÇADEIRA 200 X 3.6MM NYLON UV PACOTE COM 100 UND
1 STRING BOX ABB 1SLM400220A0000BRA QUADRO 4 ENTRADAS 2 SAIDAS 100OV (2MPPT)
6 ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 411839 RS-232 4 PAINEIS SOLO TERRESTRE INCLINAÇÃO 5 A 30 GRAUS 4,20M
6 ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 411738 RS-232 4 ACESSÓRIOS TERRESTRE 4 PAINÉIS

Com esse novo kit escolhido, foi realizada uma nova simulação para verificar a potência e energia produzida, como se segue na tabela:

TABELA 5. Valores ajustados para o consumo e energia produzida com base na potência e radiação solar para o sistema fotovoltaico com compensação (autoria própria).

<i>Mês</i>	<i>Potência Instalada (kWp)</i>	<i>Radiação Solar (kWh/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Consumo Mensal (kWh)</i>	<i>Energia Produzida (kWh)</i>
Maio 2021	9,60	5,406	900	1.245,54
Jun 2021	9,60	5,070	756	1.168,12
Jul 2021	9,60	5,368	990	1.236,78
Ago 2021	9,60	6,057	798	1.395,53
Set 2021	9,60	6,503	1.039	1.498,29
Out 2021	9,60	6,627	1.304	1.526,86
Nov 2021	9,60	6,651	1.638	1.532,39
Dez 2021	9,60	6,163	2.200	1.419,95
Jan 2022	9,60	6,147	1.857	1.416,26
Fev 2022	9,60	6,065	955	1.397,37
Mar 2022	9,60	6,124	809	1.410,96
Abr 2022	9,60	5,882	746	1.355,21
<b>Anual</b>	<b>9,60</b>	<b>6,005</b>	<b>13.992</b>	<b>16.603,26</b>

Feito isso, os resultados obtidos com a potência de 9,60 (kWp) para essa nova usina solar, foram comparadas com o consumo mensal, como indicados no gráfico abaixo:

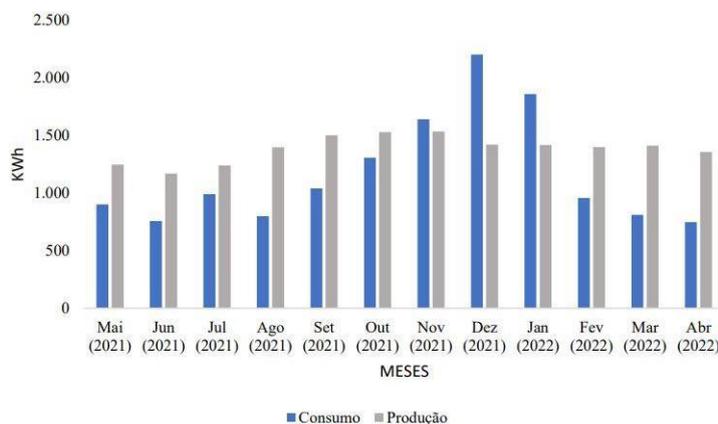


FIGURA 3. Gráfico de consumo e produção estimado do sistema fotovoltaico planejado (autoria própria).

Sendo assim, portanto, fica claro que esse novo sistema é extremamente favorável ao proprietário, uma vez que supre o consumo de quase todos os meses, ao passo que em outros até gera excedente que pode ser passado à rede para obtenção de crédito, o que determina um saldo anual de aproximadamente 2.611,26 (kWh) de energia produzida em relação ao consumo. Isso trará tanto benefícios econômicos, como ambientais, além de demonstrar como esse tipo de sistema é totalmente viável para localidades análogas.

Tendo estabelecida a potência (9,60 kWp) e a demanda de produção e consumo a ser estabelecida, pode-se calcular a quantidade de painéis necessários, conforme etapas:

$$\begin{aligned}
 N^{\circ}P &= \frac{W}{P_p} \\
 N^{\circ}P &= \frac{9.600 \text{ Wp}}{400 \text{ W}} \\
 N^{\circ}P &= 24
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Assim, a quantidade de painéis fotovoltaicos necessários para suprir a demanda elétrica é de 24 painéis de 400 (Wp) e a potência instalada de 9,60 (kWp).

### 3.2. Diagrama unifilar

Com o projeto calculado, foi realizado o dimensionamento do diagrama unifilar, de acordo com a regularização apropriada da COSERN, ficando explícito o detalhamento dos equipamentos do sistema solar fotovoltaico na Figura 4.

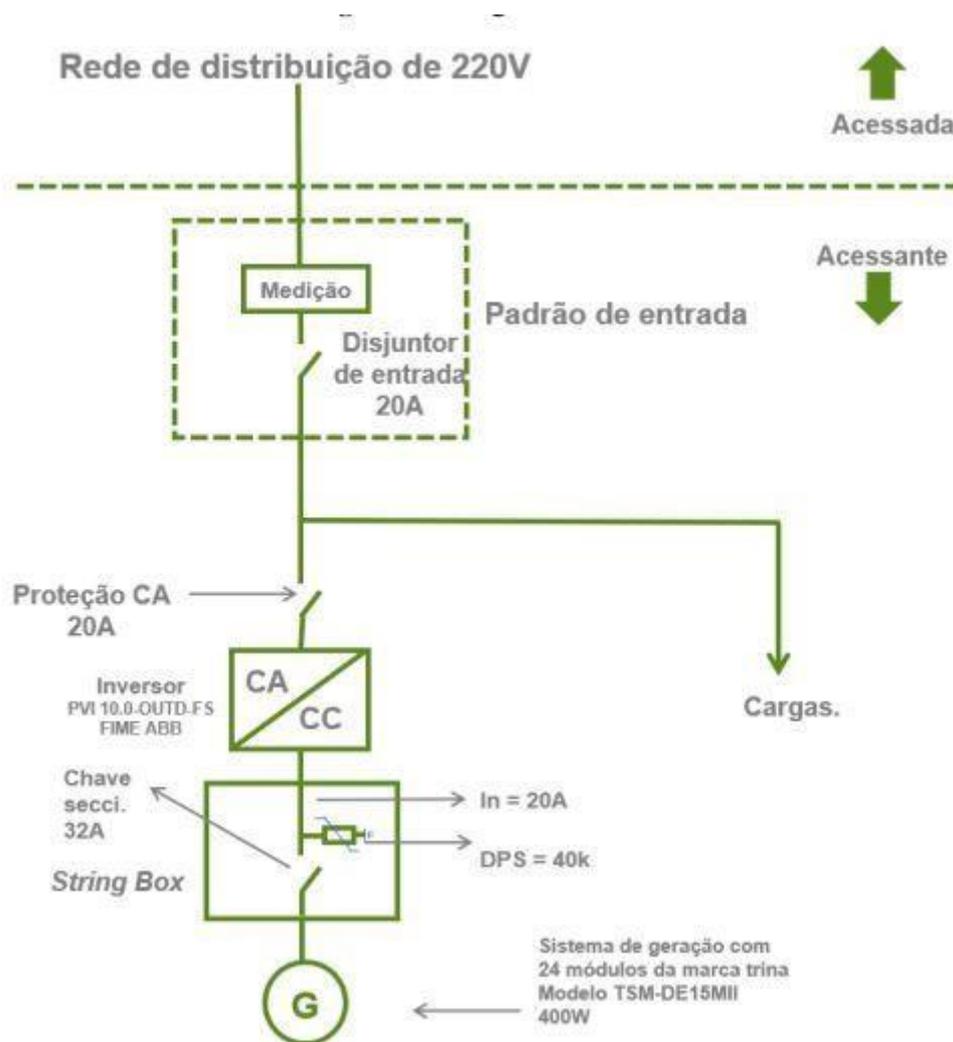


FIGURA 4. Diagrama unifilar do sistema a ser instalado (autoria própria).

Durante sua produção percebeu-se a necessidade do proprietário solicitar junto com a concessionária a alteração de carga do consumidor, uma vez que a usina não poderá possuir uma carga maior em relação a carga instalada. O processo para essa solicitação dá-se pelo site da COSERN e a sugestão foi de 10 (kW).

### 3.3. Retorno do investimento

Calcular o *payback* é de suma importância para todo investimento desse tipo, pois ele demonstra o tempo para que o dinheiro investido na construção do sistema fotovoltaico se traduza em saldo monetário positivo. Para isso, foi realizada uma simulação para estimar a produção financeira do sistema ao longo de 25 anos e compará-lo ao saldo negativo do investimento inicial para assim determinar em quanto tempo o proprietário obteria lucro pela instalação.

Consoante a isso, foi considerado um reajuste de 10% nas tarifas de energia elétrica ao longo dos 25 anos, como forma de estimativa em relação à inflação determinada pelo índice do acúmulo do IPCA nos últimos 12 meses, equivalente ao mês de dezembro de 2021, como consultado no IPCA 2022. Logo, os resultados dessa simulação encontram-se discriminados na Tabela 6, e são demonstrados de maneira mais clara no gráfico da Figura 5. Ambos demonstram que o ponto em que o sistema fotovoltaico se torna autossustentável economicamente e passa a gerar saldos positivos é a partir do sexto ano.

TABELA 6. Retorno do investimento (autoria própria).

<i>Gerador</i>	<i>Tarifa</i>	<i>Reajuste</i>	<i>Investi. Inicial</i>
----------------	---------------	-----------------	-------------------------

<i>tarifário ao longo do tempo (25 anos)</i>			
1.344 kWh/mês	0,49195	10%	42.779,90

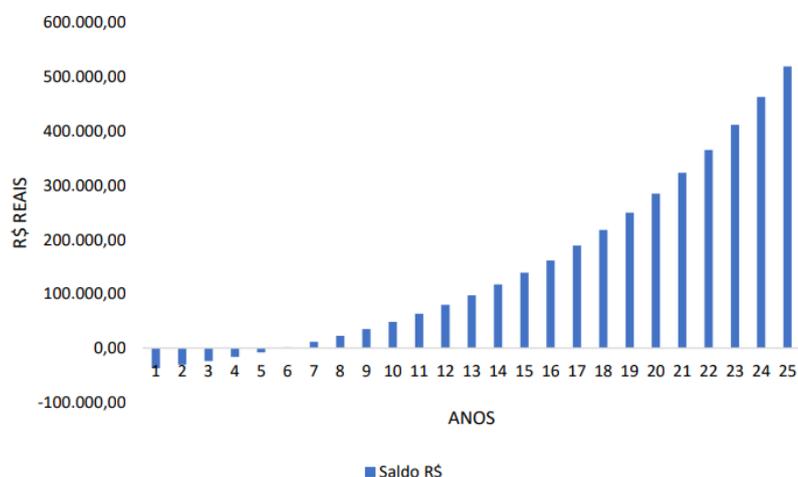


FIGURA 5. Retorno de investimento ao longo de 25 anos (autoria própria).

Além disso, levou-se em consideração as tarifas relacionadas ao valor final da fatura de energia elétrica para se chegar a uma estimativa média base. Tais tarifas são a taxa de distribuição, a taxa de iluminação pública e as bandeiras tarifárias, que indicam os níveis dos reservatórios das hidrelétricas, sendo a bandeira verde o nível adequado, no qual não há acresção à conta e as bandeiras amarela, vermelha e escassez hídrica, as que adicionam custo extra a produção de energia, visto o baixo nível de água nos reservatórios que é compensado pela energia das termelétricas, mais cara.

Esses valores, para os últimos 12 meses, foram levados em consideração para se obter o valor mínimo a ser pago em cada mês, com a instalação do sistema fotovoltaico. Esses valores são expressos na Tabela 7 e organizados no Figura 6 para melhor visualização:

TABELA 7. Comportamento das taxas cobradas em reais (autoria própria).

<i>Mês</i>	<i>Bandeira Verde</i>	<i>Bandeira Amarela</i>	<i>Bandeira Vermelha</i>	<i>Bandeira Escassez Hídrica</i>	<i>Ilu. Pública</i>
Maio 2021	0	6,23	15,5	0	12,88
Jun 2021	0	0	31,46	0	2,58
Jul 2021	0	0	45,02	0	2,58
Ago 2021	0	0	62,80	0	2,58
Set 2021	0	0	0	77,99	12,88
Out 2021	0	0	0	109,15	12,88
Nov 2021	0	64,79	0	143,98	30,87
Dez 2021	0	0	0	287,74	30,87
Jan 2022	0	0	0	242,04	30,87
Fev 2022	0	0	0	116,56	2,58
Mar 2022	0	0	0	64,04	2,58
Abr 2022	0	0	0	63,89	2,58

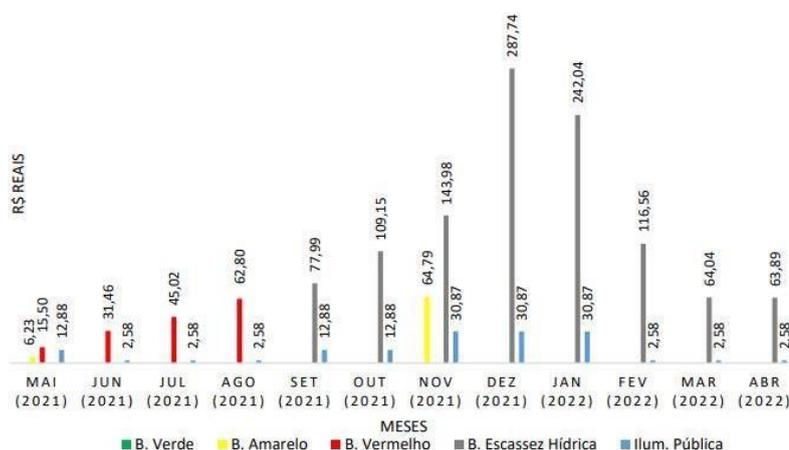


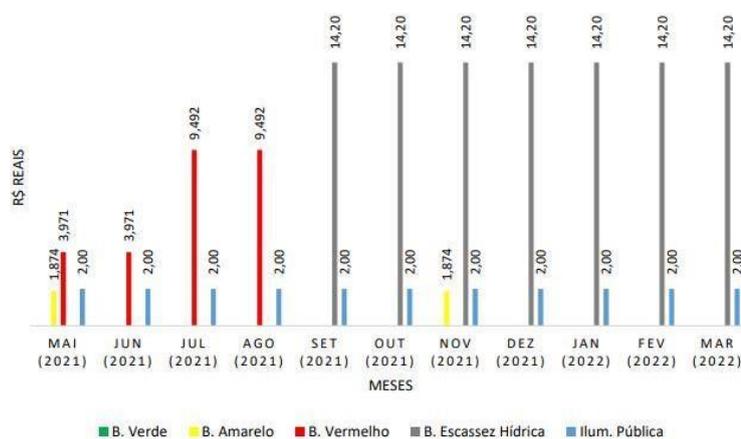
FIGURA 6. Comportamento das taxas cobradas em reais (autoria própria).

Com base nesses dados, foi construída a Tabela 8 simulando os preços as tarifas e taxas supracitadas em função dos 100 (kWh)<sup>1</sup>, de modo a visualizar a taxa mínima cobrada pela concessionária de energia elétrica após os sistema solar fotovoltaico ter sido instalado. Tais dados ficam visualizados na forma de gráfico na Figura 7 e demonstram claramente a redução dos valores comparados com o consumo de energia sem o sistema solar fotovoltaico, de modo que será cobrado apenas a taxa mínima relacionada à distribuição e iluminação pública.

TABELA 8. Análise da taxa mínima a ser cobrada em função dos 100 (kWh) (autoria própria).

<i>Mês</i>	<i>Bandeira Verde</i>	<i>Bandeira Amarela</i>	<i>Bandeira Vermelha</i>	<i>Bandeira Escassez Hídrica</i>	<i>Ilu. Pública</i>
Maio 2021	0	1,874	3,971	0	2,00
Jun 2021	0	0	3,971	0	2,00
Jul 2021	0	0	9,492	0	2,00
Ago 2021	0	0	9,492	0	2,00
Set 2021	0	0	0	14,20	2,00
Out 2021	0	0	0	14,20	2,00
Nov 2021	0	1,874	0	14,20	2,00
Dez 2021	0	0	0	14,20	2,00
Jan 2022	0	0	0	14,20	2,00
Fev 2022	0	0	0	14,20	2,00
Mar 2022	0	0	0	14,20	2,00
Abr 2022	0	0	0	14,20	2,00

<sup>1</sup> Refere-se ao custo de disponibilidade do sistema elétrico, em valor de moeda corrente equivalente ao sistema trifásico, dado pela resolução normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021.



Fonte: De Autoria Própria, 2022.

FIGURA 7. Análise da Taxa Mínima em Reais a ser cobrada em Função dos 100 (kWh) (autoria própria).

### 3.4. Local de instalação

Para a escolha do local da instalação, pôde-se optar entre a instalação no telhado ou no solo, no entanto, optou-se pelo ultimo, tendo em vista o menor preço de instalação e por proporcionar um espaço físico mais adequado para acomodar os módulos do sistema fotovoltaico.

De acordo com o Canal Solar (2020), as sombras podem causar preocupações ao sistema solar fotovoltaico, pois interferem no rendimento dos painéis e podem causar prejuízos aos clientes na geração de energia elétrica. Em casos específicos, podem causar pontos de aquecimento (hotspots) quando as sombras incidem de modo direto sobre local determinadas células de um módulo solar fotovoltaico. Para determinar, então, a instalação foi utilizado, o software *sketchup* para visualizar o comportamento da incidência solar ao longo de 12 meses no local das placas fotovoltaicas, exemplificado pelas imagens a seguir:

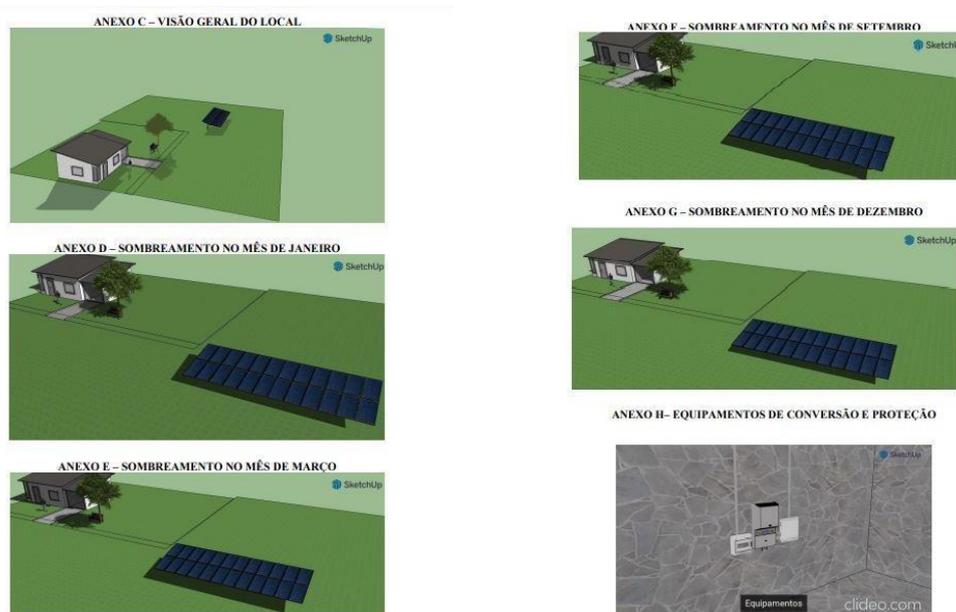


FIGURA 8. Projeções de sombra e equipamentos realizados utilizando o software *sketchup* (autoria própria).

## 4. CONCLUSÃO

Foi possível identificar que o sistema irá produzir energia para o proprietário de forma viável, econômica e segura. Seu perfil é consideravelmente ideal para a instalação em razão do seu alto consumo de energia elétrica e área física disponível para instalação dos módulos no solo. Esse resultado proporcionará melhorias no âmbito econômico e irá gerar lucros a partir de um período de aproximadamente 60 meses a partir do investimento inicial custeado em R\$ 42.779, 90 em equipamentos.

Tornou-se perceptível, também, que a energia solar fotovoltaica é de forma sustentável e renovável, além de ser muito viável para todo território nacional, pois a sua fácil instalação e inovações constantes tornam-na uma tecnologia cada vez mais eficiente e barata, aliados aos altos índices de radiação solar do território nacional. Esse reflexo positivo trará para o cidadão um alto consumo, tornando-se uma alternativa cada vez mais rentável, principalmente por produzir mais energia durante a época de estiagem quando os níveis de reservatórios hídricos estão mais baixos aumentando as tarifas sobre eletricidade da rede.

Porém, apesar de poder compensar todo o consumo elétrico da rede, o proprietário não ficará livre de faturas de energia elétrica, uma vez que será necessário pagar a pelo custo de disponibilidade cobrada pela concessionária (taxa de distribuição da rede e iluminação pública).

#### REFERÊNCIAS

- [1] DASSI, Jonatan Antonio et al. Análise da viabilidade econômico-financeira energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil. In: **Anais do congresso Brasileiro de Custos-ABC**. 2015.
- [2] ZILLES, Roberto. Energia solar fotovoltaica. **USP, São Paulo**, 2012.
- [3] ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. Disponível em: <[http://www.greenrio.com.br/arquivos/Eduardo-Miklos\\_-\\_ABSOLAR.pdf](http://www.greenrio.com.br/arquivos/Eduardo-Miklos_-_ABSOLAR.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- [4] IBGE, CIDADES. **IBGE**, 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/almino-afonso/panorama>>. Acesso: 28 fev. 2022.
- [5] INPE. Medidas do Total Diário da Irradiação Global Horizontal para o Estado do Rio Grande do Norte. Disponível em: <[http://labren.ccst.inpe.br/atlas2\\_tables/RN\\_go.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/RN_go.html)>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- [6] OLIVEIRA, Matheus Campos, CROSSARA., Vinicius de Oliveira. Dimensionamento de um sistema on-grid fotovoltaico no setor de panificação no Brasil. 2018.
- [7] CEPEL. Manual de Engenharias de Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <<http://www.cressesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual-de-engenharias-FV-2014.pdf/>>. Acesso em: 5 mar. 2022.
- [8] PEREIRA RIBEIRO. Raylla. Estudo de caso: Dimensionamento de um sistema fotovoltaico Residencial. Disponível em: <<file:///C:/Users/marco/Downloads/Tcc-Raylla-1.pdf>>. Acesso em: 7 mar. 2022.
- [9] NeoSolar. Gerador Solar 9,60 kWp – Solo – Trina – ABB – Trif380V, 2021. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/gerador-solar-9-60kwp-trina-abb-solo-trif-380vhtml>>. Acesso em: 9 Mar. 2022.
- [10] CORTES, Andrea. Qual o Valor do IPCA Hoje e Acumulado de 2022 de 2022? Disponível em: <<https://www.remissaonline.com.br/blog/ipca-hoje/#:~:text=IPCA%202022%20acumulado%20e%20dos,caiu%20para%208%2C73%25.>>. Acesso em: 10 Mar. 2022.
- [11] DIS-NOR-031: Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição.
- [12] COSERN. Alteração de Carga, 2022. Disponível em: <<https://servicos.neonergiacosern.com.br/comercial-industrial/Pages/principais-opcoes-para-instalacao-do-padrao-de-entrada.aspx>>. Acesso em: 23 abr. 2022.

Artigo

# Influência do tempo e temperatura de recozimento sobre a tenacidade ao impacto de um aço carbono

Matheus Odilon da Silva Pereira <sup>[1]</sup>, Francisco Edson Nogueira Fraga <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; matheus.odilon@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nfraga@ufersa.edu.br

Recebido: 30/09/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

**Resumo:** Este trabalho buscou relacionar as alterações de tenacidade ao impacto sofridas por uma barra chata encruada de aço ABNT SAE 1020 com os tempos e temperaturas de um tratamento térmico de recozimento pleno, responsável por modificar a microestrutura do aço. Os tratamentos foram realizados em duas temperaturas, 890°C e 970°C com tempos de uma, duas e três horas. Posteriormente, as amostras foram cortadas e levadas para a fresadora para confeccionar 35 corpos de prova tipo A, para o ensaio de Charpy. Foi realizado o ensaio com pêndulo de 300 J com corpos de prova em apoio simples. Em seguida, foi separado um corpo de cada condição para preparação metalográfica. Foi realizado o preparo metalográfico nas amostras para serem levadas ao microscópio óptico. A partir dos resultados obtidos, foi observado um aumento de tenacidade ao impacto nas amostras submetidas a temperaturas de 890°, enquanto nas amostras submetidas a temperatura de 970° ocorreu perda de tenacidade ao impacto.

**Palavras-chave:** Recozimento; tenacidade ao impacto; crescimento de grão; microestrutura; recristalização.

**Abstract:** This work sought to relate the impact toughness changes suffered by a hardened flat bar made of ABNT SAE 1020 steel with the times and temperatures of a full annealing heat treatment, responsible for modifying the steel microstructure. The treatments were carried out at two temperatures, 890°C and 970°C with times of one, two and three hours. Subsequently, the samples were cut and taken to the milling machine to make 35 type A specimens for the Charpy test. The test was carried out with a 300 J pendulum with specimens in simple support. Then, a body of each condition was separated for metallographic preparation. The metallographic preparation was carried out in the samples to be taken to the optical microscope. From the results obtained, an increase in impact toughness was observed in the experimental samples at temperatures of 890°, while in the experimental samples at a temperature of 970°C there was a loss of impact toughness.

**Key-words:** Annealing; impact toughness; grain growth; microstructure; recrystallization.

## 1. INTRODUÇÃO

Aços submetidos a processos de conformação, como barras chatas que foram deformadas plasticamente durante o processo de laminação, sofrem com alterações microestruturais e cristalográficas, normalmente envolvendo algum tipo de transformação de fase. Sofrem também com o aumento de defeitos puntiformes e discordâncias. A microestrutura se altera, os grãos adquirem uma orientação preferencial cristalográfica de acordo com a direção da conformação e se tornam alongados [1,2].

A deformação gera tensões internas provocando o aumento de dureza, proveniente da presença de discordâncias e seus deslizamentos. Uma vez que se inicia o processo de deformação plástica, a tensão necessária para gerar deformação é relativamente pequena, mas à medida que o processo continua, multiplica-se as discordâncias, aumentando sua densidade por unidade de volume no cristal, aumentando o intercruzamento das direções de movimentação, dificultando cada vez mais a movimentação, dessa forma tornando-se necessário maiores níveis de tensões para provocar deformação [1-5].

Este fenômeno, denominado encruamento, é caracterizado pelo aumento da tensão necessária para deformar plasticamente, ou seja, dureza mais elevada e menor ductilidade. Na indústria, algumas situações necessitam que o material sofra grande deformação antes da ruptura. Em razão disso, se utiliza de tratamento térmico para aumento de ductilidade e diminuição de dureza, como o tratamento de recozimento [2,5].

No recozimento, o material passa por três processos distintos, o primeiro é a recuperação, em que as

propriedades mecânicas modificadas pela laminação retornam a seus valores iniciais, havendo também diminuição significativa na energia interna e tensões internas pelo encontro de discordâncias de sinais opostos. O segundo é a recristalização, em que ocorre a formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação, em razão de alterações microestruturais, pois são nucleados novos cristais, sem deformação, que absorvem os deformados. A energia interna acumulada é aliviada e a textura de grão alongado é eliminada. O crescimento de grão, última etapa, consiste na continuação da recristalização e aumento do tamanho de grão em função dos grãos vizinhos já cristalizados [2,5].

Algumas alterações mecânicas sofridas por aços carbono que passam por recozimento são: aumento de ductilidade, tenacidade ao impacto e diminuição da dureza. Espera-se que a resistência ao impacto das amostras tratadas termicamente seja superior aos laminados, resultado da formação austenítica durante o tratamento térmico de recozimento, formando ferrita primária e perlita no resfriamento. Logo o material terá grande capacidade de absorção de impacto antes de partir, esse tipo é denominado de fratura dúctil. O que se quer evitar é a fratura frágil, aquela que não necessita de grande quantidade de energia para propagar trincas, quando ocorre o rompimento sem nenhum alerta.

Este trabalho tem como objetivo avaliar as alterações provenientes do tratamento térmico como função do tempo e temperatura no aço ABNT SAE 1020, laminado, e relacionar alterações sofridas durante o tratamento e o efeito da mudança sofrida na microestrutura, tamanho de grão e rede cristalográfica com as propriedades mecânicas, entre elas a tenacidade ao impacto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Aço carbono

O aço tem um percentual de carbono em sua estrutura cristalina que varia de 0,008 a 2,11%. Em condições normais, aços hipoeutetoides possuem sua microestrutura composta por ferrita proeutetoide e perlita. No entanto, é possível alterar a morfologia destas fases através de tratamentos térmicos. O limite inferior de 0,008% representa a máxima solubilidade de carbono no ferro em temperatura ambiente, já o limite superior de 2,11% representa a quantidade máxima de carbono que se dissolve no ferro, em sua temperatura de 1148 °C [6].

Aços carbono podem ser divididos baseando no seu percentual de carbono, em baixo teor, inferior a 0,25%, médio teor entre 0,25 e 0,6%, e alto teor de carbono acima de 0,6% [7].

O carbono também funciona como mecanismo de aumento de dureza por solução sólida intersticial, uma vez que o átomo de carbono ocupa posições intersticiais na rede cristalina do Fe<sub>3</sub>, produzindo uma liga mais resistente que o ferro puro. Há estudos que mostram que a distribuição de soluto não é aleatória, os átomos se agrupam preferencialmente nas discordâncias, falhas de empilhamento, contorno de baixo ângulo, e contornos de grão. Contribuindo assim para o aumento da curva tensão-deformação, em razão do preenchimento dos interstícios com átomos de carbono [8]. Abaixo segue a Tabela 1 com a composição do aço SAE 1020.

TABELA 1. Dados da composição química do aço SAE-1020 [9].

Elemento	Concentração
Carbono (C)	De 0,18 a 0,23%
Manganês (Mn)	De 0,3 a 0,6%
Fósforo (P)	<= 0,030%
Enxofre (S)	<= 0,05%
Silício (Si)	<= 0,20%

Nota: Concentração de cada elemento presente no aço SAE 1020.

De acordo com a Tabela 1, o carbono possui concentração entre 0,18 e 0,23% presente no aço SAE 1020, com percentual de 0,2%. O manganês tem uma concentração entre 0,3 e 0,6%. O fósforo e enxofre apresentam concentração abaixo de 0,04% e 0,05%, respectivamente.

Na Tabela 2 as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 na condição laminado e recozido.

TABELA 2. Dados com as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 [10].

AISI	Condição	Resistencia a Tração (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Redução de Area (%)	Dureza (HB)	Impacto (HB)
1020	Laminado	450	330	36	59	143	87
1020	Recozido	395	295	36,5	66	111	123

Nota: Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

## 2.2. Encruamento

Durante o processo de laminação, em que o material sofre deformação plástica, ocorrem algumas alterações permanentes no cristal, como deslizamento de planos cristalográficos por movimentação de discordâncias, maclação, difusão e transformações de fases com grande variação de volume. No processo, o poli cristal sofrerá mudança na morfologia de grão, em sua orientação de direção preferencial, aumento da área de contornos de grão por unidade de volume, de defeitos puntiformes e discordâncias por unidade de volume. Todos esses fatores contribuem para o aumento do encruamento e, consecutivamente do limite de escoamento e o limite de resistência do material [1,5].

A maior parte da energia introduzida durante o processo é perdida via dissipação de calor. Nos aços de baixo carbono, durante a laminação para altas reduções, pode-se atingir uma temperatura de até 100 °C. Parte dessa energia gasta no processo, de 2 a 10%, fica armazenada como defeitos cristalinos. O defeito cristalino que mais contribui para o aumento da energia interna é a movimentação de discordâncias. Materiais trabalhados a frio devem sofrer deformação acima de 5% para ocorrer a recristalização de acordo com a Figura 1 [1,5].

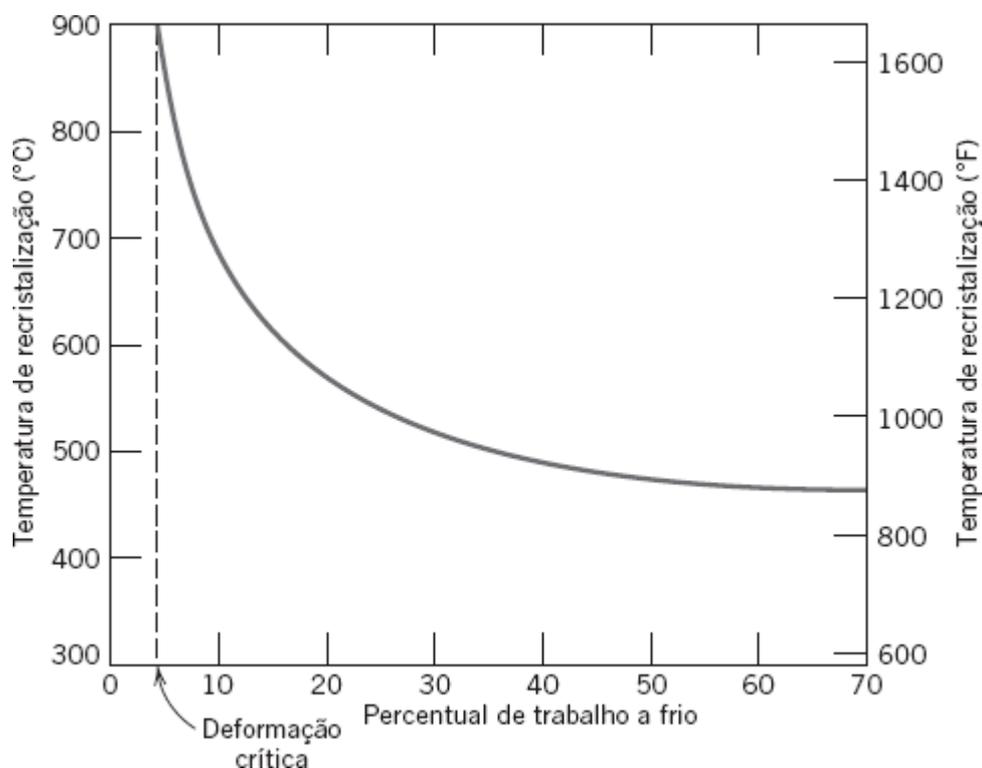


FIGURA 1. Variação da temperatura de recristalização em função do trabalho a frio para ferro [1].

O tamanho de grão inicial tem grande influência na quantidade de discordâncias por unidade de volume. Estudos mostram que matérias que sofreram mesmo grau de conformação mecânica têm diferentes densidades de discordâncias. Materiais que possuem tamanho de grão menor, apresentam maior número de densidade de discordâncias. Existe uma relação entre deformação ( $\epsilon$ ), tamanho do grão ( $d$ ), e densidade de discordâncias ( $f$ ) para ferro puro, onde ( $k_1$ ) e ( $n$ ) são constantes dependentes do modo de deformação e ( $b$ ) é o módulo de Burgers.[5] conforme a Equação 1:

$$f = \frac{\epsilon}{k_1 * b} * \frac{1}{d^n} \quad (1)$$

## 2.3. Tratamento térmico de recozimento

A realização do recozimento tem como fim alcançar alguns objetivos, como remover tensões internas a frio ou a quente devido a deformação plástica, diminuição de dureza para melhor usinabilidade, alterar propriedades mecânicas como resistência e ductilidade. Ocorrem ajustes na microestrutura, como tamanho de grão, regularização da textura, remoção de gases, e produção de uma microestrutura homogênea eliminando defeitos sofridos por tratamento térmico ou mecânico anteriormente [1,11].

Há cinco tipos de recozimento:

1. Recozimento Pleno: Consiste no aquecimento de Fe<sub>3</sub>C 50 °C acima da zona crítica A<sub>3</sub> para um aço hipoeutetóide, durante tempo suficiente para se ter solução de carbono, seguido de um resfriamento muito lento,

realizado via controle de velocidade ou até mesmo desligando o forno e deixando resfriar conforme o forno dissipa calor. Os constituintes do recozimento são perlita e ferrita para aços hipoeutetóides. A perlita é a estrutura ideal para melhorar a usinabilidade [7,11].

2. **Recozimento Cíclico:** Consiste no aquecimento do aço na mesma forma que o pleno, seguido de um resfriamento rápido até uma temperatura dentro da faixa de transformação isotérmica, onde é mantido até completa transformação e logo em seguida resfriado até temperatura ambiente. Os resultados são também perlitas e ferritas [7,11].

3. **Recozimento Para Alívio de Tensões:** O aço é aquecido até o limite inferior da zona crítica  $A_3$ . O objetivo é aliviar tensões provenientes de solidificação ou de trabalho mecânico a frio, como estampagem, ou corte por chama, soldagem ou usinagem. As tensões começam a ser aliviadas já próximo à temperatura ambiente, mas o ideal é aquecimento lento até 500 °C [7,11].

4. **Recozimento em Caixa:** Esse tratamento é feito com objetivo de proteção de grandes números de peças de aço, para impedir e proteger a superfície do aço pela oxidação ou outro tipo de tratamento. Geralmente se faz aquecimento lento até temperatura abaixo da zona crítica, de 600 °C a 700 °C [7,11].

5. **Esferoidização:** É o aquecimento, seguido de resfriamento com objetivo de produzir forma globular ou esferoidal de cementita na matriz de ferrita. Uma das formas de produzir é aquecer logo acima da linha inferior de transformação, seguido de resfriamento lento. É recomendado para melhorar a usinabilidade de aços de alto carbono [7,11].

O diagrama ferro carbono com as suas fases pode ser observado pela Figura 2 [12].

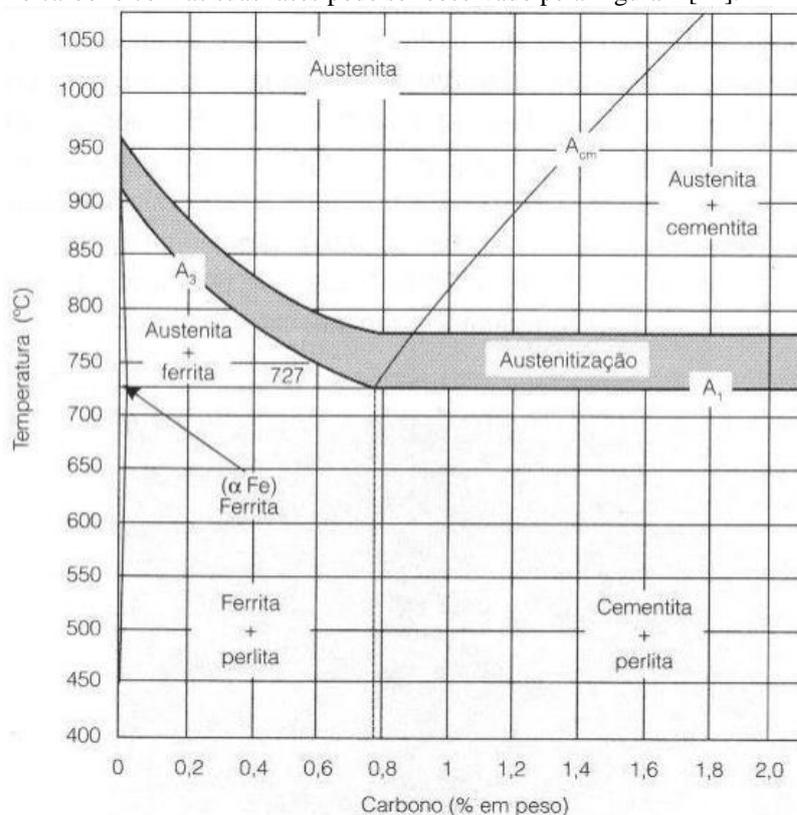


FIGURA 2. Diagrama de fase do sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C [12].

#### 2.4. Recuperação, Recristalização (nucleação e crescimento de grão) e Crescimento de grão acentuado

Em geral, ocorre a recuperação e logo em seguida o processo de recristalização que pode ser subdividido em três etapas: Nucleação, Recristalização propriamente dita e crescimento de grão. Durante a recuperação, ocorrem mudanças microestruturais que levam a uma restauração das propriedades. Em temperaturas maiores que 0,2  $T_f$  ( $T_f$  = fusão absoluta), ocorre a migração de defeitos puntiformes para contornos de grão e discordâncias, há também a eliminação de interstícios e lacunas [1,5].

As discordâncias do interior vão para as paredes, aniquiladas, deixam os subgrãos mais nítidos e maiores, surgindo assim contornos de grão com grandes ângulos, e tornando os subgrãos núcleos para o crescimento de novos grãos recristalizados. A recristalização é a próxima etapa, pois a recuperação ocorre em temperaturas mais baixas [1,5,13].

Mesmo após a recuperação, os grãos ainda apresentam um estado de energia de deformação elevada. Agora na recristalização, que se trata principalmente de um processo de mudança de fase, através de nucleação e crescimento de grão. É formado um novo conjunto de grãos livres de deformação e equiaxiais, com baixas

discordâncias, com características parecidas das que existiam antes da deformação. Durante o recozimento, a taxa de recristalização decresce devido a eliminação de discordâncias, como também redução de área deformada, substituídas por novas. As soluções sólidas têm efeito de retardar a migração dos contornos, já a nucleação e crescimento que são ativadas pela temperatura, são aceleradas conforme o aumento da temperatura [1,5,13].

A nucleação é o início do processo de recristalização, onde é formado uma região livre de defeitos associada a um contorno de alto ângulo, baixa densidade de discordâncias, e com alta mobilidade, sendo capaz de migrar rapidamente sobre a matriz encruada. Os núcleos que originam os novos grãos recristalizados são formados durante o recozimento, mas passam a existir na deformação. Envolve a migração de um contorno de grão pré-existente para o interior de um mais deformado. A condição para o processo é o balanço energético favorável, através da eliminação de defeitos e aumento total da superfície do grão, pelo “embarrigamento” [1,5,13].

O crescimento de grão, a última etapa do processo, ocorre depois que os grãos estão livres de deformação e se o material for deixado em temperatura elevada. O mecanismo fundamental, é a migração de contornos de alto ângulo. O crescimento está associado com contornos de grão de maneira que à medida que os grãos aumentam, a área de contorno diminui bem com a energia associada. O crescimento ocorre pela migração dos contornos. Os grãos maiores crescem em função da absorção dos grãos menores, que encolhem. À medida que a temperatura aumenta, o crescimento ocorre mais rapidamente. A manutenção da temperatura é etapa fundamental para o crescimento, o que é explicado pelo aumento da taxa de difusão em função da temperatura [1,5,13].

### 2.5. Tenacidade ao impacto

Tenacidade ao impacto, mede a resistência de um material à propagação de uma trinca pré-existente. As trincas atuam como concentradores de tensão, e fazem com que o material se rompa com carga menor que a tensão de escoamento. A tenacidade pode ser mensurada através da quantidade de energia absorvida em um ensaio de impacto. [14]

A fratura consiste na separação do corpo em duas partes quando está sob ação de esforço mecânico. Existem dois tipos de fratura: dúctil e a frágil.

O principal fator para uma fratura ser definida como dúctil é a ocorrência prévia de deformação plástica em detrimento da propagação de trincas. O que ocorre é uma lenta propagação de trincas, enquanto o material se deforma plasticamente. Visualmente é caracterizada por uma superfície deformada e opaca. Os modos típicos mais comuns de se observar fratura dúctil, são: [15]

- a) Afilamento gradativo da região tensionada até que ocorra a separação do corpo.
- b) Formação de uma superfície deformada, com vários pontos de clivagem.

Já a fratura frágil, o principal fator para ser definida como tal, é a ocorrência prévia de trincas em relação a deformação plástica. Ocorre uma rápida formação de trincas, levando a ruptura do material sem nenhuma deformação plástica previamente. Visualmente é caracterizada pela fratura ser perpendicular à força aplicada, com aspecto brilhoso [15].

Pode ocorrer a fratura de duas formas, a primeira transgranular, caracterizada pela separação de planos atômicos, fato que faz com que essa cisão passe por dentro do grão que forma o material, revelando uma textura superficial facetada. A segunda, intergranular, caracterizado pela separação dos grãos e as trincas se propagando nos contornos do grão [15].

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi uma barra chata laminada de aço ABNT SAE 1020 adquirida no comércio local, com dimensões de 1/2” x 2 1/2”. Esta barra foi cortada, e dividida em sete amostras de 100 mm x 12,7mm cada, das quais uma foi mantida sem tratamento térmico, como referência, e seis foram levadas ao forno para recozimento em tempos e temperaturas diferentes, como segue: três amostras à 890°C, em tempos de uma hora, duas horas, e três horas, com a última sendo resfriada ao forno até temperatura ambiente. As outras três amostras foram levadas ao forno a 970°C, em tempos de uma hora, duas horas, e três horas, com a última também sendo resfriada ao forno. Para todos os tratamentos de recozimento, as amostras foram colocadas dentro do forno somente quando o forno já se encontrava na temperatura do tratamento planejado.

Após recozimento, todas as amostras, inclusive a amostra de referência (sem recozimento), foram cortadas transversalmente e usinados, corpos de prova do tipo A para ensaio de impacto Charpy, com dimensões de 10mm x 10mm x 55mm e entalhe em V com 2mm de profundidade e 45°, em conformidade com a norma ASTM E23-02 [16]. Foram confeccionados cinco corpos de prova Charpy para cada condição [17].

Os ensaios foram feitos em uma máquina de ensaio Charpy do fabricante Time Group INC® modelo JB-W300 A com pêndulo de 300 J.

Finalizados os ensaios de impacto, avaliou-se o aspecto das fraturas e presença (ou não) de deformação plástica de todos os corpos de prova.

Posteriormente, foi escolhida uma amostra de cada condição e foram preparadas para metalografia. Foi realizado o corte através da cortadora metalográfica e posteriormente lixadas com refrigeração d'água com granulometria de 400, 600, 800 e 1200. Em seguida as amostras foram polidas com sílica coloidal e feito o ataque químico com imersão da peça em nital a 2% com tempo entre 10 e 15 segundos.

As amostras foram analisadas em um microscópio óptico, com lentes do fabricante Olympus Corporation®, modelo GX51. Foram feitas imagens da secção transversal, em aproximação de 200x, totalizando 7 imagens.

#### 4. RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados de micrografia para amostra encruada e recozidas em uma, duas e três horas à 890°C e 970°C para relacionar com os dados de energia ao impacto.

##### 4.1. Microestrutura

Através das imagens de microestrutura abaixo foram feitas análises qualitativas dos constituintes. Foi observada e digitalizada todas as amostras recozidas em diferentes tempos e temperaturas com aumento de 200x, com objetivo de observar tamanho de grão, orientação e contorno de grão. É possível observar os constituintes nas Figura 3 e Figura 4.

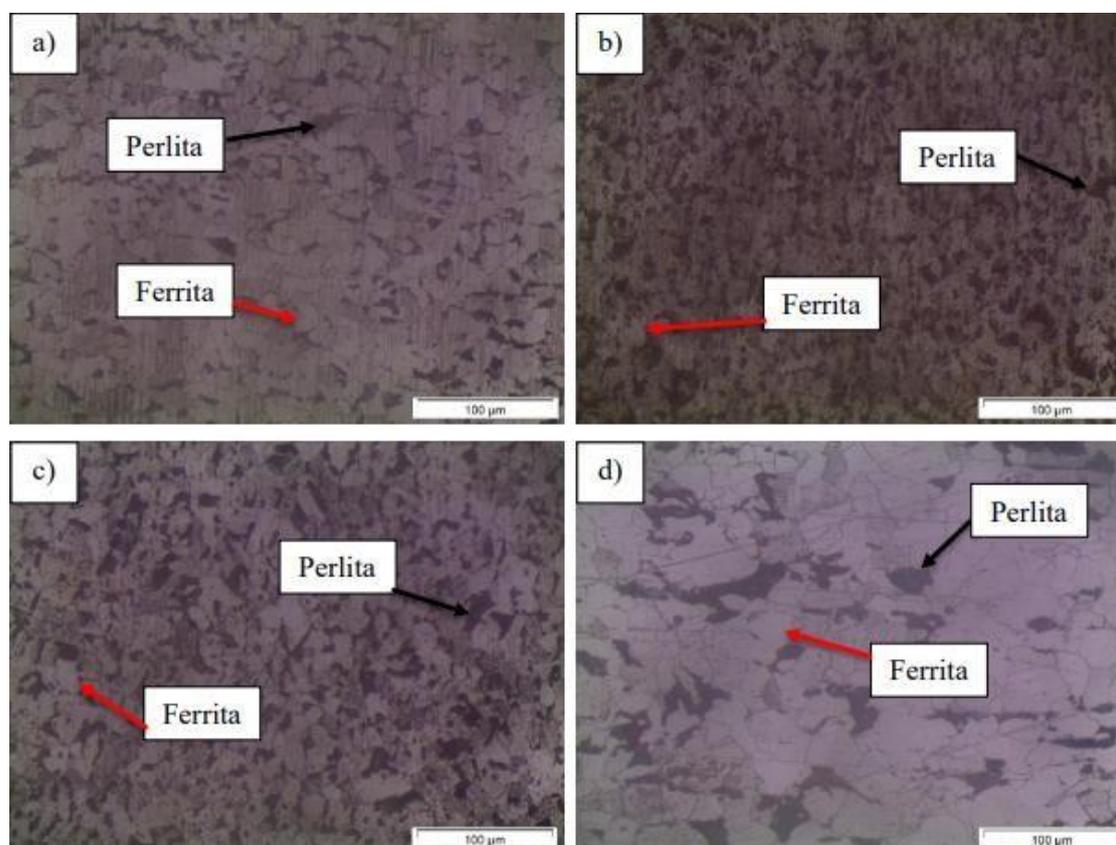


FIGURA 3. Micrografia, com aumento de 200x, a) encruada, b), c) e d) recozidas à 890°C por 1h, 2h e 3h respectivamente. Todas imagens transversais (Autoria Própria).

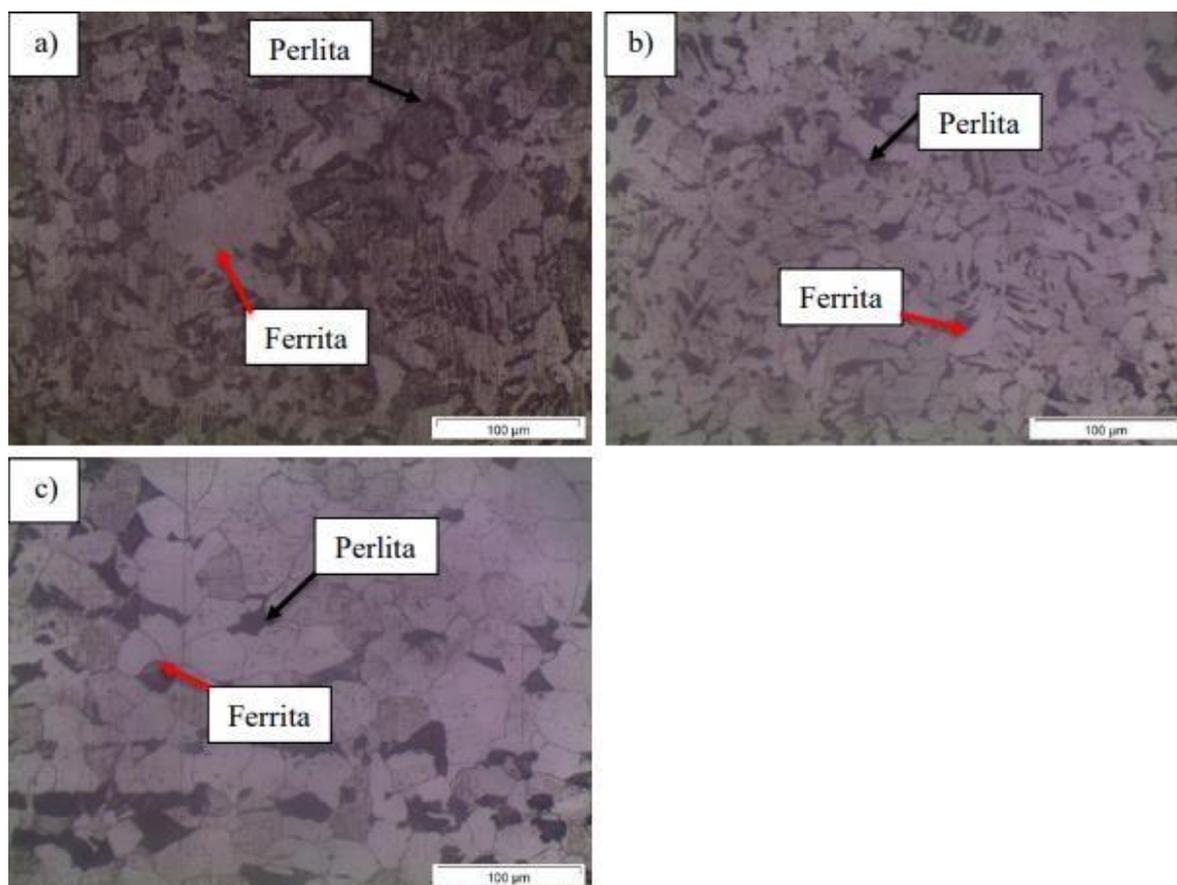


FIGURA 4. Micrografia com aumento de 200x a), b) e c) recozidas à 970°C por 1h, 2h e 3h. Todas imagens transversais (Autoria Própria).

Na Figura 3a a amostra encruada foi constatado um grão menor em relação às amostras as que passaram por tratamento térmico.

Na Figura 3b é possível visualizar que se iniciou o processo de recristalização, de modo que se deu o início da formação de um novo conjunto de grãos que tendem a serem equiaxiais, com a ferrita ligeiramente maior.

Na Figura 3c, na segunda hora o aço começou a sofrer o processo de crescimento de grãos, no qual os grãos de perlita crescem mais rapidamente. Já na Figura 3d, na terceira hora o processo de crescimento de grão continua formando um novo conjunto de grãos, com uma granulação grosseira, em virtude do demasiado tempo ao forno.

Já nas amostras que passaram pelo tratamento em 970°C, o processo foi o mesmo. Visivelmente pode-se observar na Figura 4c, grãos de perlita muito maior do que na Figura 4a e 4b, com tratamento de uma hora e duas, respectivamente.

#### 4.2. Ensaio de Impacto Charpy

A Tabela 3, mostra os valores das médias e desvio padrão de tenacidade ao impacto obtidas através do ensaio Charpy.

TABELA 3. Dados de energia de impacto e tamanho de grão do aço SAE 1020 (Autoria Própria).

Amostra	Energia de Impacto (J)
Encruado	44 ± 4,70
Recozido 1h – 890°C	58 ± 3,30
Recozido 2h – 890°C	60 ± 10,2
Recozido 3h – 890°C	77 ± 14,3
Recozido 1h – 970°C	73 ± 4,80
Recozido 2h – 970°C	67 ± 4,60
Recozido 3h – 970°C	52 ± 11,2

Observa-se, para situação de recozimento a 890°C por 1 (uma) hora, que ocorreu um aumento de tenacidade ao impacto em relação a amostra encruada. Quanto mais acima da temperatura de austenitização e

mais tempo no tratamento, maior o tamanho de grão e alterações nas propriedades mecânicas.

Nas amostras de 970°C fica claro o decréscimo de tenacidade sofrido pela amostra, proveniente do grão muito crescido, conseqüentemente com menor número de contornos de grão que agem como barreiras para propagação da trinca, tornando o material mais suscetível a trincas intergranular que se propagam por contornos de grão.

Na Figura 4, tem-se o gráfico de tenacidade ao impacto em barra para cada condição. O gráfico de barra foi construído com os valores de energia ao impacto de cada condição. Cada barra do gráfico apresenta os valores máximos e mínimos e os quartis um, dois e três.

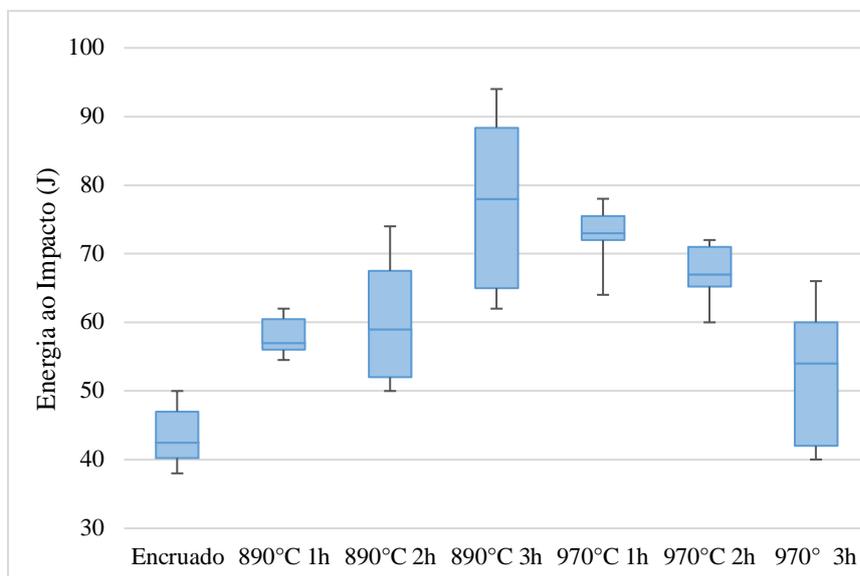


FIGURA 5. Gráfico com quartis 1, 2 e 3 com valores máximos e mínimos da tenacidade ao impacto das amostras: encruada e recozidas a 890°C e 970°C em tempos de uma, duas e três horas (Autoria Própria).

Foi realizado o teste t de student unicaudal para um p-valor de 0,05 entre todas as amostras. É possível afirmar que existe uma diferença entre a amostra encruada em relação a recozida 1h a 890°C. A amostra recozida 1h à 890°C em relação a recozida 2h a 890°C apresentou igualdade entre os dois grupos. A amostra recozida 2h à 890°C em relação a 3h 890°C apresentou diferença entre os grupos. Para a amostra recozida por 3h a 890°C em relação às amostras recozidas por 1h e 2h à 970°C o teste revelou uma igualdade entre os dois grupos. Já para recozida em 1h à 970°C em relação às amostras de 2h e 3h à 970°C é possível dizer com 95% de confiança que os dados são diferentes.

Pode ser observada o modo da fratura pelas Figura 5 e Figura 6.

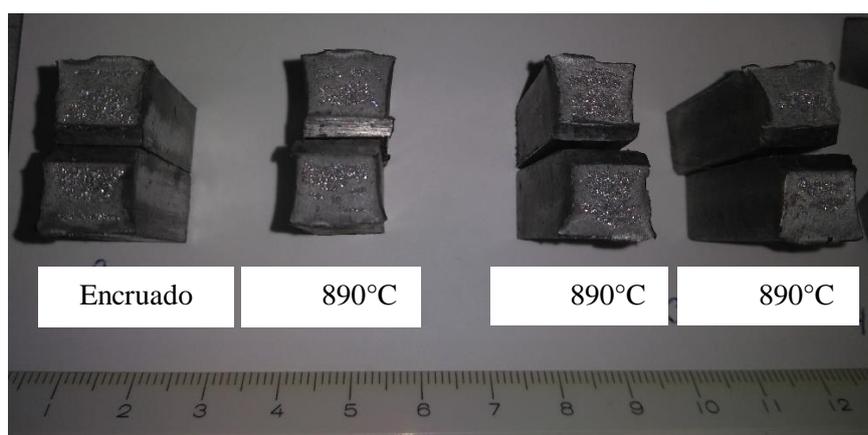


FIGURA 6. Seções fraturadas dos corpos de prova para cada condição (Autoria Própria).

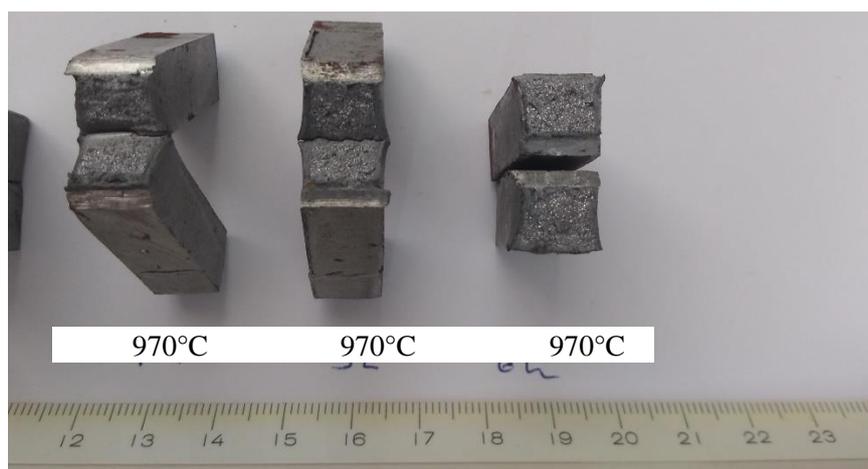


FIGURA 7. Seções fraturadas dos corpos de prova para cada condição (Autoria Própria).

Na Figura 5 e 6 é possível avaliar as seções fraturadas de cada condição ensaiada. A amostra encruada apresenta uma superfície lisa e brilhante, características de uma fratura frágil. As recozidas a 890°C 1h começam a apresentar algumas deformações na borda da superfície, juntamente com superfície mais opaca nas bordas. Já as recozidas 890°C 2h ainda apresentam uma superfície brilhante característica de fratura frágil com deformações na borda. As recozidas 890°C 3h resfriadas ao forno, apresentam uma predominância de superfície opaca, característica de uma fratura dúctil. [18]

Nas amostras recozidas a 970°C 1h e 2h, muitas delas não chegaram a romper completamente, e apresentam uma superfície brilhosa ao centro e opaca nas bordas, caracterizando uma fratura dúctil-frágil. Já a amostra, recozida à 970°C 3h e resfriada ao forno, tem predominância de superfície brilhosa, característica de fratura frágil. [15]

Os resultados se mostram de acordo com a literatura para a primeira condição, provavelmente ocorreu a recristalização e em seguida o crescimento de grão, que não foi suficiente para comprometer a tenacidade ao impacto. Já na segunda condição, a temperatura mais elevada ocasionou um grão muito crescido que foi suficiente para comprometer a tenacidade ao impacto. [1]

As amostras da primeira condição se comportaram de maneira semelhante ao estudo [19], de forma que ocorreu aumento de tenacidade ao impacto com o aumento do tempo. Já as amostras da segunda condição se comportaram de maneira semelhante à observada em outro estudo [7], a tenacidade ao impacto se apresentou menor em função do grão muito crescido.

## 5. CONCLUSÃO

A amostra encruada na figura 3, é a que apresenta menor capacidade de absorver impacto, apresentando uma fratura frágil, caracterizada por ser reta e brilhante. A amostra encruada apresentou uma absorção de energia de 44J em média.

Os tratamentos térmicos de recozimento à 890°C durante uma, duas e três horas realizados nas amostras promoveram o crescimento do tamanho de grão, promovendo uma maior ductilidade para o material, ou seja, maior capacidade de sofrer deformação antes da ruptura. As amostras apresentaram uma absorção de energia de 58J, 60J e 77J em média, respectivamente.

As amostras recozidas a 890°C em uma e duas horas e três horas, apresentaram um aumento da ductilidade em relação a encruada. Pode-se observar uma pequena mudança na superfície da fratura, apresentando mais opacidade próxima às bordas.

A amostra recozida a 970°C em uma hora foi a que apresentou maior ductilidade entre todas nessa temperatura, pois provavelmente só passou pelo processo de recristalização e um leve crescimento de grão. Ao contrário das recozidas a 970°C em duas e três horas, que sofreram recristalização, mas sofreram com um crescimento de grão muito mais acentuado. Que foi responsável pela perda de tenacidade, proveniente do invólucro contínuo e frágil de carboneto. A absorção de energia ao impacto foi de 73J, 67J e 52J em média respectivamente.

Apesar das últimas amostras terem comprometido a tenacidade em relação a recozida a 970°C 1 hora, ainda assim, apresenta uma fratura muito mais dúctil em relação às outras. Fica claro a fratura dúctil, pois muitas amostras não sofreram a ruptura completa, e apresentam bastante deformação, juntamente com uma superfície mais opaca.

## REFERÊNCIAS

- [1] Callister Jr., William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8rd ed; LTC Editora, Brasil, 2012. 809 p.
- [2] BRUNA, Roberto Gerardo. *Effects of hot and warm rolling on microstructure, texture and properties of low carbon steel*. Metallurgy and materials, Minas, Ouro Preto, 2011.
- [3] N.K., Tewary. *Influence of cold rolling on microstructure, texture and mechanical properties of low carbon high Mn TWIP steel*. Materials Science & Engineering A, India, 2 ago. 2014.
- [4] RAHMAN, S.M. Mahbobur. *Effect of Heat Treatment on Low Carbon Steel: An Experimental Investigation*. Trans Tech Publications, Ltd, [s. l.], 2016.
- [5] PADILHA, Angelo F.; SILICIANO JR, Fulvio. *Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura*. 3rd ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasil, 2005.
- [6] FAILURE *Analysis and Prevention*. ASM - Metals Handbook, Ohio, v. 9, 1986.
- [7] PANDOLFO, DIOGO. *Estudo Da Tenacidade Ao Impacto De Um Aço Sae 1020 Submetido A Tratamentos Térmicos*. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2009.
- [8] DIETER, George E. et al. *Metalurgia Mecânica*. 2rd ed. Guanabara Koogan, Brasil, 2012.
- [9] ARCELORMITTAL. *Guia do Aço: Aços Longos*. [S. l.: s. n.], 2020. 136 p.
- [10] *Propriedades Mecânicas Dos Aços*. [S. l.], [2015]. Disponível em: <http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- [11] CHIAVERINI, Vicente. *Aços e Ferros fundidos*. 7rd ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasil, 1996.
- [12] SHACKELFORD, James F. *Ciência dos materiais*. 6rd ed. Pearson Education do Brasil, Brasil, 2008. 556 p.
- [13] BUTTON, Sergio. *Recozimento de Materiais Metálicos*. In: APOSTILA Button Unicamp. [S. l.: s. n.], [2010].
- [14] SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. *Aços e ligas especiais*. 4rd ed. Editora Blucher, Brasil 2021.
- [15] G A DA SILVA, Hugo; A R NETO, Eféisio; DI B ESTEVES, Paulo. *Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV)*. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.
- [16] ASTM E23-02, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [17] A.T., Koike; R.C, Tokimatsu; F.C., Nogueira; S. I., Irikura. *A INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA APARENTE DO AÇO ABNT 4340*. CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.
- [18] LOPES FERNANDES DE SOUZA, Thaís. *Análise comparativa da resistência à fratura dos aços SAE 1020 e SAE 4140*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [S. l.], 2017.
- [19] ALVES DE OLIVEIRA, Dyana; EDSON NOGUEIRA FRAGA, Francisco. *Influência Do Tempo De Recozimento Sobre A Recristalização E Tenacidade Ao Impacto De Um Aço Baixo Carbono*. Projeto de Graduação – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2019.

Artigo

# Estimação de estado em redes de distribuição de energia elétrica com geração distribuída

Gabriel Luiz D. L. Nogueira <sup>[1]</sup>, Adriano Aron Freitas de Moura <sup>[2]</sup> e Ednardo Pereira da Rocha <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; gabrieldantas503@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Recebido: 30/09/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

**Resumo:** A estimação de estado é uma técnica que facilita a operação e supervisão de sistemas elétricos de potência, uma vez que o uso indiscriminado de equipamentos de medição em redes de distribuição é limitado pelos seus custos de implantação, tornando inviável o acompanhamento em tempo real do estado do sistema em todas as barras. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos da injeção de corrente em pontos variados de uma rede de distribuição modelada no *software* ATPDraw, para fins de simulação dos impactos da geração distribuída, e comparar os resultados com os valores calculados do estimador de estado utilizando um método baseado na *Ladder Iterative Technique*. Os resultados obtidos mostraram erros na faixa dos 10%, para simulações que envolvem níveis leves e medianos de injeção de corrente na rede. No entanto, foram verificados erros elevados no módulo da corrente elétrica medida no ramo 20, em comparação com os dados do estimador de estado, atingindo valores acima de 40%. Por outro lado, foram observadas baixas variações de tensão entre os casos analisados, comparando as informações resultantes do estimador de estado e as magnitudes de tensão obtidas pelo ATPDraw.

**Palavras-chave:** estimação de estado; redes de distribuição; geração distribuída.

**Abstract:** State estimation is a technique that facilitates the operation of power electrical systems, since the indiscriminate use of measuring equipment in distribution are limited by its implementation costs, making real time monitoring of the system status in all bars unfeasible. The objective of this work is to analyze the current injection at multiple points in a distribution grid modeled in the ATPDraw software, for the purpose of simulating the impacts of distributed generation, and compare the results of the calculated values by the state estimator using a method based on the ladder iterative technique. The obtained results showed errors in the 10%, range for simulations involving lower and medium levels of grid current injection. However, high errors were verified in the electric current magnitude measured at branch 20, compared to the data from the state estimator, reaching values over 40%. Meanwhile, small voltage variations were observed among the cases analyzed, comparing the information resulting from the state estimator and the voltage magnitudes obtained by ATPDraw.

**Key-words:** state estimation; distribution systems; distributed generation.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a criação dos primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica, em corrente contínua, no final do século XIX, estes vêm sendo aprimorados de forma a melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica para a população. Na medida em que a população mundial cresce e, conseqüentemente, com o aumento da demanda de energia a ser gerada, inúmeros problemas associados surgiam. Técnicas de aperfeiçoamento e planejamento dos processos de operação nos sistemas de geração, transmissão e distribuição foram desenvolvidas. Nos dias atuais, métodos de estimação de estado e fluxo de carga para a determinação dos níveis de tensão nos nós do sistema elétrico são utilizados para supervisão e operação nos sistemas [1].

A estimação de estado em particular, segundo [2], os constantes blecautes nos Estados Unidos nos anos 60 motivaram a revisão nos métodos de controle e segurança operativa nos sistemas de potência praticadas na época, que eram compostos por sistemas de controle da posição dos disjuntores nas subestações e da geração e o despacho econômico. Os métodos de estimação de estado possuem divergências na determinação de estado

em sistemas de transmissão e em distribuição por uma série de motivos e, portanto, não podem ser compartilhados [3].

De acordo com [4], a estimação de estado em sistemas de distribuição requer a medição de dados em tempo real, com a aplicação de algoritmos e é motivada basicamente pelo fato de que os alimentadores em sua grande maioria, não possuem equipamentos de medição, ficando as medições neste tipo de sistema limitadas somente a um medidor na saída da subestação. Isso compromete a observabilidade do sistema em outros nós na rede, sendo necessária a utilização de pseudomedidas, provenientes de dados históricos ou previsões de carga e geração [4].

Atualmente, ter acesso a medidas aproximadas em tempo real, de cada nó, é essencial para o operador ter uma noção aproximada das condições do sistema uma vez que a medição física das variáveis de estado está limitada a altas temperaturas, partes móveis, alto custo e alto grau de insalubridade [5]. Dentre alguns dos trabalhos disponíveis na literatura e voltados para estimação de estados em redes de distribuição, está o modelo de estimação de estados em redes de distribuição com base no algoritmo que calcula os fluxos de carga pelo método da soma de potências voltado para redes de distribuição radiais [6]. Posteriormente, [7] aperfeiçoou o modelo de estimação desenvolvido por [6], realizando um tratamento considerando um modelo trifásico.

Uma contribuição interessante também foi realizada por [2], ao desenvolver estimador de estado em versões balanceadas e desbalanceadas para calcular o ponto de operação do sistema a partir do fornecimento de um plano de medidas. E, como base para este trabalho, [1] desenvolveu um estimador de estado trifásico utilizando o método da soma de correntes, no qual é realizada a varredura no sistema (*Backward-Forward Current Sweep*).

Com a popularização da energia fotovoltaica no Brasil, os impactos dos geradores na rede de distribuição são cada vez mais visíveis para a concessionária. Dessa forma, outra perspectiva que pode ser observada como forma de aprimoramento do estimador de estado desenvolvido por [1], é a inserção da geração distribuída no modelo da rede de distribuição a ser utilizado como base para o algoritmo desenvolvido. Vê-se, portanto, a necessidade de se analisar as influências desses geradores no processo de estimação de estado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste numa pesquisa do tipo bibliográfica, no qual o embasamento teórico para o a utilização e entendimento da teoria da estimação de estado em redes de distribuição e manuseio das funções específicas dos *softwares* necessárias para a pesquisa foi retido de trabalhos disponíveis na literatura geral. Foi utilizado um método hipotético-dedutivo, no qual foi expectado um efeito de redução da corrente total fornecida pela subestação, devido à injeção de potência nas barras da rede, e principalmente, uma baixa divergência entre o valor registrado nos medidores disponíveis no sistema (alimentador da subestação e ramo 2) e o valor calculado pelo estimador de estado.

Possui uma abordagem quantitativa, no qual foi utilizado como base para esta pesquisa uma rede de distribuição modelada no *software* ATPDraw (Figura 1) por [1]. Foram injetados geradores nas barras 5, 22, 36, 42 e 46 do modelo, que foram representados na simulação por fontes de corrente. Foram coletados os valores trifásicos da corrente registrada no alimentador da subestação mediante a inserção dos geradores. Esses dados foram atribuídos ao algoritmo do estimador de estado — também desenvolvido por [1] no *software* MATLAB — que, por sua vez, foi programado para calcular as correntes no ramo 20 e na barra do alimentador (subestação), do qual foi possível verificar o quão próximo os valores calculados pelo estimador ficaram dos valores obtidos nos medidos disponíveis.

As adaptações necessárias para simular a injeção de correntes nas barras foram realizados no processo do *backward/forward sweep*, integrado ao processo de estimação de estado linear, conforme passos listados a seguir:

- Ler os dados de entrada do sistema: Os arquivos de dados são subdivididos em dados de nós e os dados de ramos, contendo informações das demandas e parâmetros das linhas, respectivamente;
- Inicializar o contador de iterações  $t = 0$ ;
- Assume-se o perfil plano das tensões nodais,  $V_n$ , como sendo o valor da tensão da subestação onde se inicia o alimentador, considerando que não há correntes de carga e nem nos trechos;
- Calcular as correntes nas cargas  $I_n$  através da expressão  $I_n^t = \left(\frac{S_n}{V_n^t}\right)^*$ , sendo  $S_n$  a demanda da barra  $n$ , para cada fase, na primeira iteração  $t$ ;

- Calcular as correntes injetadas nas barras, através da expressão  $I_g^t = \left(\frac{S_n}{V_n^t}\right)^*$ , para cada fase, na primeira iteração  $t$ ;
- Dos nós finais até a subestação, calcular as correntes dos ramos do sistema. Este processo também é conhecido como *backward sweep*. Logo, no caso de dois ramos consecutivos  $l-m$  e  $m-n$ , a corrente do ramo  $J_{lm}^t$  é dada por:

$$J_{lm}^t = I_m^t + \sum_{n \in M} J_{mn}^t \quad (3.6)$$

Onde  $M$  é o conjunto dos ramos conectados ao nó  $m$ .

- Partindo do nó da subestação, calcular as tensões dos nós a jusante, considerando a tensão nominal na barra da subestação e uma corrente de saída como sendo a corrente total acumulada no passo anterior, da seguinte forma:

$$V_m^t = V_l^t - Z_{lm}^t \cdot I_m^t \quad (3.7)$$

- Com as novas tensões dos nós definidas, calcular as novas correntes por meio da equação  $I_n^{t+1} = \left(\frac{S_n}{V_n^t}\right)^*$ ;
- O procedimento de varredura é repetido até que a diferença de tensão entre a iteração  $t$  e  $t-1$  seja menor que uma tolerância especificada.

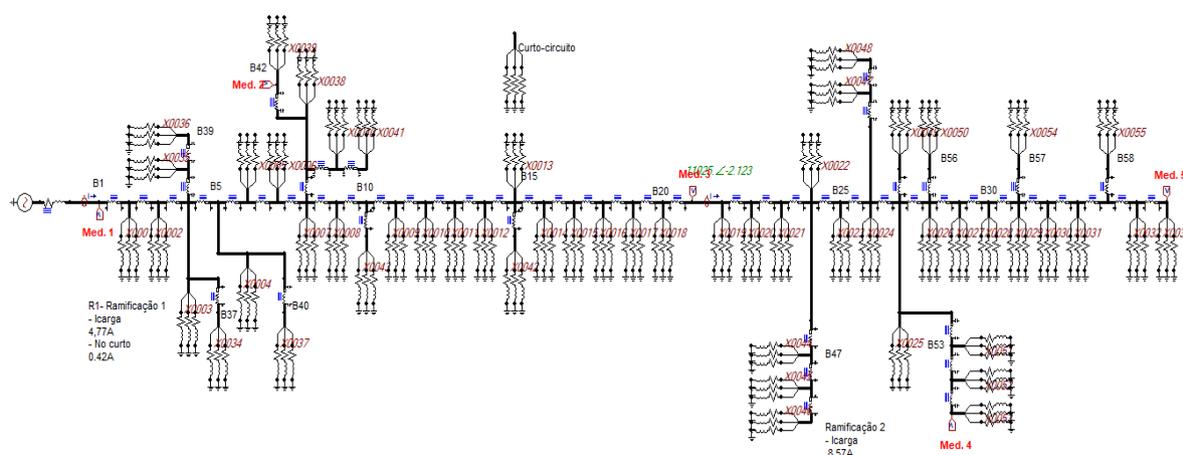


FIGURA 1. Alimentador real de distribuição de 58 barras modelado no *software* ATP [1].

A partir disso, foram projetados três cenários: inicialmente, foram inseridas fontes de corrente de 10 A, à 13,8 kV em cada barramento citado, e em seguida, analisado o efeito individual na corrente do alimentador da subestação e os respectivos erros com relação os valores estimados e medidos. Em uma segunda situação, foram injetados geradores de 20 A nas mesmas barras e analisado os seus efeitos individualmente. Por fim, foram analisados os efeitos da injeção simultânea dos geradores na rede (com 10 A e 20 A cada gerador). Para a análise das tensões, foram utilizados como base os cinco medidores já dispostos no modelo do sistema (barras 1, 21, 36, 42 e 55), do qual foram quantificados e analisados os erros entre os dados medidos e estimados.

Foi realizado, o estudo dos efeitos obtidos em cada cenário e a comparação entre o obtido, o esperado e se os dados fazem sentido com a teoria utilizada, caracterizando a pesquisa como descritiva. Por fim, este trabalho, quanto à sua finalidade, é do tipo básica estratégica, pois expande as aplicações da estimação de estado em sistemas de distribuição para o âmbito da geração distribuída e deixa espaço para exploração e aprimoramento da técnica em estudos futuros.

### 3. RESULTADOS

Os cenários criados para a análise dos efeitos da injeção de corrente (geração distribuída) no modelo da Figura 1, tiveram como base de comparação apenas os dados do medidor do ramo 20 e seus respectivos valores estimados no estimador de estado, pois os erros registrados entre os valores medidos e estimados no alimentador

(ramo 1) foram iguais a zero em todos os cenários. Coerente com o que se espera, uma vez que o algoritmo do estimador utiliza como parâmetro utiliza as correntes trifásicas do alimentador para iniciar o processo de estimação.

### 3.1 Cenário 1: Análise dos efeitos da injeção individual de geradores de 10A

Tabela 1 mostra a comparação entre os valores estimados e medidos corrente (três fases) no ramo 20 e os respectivos erros obtidos. A Tabela 2 por sua vez, mostra essa comparação com os valores de tensão medidos pelos medidores dispostos no sistema (alocado na barra indicada) e seus respectivos erros e valores de tensão estimados. Ambos os casos, mediante a inserção de corrente nas barras anteriormente mencionadas.

TABELA 1. Valores medidos e estimados do corrente no ramo 20 a partir da injeção de 10 A (autoria própria).

Barra de injeção	Fase A			Fase B			Fase C		
	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO
22	76,62 A	77,43 A	1,0461%	78,49 A	78,66 A	0,2161%	79,06 A	79,21 A	0,1894%
46	82,81 A	83,83 A	1,2167%	84,68 A	85,22 A	0,6337%	85,24 A	85,77 A	0,6179%
36	76,70 A	77,80 A	1,4139%	78,57 A	78,70 A	0,1652%	79,14 A	79,24 A	0,1262%
5	82,76 A	88,08 A	6,0400%	84,62 A	89,35 A	5,2938%	82,19 A	89,92 A	8,5965%
42	82,77 A	86,90 A	4,7526%	84,63 A	88,15 A	3,9932%	85,20 A	88,72 A	3,9675%

TABELA 2. Valores medidos e estimados da tensão a partir da injeção de 10 A nas barras (autoria própria).

Medidor (Barra)	Tensão	Barra de injeção				
		22	46	36	5	42
Medidor 1 (Barra 1)	Medida (kV)	13,932	13,932	13,932	13,932	13,932
	Estimada (kV)	14,100	14,100	14,100	14,100	14,100
	ERRO (%)	1,1915	1,1915	1,1915	1,1915	1,1915
Medidor 2 (Barra 42)	Medida (kV)	13,765	13,766	13,765	13,763	13,766
	Estimada (kV)	13,942	13,942	13,948	13,940	13,942
	ERRO (%)	1,2695	1,2624	1,3120	1,2697	1,2624
Medidor 3 (Barra 21)	Medida (kV)	13,519	13,514	13,520	13,506	13,507
	Estimada (kV)	13,704	13,700	13,714	13,686	13,690
	ERRO (%)	1,3500	1,3577	1,4146	1,3152	1,3367
Medidor 4 (Barra 55)	Medida (kV)	13,393	13,386	13,403	13,378	13,380
	Estimada (kV)	13,568	13,572	13,585	13,550	13,557
	ERRO (%)	1,2898	1,3705	1,3397	1,2694	1,3056
Medidor 5 (Barra 36)	Medida (kV)	13,338	13,332	13,370	13,324	13,325
	Estimada (kV)	13,496	13,517	13,521	13,482	13,493
	ERRO (%)	1,1707	1,3686	1,1168	1,1719	1,2451

Pode-se observar pela Tabela 1, que os erros entre são menores que 10%. Sendo o erro calculado a partir da injeção de corrente na barra 5, o maior registrado, chegando a 8,5965% na fase C, e, o erro calculado a partir da injeção de corrente na barra 36 o menor, com 0,1262% na fase C. A Figura 2, montada a partir da Tabela 1, ilustra o comportamento do erro obtido da corrente estimada e medida para injeção e 10 A de corrente em cada barra. Nota-se ainda, pela Figura 2, que os maiores erros registrados foram quando foi inserido geradores na barra 5 (próximo ao alimentador).

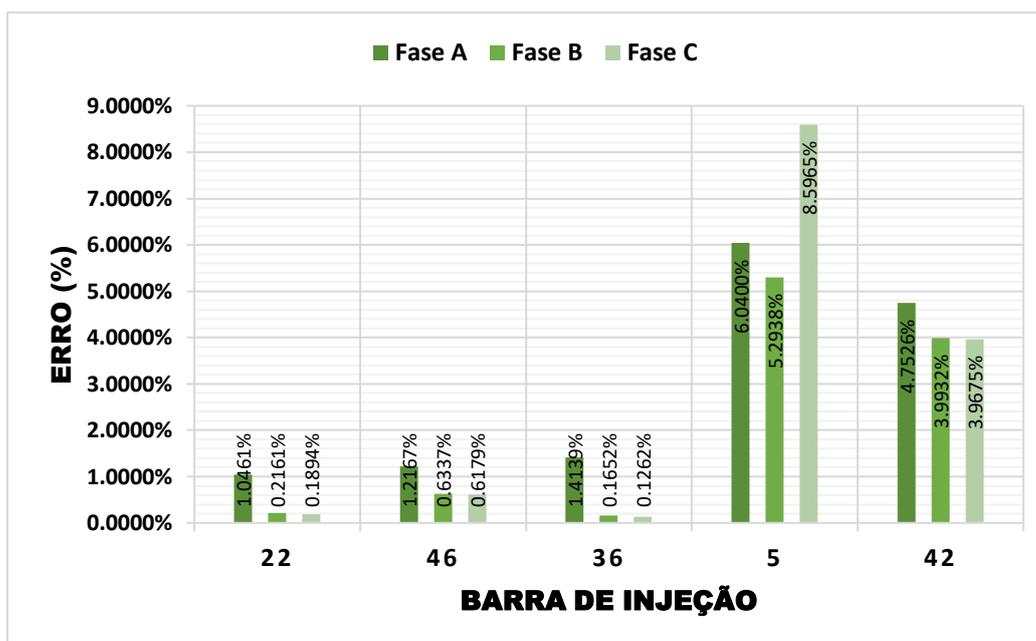


FIGURA 2. Gráfico de colunas agrupadas do erro entre a corrente medida e estimada para a injeção individual de 10 A em cada barra indicada (autoria própria).

Quanto à Tabela 2, pode-se notar que os erros obtidos são de valores mais constantes, nunca ultrapassando 1,5% e nunca abaixo de 1,0%, além de não haver variações significativas nas tensões medidas ou estimadas de acordo com a barra de injeção. O gráfico de linhas empilhadas da Figura 3, montada a partir da Tabela 2, ilustra bem essa linearidade nos valores dos erros para cada barra (de injeção dos geradores).

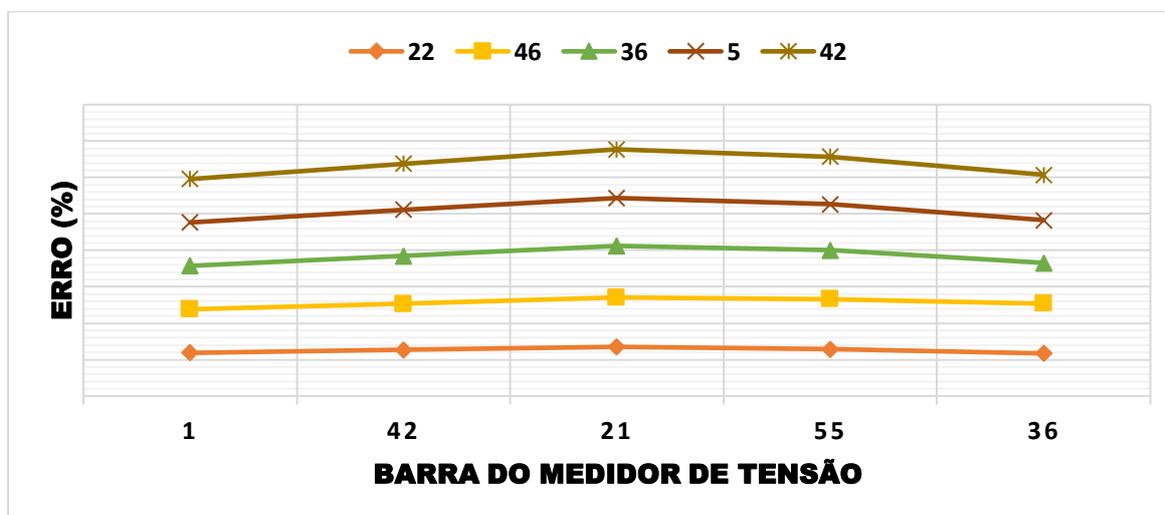


FIGURA 3. Gráfico de linhas empilhadas do erro entre a tensão medida e estimada para a injeção individual de 10 A em cada barra indicada (autoria própria).

### 3.2 Cenário 2: Análise dos efeitos da injeção individual de geradores de 20A

Neste cenário, como pode ser observado na Tabela 3, foram identificados erros de maior escala para as mesmas barras de injeção dos geradores nas correntes do ramo 20, no qual o menor erro registrado foi de 2,7630% e o maior foi de 10,6420%. Não foi observado nenhum padrão ou proporção fixa no aumento da porcentagem de erro em comparação aos valores registrados nos erros do cenário 1 (Figura 2) em nenhuma das fases, como é possível visualizar graficamente com o gráfico de colunas agrupadas da Figura 4, montada a partir da Tabela 3, que ilustra o comportamento do erro a partir da injeção em cada barra indicada. os maiores erros registrados foram com a injeção de potência nas barras 5 e 42.

TABELA 3. Valores medidos e estimados do corrente no ramo 20 a partir da injeção de 20 A (autoria própria).

Barra de injeção	Fase A			Fase B			Fase C		
	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO
22	70,65 A	74,48 A	5,1423%	72,52 A	75,71 A	4,2134%	73,09 A	76,26 A	4,1568%
46	82,88 A	85,98 A	3,6055%	84,75 A	87,18 A	2,7873%	85,32 A	87,72 A	2,7360%
36	70,79 A	74,57 A	5,0691%	72,67 A	75,79 A	4,1166%	73,25 A	76,34 A	4,0477%
5	82,79 A	92,65 A	10,642%	84,65 A	93,92 A	9,8701%	85,22 A	94,49 A	9,8106%
42	82,80 A	91,52 A	9,5280%	84,67 A	92,77 A	8,7313%	85,24 A	93,33 A	8,6682%

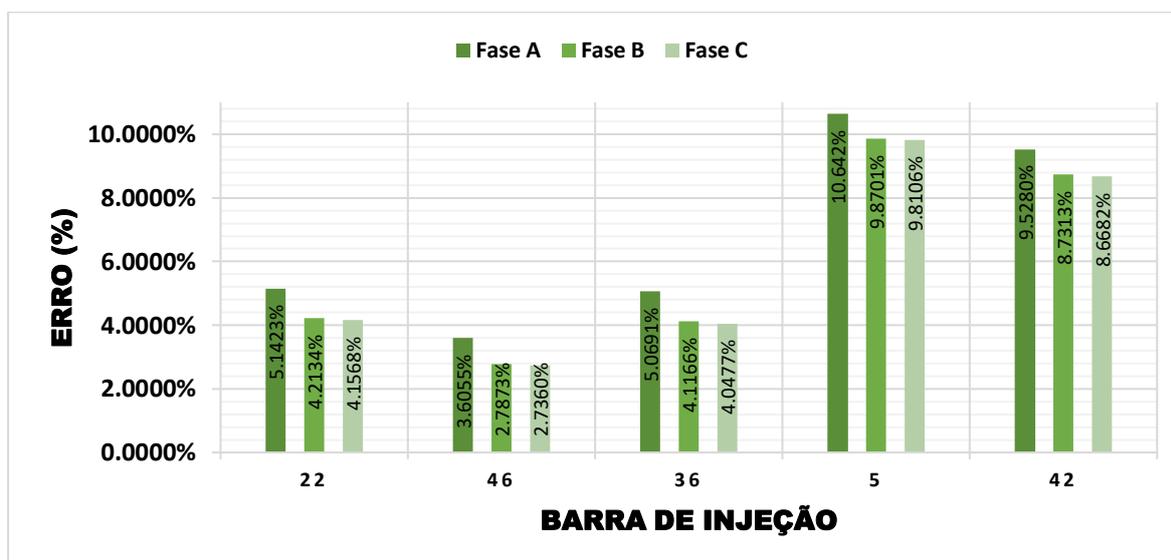


FIGURA 4. Gráfico de colunas agrupadas do erro entre a corrente medida e estimada para a injeção individual de 20 A em cada barra indicada (autoria própria).

Para a tensão, como mostra na Tabela 4, os erros obtidos permaneceram com valores aproximadamente constantes e baixos, semelhante ao cenário 1 mostrado na Tabela 2. Sendo o menor erro de 0,9418% e o maior de 1,3765%. Além disso, também não houveram variações significativas no valor das tensões medidas ou estimadas com a mudança de injeção na barra, assim como no cenário 1.

TABELA 4. Valores medidos e estimados da tensão a partir da injeção de 20 A nas barras (autoria própria).

Medidor (Barra)	Tensão	Barra de injeção				
		22	46	36	5	42
Medidor 1 (Barra 1)	Medida (kV)	13,933	13,933	13,934	13,933	13,933
	Estimada (kV)	14,100	14,100	14,100	14,100	14,100
	ERRO (%)	1,1844	1,1844	1,1773	1,1844	1,1844
Medidor 2 (Barra 42)	Medida (kV)	13,771	13,772	13,771	13,768	13,772
	Estimada (kV)	13,948	13,948	13,948	13,946	13,949
	ERRO (%)	1,2690	1,2618	1,2690	1,2764	1,2689
Medidor 3 (Barra 21)	Medida (kV)	13,538	13,527	13,538	13,510	13,514
	Estimada (kV)	13,719	13,714	13,719	13,693	13,698
	ERRO (%)	1,3193	1,3636	1,3193	1,3364	1,3433
Medidor 4 (Barra 55)	Medida (kV)	13,412	13,398	13,432	13,382	13,385
	Estimada (kV)	13,577	13,585	13,606	13,551	13,557
	ERRO (%)	1,2153	1,3765	1,2788	1,2471	1,2687
Medidor 5 (Barra 36)	Medida (kV)	13,358	13,344	13,421	13,328	13,331
	Estimada (kV)	13,485	13,521	13,576	13,463	13,473
	ERRO (%)	0,9418	1,3091	1,1417	1,0027	1,0540

A Figura 5 ilustra o mesmo comportamento aproximadamente linear da Figura 3 para todas as barras de injeção. Isso implica, que o ligeiro aumento da corrente injetada no sistema, não afetou significativamente a tensão registrada nos medidores, tampouco no desempenho do estimador para o cálculo das tensões.

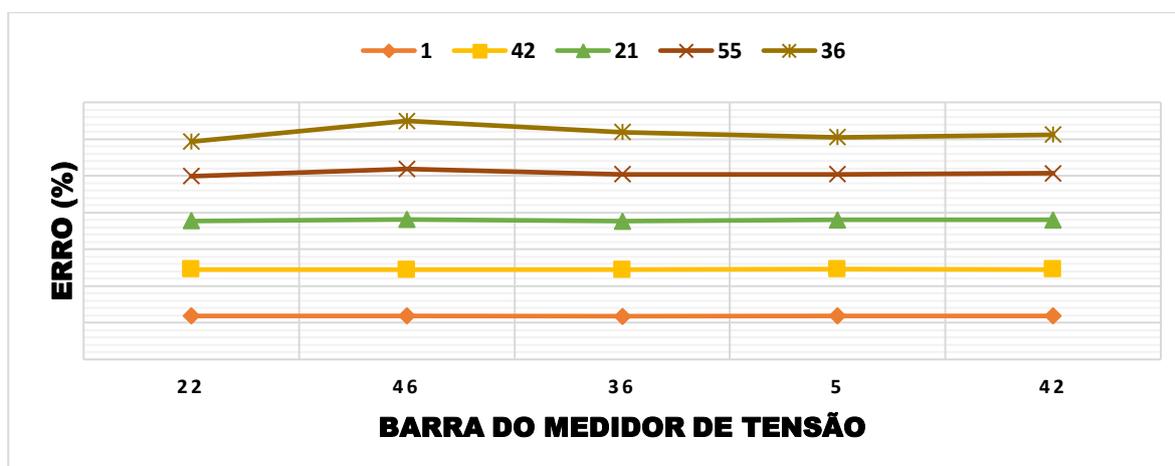


FIGURA 5. Gráfico de linhas empilhadas do erro entre a tensão medida e estimada para a injeção individual de 20 A em cada barra indicada (autoria própria).

### 3.3 Cenário 3: Análise dos efeitos da injeção simultânea de geradores de 10A e 20A

Este cenário foi o que registrou os maiores erros para a corrente no ramo 20, chegando a mais 40% com a injeção simultânea de 20A, em todas as fases, como pode-se observar na Tabela 5. Assim como no cenário 2, não se observou qualquer padrão nos valores dos erros, entretanto, ficou nítido que eles são proporcionais à quantidade de corrente total injetada no sistema pelos geradores. Quanto mais corrente é injetada no sistema, menos assertivo ficam os resultados obtidos pelo estimador de estado e menos divergência entre os valores de cada fase, conforme pode-se observar pela Tabela 5 e pela Figura 6. Além disso, também não foi observada qualquer relação entre o erro e a distância da posição da barra de injeção e o ramo 20 ou alimentador da subestação.

TABELA 5. Valores medidos e estimados da corrente no ramo 20 a partir da injeção simultânea de 20 A nas barras indicadas (autoria própria).

Corrente injetada por gerador	Fase A			Fase B			Fase C		
	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO	Medida	Estimada	ERRO
10 A	70,83 A	93,21 A	24,010%	72,70 A	94,51 A	23,077%	73,27 A	95,09 A	22,947%
20 A	59,52 A	103,92 A	42,725%	60,68 A	105,1 A	42,265%	61,96 A	105,62 A	41,337%

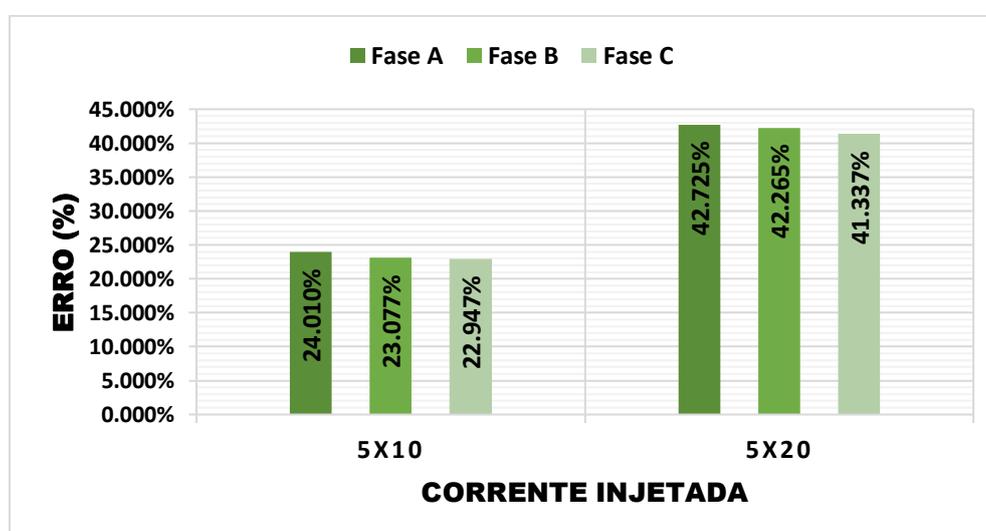


FIGURA 6. Gráfico de colunas agrupadas do erro entre a corrente medida e estimada para a injeção simultânea de 10 A e 20 A em cada barra indicada (autoria própria).

Quanto às análises de comparação entre as tensões estimadas nas barras dos medidores de tensão, indicada na Tabela 6, foi observado que os erros calculados não registraram divergências, de um cenário para outro, nos valores dos erros calculados. A maioria dos casos, registrou-se erros numa faixa de 1,0% e 1,5%, como indica a Figura 7. Com exceção das medidas nas barras 36 e 55, que no cenário 3, tanto para 10A quanto 20A, foram registrados erros abaixo de 1,0%. E, excepcionalmente, para a injeção simultânea de geradores a 20A, o erro o estimado e o medido na barra 36 foi negativo, sendo este, o único caso onde a tensão medida foi maior do que a estimada.

TABELA 6. Valores medidos e estimados da tensão a partir da injeção simultânea de 20 A nas barras indicadas (autoria própria).

Medidor (Barra)	Tensão	Corrente injetada por gerador	
		10 A	20 A
Medidor 1 (Barra 1)	Medida (kV)	13,938	13,947
	Estimada (kV)	14,100	14,100
	ERRO (%)	1,1489	1,0851
Medidor 2 (Barra 42)	Medida (kV)	13,788	13,818
	Estimada (kV)	13,965	13,993
	ERRO (%)	1,2675	1,2506
Medidor 3 (Barra 21)	Medida (kV)	13,560	13,621
	Estimada (kV)	13,730	13,784
	ERRO (%)	1,2382	1,1825
Medidor 4 (Barra 55)	Medida (kV)	13,445	13,517
	Estimada (kV)	13,570	13,607
	ERRO (%)	0,9211	0,6614
Medidor 5 (Barra 36)	Medida (kV)	13,412	13,506
	Estimada (kV)	13,430	13,408
	ERRO (%)	0,1340	-0,7309

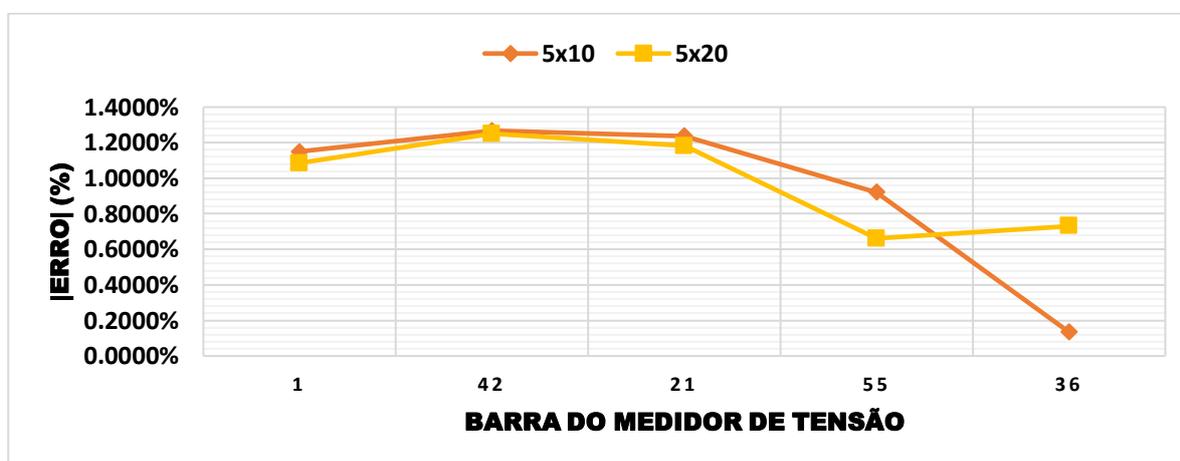


FIGURA 7. Gráfico de linhas do módulo do erro entre a tensão medida e estimada para a injeção simultânea de 10 A e 20 A em cada barra indicada (autoria própria).

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a injeção de corrente direta na rede de distribuição modelada no ATPDraw e no algoritmo de estimação de estado do MATLAB gerou bons resultados (baixos erro entre o medido e o estimado) para valores baixos de injeção de corrente (10 A). Atingindo valores de erro relativamente baixos, como foi o caso da injeção nas barras 22, 36 e 46, que gerou erros abaixo de 1,5% entre os valores medidos e estimados, como foi observado na Tabela 1 e Figura 2. Um valor de corrente desta magnitude equivale a um sistema de minigeração com potência superior a 100 kVA.

Notou-se ainda, resultados satisfatórios com uma baixa variação de erros na tensão medida e estimada, situados entre 1,0% e 1,5% na maior parte dos casos. Algumas exceções, como no caso das barras 36 e 55, registraram erros abaixo de 1,0% quando injetado simultaneamente corrente (tanto 10 A quanto 20 A) nas

barras dos medidores de tensão distribuídos no sistema. Mesmo no cenário 3, com alta injeção de corrente no sistema, os erros não foram altos e variaram pouco, quando comparado aos resultados obtidos nos cenários 1 e 2, indicando que uma relação não linear e aparentemente inexistente entre a potência injetada e a tensão nas barras dos medidores, nas faixas de corrente analisadas.

Por outro lado, deficiências entre os valores estimados e medidos da corrente no ramo 20 foram registradas, ultrapassando 40% no qual (Cenário 3, à 20A). Observou-se, neste caso, que o erro é proporcional à quantidade de corrente inserida, não havendo qualquer relação matemática que descreve o comportamento do erro em relação à corrente injetada ou em relação à distância entre o medidor e as barras de inserção das fontes. Estes erros podem estar associados aos altos valores de corrente injetada (resultado do somatório de todas das correntes injetadas simultaneamente na análise do cenário 3), que, possivelmente, prejudicaram o método de varredura utilizado no estimador de estado.

#### AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

#### REFERÊNCIAS

- [1] ROCHA, E. P. Algoritmo para um estimador de estado trifásico linear baseado no método de soma de correntes aplicado às redes de distribuição de energia elétrica. 2020. 107f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.
- [2] FLÓREZ, H. A. R. Desenvolvimento de um estimador de estado para sistemas de distribuição de energia elétrica desbalanceados. 2013. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia Elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2013.
- [3] BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. *IEEE Transactions On Power Systems*, Raleigh, v. 10, n. 1, p.483-491, fev. 1995.
- [4] WANG, H.; SCHULZ, N. A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 1, p. 207 – 213. Fev. 2004.
- [5] CROW, M. L. *Computational Methods for Electric Power Systems*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 304 p
- [6] ALMEIDA, M. A. D. Um Algoritmo para Estimção de Estado em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica com base no Método da Soma de Potências. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.
- [7] FRANÇA, R. V. Estimador de estado trifásico para sistemas de distribuição. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2010.

Artigo

# Análise computacional das curvas de ciclo térmico em uma chapa de alumínio soldada com o processo TIG autógena

Hugo Eduardo Tavares Vieira <sup>[1]</sup>, Francisco Edson Nogueira Fraga <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; hugovieira2018.2@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nfraga@ufersa.edu.br

Recebido: 18/10/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

**Resumo:** O processo de soldagem é largamente utilizado na indústria, sendo aplicado em diversas áreas, inclusive com o uso dos métodos de simulação computacional por elementos finitos (MEF) como ferramenta que auxilia o profissional de engenharia na otimização de parâmetros de soldagem e na consecutiva tomada de decisões para mitigar defeitos. Todavia, modelos de simulação por MEF necessitam previamente de serem validados, seja com um procedimento experimental, seja por meio de comparação com resultados de outros trabalhos consolidados, a fim de que possam ser aplicados posteriormente para simular outras condições de soldagem que respeitem aquelas mesmas condições de contorno previamente validadas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar a simulação computacional, através de MEF, de um processo de soldagem TIG autógeno em uma chapa de alumínio Al 5052 para obter as curvas de ciclo térmico em diferentes pontos do material, e após isso, comparar com os resultados obtidos na literatura, a fim de validar o modelo aqui proposto para obtenção destas curvas de ciclo térmico em outras condições correlatas. A fonte de calor na superfície da chapa foi modelada a partir de uma distribuição gaussiana, na qual foi inserida no software ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal® em forma de uma rotina. A partir dos dados obtidos foi possível observar o campo de temperaturas na chapa e, com isso, obter as curvas de ciclo térmico em pontos específicos na chapa em função do tempo de soldagem. Comparando esses resultados com uma literatura de referência, observou-se que, para as condições de contorno e demais parâmetros utilizados, conseguiu-se alcançar uma convergência de valores na meta dos pontos medidos. Com isso, foi possível concluir que para os parâmetros de soldagem adotados e o modelamento matemático, bem como as condições de contorno adotadas, conseguiu-se uma aproximação entre os valores numéricos e experimentais para a maioria das regiões de interesse, entretanto, para os pontos ao fim do cordão de solda e na periferia da chapa, observou-se maior divergência de resultados.

**Palavras-chave:** Soldagem TIG; Método dos elementos finitos; Simulação computacional; Distribuição gaussiana.

**Abstract:** The welding process is widely used in industry, being applied in several areas, including several methods of computational finite computation (FEM) as a tool that assists the engineering professional in optimizing selection parameters and in making configuration decisions to mitigate tasks. , simulation by FEM, even though they are similar to other valid test procedures, with comparison of consolidated experimental models to a model that can be applied to other models that can be applied to other models that can be applied to other models that are applicable to other conditions previously validated boundary conditions. In this sense, this work aims to perform a computational simulation, through a FEM methodology, of an autogenous TIG welding process on an Al 5052 aluminum plate to obtain the thermal cycle curves at different points of the material, after that, comparing with the results obtained in the literature, in order to validate the model proposed here for these cycle curves of other correlated conditions. The heat source on the surface of the plate was modeled from a Rio Grande do Sul distribution, which was incorporated into the ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal® software in the form of a routine. From the data obtained, it was possible to observe the temperature field on the plate and, with that, to obtain the curves of the thermal cycle at specific points of the plate as a function of the welding time. Comparing with a reference literature, it was observed that, for the boundary conditions and other parameters used, it was possible to reach a convergence of values in the target of the midpoints. With this, it was possible, it is intended to be possible for the definition models, as well as delineated, an approximation between the numerical and experimental values was carried out for

most of the mathematical points of the definitions at the end of the weld bead and at the periphery. of the plate, a greater divergence of results was observed.

*Key-words:* TIG welding; Finite element method; Computer simulation; Gaussian distribution.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem é amplamente utilizada na indústria, sendo aplicada em diversos setores, tais como: automotivo, naval, aeroespacial, estrutural, marítimo e eletrônico, tanto em processos de construção mecânica quanto como processo de reparo e manutenções. Em destaque, temos o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), no qual permite a soldagem de diversos materiais com ou sem o uso de metal de adição e possível de ser automatizado, sendo assim um processo versátil, além de produzir resultados de ótima qualidade [1].

Durante a soldagem as variáveis envolvidas, tais como: velocidade de soldagem, distribuição de temperaturas variando ao longo da peça (gradiente), fluxo de calor transiente e modelagem da fonte de calor, podem adicionar comportamentos complexos, do ponto de vista matemático, e não-lineares ao sistema, tornando a transferência de calor de difícil análise e mais complexa de obter uma solução analítica. Porém, com o avanço tecnológico, os métodos numéricos vêm ganhando espaço nesse tipo de análise. Logo, para obter resultados válidos, é preciso partir para métodos numéricos, porém esses resultados têm a necessidade de serem validados experimentalmente. Dentre os métodos mais difundidos, o chamado Método dos Elementos Finitos (MEF), por sua capacidade de discretizar geometrias complexas, aproxima soluções de problemas numericamente, dadas pela resolução de um sistema de equações diferenciais, para um sistema algébrico de equações e, ainda assim, obter resultados confiáveis, como por exemplo, problemas de análise estrutural e transferência de calor, passando por acústica e eletromagnetismo, indo até problemas complexos de multifísica e interação fluido-estrutura, consolidou-se como referência nos problemas de engenharia nos mais diversos casos [2]. Para simular o regime transiente, o software *ANSYS Transient Thermal*® faz uso da discretização por elementos finitos, onde é possível inserir a velocidade de avanço da fonte de calor e o modelo numérico desta, entretanto, em algumas ocasiões, pode ser necessário simplificar o problema, pois essas variáveis podem acarretar em maior dificuldade na modelagem matemática do problema, como, por exemplo, se a velocidade de soldagem não for constante, a fonte de calor estará acelerando durante o processo, isto levaria em um maior complexidade no equacionamento e maior esforço computacional.

O processo de transferência de calor envolve variáveis que, muitas vezes, não são constantes e também sofrem alterações em decorrência da temperatura. Dentre elas, a condutividade térmica é uma propriedade importante na simulação de processos de soldagem, visto que representa a capacidade de condução de calor do material. Quando a condutividade térmica do material muda consideravelmente com a temperatura, pode ser necessário levar essa variação em conta durante a análise do problema [3, 4]. Este trabalho tem como objetivo simular por elementos finitos um processo de soldagem TIG autógeno e obter, a partir desta, curvas de ciclo térmico de soldagem em chapas metálicas de alumínio, liga Al 5052, e, para a validação dos resultados da simulação, esta foi feita por meio de comparação com os resultados experimentais apresentados em um trabalho científico que utilizado como referência.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Soldagem TIG autógena

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (*Tungsten Inert Gas – TIG* ou *Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*) é um processo no qual a união de peças metálicas pela fusão destas por meio de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem soldadas [5].

Uma vez que o processo TIG é bastante estável, metais reativos, como titânio, zircônio, alumínio e magnésio podem ser soldados com eficiência [6]. Nesse tipo de procedimento, também é possível realizar a soldagem autógena, ou seja, sem material de adição, nesse caso não existirá fluxo de massa entrando na poça de fusão, sendo uma propriedade importante para soldagem em peças de espessuras finas [5].

Na análise dos processos de soldagem é necessário estimar o rendimento dos mesmos, pois este dirá a quantidade de calor, responsável pela fusão do material de base, que será convertida em energia útil de soldagem. Para o processo TIG existem diversos estudos, tanto experimentais como computacionais, sobre a

eficiência do mesmo [7, 8]. A Figura 1 apresenta um histórico temporal dos valores médios trazidos pela literatura.

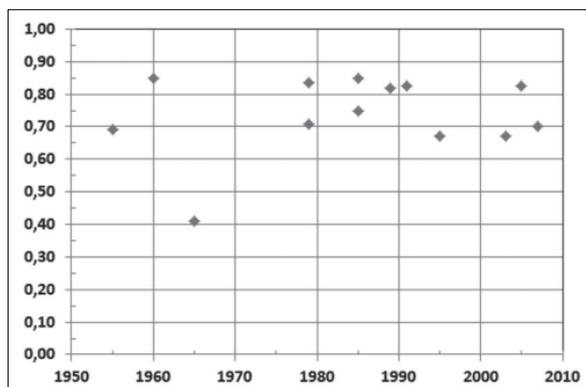


Figura 1. Valores médios de eficiência do processo TIG com o tempo. [9]

Nesse trabalho foi adotada a eficiência do processo sendo 0,67 [4], na qual é um valor coerente com a média dos valores apresentados na Figura 1. Em simulações computacionais envolvendo soldagem, o processo TIG sem material de adição se torna mais fácil de modelar, pois não é necessário avaliar a quantidade de massa entrando no sistema. Caso o contrário, além da fonte calor, seria necessário levar em consideração o fluxo de massa entrando no sistema, estabelecer o passo de tempo que o material é adicionado na poça de fusão e definir uma velocidade de adição do material, isto acarretaria em maior dificuldade matemática de equacionar o problema, mais equações de restrição e, por consequência, maior esforço computacional.

## 2.2. Análise térmica

Durante o processo de soldagem, o calor envolvido é dissipado a partir de três mecanismos de transferência de calor, parte é convertida em irradiação, uma pequena parcela em convecção com o gás de proteção e a maioria é convertida em condução, sendo esta última a parcela responsável pelo processo de soldagem. A condução de calor através de um sólido, no domínio do tempo  $t$  referido a um sistema cartesiano tridimensional  $(x,y,z)$  pode ser expresso pela Equação 1 [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_o = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Onde  $T$  é temperatura do material em °C,  $\rho$  a densidade do material,  $c$  calor específico,  $q_o$  termo fonte ou sorvedouro de calor e  $\lambda_T$  é a condutibilidade térmica do material.

No caso da soldagem, pode-se considerar as fontes ou sorvedouros no interior do material como desprezíveis e/ou inexistentes, e também é válido considerar a condutibilidade térmica constante [1], logo, a Equação 1 é reduzida para a lei de Fourier.

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Onde  $\kappa$  é a difusividade térmica do material. As perdas por convecção podem ser dadas pela equação de Newton para transferência de calor (Equação 3), enquanto as perdas por radiação podem ser definidas pela Equação 4:

$$q_{convec} = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de calor por convecção,  $T_s$  é a temperatura na superfície do sólido,  $T_\infty$  é a temperatura na vizinhança,  $\varepsilon$  é emissividade e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman, dada por  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

## 2.3. Fonte de calor gaussiana

Com o avanço das ferramentas computacionais, simulações com métodos numéricos envolvendo soldagem estão cada vez mais presentes. O método dos elementos finitos (MEF) é a técnica mais usual na análise de problemas de soldagem envolvendo questões térmicas, metalurgia e fenômenos mecânicos simultaneamente [10].

Na análise computacional do processo de soldagem, é necessário realizar a modelagem matemática da fonte de calor, para isso, alguns modelos foram criados com esse propósito. A maior dificuldade em simular o campo de temperaturas durante a soldagem é a modelagem da fonte de energia [11]. A Figura 2 apresenta diferentes fontes de calor e seus autores:

Geometria	Fonte de calor	Autores
	Pontual	Rosenthal (1941)
	Linear	Rosenthal (1941)
	Conjunto de linhas	Lambraskos, Milewski e Moore (2003)
	Planar	Akbari, Sinton e Bahrami (2009)
	Gaussiana	Eagar e Tsai (1983); Cho e Kim (2002); Deng, Murakawa e Liang (2007); Rayamyaki, Karkhin e Khomich (2007)
	Gaussiana Cônica	Balasubramanian et al. (2008); Zaeih e Schober (2008); Ziolkowski e Brauer (2009)
	Gaussiana com cilindro	Bachorki et al. (1999)
	Duplo-Elipsóide	Goldak, Chakravarti e Bibby (1984); Nguyen et al. (1999); Goldak (2005); Gery, Long e Maropoulos (2005); Zhang, Zhang e Wu (2007)
	Duplo-Elipsóide com uma fonte de calor esférica	Wahab, Painter e Davies (1998)
	Duplo-elipsóide com uma fonte de calor cilíndrica	Wu, Hu e Gao (2009)

Figura 2. Fontes de calor e seus autores. Adaptado de [11]

A fonte Gaussiana é uma das fontes mais utilizadas nesse tipo de análise, devido a sua simplicidade e boa modelagem do fenômeno térmico envolvido, sendo o único parâmetro de regulagem o sigma ( $\sigma_g$ ), na qual aumenta ou diminui a densidade de calor [11]. Nesse estudo é usado a fonte calor gaussiana [4, 10, 12], dada pela Equação 6:

$$q(r) = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_g^2}} \quad (5)$$

$$q(x,y) = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_g^2}} \quad (6)$$

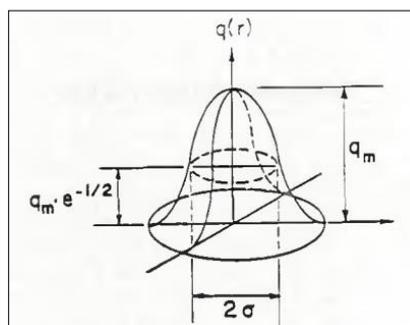


Figura 3. Fonte de calor Gaussiana. [12]

Onde  $q_{((x,y))}$  é o fluxo de calor na superfície da chapa,  $\eta$  é a eficiência do processo de soldagem,  $V$  é

tensão elétrica,  $I$  a corrente usada e  $\sigma_g$  é a distância radial da distribuição de calor na superfície da peça. Para um sistema de coordenadas móveis, tem-se:

$$\xi(t) = x + vt \quad (7)$$

No qual  $v$  é velocidade de soldagem e  $t$  o tempo. Substituindo a componente fixa ( $x$ ), na Equação 5, por uma componente móvel ( $\xi$ ), tem-se que a fonte gaussiana, para um sistema de coordenadas em função do tempo, é dada por (8):

$$q_{(x,y)} = \frac{\eta VI}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{(\xi^2+y^2)}{2\sigma_g^2}} \quad (8)$$

#### 2.4. Ciclo térmico

Durante a soldagem, cada ponto do material irá sofrer um aquecimento e, em seguida, um resfriamento, com isso, é possível plotar curvas de temperatura, em função do tempo, de determinados pontos do cordão de solda, estas curvas são chamadas de curvas de ciclo térmico (Figura 4).

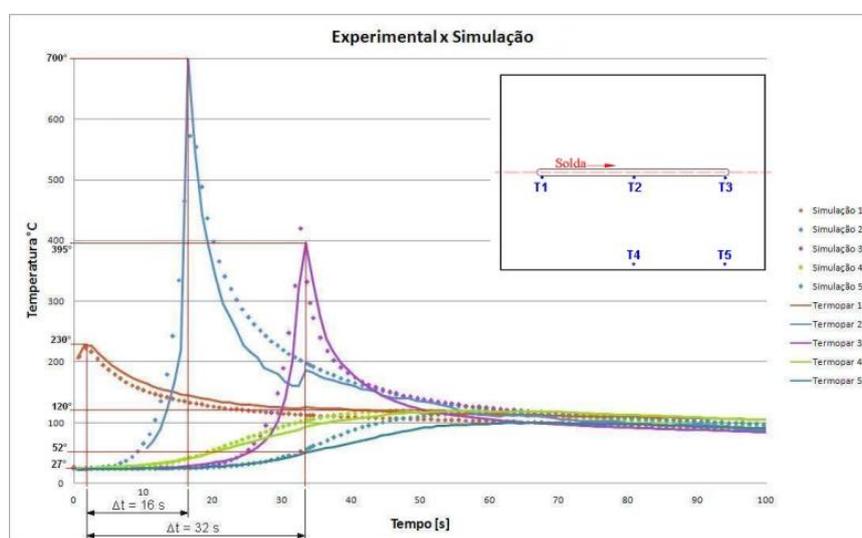


Figura 4. Curvas de ciclo térmico. [4]

Para a metalurgia, a obtenção das curvas de ciclo térmico também é importante, visto que, com as informações de temperatura máxima atingida em uma determinada região do material, intervalos de aquecimento e resfriamento do material e velocidade de resfriamento, é possível prever as transformações microestruturais no material [1, 4], nesse sentido, alguns parâmetros são importantes nesse tipo de análise, sendo a temperatura de pico o maior valor durante determinado ciclo, além disso é possível saber o tempo que a região passou sob efeito dessa temperatura, na qual pode influenciar no crescimento de grãos da zona afetada, as curvas de ciclos também proporcionam a taxa e o tempo de resfriamento do material naquela região, com isso é possível estimar a microestrutura final e as transformações de fase do material. Essa análise pode ser realizada em diferentes pontos do material, podendo obter assim um perfil de distribuição térmica ao longo do material, desse modo pode-se avaliar o perfil microestrutural ao longo da peça, ou seja, se existe de um gradiente significativo de fases na extensão do material de base.

Os defeitos de distorção em juntas soldadas são dados pelo aquecimento e resfriamento dos ciclos térmicos da peça [4], logo, é de interesse a obtenção dessas curvas para a tomada de decisões. Durante o ciclo térmico, é possível observar um aquecimento e resfriamento não uniforme, devido a isso poderá existir, no material após a soldagem, um perfil de tensões internas, nas quais são chamadas de tensões residuais, sendo funções das taxas de aquecimento e resfriamento e da distribuição do fluxo de calor no material e do perfil de ciclo térmico.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação de soldagem foi realizada no software *ANSYS 2022 R1 STUDENT-Transient Thermal*®, para isso, foi modelado o corpo de prova, com dimensões estabelecidas, em um software CAD, após isso foi gerada a malha computacional, realizada a modelagem da fonte de calor e inserido as condições de contorno do problema. A Figura 5 ilustra as etapas do processo de simulação deste trabalho. E a Figura 6 ilustra as dimensões

do corpo de prova simulado.

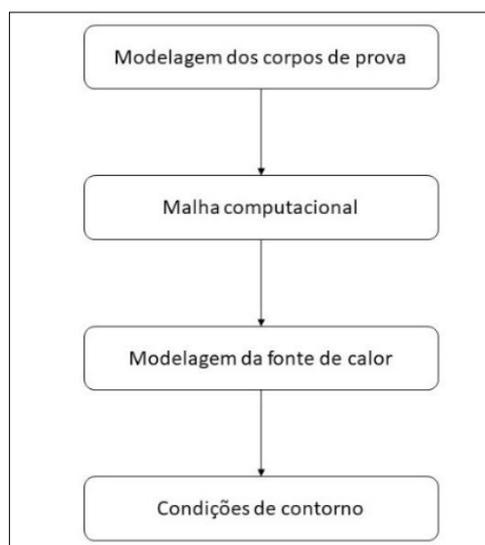


Figura 5. Fluxograma do processo. (Autoria própria)

As dimensões da chapa usada como corpo de prova foram 200 mm de comprimento, 150 mm de largura e 2 mm de espessura, juntamente com um cordão de solda de 140 mm. O corpo de prova é ilustrado na Figura 6.

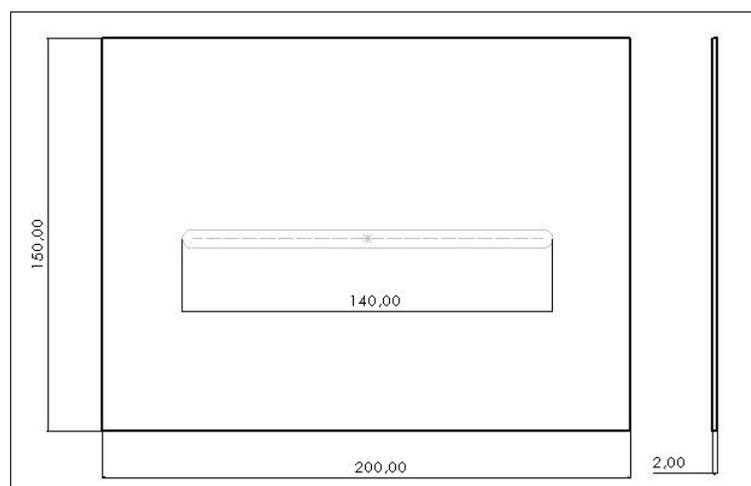


Figura 6. Ilustração do corpo de prova. (Autoria própria)

O modelo CAD foi desenhado nas dimensões do trabalho usado como referência [4], para, em seguida, ser exportado para o software de simulação por elementos finitos.

### 3.1. Malha computacional

A malha computacional foi gerada em duas regiões, a primeira é a criação dos elementos na chapa, e a segunda na região que engloba o cordão de solda. Com o intuito de obter resultados precisos e otimizar o esforço computacional, a malha na região do cordão é mais refinada, isto se dá devido ao maior interesse nos processos que ocorrem nessa região, pois é nela onde a fonte de calor irá interagir diretamente, logo, o aporte térmico será maior, com isso, é necessário que a discretização ocorra de forma mais precisa nessa região.

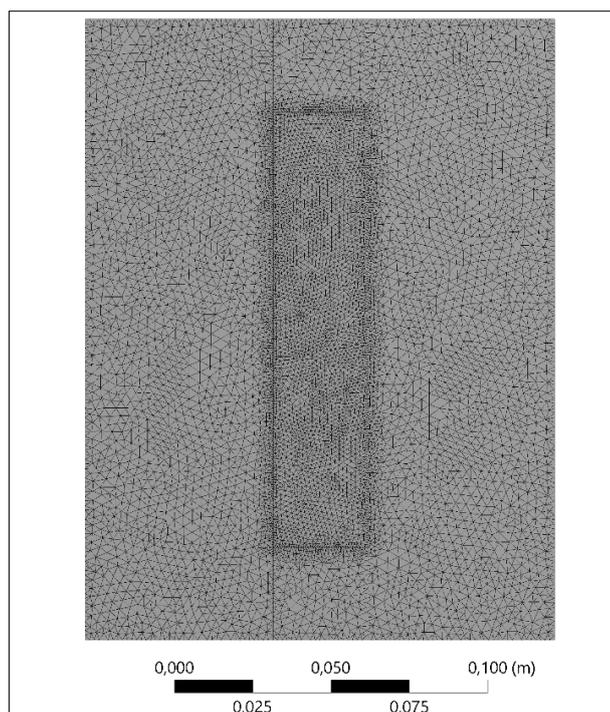


Figura 7. Malha computacional. (Autoria própria)

Foi usado elementos tetraédricos de tamanho médio de 1,5 mm, enquanto na região de refino foi utilizado elementos de tamanho médio de 0,5 mm, este formato foi escolhido por melhor se adaptar a geometria do corpo de prova (Figura 7).

### 3.1.1. Convergência de malha

Para definir o tamanho adequado da malha computacional, foi realizado um estudo de convergência de malha, onde o parâmetro variado foi  $\kappa_i$  e, a cada resultado, foi computado a temperatura T1 máxima no início de cordão de solda.

$$\kappa_i = \frac{1}{n} \quad (8)$$

Onde n é o número de nós. Com isso é possível plotar um gráfico de  $\kappa_i$  vs T1 e obter uma reta de tendência, onde, para  $\kappa_i$  tendendo a zero, ou seja, n tendendo ao infinito, T1( $\kappa_i = 0$ ) será a temperatura convergida. Esse resultado é mostrado na Figura 8.

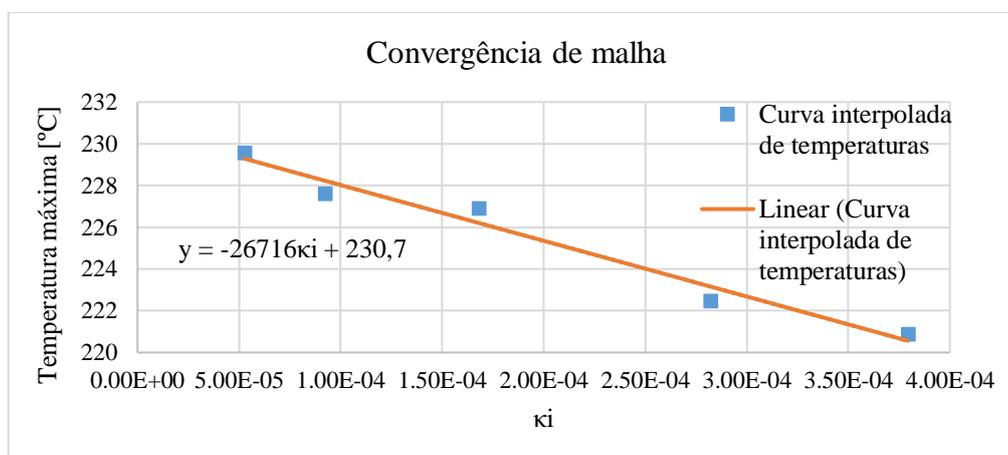


Figura 8. Gráfico de convergência da malha computacional. (Autoria própria)

É possível observar que, para  $\kappa_i \rightarrow 0$ , a temperatura irá convergir para, aproximadamente, 230 °C, esse resultado está coerente com o obtido na literatura, logo, é possível que afirmar que a malha computacional

escolhida é adequada.

### 3.2. Modelagem Computacional da Fonte de Calor e do Material

No presente trabalho a fonte de calor foi modelada a partir de uma distribuição gaussiana, para isso, é necessário conhecer o raio da distribuição de calor na peça ( $\sigma_g$ ), este foi obtido a partir da literatura de referência, onde foi estabelecido 7 mm. Outros parâmetros também são necessários para, conforme a equação 7, o cálculo do calor na superfície, tais como; eficiência do processo, tensão do arco, corrente e velocidade de soldagem. A Tabela 1 apresenta os parâmetros exigidos.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem. Adaptado de [4].

Eficiência do processo ( $\eta$ )	Tensão do arco (V)		Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/min)
0,67	13		90	250

Tabela 2. Propriedades do material. (ANSYS Engineering Data)

Densidade ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Condutividade térmica ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ )	Calor específico ( $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ )
2685,0	144,20	982,50

O material utilizado é o mesmo da literatura de referência [4], sendo o alumínio Al 5052. Para os fins dessa análise, foi utilizado as propriedades padrões do *software*, no qual considera a condutividade térmica do material constante, a Tabela 2 apresenta os valores das propriedades termofísicas do material utilizado. Além disso, é adotado a temperatura de fusão do alumínio em torno de 660 °C [13].

### 3.3. Condições de contorno

Para realizar a simulação, buscou-se replicar condições semelhantes ao estudo feito na literatura. A partir dos parâmetros descritos na T 1, a fonte de calor móvel possui um deslocamento linear de, no máximo, 140 mm. A fonte gaussiana foi programada a partir de uma rotina implementa em APDL, sendo inserida na janela de comandos do Thermal.

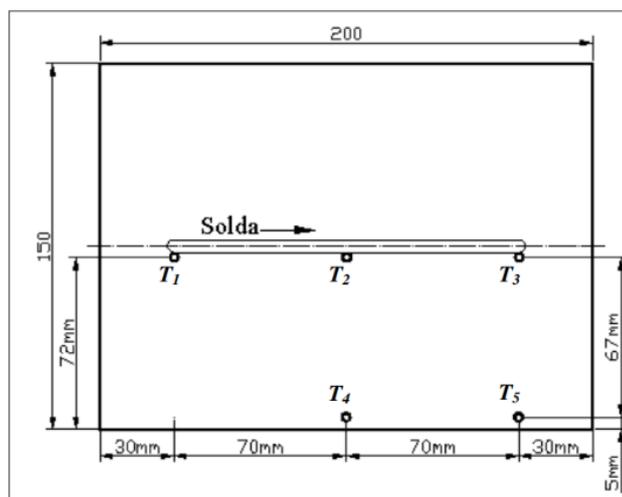


Figura 9. Posição dos pontos de interesse. [4]

As medições de temperatura foram realizadas em 5 pontos diferentes da chapa, para isso foi monitorado os nós da malha computacional durante a simulação através do comando *Named Selections*, com isso foi possível observar o estado térmico de cada ponto durante a passagem da fonte de calor. A temperatura inicial do processo de soldagem foi considerada como 25 °C (temperatura ambiente), o coeficiente de calor por convecção foi adotado como  $h=15 \text{ W/h}^2 \text{ K}$  e as perdas por radiação foram consideradas, sendo a emissividade  $\epsilon=0,75$  [14].

## 4. RESULTADOS

Com os resultados obtidos no pós-processamento, a partir da Figura 10, foi possível observar os campos de temperaturas da chapa em função do tempo e da posição da fonte de energia. Nos primeiros instantes de tempo, representados pela Figura 9-a, o campo de temperaturas inicial gerado a partir dos primeiros 6 s do fluxo de calor, enquanto nos outros é possível observar um gradiente de temperaturas totalmente desenvolvido, inclusive,

comparando as Figuras 9-b para 9-c para 9-d, pode-se observar o deslocamento da fonte de calor, ou seja, o deslocamento da fonte de soldagem.

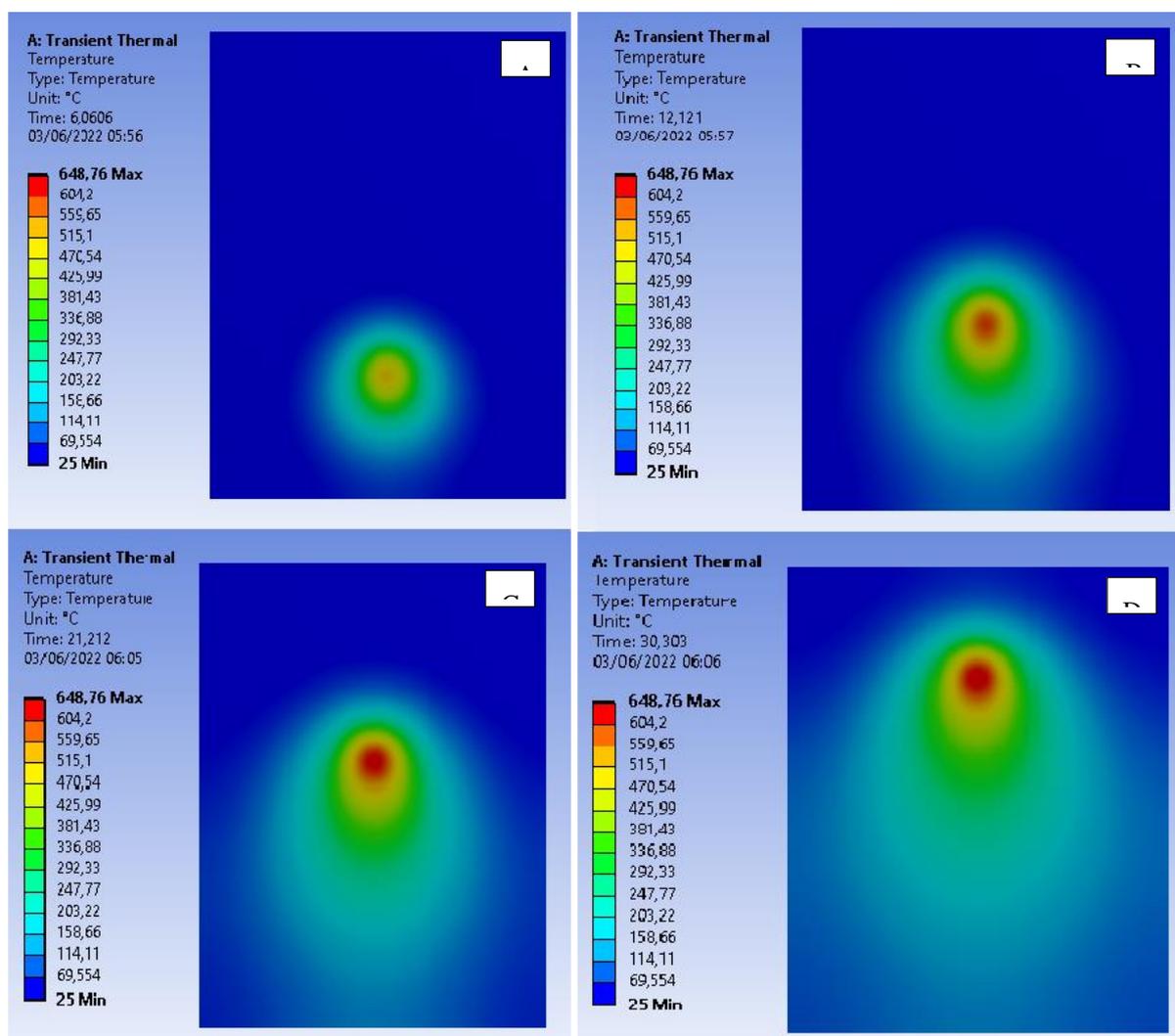


Figura 10. Campo de temperaturas. (Autoria própria)

O campo de temperaturas ilustrado nas imagens “A, B, C” e “D” da Figura 10 apresentam isotérmicas durante o deslocamento da fonte de calor na simulação do processo de soldagem, o “A” representa o início do deslocamento da fonte no processo de soldagem e “D” representa o final. Estas curvas são de natureza da fonte gaussiana. As áreas em vermelho representam a temperatura máxima, onde foi observado um pico de aproximadamente 648 °C, sendo a temperatura de fusão do alumínio em torno de 660 °C, é possível notar que a região se aproxima desta, entretanto não ocorre a fusão definitiva do material, uma possível fonte de erro, na qual pode ter acarretado nessa discrepância de valores, é a modelagem matemática das propriedades termofísicas do material, pois, uma vez consideradas constantes, não foi levada em consideração a variação destas em relação ao aumento de temperatura no sólido, ou seja, não é computado, na análise, as mudanças de fase do alumínio, logo, para temperaturas próximas da de fusão, ocorre um relaxamento dos resultados.

#### 4.1. Curvas de Ciclo Térmico

As curvas de ciclo térmico foram obtidas para os pontos T1, T2, T3, T4 e T5 descritos na Figura 11, dessa forma é possível visualizar estado de temperatura desses pontos com relação ao tempo de soldagem.

A Figura 11 mostra as curvas obtidas com a simulação numérica do processo de soldagem TIG. É possível notar que o ponto T2 apresenta o maior ciclo térmico, com uma temperatura de pico de, aproximadamente, 620°C, se aproximando da temperatura de fusão. Além disso o ponto T3, juntamente com o ponto T2, apresentam aquecimento e resfriamento consideravelmente rápidos.

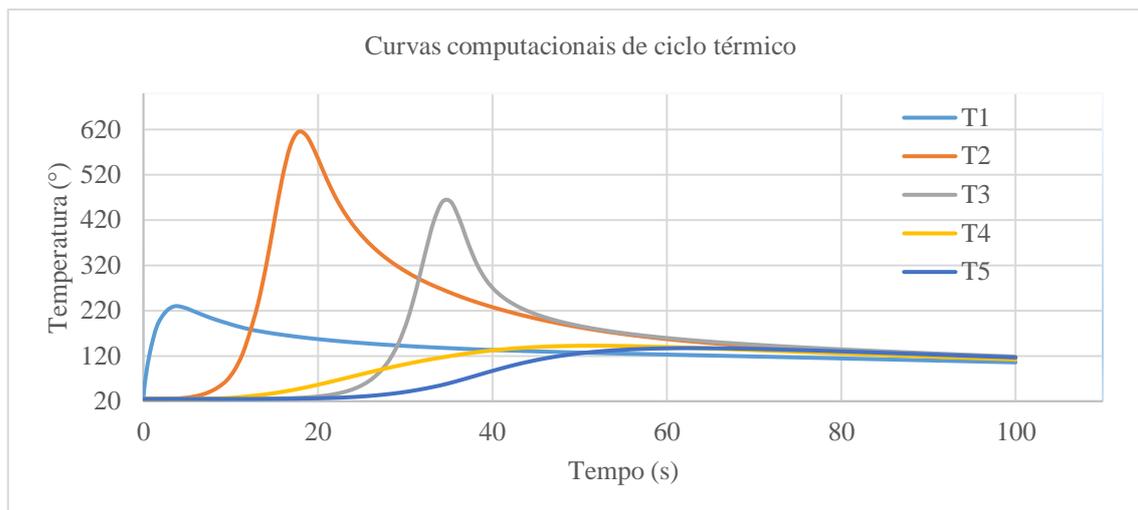


Figura 11. Curvas computacionais de ciclo térmico. (Autoria própria)

Em comparação com os resultados obtidos na literatura de referência [4], nota-se, conforme as Figuras 11 e 12, uma convergência de resultados para os pontos T1, T2 e T5, entretanto os pontos T3 e T4 obtiveram temperaturas acima dos resultados experimentais. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre as temperaturas de pico de cada curva.

Tabela 3. Comparativo entre os valores de pico. (Autoria própria)

	Computacional (°C)	Experimental (°C)	Erro relativo (%)
T1	229,58	230	0,18
T2	614,29	700	12,24
T3	460,02	395	16,46
T4	142,54	120	18,78
T5	137,24	120	14,37

Foi possível observar que o ponto T1 obteve excelente convergência de resultados e, com base no erro relativo entre os valores computacionais e experimentais, os demais apresentaram relativa divergência dos valores de referência, sendo os pontos T3 e T4 os mais discrepantes.

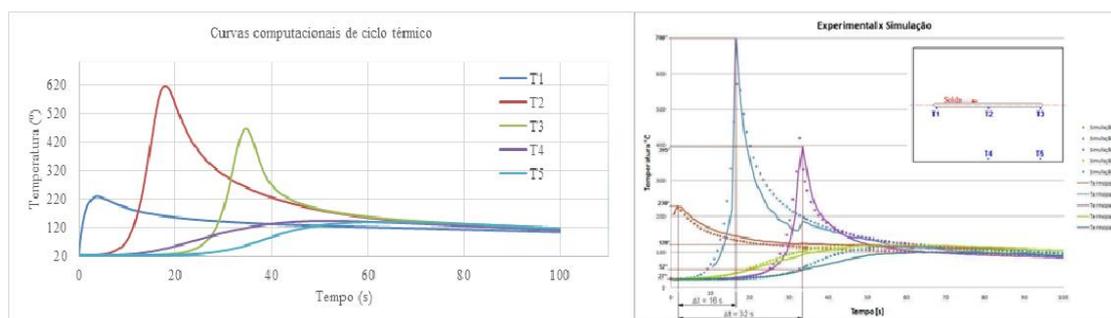


Figura 12. Comparação das curvas de ciclo térmico. Adaptado de [4].

O fato de considerar a condutividade térmica do material constante pode ser a principal fonte de erro, visto que, para consideráveis variações da temperatura, a mesma sofrerá variações no seu valor, os resultados no ponto T4 também podem ter sido afetados devido a malha computacional, pois os mesmos estão localizados na periferia da malha, em uma região menos refinada. O ponto T3 está localizado no final do escoamento, logo, os resultados nele podem conter resíduos numéricos, oriundo da modelagem matemática das propriedades termofísicas. Outra possível fonte de discrepância entre os resultados numéricos e experimentais é a sensibilidade dos sensores térmicos utilizados na medição real, pois os mesmos captam a temperatura na interface com o material de base e não o valor absoluto da região de interesse.

Apesar da divergência observada em alguns pontos, de um modo geral, pode-se afirmar que, para o que se pretende utilizar o modelo computacional aqui estudado, os resultados de convergência obtidos conseguem modelar, aproximadamente, o fenômeno real, sendo capaz de estimar as transformações microestruturais e as zonas em que provavelmente ocorreram fusão do material. A fim de refinar o modelo e obter resultados mais

precisos, este trabalho tem, como próxima etapa, o objetivo de simular o fluxo de calor, a partir de uma distribuição gaussiana, considerando as mudanças das propriedades termofísicas do material de base.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi simular um processo de soldagem TIG autógeno em uma chapa de alumínio Al 5052 e, a partir dos resultados computacionais, extrair as curvas ciclo térmico para os pontos denominados para, em seguida, comparar com um trabalho científico de referência. A simulação computacional logrou êxito, onde foi possível observar a convergência de resultados em dois pontos, entretanto o restante apresenta picos de temperaturas acima dos registrados em experimento. As possíveis fontes de erro são, provavelmente, a constância das propriedades termofísicas do material com a temperatura, onde, devido ao gradiente de temperaturas, as mesmas podem sofrer variações, a escolha da fonte pode ter influência, visto que a mesma considera uma distribuição simétrica do calor na superfície, logo, essa simplificação do modelo pode ter afetado os resultados, além dos erros matemáticos inerentes ao método numérico.

Dessa forma, conclui-se que as simulações envolvendo os processos de soldagem são de bastante eficácia, podendo estimar o comportamento térmico do material durante a soldagem, e com isso tomar decisões. Nesse contexto, a ferramenta computacional ANSYS Transient Thermal® se mostrou eficaz neste tipo análise. Por fim, observou-se que o modelo numérico-computacional implementado obteve uma convergência satisfatória de resultados, podendo ser um importante dispositivo para tomada de decisões técnicas acerca do processo de soldagem e seus fenômenos térmicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem – Processos e Metalurgia. 2ª ed. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1992.
- [2] PEREIRA, Heitor Abdias da Silva. Implementação de padrões de tecimento na simulação de operações de soldagem pelo método dos elementos finitos. 2019. 81 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- [3] ÇENGEL, Yunus A. Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- [4] FRAGA, Francisco E. N. Proposta de modelo para caracterizar susceptibilidade à distorção devido à soldagem em chapas de alumínio. 2009. 158 f. Tese (Doutorado) – Curso de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- [5] BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- [6] KOU, Sindo. Welding Metallurgy. 2 ed. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2003.
- [7] HAELSIG, A.; MAYR, P. Energy balance study of gas-shielded arc welding processes. *Welding In The World*, [s.l.], v. 57, n. 5, p.727-734, 26 jun. 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-013-0073-z>>. Acesso em: junho de 2022.
- [8] PEREIRA, G.B.A. Metodologia para determinação do rendimento térmico de um processo de soldagem. 2020. 10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.
- [9] STENBACKA, N. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 380-390, Dec. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242013000400010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242013000400010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 03 Jun. 2022.
- [10] TEIXEIRA, Paulo R. F. et al. Study of the Gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of tig welding processes. *Science and Engineering Journal*, v. 23, n. 1, p. 115-122, 2014.
- [11] ARAÚJO, Douglas Bezerra de. Estudo de distorções em soldagem com uso de técnicas numéricas e de otimização. 2012. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [12] EAGAR, T. W; TSAI, N. S. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding journal*, v. 62, n. 12, p. 346-355, 1983.
- [13] CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [14] INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. Fundamentos de Transferência de Calor e De Massa. 6a ed. São Paulo: LTC. 2008. 664.