

**NELSON DE SOUZA AMORIM
FERNANDO MANUEL ARAÚJO MOREIRA
CARLOS CÉLIO SOUSA DA CRUZ
UBIRAEALSON DE LIMA RUELA
PAULA RENATHA NUNES DA SILVA
JOSÉ ROBERTO BRANCO RAMOS FILHO
VICENTE MOREIRA RODRIGUES
THIAGO AUGUSTO DE SOUSA MOREIRA
GILSON FERNANDES BRAGA JUNIOR
ESTEFANY COUTO MILÉO
(ORGANIZADORES)**

ANAIS DO XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA FÍSICA



Atena
Editora

Ano 2020

**NELSON DE SOUZA AMORIM
FERNANDO MANUEL ARAÚJO MOREIRA
CARLOS CÉLIO SOUSA DA CRUZ
UBIRAEALSON DE LIMA RUELA
PAULA RENATHA NUNES DA SILVA
JOSÉ ROBERTO BRANCO RAMOS FILHO
VICENTE MOREIRA RODRIGUES
THIAGO AUGUSTO DE SOUSA MOREIRA
GILSON FERNANDES BRAGA JUNIOR
ESTEFANY COUTO MILÉO
(ORGANIZADORES)**

ANAIS DO XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA FÍSICA



Atena
Editora

Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
S612a	<p>Simpósio Brasileiro de Engenharia Física (14 : 2019 : Santarém) Anais [...] / XIV Simpósio Brasileiro de Engenharia Física, 23-25 outubro 2019, Santarém, PA; organizadores Nelson de Souza Amorim... [et al.]. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-65-86002-15-7 DOI 10.22533/at.ed.157200203</p> <p>1. Engenharia física – Congressos. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 573.724</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

O curso de Engenharia Física da Universidade Federal de São Carlos foi criado no ano 1999 e foi pioneiro nesta área no Brasil. No ano de 2019, o curso de engenharia física no Brasil completou 20 anos. Nesse contexto, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e a Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPa) promoveram o XIV Simpósio Brasileiro de Engenharia Física que foi realizado na cidade de Santarém-PA no período de 23 a 25 de Outubro de 2019 na Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus Tapajós com o tema “Jubileu de 20 anos da Engenharia Física no Brasil”.

Com a proposta de promover o conhecimento científico e inovação tecnológica bem como a integração entre especialistas, docentes e discentes da área, foram discutidos os 20 anos de existência do curso no Brasil e o intercâmbio de informações técnicas-científicas através de minicursos e palestras relacionados as diferentes temáticas da Engenharia Física e suas perspectivas futuras.

A coleção Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Engenharia Física é uma obra que tem como objetivo divulgar os diversos trabalhos que participaram do evento através de trabalhos acadêmicos que abordaram diferentes temas, tais como: termodinâmica, propriedades dielétricas de materiais, ciência dos dados e machine learning, internet das coisas, deep learning, processos oxidativos avançados, energia solar, gerenciamento de projetos, física quântica e automação. Deste modo a obra contribui para disseminar os resultados obtidos pelos acadêmicos e fortalecer a diversidade científica no país, de forma multidisciplinar.

Comitê Organizador

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
A IMPORTÂNCIA DO REALIMENTADOR NA EFICIÊNCIA DE UM CICLO DE RANKINE UTILIZANDO O EES	
Muller Gabriel da Silva Chaves Carlos Eduardo Ribeiro Silva Vitor Azevedo Pinto Carlos Célio Sousa da Cruz	
DOI 10.22533/at.ed.1572002031	
CAPÍTULO 2	11
ANÁLISE TEÓRICA DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DA MACAÚBA (<i>Acrocomia acuelata</i>)	
Alex Torres da Silva Nelson de Souza Amorim	
DOI 10.22533/at.ed.1572002032	
CAPÍTULO 3	19
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE DATA SCIENCE E MACHINE LEARNING EM UM PROBLEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE UM DATASET DE MARKETING BANCÁRIO	
Yasmin Braga Teixeira João Vitor Rebelo Viana Josecley Fialho Góes Anderson Alvarenga de Moura Meneses	
DOI 10.22533/at.ed.1572002033	
CAPÍTULO 4	28
AQUISIÇÃO DE DADOS DO CONSUMO ELÉTRICO EM UMA EDIFICAÇÃO DA UFOPA UTILIZANDO CONCEITOS DE IOT	
Leonardo Paz Amoêdo Dalton Felipe Silva Varão João Elias Brasil Bentes Júnior Anderson Alvarenga de Moura Meneses	
DOI 10.22533/at.ed.1572002034	
CAPÍTULO 5	37
DEEP LEARNING PARA REGRESSÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA DE UMA USINA DE ENERGIA DE CICLO COMBINADO	
Mauro Sérgio dos Santos Moura Anderson Alvarenga de Moura Meneses	
DOI 10.22533/at.ed.1572002035	
CAPÍTULO 6	46
DEGRADAÇÃO DE CORANTES EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA FORMA DE FILMES FINOS PREPARADOS SOBRE SUBSTRATO CERÂMICO COMERCIAL	
Graziele Daiana Sena de Sousa Adriano Cesar Rabelo	
DOI 10.22533/at.ed.1572002036	

CAPÍTULO 7	59
FATORES CRÍTICOS QUE INTERFEREM NO GERENCIAMENTO DO TEMPO EM PROJETOS DE ENGENHARIA: ESTUDO DE CASO EM SANTARÉM – PA	
Raíssa Coelho Almeida Kevin de Matos Costa	
DOI 10.22533/at.ed.1572002037	
CAPÍTULO 8	70
OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE KLEIN-GORDON-FOCK EM COORDENADAS DO CONE DE LUZ	
Jorge Kysnney Santos Kamassury Damião Pedro Meira Filho Sérgio Antônio de Souza Farias Natalie Von Paraski	
DOI 10.22533/at.ed.1572002038	
CAPÍTULO 9	83
RÁPIDO RECONHECIMENTO DE MODULAÇÕES ANALÓGICAS E DIGITAIS VIA REDES RESIDUAIS PROFUNDAS	
Jorge Kysnney Santos Kamassury Vinícius Felipe de Oliveira da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.1572002039	
CAPÍTULO 10	98
REVISÃO DE LITERATURA SOBRE A AUTOMAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA NO BRASIL	
Davi Henrique da Silva Pedroso Gabriel Gonçalves da Silva Gilson Fernandes Braga Junior	
DOI 10.22533/at.ed.15720020310	
CAPÍTULO 11	109
DIAGNÓSTICO DOS MICROSSISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO INSTALADOS NAS COMUNIDADES RURAIS DO MUNICÍPIO DE SANTARÉM	
Fabiane da Conceição Almeida Manoel Roberval Pimentel Santos	
DOI 10.22533/at.ed.15720020311	
SOBRE OS ORGANIZADORES.....	119
ÍNDICE REMISSIVO	121

A IMPORTÂNCIA DO REALIMENTADOR NA EFICIÊNCIA DE UM CICLO DE RANKINE UTILIZANDO O EES

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 21/11/2019

Muller Gabriel da Silva Chaves

Universidade Federal do Oeste do Pará
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/7702853835432658>

Carlos Eduardo Ribeiro Silva

Universidade Federal do Oeste do Pará Santarém
– Pará
<http://lattes.cnpq.br/9904715808665794>

Vitor Azevedo Pinto

Universidade Federal do Oeste do Pará Santarém
– Pará
<http://lattes.cnpq.br/7321405317669336>

Carlos Célio Sousa da Cruz

Programa de Ciência e Tecnologia/UFOPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/8929989531873951>

RESUMO: O realimentador é um dispositivo pertencente a ciclos termodinâmicos, sua principal característica é de aumentar a eficiência do ciclo, pois sua presença é de vital importância nas termoelétricas, que por sua vez, são de imprescindível relevância no território brasileiro. O artigo tem como principal objetivo analisar a importância do realimentador e a eficiência em um ciclo de Rankine com finalidade de relacionar a pressão que entra no

realimentador e as frações de vapor nas saídas da turbina com o rendimento. A metodologia utilizada durante o estudo foi montar um ciclo de Rankine isentrópico teórico com dados pré-estabelecidos para realizar uma simulação através do software EES. Para uma melhor compreensão da análise feita pelo software, foi calculado analiticamente o rendimento do ciclo original. Os resultados encontrados mostram que quanto menor for a pressão na entrada do realimentador maior será o rendimento do ciclo térmico. Além disso, mostra uma diminuição gradativa na eficiência quando a distribuição de fluxo de massa se dar a partir da turbina. A partir dessa pesquisa foi possível mensurar a eficiência do realimentador, mostrando os ganhos adquiridos com sua utilização, além da distribuição mais adequada do fluxo para melhorar o rendimento e a redução dos impactos ambientais ocasionados aos rios e lagos próximos de termoelétricas.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência, ciclo de Rankine, realimentador, EES.

THE IMPORTANCE OF FEEDWATER HEATER ON THE EFFICIENCY OF A RANKINE CYCLE USING THE EES

ABSTRACT: The Feedwater Heater is a device belonging to thermodynamic cycles, its main feature is to increase the efficiency of

the cycle, because its presence is vital importance in thermoelectric, which in turn are indispensable relevance in the Brazilian territory. The article aims to analyze the importance of the feedwater heater and its efficiency in a Rankine cycle for the purpose to list the pressure entering from the feedwater heater and the steam fractions in the turbine outputs with efficiency. The methodology used during the study was to assemble a theoretical isentropic Rankine cycle with pre-established data for perform a simulation using the EES software. For a better understanding of the analysis made by the software, the yield of the original cycle was analytically calculated. The results found show that the lower the pressure at the feedwater heater inlet, results in a higher yield. In addition, it shows a gradual decrease in efficiency when the mass flow distribution is from the turbine. From this research it is possible to measure the effectiveness of the feedwater heater, showing the gains acquired from its use, as well as the most appropriate distribution of flow to improve yield and reduction of environmental impacts caused to rivers and lakes near thermoelectric.

KEYWORDS: Efficiency, Rankine Cycle, Feedwater Heater, EES.

1 | INTRODUÇÃO

Segundo Borgnakke e Sonntag (2017) o realimentador é um aquecedor e desareador da água de alimentação, esse equipamento tem duplo objetivo, o de aquecimento e o de remoção de ar da água de alimentação. A menos que o ar seja removido da água, pode ocorrer corrosão excessiva na caldeira.

De acordo com Çengel e Boles (2013) o aquecedor de água de alimentação também conhecido como realimentador é um equipamento que tem como função o pré-aquecimento de um fluido antes dele voltar a entrar na caldeira, ao realizar essa troca de calor adiciona energia ao fluido, exigindo uma menor quantidade de energia da caldeira para aquecer o fluido, ao fazer isso as perdas de energias são menores, pois, ao mesmo tempo em que perde energia ao passar de um dispositivo a outro, acaba-se ganhando no realimentador, assim maximizando a eficiência do ciclo.

O realimentador é utilizado quase que restritivamente em termoelétricas, que por sua vez são de extrema importância no território brasileiro, pois, de acordo com a ANEEL essa é a segunda maior fonte geradora de energia elétrica do país, produzindo 24,41% de toda energia produzida, esses dados nos remetem a diversos fatores importantes seja positivamente ou negativamente, como o econômico e ambiental.

Segundo Guerra e Carvalho (1995) o principal destaque negativo causado pela geração da termoelétricas são as emissões de gases e material particulado na atmosfera, que nos remetem ao tema ambiental uma vez que tais gases estão relacionados as mudanças climáticas acarretadas pelos gases de efeito estufa e as consequentes negociações, em curso, sobre medidas de controle da emissão de CO₂. Outro dano com bastante relevância é ocasionado pelo aumento na temperatura

dos rios próximos onde estão instaladas as termoelétricas. Segundo Powers et al. (1979) as necessidades biológicas dos peixes estão correlacionadas a temperatura do ambiente onde vivem, caso haja uma mudança na temperatura de lagos ou rios a quantidade de oxigênio diminui, prejudicando a sobrevivência dos animais que vivem naquele habitat, esse efeito é conhecido como Lei de Henry.

Segundo Pariente (2015) a presença do realimentador é fundamental para minimizar os danos ao meio ambiente e a geração de energia elétrica, pois, influi consideravelmente na eficácia do sistema, permitindo uma melhor produção da usina, isso sem prejudicar ainda mais a natureza. A partir disso o presente artigo tem como objetivo estudar e analisar o potencial do realimentador a fim de mostrar sua utilização dentro de um ciclo de Rankine comprovando sua funcionalidade e junto a todos os seus ganhos.

2 | DESENVOLVIMENTO

De acordo com o seguinte ciclo de Rankine com realimentador apresentado na figura 1, nele está presente uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador, duas bombas e um realimentador.

A figura 1 apresenta o ciclo de forma exemplificada e o seu funcionamento se dá da seguinte maneira: a caldeira aquece o fluido vindo da bomba 2 transformando o líquido comprimido em vapor superaquecido; após a sua saída da caldeira o fluido escoar para a turbina a vapor, no qual ela possui frações de vapor, ou seja, a maior parte do fluido vai para o condensador e a outra para o realimentador, gerando trabalho a partir do vapor que entra.

O condensador recebe parte do fluido vindo da turbina transformando a mistura líquido-vapor em líquido saturado. Logo após, o fluido segue para a bomba 1 onde é comprimido até entrada do realimentador. Parte do vapor é extraído nesse estado e enviado para o realimentador, enquanto o restante do vapor continua se expandindo de forma isentrópica até o condensador. O fluido deixa o condensador como líquido saturado estando à pressão do condensador. Esse fluido condensado, entra em uma bomba isentrópica, no qual é comprimido e direcionado até o realimentador, onde se mistura ao vapor extraído da turbina. A fração de vapor extraída é tal que a mistura sai do realimentador como líquido saturado à pressão do aquecedor. Uma segunda bomba eleva a pressão do fluido até a pressão da caldeira. O ciclo se completa pelo aquecimento do fluido na caldeira até o estado de entrada da turbina.

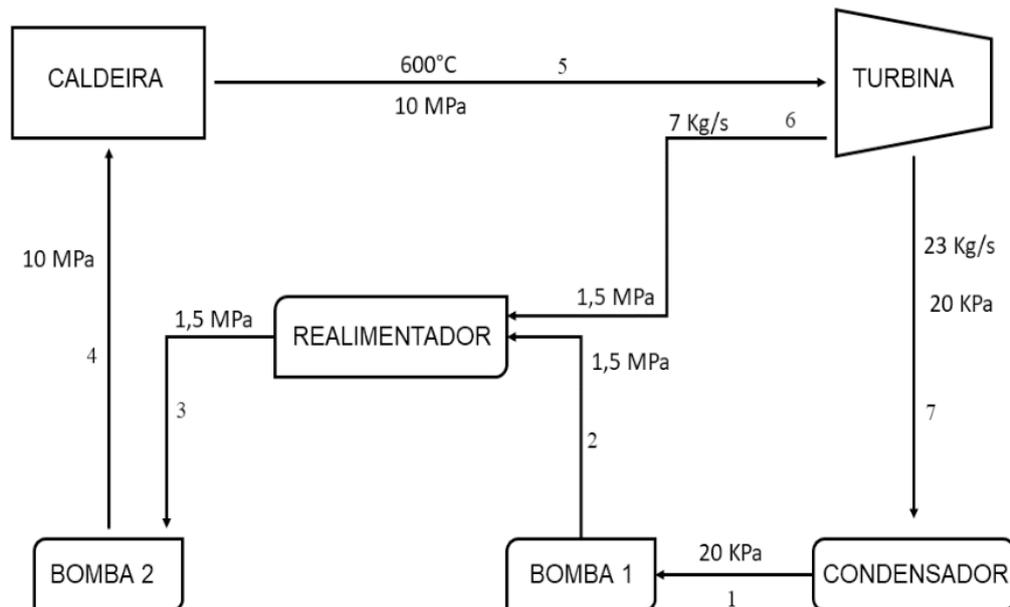


Fig. 1: Ciclo de Rankine com realimentador

Fonte: Autor (2019)

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do artigo é analisar a importância do realimentador de um ciclo termodinâmico e meios para alternativas para melhorar a eficiência através de simulações realizadas no software EES.

2.1.2 Objetivos Secundários

- i) Analisar a eficiência do ciclo energético a partir do software EES.
- ii) Encontrar a relação da eficiência do ciclo com e sem a presença do realimentador, afim de comprovar a sua importância.
- iii) Avaliar a distribuição ideal da fração de vapor extraído da turbina.

3 | METODOLOGIA

Para encontrar os objetivos do artigo deve-se compreender sobre a primeira lei da termodinâmica, que de acordo com Çengel e Boles (2013) uma das leis mais fundamentais da natureza é o princípio da conservação de energia e que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas que a quantidade total permanece constante, ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída, isso dimensiona a relação entre os processos de um ciclo e a partir dela se pode compreender a interação entre cada equipamento pertencente ao esquema mostrado na figura 1. A equação 1 é a expressão numérica da primeira lei da termodinâmica.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sai} \dot{m} \left(h + \frac{m.v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{m.v^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

A equação 2 expressa o mesmo princípio, não obstante, relata a o processo por meio do fluxo de massa, em que demonstra que a massa que entra em um volume de controle é igual a massa que sai.

$$\sum \dot{m}_{entra} = \sum \dot{m}_{sai} \quad (2)$$

Para fazer as simulações no EES faz-se primeiramente o balanço de massa usando a equação 2 e em seguida o balanço de energia adequando cada equipamento de acordo com a equação. O cálculo foi feito de forma individual para cada elemento pertencente ao ciclo, porém, foi considerado o efeito de cada processo anterior influenciando o posterior.

Segundo Martinelli (2003) a caldeira é um aparelho térmico cujo objetivo é produzir aquecimento de um fluido vaporizante. Para encontrar o calor que sai da caldeira, tem-se as seguintes considerações: não há geração de trabalho, energias cinéticas e potenciais são desconsideradas, além disso as entalpias foram retiradas do EES durante a simulação. Podemos assim calcular a troca de energia na caldeira a partir da seguinte equação:

$$\dot{Q}_{caldeira} = h_5 - h_4 \quad (3)$$

A turbina é o ponto posterior a caldeira, pois segundo Çengel e Boles (2013) à medida que o fluido escoar pela turbina as pás se movem realizando o trabalho de eixo. A turbina considerada no sistema possui duas saídas de massa, em uma o fluido sai como vapor superaquecido e em outra sai como mistura, indo diretamente para o condensador. Com isso, considera-se que haverá apenas geração de trabalho, portanto, será apenas desconsiderado a energia cinética e potencial, todas as entalpias atribuídas nas resoluções foram obtidas através do software EES e a partir das informações disponíveis obtém-se:

$$\dot{W}_{turbina} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (4)$$

O sistema utiliza duas bombas em distintos momentos, de acordo Çengel e

Boles (2013) o trabalho da bomba é utilizado e não gerado, com isso sabe-se que as bombas são apenas um dispositivo para as pressões, então não há calor nem trabalho gerado e as energias cinéticas e potenciais são desprezíveis, portanto, através da equação 5 e as considerações utilizadas para a bomba 1 obteve-se a seguinte equação para o trabalho:

$$\dot{W}_{bomba1} = (1 - y)v(P_2 - P_1) \quad (5)$$

Para a bomba 2, utilizou-se a equação 6:

$$\dot{W}_{bomba2} = v(P_4 - P_3) \quad (6)$$

O condensador é um trocador de calor, tendo a função retirar energia. Segundo Borgnakke e Sonntag (2017) o condensador retira calor do fluido, alterando seu estado. Neste processo torna-se a ignorar as energias cinéticas e potenciais envolvidas, analisando apenas as entalpias, através dessas considerações, temos a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{condensador} = (1 - y)(h_1 - h_7) \quad (7)$$

O rendimento do sistema de acordo com Moran et al. (2018) é encontrado buscando a relação entre o trabalho gerado e o calor dissipado, como o trabalho é gerado na turbina e consumido nas bombas, o rendimento se dar por:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{turbina} - (\dot{W}_{bomba1} + \dot{W}_{bomba2})}{\dot{Q}_{caldeira}} \quad (8)$$

As equações descritas foram utilizadas para escrever o código utilizado na simulação, contudo, para mostrar a significância da utilização do realimentador durante o ciclo, foi realizado uma comparação entre os ciclos em que os dois são diferidos pela presença do realimentador, o rendimento foi utilizado como parâmetro de comparação, sendo utilizado a equação 9.

Para traçar meios para avaliar a eficiência do sistema, foram modificados

alguns pontos no ciclo ilustrado pela figura 1. Durante o processo foi alterado a pressão na entrada do realimentador, foram selecionadas dez pressões diferentes e correlacionado com o rendimento causado a partir da mudança. Também foram modificados outros parâmetros, sendo o fluxo de massa distribuído na saída da turbina, modificando em sete outras variáveis relacionando com a eficiência do ciclo.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para encontrar o calor de entrada na caldeira, utilizou-se as entalpias de entrada e saída desta, obtendo-se o seguinte valor:

$$\dot{Q}_{caldeira} = 2.654,1 \quad (kJ/kg)$$

Para encontrar o trabalho produzido pela turbina, foi utilizada a equação 4 com as devidas entalpias de entrada e saída juntamente com a fração de vapor, obtendo-se:

$$\dot{W}_{turbina} = 1142,39 \quad (kJ/kg)$$

Os trabalhos fornecidos pelas duas bombas foram calculados pelas equações 5 e 6, através de suas determinadas pressões de trabalho, obtendo-se:

$$\dot{W}_{bomba1} = 18,64 \quad (kJ/kg)$$

$$\dot{W}_{bomba2} = 8,9775 \quad (kJ/kg)$$

O calor de saída do condensador calculado a partir da equação 7 e com as determinadas entalpias de entrada e saída, obtém-se o valor de:

$$\dot{Q}_{condensador} = -1712,4 \quad (kJ/kg)$$

O rendimento foi calculado a partir da equação 9, encontrando o valor aproximado de:

$$\eta = 0,4325$$

O ciclo de Rankine com realimentador apresentou uma eficiência de 43,25 % quando comparado com o ciclo de Rankine ideal, ocorreu um aumento de 9,3 % de eficiência do ciclo como resultado da regeneração.

A tabela 1 mostra a relação de variação da pressão na entrada do realimentador com cinco pressões distintas e valores variando entre 3000 KPa à 2000 KPa com o rendimento do ciclo. Na tabela 1 percebe-se que a eficiência aumenta de acordo com a diminuição da pressão, demonstrando uma linearidade na relação entre ambas variáveis. Caso o realimentador não estivesse presente no ciclo, todo o fluxo de

massa passaria pelo condensador diminuindo o rendimento.

Pressão na entrada do realimentador (KPa)	Rendimento (%)
3000	42,79
2750	43,01
2500	43,25
2250	43,51
2000	43,80

Tabela 1: Análise de eficiência

Fonte: Autor (2019)

A tabela 2 descreve a relação da fração de vapor que se expande parcialmente na turbina e o restante até a pressão do condensador com a eficiência do ciclo térmico. A tabela 2 mostra que quanto maior for a fração de vapor y , menor será a eficiência no ciclo, pois o trabalho produzido na turbina é o fator preponderante na diminuição da eficiência do sistema térmico.

y	$1 - y$	Eficiência (%)
0,233	0,767	43,25
0,250	0,750	42,67
0,266	0,734	42,12
0,283	0,717	41,53
0,300	0,700	40,95
0,316	0,684	40,40
0,330	0,670	39,81

Tabela 2: Relação das frações de vapor com a eficiência

Fonte: Autor (2019)

Para fazer uma análise mais eficiente do ciclo, faz-se um gráfico T-s relacionando a temperatura com a entropia. O gráfico 1 revela que o calor transferido para o fluido de trabalho durante o processo do realimentador a caldeira diminui a temperatura média do processo de fornecimento de calor, portanto, a eficiência do ciclo. Caso não houvesse o realimentador no ciclo, parte do processo após a saída da turbina apresentaria valores de entropia maiores e demandaria mais energia para voltar ao estado inicial que resultaria na diminuição da eficiência do processo.

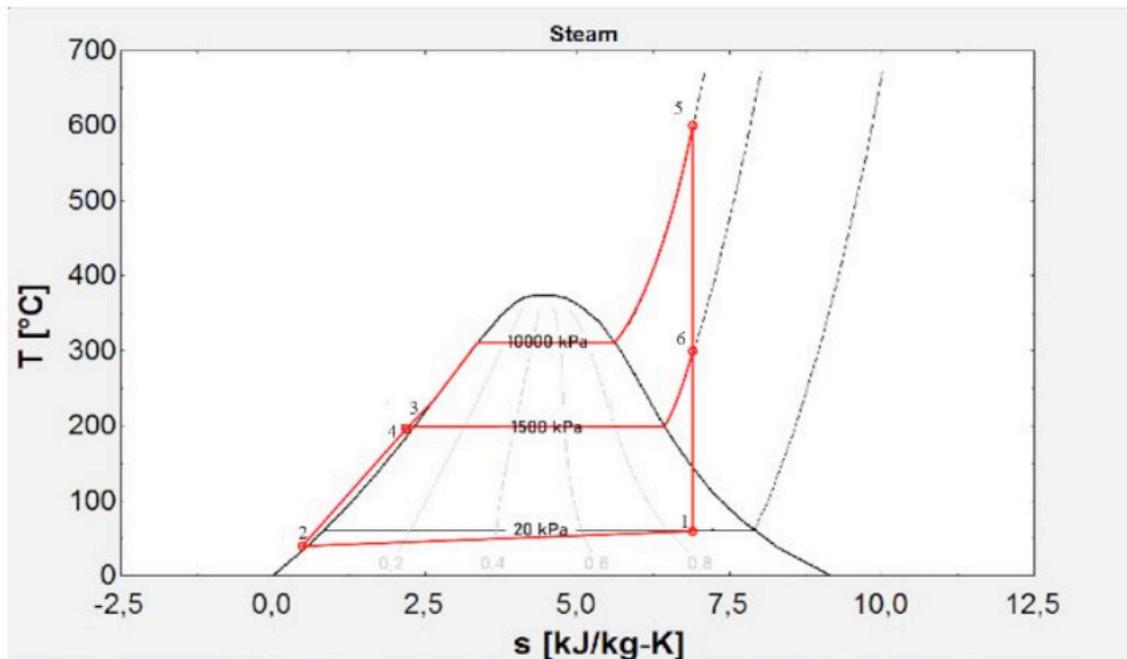


Gráfico 1: Gráfico T-s com realimentador

Fonte: Autor (2019)

5 | CONCLUSÃO

Os objetivos mensurados foram alcançados através das simulações realizadas no software EES e os resultados obtidos demonstraram a influência do realimentador no ciclo. Foi mostrado que a mudança de pressão na entrada do realimentador influencia no rendimento do ciclo, uma vez que reduzida a pressão na entrada, por consequência, o rendimento também aumentará proporcionalmente.

Observou-se também que as mudanças na fração de vapor nas saídas da turbina ocasionaram um aumento significativo na eficiência do ciclo, pois, o valor extraído poderia ter produzido mais trabalho, mas seu efeito de elevar temperatura média do processo de fornecimento de calor é mais benéfico para a eficiência térmica.

Conforme o estudo foi possível obter uma melhor compreensão do funcionamento do ciclo e impactos energéticos decorrentes ao uso do realimentador. Porém, é importante ressaltar que a presença do realimentador não pode ser justificada economicamente, de acordo com Borgnakke e Sonntag (2017), pois os autores argumentam que a economia alcançada com o aumento do rendimento não compensaria o custo dos equipamentos adicionais como o realimentador, tubulações extras, nova bomba e etc. No entanto, devem-se considerar outras variáveis tão importantes quanto esta, como a ambiental devido a crescente conscientização ambiental. Não se deve ignorar, por exemplo, os benefícios ambientais que esses ciclos podem gerar com o ganho energético, pois as diversas entidades que compõem a sociedade têm reforçado cada vez mais a necessidade de tecnologias

sustentáveis, e para alcançarmos tal objetivo todo ganho ecológico deve ser valorizado.

REFERÊNCIAS

ANEEL, **Banco de Informação de Geração**. Brasil, 2019. Disponível em: < www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm > acessado em 10/07/2019 às 15:00 horas.

BORGNAKKE, Claus. SONNTAG, Richard. **Fundamentos da termodinâmica**, São Paulo, 2017.

ÇENGEL, Yunus. BOLES, Michael. **Termodinâmica**, Nova York, 2013.

GUERRA, Sinclair. CARVALHO, Antomar. **Um paralelo entre os impactos das usinas hidrelétricas e termoelétricas**. São Paulo, 1995.

MARTINELLI, Luiz. **Geradores de vapor**. Rio Grande do Sul, 2003.

MORAN, Michael. SHAPIRO, Howard. BOETTNER, Daisie. BAILEY, Margaret. **Princípio da Termodinâmica para Engenharia**. Nova Jersey, 2018.

PARIENTE, Marcos. **Efecto del nivel condensado en Feedwater heaters**. Lérganes, 2015.

POWERS, Denis. MARTIN, Joseph. GARLICK, Robert. FYHN, Hans. FYHN, Unni. **O efeito da temperatura sobre os equilíbrios do oxigênio das hemoglobinas de peixe em relação à variabilidade térmica ambiental**. 1979.

ANÁLISE TEÓRICA DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DA MACAÚBA (*Acrocomia acuelata*)

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 17/11/2019

Alex Torres da Silva

Instituto de Engenharia e Geociência,
Universidade Federal do Oeste do Pará.

Santarém - Pará.

<http://lattes.cnpq.br/7767758510451405>

Nelson de Souza Amorim

Instituto de Engenharia e Geociência,
Universidade Federal do Oeste do Pará.

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/8046892199808707>

RESUMO: O conhecimento das propriedades dielétricas de materiais quando submetidos a um campo elétrico é fundamental em diferentes áreas da engenharia, tais como: conservação de alimentos, transmissão de energia, telecomunicações e eletrônica. As propriedades dielétricas são definidas em termos de constante dielétrica (k') e fator de perda dielétrica (k''). O comportamento das propriedades dielétricas da Macaúba (*Acrocomia Acuelata*) em função de parâmetros importantes, tais como: temperatura, teor de umidade e teor de cinzas, foram analisados teoricamente. Para a constante dielétrica (k') foi observado que para a frequência de 2450 MHz esta diminui com o aumento da temperatura, aumenta com o teor

de umidade e uma baixa influência do teor de cinzas. Foi observado que o fator de perda (k'') aumenta com a temperatura, teor de umidade e teor de cinzas.

PALAVRAS-CHAVE: macaúba, propriedades dielétricas, constante dielétrica, fator de perda

THEORETICAL ANALYSIS OF DIELECTRIC PROPERTIES

OF MACAUBA (*Acrocomia acuelata*)

ABSTRACT: The knowledge of the dielectric properties of materials when subjected to an electric field is fundamental in different areas of engineering such as food conservation, power transmission, telecommunications and electronics. Dielectric properties are defined in terms of dielectric constant (k') and dielectric loss factor (k''). The behavior of dielectric properties of Macaúba (*Acrocomia Acuelata*) as a function of important parameters such as temperature, moisture content and ash content were theoretically analyzed. For the dielectric constant (k') it was observed that for the frequency of 2450 MHz it decreases with increasing temperature, increases with moisture content and a low influence of ash content. It was observed that the loss factor (k'') increases with temperature, moisture content and ash content.

KEYWORDS: macauba, dielectric properties,

dielectric constant, dielectric loss factor.

1 | INTRODUÇÃO

Materiais dielétricos são importantes para diversas aplicações tecnológicas, tais como: atuadores, geradores, estruturas inteligentes, componentes ópticos, dispositivos ultrassônicos, comunicação e micro-ondas. Além disso, as propriedades dielétricas fornecem informações úteis para a melhoria do controle de processamento e qualidade de produtos alimentícios e materiais. Uma fruta com potencial econômico-tecnológico promissor conhecida como Macaúba (*Acrocomia Acuelata*), com enfoque em suas propriedades físico-químicas, tem sido amplamente estudada (Teixeira *et.al.*, 2018; Batista *et.al.*, 2019; Queiroz *et.al.*, 2014). A macaúba é uma palmeira nativa de florestas tropicais e abrange 15 espécies diferentes (Lira *et.al.* (2014)).

Segundo Flaker (2018), com ênfase no conhecimento das propriedades dielétricas baseado no tratamento térmico por micro-ondas de alimentos, este é caracterizado pela constante dielétrica (k') e fator de perda (k''), fornecendo como informação, a forma como o alimento absorve/armazena energia e dissipa na forma de calor. As propriedades dielétricas de diferentes alimentos líquidos e semissólidos para diferentes faixas de temperatura e frequência, teor de umidade e teor de cinzas, vêm sendo estudadas experimentalmente por (Sipahioglu e Barringer, 2003; Calay *et.al.*, 1995; Nelson, 2015). Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento teórico das propriedades dielétricas da polpa e amêndoa da Macaúba (*Acrocomia Acuelata*) em função de parâmetros importantes, como: temperatura, teor de umidade e teor de cinzas.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para a estimativa das propriedades dielétricas: constante dielétrica (k') e fator de perda dielétrica (k'') foi a Macaúba (*Acrocomia Acuelata*), conforme a figura 1.



Figura 1 - Macaúba (*Acrocomia Acuelata*).

Fonte: Autor.

Para a estimativa teórica da constante dielétrica (k') e fator de perda (k'') foram utilizadas as equações 1 e 2 respectivamente, obtidas a partir do trabalho experimental para uma frequência de 2450 MHz [4].

Equação 1:

$$k' = 22,12 + 0,2379 \times T + 0,5532 \times M - 0,0005134 \times T^2 - 0,003866 \times M \times T \quad (1)$$

Equação 2:

$$k'' = 33,41 - 0,4415 \times T + 0,001400 \times T^2 - 0,01746 \times M + 1,438 \times A + 0,001578 \times M \times T + 0,2289 \times A \times T \quad (2)$$

onde T é a temperatura (°C), M é o teor de umidade (%) e A o teor de cinzas (%).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a estimativa teórica da constante dielétrica (k') e para o fator de perda dielétrica (k'') foram avaliadas duas subespécies da Macaúba (*Acrocomia Acuelata*), *Sclereocarpa* (A) e *Totali* (B) através de suas composições centesimais obtidas experimentalmente por Lira *et.al.* (2013), conforme a tabela 1.

	Polpa		Amêndoa	
	A	B	A	B
Cinzas (%)	3,22	2,03	1,54	1,29
Umidade (%)	45,86	45,42	4,42	3,18

Tabela 1: Composição Centesimal

Fonte: Lira *et.al.* (2013).

Constante Dielétrica

A figura 2, mostra o comportamento da constante dielétrica da polpa e amêndoa para a subespécie da Macaúba, *Sclereocarpa* utilizando a equação 1. Foi observado que a constante dielétrica tende a diminuir com o aumento da temperatura, pois segundo Flaker (2018), a água presente nos alimentos está sob a forma de água livre, e a agitação das moléculas da água simultaneamente esta dificulta o alinhamento dos dipolos com o campo elétrico, resultado na diminuição deste parâmetro. O máximo valor para a constante dielétrica para a polpa foi na temperatura de 59°C, isto é,

49,2783. Para a amêndoa, o valor foi de 44,5943 na temperatura de 130°C. Quanto a influência do teor de umidade, a constante dielétrica aumenta com o aumento do teor de umidade para a polpa e diminui os valores de umidade para a amêndoa, isto se deve ao fato da água apresentar uma alta polaridade e reorientar-se em resposta ao campo magnético aplicado. Quanto a influência do teor de cinzas, a constante dielétrica da polpa não foi afetada de forma significativa.

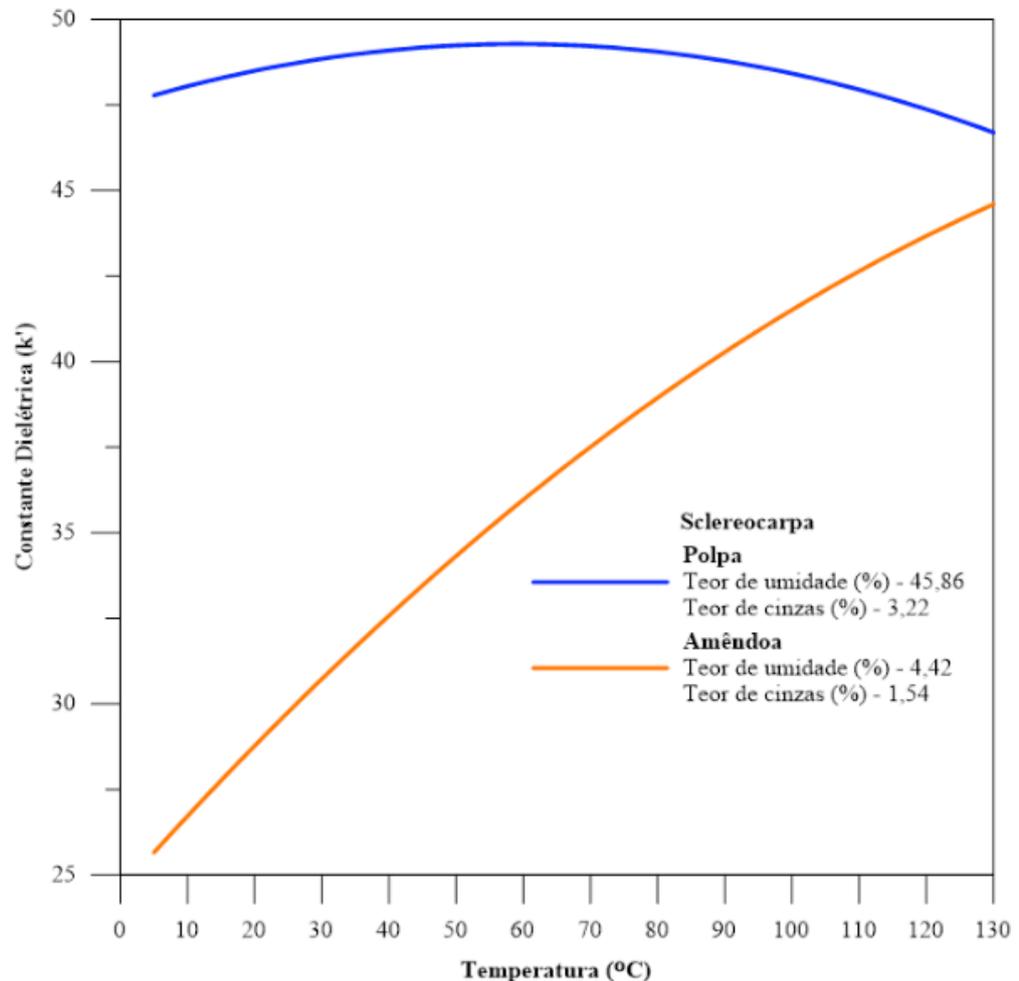


Figura 2- Constante dielétrica *Sclerocarpa*

A figura 3, mostra o comportamento da constante dielétrica para a espécie *Totai* a partir da equação 1. De forma semelhante à figura 1, a constante dielétrica diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o aumento do teor de umidade, para a polpa e amêndoa respectivamente. O máximo valor para a constante dielétrica foi de 49,1367 na temperatura de 61°C para polpa. Para a amêndoa, o valor máximo foi de 44,5315 na temperatura de 130°C. Novamente, a influência do teor de cinzas sobre a constante dielétrica para a espécie *Totai*, não foi afetada de forma significativa.

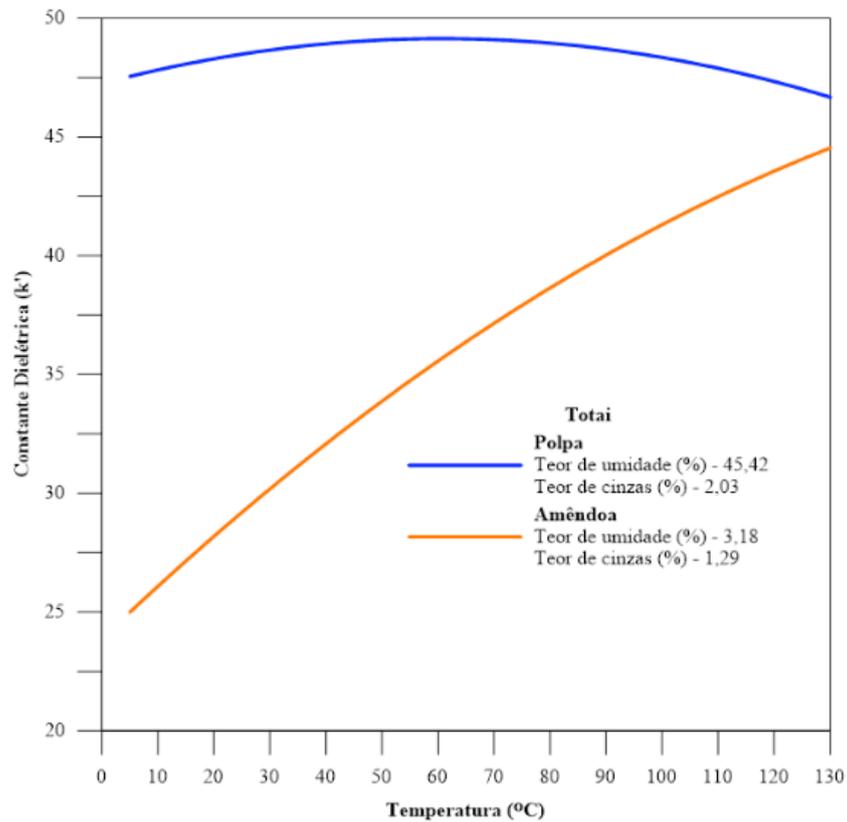


Figura 3 - Constante dielétrica espécie *Total*.

Fator de Perda

A figura 4, mostra o comportamento do fator de perda dielétrica para a espécie *Sclereocarpa* usando a equação 2 para a polpa e amêndoa respectivamente. Para o teor de umidade, a influência sobre o fator de perda dielétrica é baixa para temperaturas abaixo de 10°C. Acima desta temperatura, o fator de perda aumenta devido à condutividade iônica com o aumento do teor de umidade. Para a polpa, o máximo valor do fator de perda foi de 101,523 e para a amêndoa foi de 47,8503 ambos para a temperatura de 130°C. Para o teor de cinzas, existe um aumento influenciado pelo teor de cinzas, devido ao aumento da componente iônica do fator de perda.

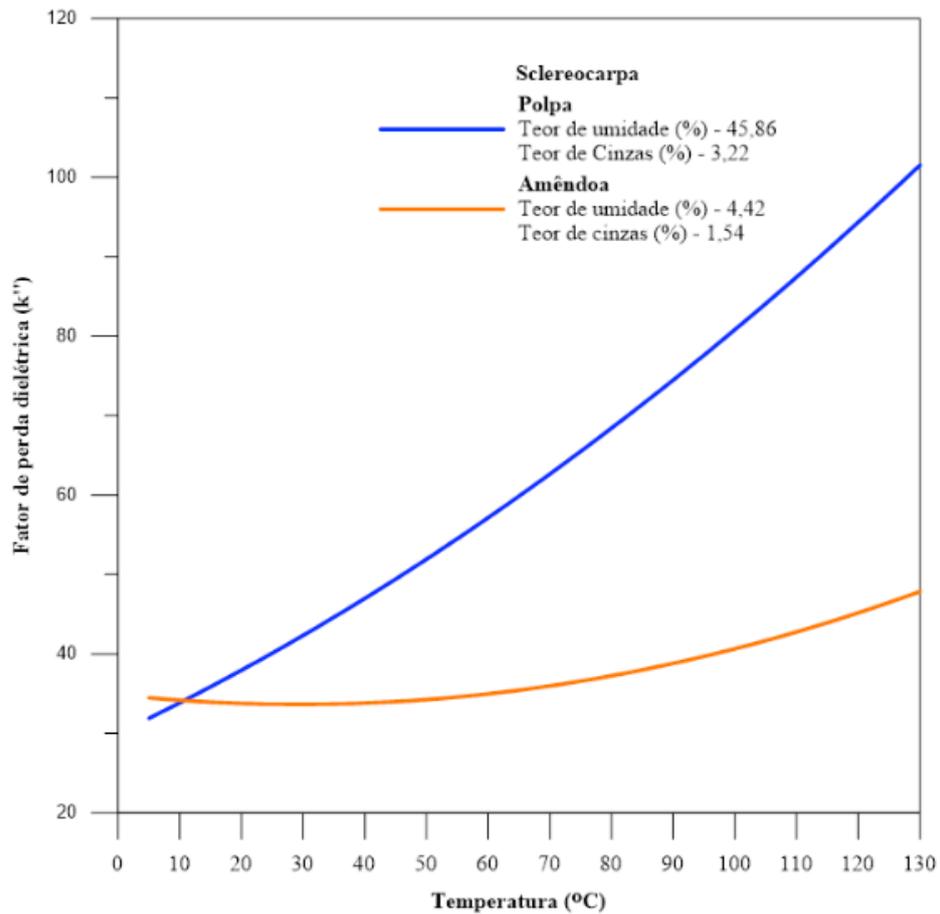


Figura 4 - Fator de perda espécie *Sclereocarpa*.

A figura 5, mostra o comportamento do fator de perda dielétrica para a espécie *Totai* a partir da equação 2 para a polpa e amêndoa respectivamente. Um comportamento semelhante a espécie *Sclereocarpa* foi observado, onde a influência do teor de umidade sobre o fator de perda dielétrica é pequena para temperaturas abaixo de 5°C. Acima desta temperatura, o fator de perda aumenta com o aumento do teor de umidade, onde o valor máximo do fator de perda foi de 64,388 para a polpa e para a amêndoa foi de 40,0137, ambos para a temperatura de 130°C, devido a condutividade iônica. Para o teor de cinzas, este aumenta com o aumento do teor de cinzas.

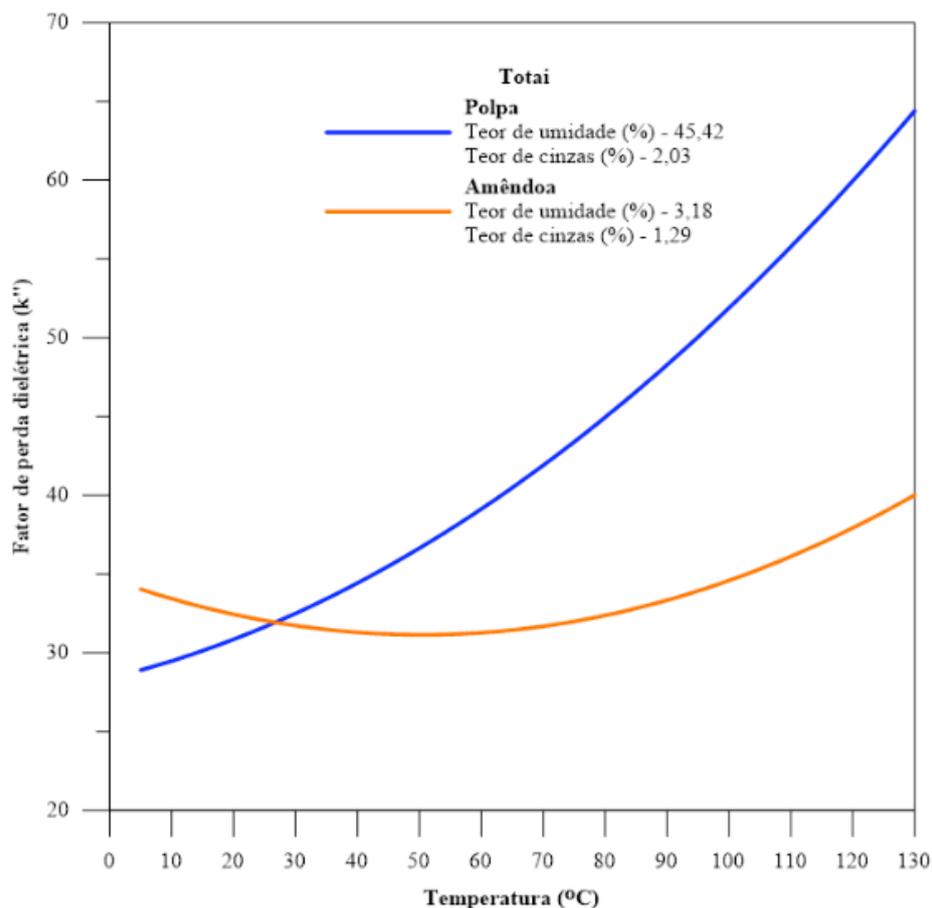


Figura 5 - Fator de perda espécie *Total*.

4 | CONCLUSÃO

A avaliação teórica das duas espécies da Macaúba, *Sclereocarpa* e *Total*, mostra que a constante dielétrica (k') diminuem com o aumento da temperatura e aumentam com o teor de umidade em decorrência da alta polaridade da água livre. Em ambos os casos, a influência do teor de cinzas foi praticamente insignificante. Por outro lado, para o fator de perda dielétrica (k''), levando em consideração as duas espécies, a perda dielétrica aumenta com a temperatura, com aumento do teor de umidade e também com o teor de cinzas, isso ocorre porque os três são influenciados pela condutividade iônica.

REFERÊNCIAS

Batista, D. E. C.; Fabris, D. J.; Cavalcante, D. C. L.; Ferraz, P. V.; Junior, A. C. B.; Ardisson, D. J.; Lemos, R. L.; Damasceno, M. S. **Monitoramento da Composição em Ésteres do Biodiesel do Óleo de Amêndoa da Macaúba (*Acrocomia acuelata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.) em Contato Direto com Aço Carbono e o Aço Carbono Galvanizado**, Química Nova, Vol. 42, No. 4, 387-396, Belo Horizonte, 2019.

Calay, K. R.; Newborough, M.; Probert D.; Calay, S. P. Predictive Equations for the Dielectric Properties of Foods, International **Journal of Food Science and Technology**, Vol. 29, p. 699-713, 1995.

Flaker, C. H. C. **Propriedades dielétricas de suco de laranja, goiabada em pasta e filmes de gelatina**, Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

Lira, F. F.; Machado, W.; Santos, F. V. J.; Takahashi, A. S.; Guimarães, F. M.; Leal, C. A. **Avaliação da Composição Centesimal de Frutos da Macaúba**, Anais do III Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, Vol. 2, No. 3, p. 17-20, Londrina, 2013.

Nelson, O. S. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications, **Academic Press**, 2015.

Penãta, F. P. A. **Estudo das propriedades dielétricas de água de coco verde e suco de frutas cítricas relevantes para o aquecimento por microondas**, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Queiroz, L. A. L.; Nascimento, C. S.; Silveira, A. L. M.; Fonseca, R. M.; Cren, E. C.; Andrade, M. H. C. **Caracterização das Propriedades Físico-Químicas da Polpa da Macaúba (Acrocomia Acuelata) após Diferentes Tratamentos Pós-Colheita e Armazenamento**, XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

Sipahioglu, O.; Barringer, S. A. Dielectric Properties of Vegetables and Fruits as a Function of Temperature, Ash, and Moisture Content, **Journal of Food Science**, Vol. 68, p. 234-239, 2003.

Teixeira, L. V.; Carneiro, O. C. A.; Evaristo, B. A.; Faria, H. F. B.; Donato, B. D.; Magalhães, A. M. Potential of Macauba Epicarp (*Acrocomia Acuelata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) for Briquettes Production, **Revista Floresta**, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2018.

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE DATA SCIENCE E MACHINE LEARNING EM UM PROBLEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE UM DATASET DE MARKETING BANCÁRIO

Data de aceite: 27/01/2020

Yasmin Braga Teixeira

UFOPA, Laboratório de Inteligência Computacional (LabIC),
Santarém, Pará

<http://lattes.cnpq.br/3762230290151180>

João Vitor Rebelo Viana

UFOPA, Laboratório de Modelagem Computacional (LabMC)
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/6370552438773776>

Josecley Fialho Góes

UFOPA, Laboratório de Modelagem Computacional (LabMC)
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/6689337073298410>

Anderson Alvarenga de Moura Meneses

UFOPA, Laboratório de Inteligência Computacional (LabIC),
Santarém, Pará

<http://lattes.cnpq.br/6272872215125680>

RESUMO: A pesquisa explora o conceito de análise de dados com Ciência dos Dados (*Data Science*) ao utilizar Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) para resolver o problema de classificação de uma proposta de marketing Bancário. O *dataset* utilizado consiste no resultado de uma campanha de *marketig* em um

banco de Portugal. Ele foi obtido no repositório da Universidade da Califórnia (UCI) e chama-se *Bank Marketing Data Set*. A composição do *dataset* está dividida em 45211 observações e 17 atributos incluindo os dados sobre a aceitação ou não da proposta pelo cliente do banco. Com isso, a pesquisa foca em desenvolver algoritmos de Aprendizado de Máquina que resolvam o problema de classificação para prever se o cliente aceitou ou não a proposta da propaganda. Os processos da metodologia incluem analisar o *dataset*, fazer análise exploratória de dados e plotagem de gráficos para conhecimento de quais variáveis são necessários manter ou retirar para aplicação do algoritmo, implementar a algoritmo KNN e Redes Neurais para classificação de valores. Como resultados a acurácia foi de 88% para a Rede Neural MLP e para o KNN. Como trabalhos futuros, é necessário mais testes para uma melhor comparação, porém foi possível prever a proposta do cliente e obter informações sobre perfis de consumo de clientes de um banco.

PALAVRAS-CHAVE: Ciência de Dados, Aprendizado de Máquina, Redes Neurais, K-Nearest Neighbors, Marketing Bancário.

APPLICATION OF DATASCIENCE AND
MACHINE LEARNING TECHNIQUES IN
A PROBLEM OF CLASSIFICATION OF A
BANKING MARKETING DATASET

ABSTRACT: The research explores the concept of Data Science by using Machine Learning to solve the classification problem of a Banking marketing proposal. The dataset used is the result of a marketing campaign in a bank of Portugal. It was obtained from the University of California (UCI) repository and is called Bank Marketing Data Set. The composition of the dataset is divided into 45211 observations and 17 attributes including data on whether or not the bank's client accepts the proposal. Thus, the research focuses on developing Machine Learning algorithms that solve the classification problem to predict whether or not the customer accepted the advertising proposal. The methodology processes include analyzing the dataset, doing exploratory data analysis with graph plotting to know which variables are necessary to maintain or remove for application of the algorithm, implementing the KNN algorithm and Neural Networks for comparison of values. As a result the accuracy was 88% for the Neural Network and the KNN. In future researches, further testing is needed for a better comparison, but it was possible to predict the customer's proposal and obtain information on customer consumption profiles from a bank.

KEYWORDS: Data Science, Machine Learning, Neural Network, K-Nearest Neighbors, Bank Marketing.

1 | INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, uma imensa quantidade de dados é coletada de diversos âmbitos. Esses dados são analisados e podem ser utilizados para inferir na tomada de decisões que contribuem para a evolução dependendo do contexto ou local onde será aplicado. Com isso, diversas indústrias estão investindo para obter vantagens com a utilização da análise de dados (WISAENG, 2013). Incluídas nessas empresas estão as de finanças ou bancárias. Segundo (PROVOST e FAWCETT, 2013) a análise de dados de propagandas em bancos é utilizada para o desenvolvimento de perfis de clientes. Com isso, favorecem a indicação de produtos ou serviços específicos para cada perfil (ELSALAMONY e ELSAYAD, 2013).

Essa análise de dados é feita através de Ciência de Dados (Data Science) que segundo (CIELEN, MAYSMAN e ALI, 2016) é o processo de extrair conhecimento a partir da análise de uma série de dados e fazer previsões a partir disso.

Nesse sentido, para a previsão é utilizado o conceito de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) (GRUS, 2014) em que sua definição é a criação de modelos que aprendem a partir de dados analisados.

No contexto de *Machine Learning* existem dois tipos de problemas a serem resolvidos, que consistem nos problemas de Regressão, com variáveis-alvo quantitativas, e Classificação que por sua vez as variáveis-alvo são qualitativas (CAETANO, 2015).

Dentre os diversos algoritmos de aprendizado de máquina, este trabalho foca

na classificação com *K-Nearest Neighbors* (KNN) (ABDELMOULA, 2015) e Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Network*) (KIRK, 2017). O algoritmo KNN calcula a distância Euclidiana dos pontos e os classifica a partir de suas proximidades. Já as Redes Neurais simulam neurônios artificiais com conjuntos de entradas e saídas em que cada conexão (neurônio) tem um peso associado (ELSAMONY, 2014).

O *dataset* explorado chama-se Bank Marketing Data Set e consiste em uma reunião de dados de uma campanha de marketing feita com os clientes de um banco de Portugal em que tinha como proposta a venda de uma aplicação bancária de longo prazo. Ele é composto por 45211 observações e 17 atributos onde é incluído os dados sobre se o cliente aceitou ou não a proposta além de características dos clientes, da campanha de propaganda e do próprio banco.

O objetivo da pesquisa é desenvolver algoritmos em Python que resolvam com Aprendizado de Máquina o problema de Classificação para prever se o cliente aceitará a proposta de investimento da propaganda ou não.

2 | METODOLOGIA

A base de dados chamada Bank Marketing Data set foi baixada do repositório de dados da UCI. Os atributos “*age*”, “*job*”, “*education*”, “*marital*”, “*default*”, “*balance*”, “*housing*” e “*loan*” contidos nela são relacionados ao cliente; “*contact*”, “*day*”, “*contact*”, “*month*”, “*duration*” e “*campaign*” referem-se a campanha em si e, por fim, “*pdays*”, “*previous*” e “*poutcome*” fazem parte do histórico bancário.

Toda a solução do problema foi implementada na linguagem Python no ambiente de desenvolvimento *Spyder*. Para o tratamento dos dados foi utilizada a biblioteca *Pandas*, com ela a análise dos dados se torna rápida e poderosa, junto com as bibliotecas de visualização gráfica *Matplotlib* e *Seaborn* onde foi feita a Análise Exploratória de Dados com a plotagem dos gráficos relação entre os clientes contatados e seu estado de empréstimo habitacional e pessoal, gráfico entre os dados de inadimplência dos clientes e a aceitação do investimento, gráfico de relação entre o número de ligações e a duração das chamadas, gráfico da taxa de inscrição na proposta pelo mês de contato, gráfico da taxa de inscrição pelo emprego do cliente e gráfico da taxa de inscrição por número de contato por mês. Na preparação dos dados para os testes, as variáveis “*job*”, “*education*”, “*housing*”, “*default*”, “*loan*” e “*y*” do *dataset* foram transformadas para variáveis do tipo *dummy* para evitar tendências na rede.

O data set foi dividido em variável alvo (*y*) e variáveis preditoras (todas as outras 16 variáveis). Para o cálculo do desempenho do classificador foi tirada a média das acurácias dos *Cross Validation* (CVs) de dez testes. O modelo utilizado para classificação foi o *K-Nearest Neighbors* (KNN) e Redes Neurais Artificiais Perceptron

Multicamadas (*Multilayer Perceptron - MLP*). Para o KNN foi realizado o modelo de seleção “*train_test_split*” que separa o *dataset* em conjunto de teste e conjunto de treinamento em uma proporção que evita tendências no modelo.

Os algoritmos foram implementados com auxílio da biblioteca de aprendizado de máquina *Scikit-Learn*. O algoritmo KNN foi treinado com o número de vizinhos igual a 6. A rede neural foi treinada com *cross-validation* igual a 10, com 3 camadas ocultas contendo, respectivamente, 100, 90 e 30 neurônios, todas com função de ativação *ReLU* e 1000 épocas.

3 | RESULTADOS

Foi realizado o processo de Análise Exploratória de Dados e a construção de gráficos que correlacionam as variáveis do problema para maior conhecimento do *dataset* a ser estudado.

As Fig. 1 e Fig. 2 relacionam o estado de empréstimo bancário dos clientes do banco que foram contatados na campanha. Na Fig. 1 os empréstimos habitacionais e em Fig. 2 empréstimos pessoais. Em ambas a taxa de aceitação da proposta é maior quando os clientes não possuem nenhum empréstimo.

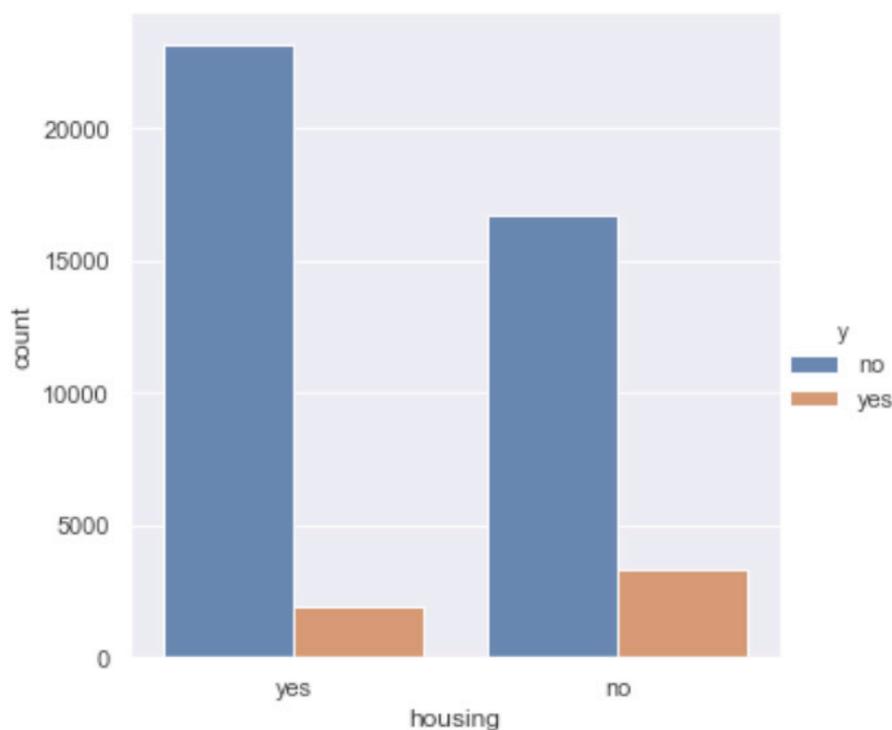


Figura 1: Relação entre os clientes contatados que possuem empréstimo habitacional e resposta da campanha.

Fonte: Autores.

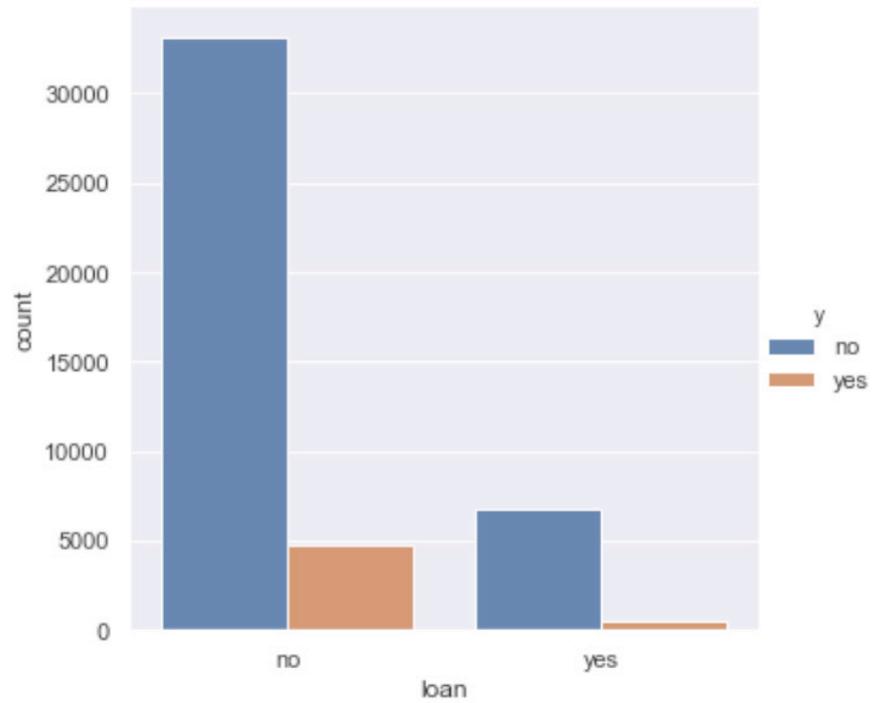


Figura 2: Relação entre o estado de empréstimo pessoal dos clientes e a resposta da proposta.

Fonte: Autores.

Na Fig. 3 a relação é entre os dados de inadimplência dos clientes no banco. Nela pode-se perceber que os clientes que se encontram no estado de inadimplência quase não aceitaram a proposta de investimento.

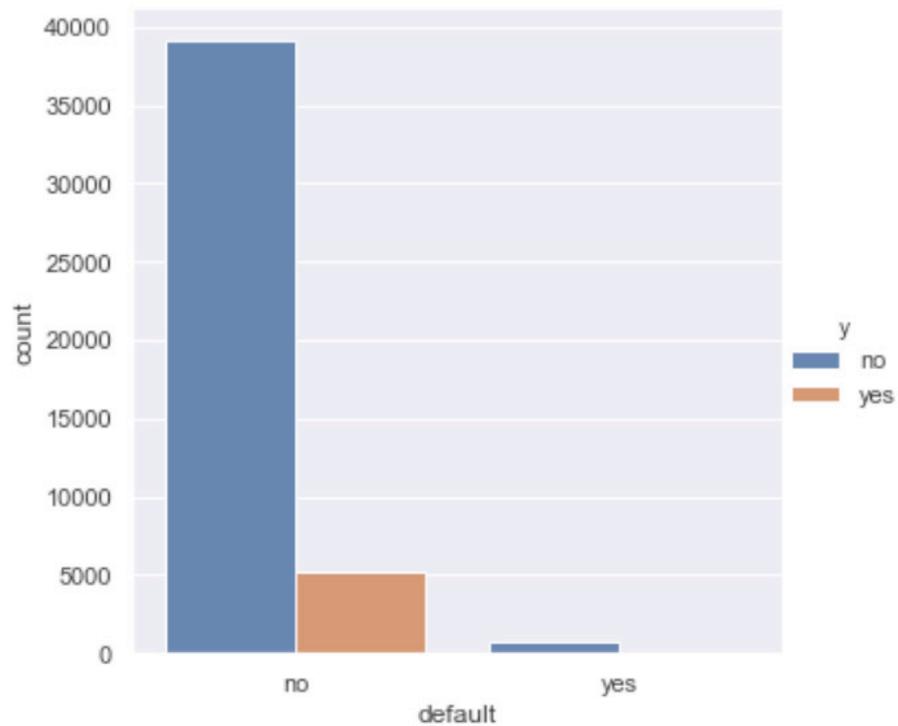


Figura 3: Relação entre os clientes contatados pela campanha que estão inadimplentes ou não e a resposta da campanha.

Fonte: Autores.

A Fig 4 configura-se um histograma com as contratações mensais feitas pela campanha. Com isso, é possível perceber que o mês em que a campanha mais divulgou o investimento para os clientes foi o mês de maio. Na Fig 5 por outro lado, que mostra a porcentagem de aceite da proposta por mês, ou seja, o mês em que as pessoas mais aceitam a proposta foi o mês de março.

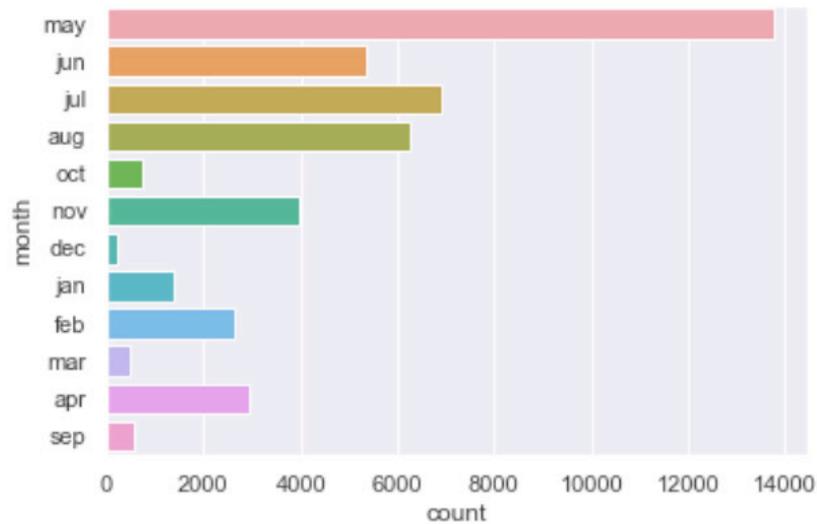


Figura 4: Número de contato na campanha por mês.

Fonte: Autores.

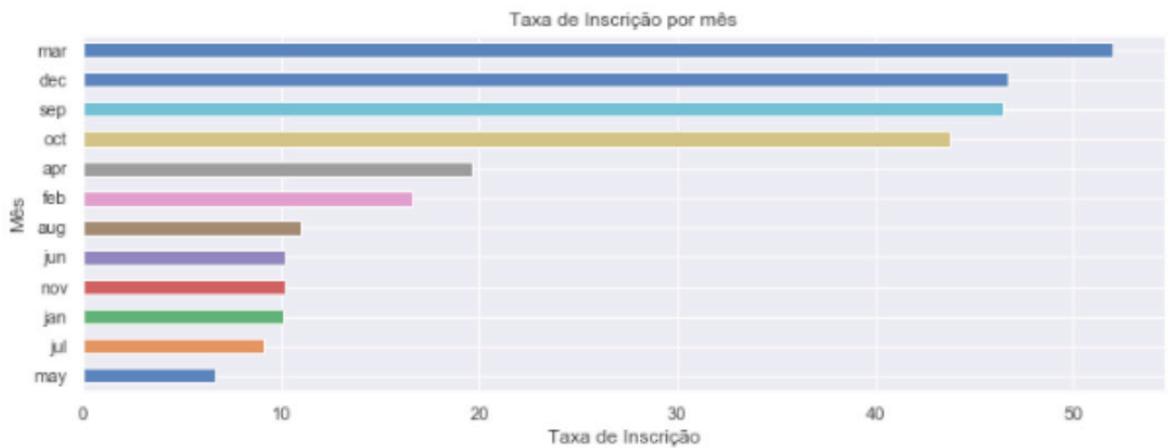


Figura 5: Relação da porcentagem de aceitação na proposta por mês.

Fonte: Autores.

A Fig 6 mostra a correlação entre duas colunas do *dataset* relacionadas as ligações feitas para os clientes que são “*campaign*” com o número de ligações feitas para cada cliente e “*duration*” com a duração das chamadas em segundos. Além disso, possui a resposta do cliente para cada caso o que informa uma correlação muito grande em ligações não muito longas com um baixo número de ligações.

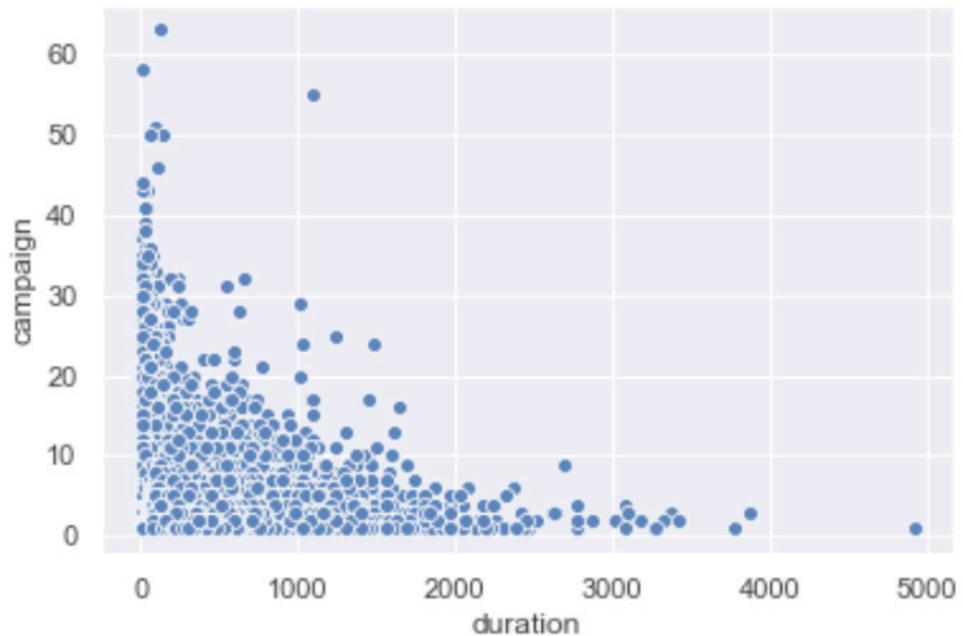


Figura 6: Relação entre duração da chamada e número de ligações com a resposta do cliente na campanha.

Fonte: Autores.

Com base na Análise Exploratória de Dados do problema de classificação as informações mais relevantes foram utilizadas, ou seja, as colunas diretamente relacionadas com a resposta na proposta de investimento. Sendo assim, as colunas “*marital*” que corresponde ao estado civil dos clientes, “*contact*” que correspondente ao tipo do meio de comunicação do cliente, “*day*” correspondente ao dia do mês do último contato, “*pdays*” número de dias que passaram depois do último contato na última campanha, “*previous*” correspondente a taxa de contato ao cliente antes da campanha e “*poutcome*” que corresponde ao resultado da campanha anterior para cada cliente, foram removidas do *dataframe*. Foram utilizadas, então, a coluna “*job*” com o tipo de emprego dos clientes, “*education*” com o tipo de estudo do cliente, “*age*” com a idade dos clientes, “*balance*” com o balanço bancário dos clientes, “*default*” com dados se o cliente está inadimplente ou não, “*housing*” com dados de empréstimo habitacional do cliente, “*loan*” com dados de empréstimo pessoal do cliente, “*month*” correspondente ao mês do último contato e “*campaign*” correspondente ao número de ligações realizados durante esta campanha e para cada cliente.

Com isso, como resultados dos testes de classificação encontram-se na Tabela 1. A média das acurácias com o algoritmo KNN foi em torno de 88,3% e com Redes Neurais MLP, a média foi de 88,2%, ou seja, aproximadamente iguais.

	MLP	KNN
	0.896	0.883
	0.911	0.882
	0.894	0.882
	0.873	0.883
	0.888	0.881
	0.873	0.884
	0.864	0.882
	0.883	0.882
	0.878	0.883
	0.861	0.885
Média	0.882	0.883
Desvio Padrão	0.0014	0.0014

Tabela 1: Resultados dos Testes e média dos valores.

Fonte: Autores.

4 | CONCLUSÃO

Em comparação, pode-se concluir que a classificação feita sobre a aceitação da proposta de marketing em uma aplicação bancária obteve um valor próximo de acurácia para o caso de uma Rede Neural Multi-layer Perceptron e o KNN, porém com uma diferença muito pequena, o que necessita, como trabalhos futuros, de mais testes para uma melhor comparação dos dois parâmetros. Por fim, foi possível prever a resposta de um cliente em uma campanha de marketing com base em dados coletados anteriormente durante a campanha. Além disso, foi possível obter informações sobre perfis de consumidores para possíveis melhorias nas próximas campanhas de marketing a serem realizadas.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo Banco da Amazônia S.A. (projeto “Sistema para monitoramento de energia usando Internet das Coisas, Big Data e Machine Learning). Y.B. agradece o apoio do CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ABDELMOULA, Aida Krichene. **Bank credit risk analysis with k-nearest-neighbor classifier: Case of Tunisian banks**. Accounting and Management Information Systems, v. 14, n. 1, p. 79, 2015.

CAETANO, Mateus et al. **Modelos de classificação: aplicações no setor bancário**. 2015.

CIELEN, Davy; MEYSMAN, Arno; ALI, Mohamed. **Introducing data science: big data, machine learning, and more, using Python tools**. Manning Publications Co., 2016.

ELSALAMONY, Hany A. **Bank direct marketing analysis of data mining techniques**. International Journal of Computer Applications, v. 85, n. 7, p. 12-22, 2014.

ELSALAMONY, Hany A.; ELSAYAD, Alaa M. **Bank direct marketing based on neural network and C5. 0 Models**. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), v. 2, n. 6, 2013.

GRUS, Joel. **Data science from scratch: first principles with python**. O'Reilly Media, 2019.

KIRK, Matthew. **Thoughtful Machine Learning with Python: A Test-driven Approach**. " O'Reilly Media, Inc.", 2017.

PROVOST, Foster; FAWCETT, Tom. **Data science and its relationship to big data and data-driven decision making**. Big data, v. 1, n. 1, p. 51-59, 2013.

WISAENG, K. **A comparison of different classification techniques for bank direct marketing**. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), v. 3, n. 4, p. 116-119, 2013.

AQUISIÇÃO DE DADOS DO CONSUMO ELÉTRICO EM UMA EDIFICAÇÃO DA UFOPA UTILIZANDO CONCEITOS DE IOT

Data de aceite: 27/01/2020

Leonardo Paz Amôdo

Laboratório de Inteligência Computacional –
LabIC/UFOPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9377111035857568>

Dalton Felipe Silva Varão

Laboratório de Inteligência Computacional –
LabIC/UFOPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/4054538928661342>

João Elias Brasil Bentes Júnior

Laboratório de Inteligência Computacional –
LabIC/UFOPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/9994659924863869>

Anderson Alvarenga de Moura Meneses

Laboratório de Inteligência Computacional –
LabIC/UFOPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/6272872215125680>

RESUMO: A eletricidade é a principal fonte de energia do mundo e certamente o seu consumo de maneira exagerada causa grandes impactos ambientais e econômicos. Um dos grandes desafios para o setor energético é prover alternativas cabíveis para a expansão do sistema elétrico sem que haja desperdício

no consumo e, conseqüentemente, gere sustentabilidade em seus processos. A partir desse ponto de vista, o objetivo geral deste trabalho é apresentar soluções e ações que ajudem a reduzir o consumo de energia elétrica na UFOPA. Para tanto, a metodologia adotada compreende medir os atuais padrões de energia consumidos na instituição, passando pelo mapeamento para identificar os principais equipamentos responsáveis pelo consumo, e por fim registrar os dados da coleta para que sejam acessados a partir de um sistema web desenvolvido utilizando conceitos de Internet das Coisas. Os resultados obtidos mostram que há oportunidade de melhorias na eficiência energética na Universidade e, portanto, com o funcionamento do sistema espera-se tornar mais fácil o gerenciamento da energia a fim de serem estabelecidas metas e controle para o consumo.

PALAVRAS-CHAVE: Energia elétrica, eficiência energética, acompanhamento do consumo, Internet das Coisas.

ACQUISITION OF ELECTRICAL CONSUMPTION DATA IN A UFOPA BUILDING USING IOT CONCEPTS

ABSTRACT: Electricity is the main source of energy in the world and certainly its irrational consumption causes major environmental and

economic impacts. One of the major challenges for the energy sector is to develop alternatives for the expansion of the electricity system without wasting consumption and generating sustainability in its processes. From this point of view, the general objective of this paper is to present solutions and actions that help reduce the consumption of electricity in UFOPA. To this end, the methodology adopted comprises measuring the energy standards currently consumed in the institution, through mapping to identify the main equipment responsible for the consumption, and finally record the data collection, to be accessed from a web system developed using concepts of Internet of Things. The results show that there is opportunity for improvements in energy efficiency at the University and, therefore, with the operation of the system, it is expected to make energy management easier in order to set goals and control for consumption.

KEYWORDS: Electricity, energy efficiency, consumption monitoring, Internet of Things.

1 | INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso fundamental para o funcionamento de diversos setores na sociedade. Entretanto, após um período de quase dois séculos de consumo exagerado de energia, da falta de consciência sobre futuras crises ambientais ocasionadas pela industrialização e consumismo acelerado, as últimas décadas revelaram significativas mudanças de conduta na humanidade (ALVAREZ, 1998). Conferências, fóruns e debates sobre o meio ambiente, nunca foram tão repercutidos nos últimos anos, uma tentativa de países e organizações alertarem sobre a preservação da natureza e dos recursos naturais.

Nesse âmbito, o setor energético passou a ser muito discutido tanto pelos efeitos negativos causados ao meio ambiente, quanto pelo desperdício e ineficiência do uso da eletricidade. É preciso mudar esse cenário buscando desenvolver e adotar medidas a favor do controle de consumo. Como pauta, a eficiência energética que por definição é a capacidade de utilizar menos energia para produzir os mesmos trabalhos e benefícios (IEA, 2019), possui hoje um papel de ampla importância no cenário de políticas mundiais de energia (PINHEIRO e KOHLRAUSCH, 2011).

Junto a isso, os sistemas de tecnologia da informação estão se tornando protagonistas por proverem diversas funcionalidades para com o setor energético, entre elas dispositivos interconectados capazes de medirem todo o consumo de uma rede elétrica e permitirem o gerenciamento desse gasto de maneira totalmente remota. Essa modernização pretende integrar toda a cadeia de produção elétrica com o objetivo de assegurar a eficiência energética como medida para prover ganhos tanto na qualidade quanto na redução do consumo de energia (SCHETTINO, 2013).

Essa nova forma de controle no consumo possibilita, dentre outras coisas, o desenvolvimento de aplicações e microssistemas, em especial a nível de usuário. Interfaces para registro, acompanhamento e análise de dados da demanda energética,

são um exemplo disso. Assim, com o objetivo de difundir estratégias que contribuam com o consumo mais sustentável e consciente de energia, este trabalho apresenta a metodologia geral para o acompanhamento e mapeamento do consumo elétrico em uma edificação da UFOPA a fim de registrar esses dados em um servidor local utilizando, para tanto, conceitos de Internet das Coisas.

Assim, na seção seguinte deste trabalho os tópicos estão organizados da seguinte maneira: a seção 2 trata da contextualização acerca do tema pelo qual este trabalho foi desenvolvido contendo sua importância e definições; na seção 3 é descrito a metodologia geral do trabalho, ou seja, a forma como o acompanhamento do consumo foi realizado; a seção 4 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia descrita; na seção 5 são feitas algumas considerações finais a respeito do trabalho e na seção 6 são feitos agradecimentos.

2 | REFERÊNCIAL TEÓRICO

A eficiência energética pode ser definida como a razão entre os benefícios obtidos e a energia efetivamente utilizada para a realização de um processo (SOLA e MOTA, 2015). Ou seja, a eficiência energética será maior quando, para uma mesma quantidade de energia tivermos mais benefícios, ou ainda, se pudermos desempenhar a mesma atividade com menos gasto e desperdício de energia. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a eficiência energética é “chave para assegurar um sistema de energia seguro, confiável, acessível e sustentável para o futuro” (IEA, 2019).

Para Menkes (2004) as ações de eficiência energética representam hoje uma alta importância para o sustento e preservação dos recursos naturais. Ao contribuir com a redução do consumo elétrico, promover significativas economias na produção energética e ainda permitir que os mesmos trabalhos com uso de energia sejam realizados com menos desperdício, essas ações dispensam a geração extra de energia e desempenham um papel a favor da diminuição dos impactos sob o meio ambiente.

Ao compararmos os valores de tempo de retorno dos investimentos em medidas para racionalizar o consumo elétrico, as alternativas de eficiência energética apresentam os melhores resultados. Por conta disso, muitos países estão investindo elevados valores financeiros na modernização de redes de produção e distribuição elétrica, buscando o uso mais eficiente e, também, solucionar a problemática do fornecimento energético expansivo (ALVAREZ, 1998).

No Brasil, os financiamentos em projetos de desenvolvimento e, principalmente, implementação da eficiência energética são muito poucos. Os investimentos em soluções por meio da energia convencional ainda são maioria (MARTINS, 1999).

Entretanto, o Ministério de Minas e Energia destaca para o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), o qual descreve diversas ações para serem implementadas. Além disso, o Plano deixa claro a importância de se desenvolver a eficiência energética desde os níveis mais básicos na educação (MME, 2011).

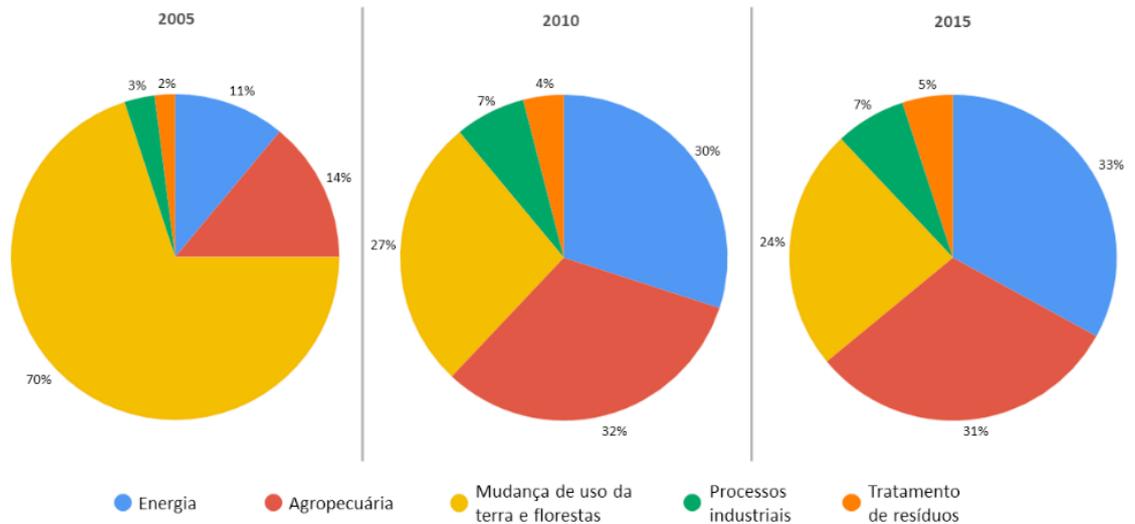


Figura 1. Participação nas emissões líquidas, por setor, para os anos 2005, 2010 e 2015 – CO₂. (adaptado de: Ministério do Meio Ambiente (2019)).

Certamente, um fator que preocupa bastante cientistas e pesquisadores da área ambiental é quanto ao excesso de gases lançados na atmosfera, contribuidores para o efeito estufa. A Figura 1 apresenta o gráfico para a quantidade de gás CO₂ emitido por setor de produção. Os dados são do Ministério do Meio Ambiente e mostram quanto o setor de produção de energia ganhou destaque para a emissão desse gás do ano de 2005 até 2015 (MMA, 2019).

Logo, adotar a eficiência energética como política pública de meio ambiente, é a maneira mais sustentável para o fornecimento de energia e de redução dos gases poluentes.

3 | METODOLOGIA

O estudo constituiu-se, inicialmente, em uma abrangente pesquisa bibliográfica relacionada ao tema, onde foram levados em consideração trabalhos desenvolvidos com o mesmo foco de pesquisa. Em um segundo momento, foram realizadas atividades para o levantamento de informações a respeito dos atuais padrões de consumo na universidade.



Figura 2. Multimetro de grandezas elétricas instalado no Bloco de Salas Especiais – Unidade Tapajós.

Nesse sentido, através de um multimetro de grandezas elétricas (Figura 2), instalado no bloco de salas especiais da unidade Tapajós, foi possível medir e identificar a linha base a qual representa os dados de consumo energético no prédio. Essa linha base contém informações exatas sobre potência, corrente, tensão e outras medidas elétricas necessárias para determinar os gastos com energia, inicialmente, no bloco de salas especiais.

Também, foi realizada uma visita em cada sala do prédio para anotações sobre quantidade, tipo e potência nominal dos equipamentos responsáveis pelo consumo elétrico. Além disso, foi aplicado um questionário (Apêndice A) aos responsáveis por ligar e desligar os aparelhos, com intuito de constatar quanto tempo cada equipamento ficava em funcionamento. Esse questionário foi aplicado em um único dia, porém em três turnos diferentes, visto que há variações no cronograma das pessoas responsáveis. No total, três pessoas responderam ao questionário, exatamente uma em cada turno.

Após esta etapa, junto com os dados obtidos do questionário aplicado, foi possível realizar um cálculo estimativo para se ter uma base de quanto cada equipamento representava no consumo final. A equação 1 utilizada no cálculo é dada por:

$$\text{Consumo}(kWh) = \frac{Q \times W \times H \times D}{1000}$$

Equação 1. Fórmula para cálculo de consumo.

Onde,

- Q representa a quantidade de equipamentos, do mesmo tipo e potência;
- W representa a potência do equipamento em *Watts*;
- H indica o número de horas utilizadas;
- D o número de dias de uso do equipamento no mês.

Além disso, a eficiência energética compreende o gerenciamento de consumo, pensando assim foi desenvolvido um protótipo de sistema web com função de envio dos dados originados do multimedidor para que possam ser realizadas análises posteriores sobre os gastos mensais com a energia. Na construção do sistema foi utilizada a linguagem de programação Python.

4 | RESULTADOS

Através do multimedidor foi possível identificar e medir a linha base de consumo do bloco de salas especiais onde todo mês, através de um dispositivo de memória, são recolhidos dados de amostragem em planilha eletrônica com informações pertinentes sobre medidas de caráter elétrico.

Como já citado, uma determinada quantidade de dados sobre o consumo elétrico é adquirida mensalmente. Entretanto, foi necessário também identificar quais equipamentos e ferramentas eram responsáveis pela quantidade de energia consumida. Por isso, houve a realização da visita em cada cômodo do prédio para mapear os equipamentos. A Tabela 1 apresenta os resultados do mapeamento exclusivamente nas salas de aula.

Local	Equipamento	Potência Nominal (W)
Sala de aula	Ar-Condicionado	6659
	Lâmpadas	32

Tabela 1. Resultado do mapeamento nas salas de aula.

Alguns dos resultados encontrados a partir do cálculo de consumo (Equação 1) são apresentados na Tabela 2. Esses resultados representam uma estimativa para em torno de quanto é gasto com energia somente nas salas de aula. Para o cálculo foram levados em consideração os dados do tempo de funcionamento de cada equipamento, isto é, número de horas e de dias utilizados, do mês de janeiro de 2019. Para este período estima-se que o consumo total no prédio tenha ultrapassado 40 mil kWh/mês.

Equipamento	Central de ar	Lâmpada
Quantidade	16	512
Consumo (kWh/mês)	24.292	3.735,5
Total	28.027,5	

Tabela 2. Consumo estimado de cada equipamento somente nas salas de aula.

A partir de então, cruzando os dados do mapeamento com o do tempo de funcionamento, foi identificado que mais de 95% da taxa de energia consumida na instituição provém de equipamentos de refrigeração e iluminação, conforme ilustra o gráfico na figura 3 para o mês de janeiro. Além disso, a partir do que foi respondido pelas pessoas responsáveis pelo ligamento e desligamento dos equipamentos, foi constatado que muitas dessas ferramentas ficam ligadas por períodos indevidos, isto é, mesmo quando não há ninguém para utilizá-los. Confirmou-se isso, também, através de inspeção diária realizada durante uma semana. Consequentemente, esse excesso contribui para um consumo e desperdício maior de energia.

Consumo por Equipamento - Janeiro



Figura 3. Quantidade de energia consumida por equipamento.

Conforme apresentado, através do mapeamento foram descobertos quais os equipamentos responsáveis pela maior parte do consumo na universidade, justificando a origem dos dados coletados do multimedidor. Com isso feito, o trabalho passou para a etapa de viabilizar formas que pudessem disponibilizar os dados de energia coletados para as partes interessadas. Nesse mérito, foi desenvolvido um protótipo de sistema web com a função de enviar esses dados coletados do multimedidor.

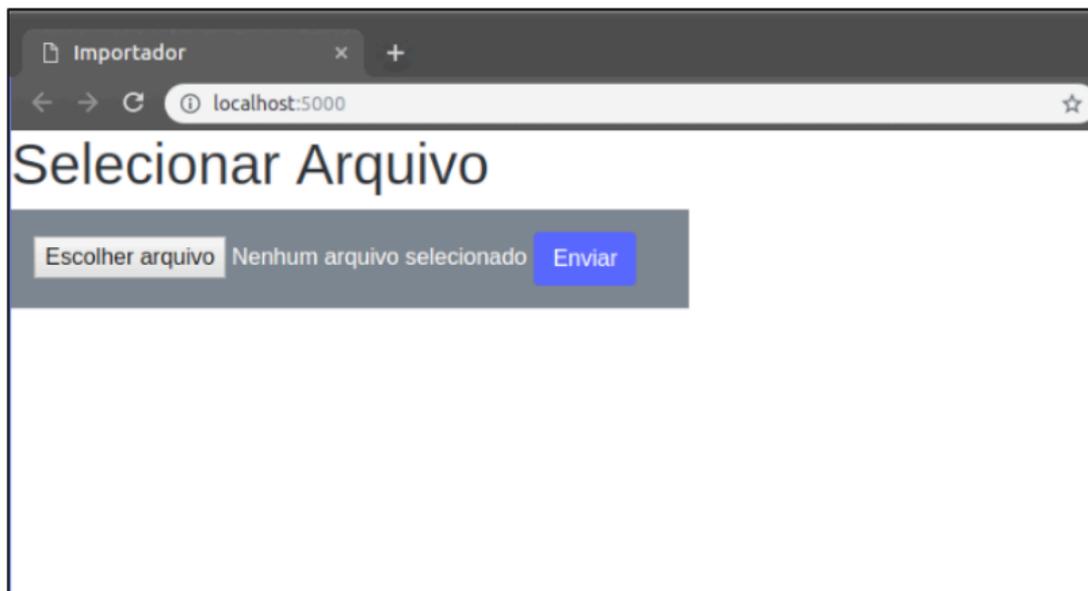


Figura 4. Protótipo da interface para envio de dados do multimedidor.

O sistema foi desenvolvido em linguagem de programação Python a qual permite trabalhar mais rapidamente e integrar sistemas de forma eficaz, além de possuir uma variedade de bibliotecas e APIs. Com isso, foi gerada a interface (Figura 4) que permite a importação do arquivo contendo os dados do consumo e a salva em um banco de dados.

O desenvolvimento está em andamento, faltando apenas tornar esse sistema acessível a partir de um servidor que se encontra na reitoria da universidade. O objetivo final é realizar o salvamento e disponibilizar a gerencia dos dados de consumo de forma online, além de algumas melhorias na interface web.

5 | CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de ações em prol da eficiência energética, inicialmente de caráter universitário. Para tanto, foram abordadas as principais atividades realizadas ao decorrer do estudo, desde a medição dos atuais padrões de consumo elétrico, passando pelo mapeamento dos equipamentos responsáveis por esse consumo até a fase de prototipagem do sistema para envio dos dados da medição.

Esse sistema objetiva prover às partes interessadas, em especial o setor de gestão da universidade, informações sobre o quanto está sendo gasto com eletricidade, para que seja possível estabelecer metas de controle no consumo e assim possibilitar o uso consciente e sustentável de energia.

Como trabalhos futuros, objetiva-se realizar o envio de dados originados do multimedidor de forma autônoma utilizando, para isto, conceitos de IoT e também

equipamentos específicos para realizar a conexão com o servidor como *datalogger* e ESP-12E.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Banco da Amazônia S.A., pelo financiamento parcial deste trabalho (projeto “Sistema para monitoramento de energia usando Internet das Coisas, Big Data e Machine Learning”);

O autor L.P.A. agradece à UFOPA pelo apoio financeiro;

Os autores agradecem ao Eng. Reynaldo Serrão pelo apoio técnico e à SINFRA por disponibilizar o acesso ao multimedidor de grandezas elétricas para leitura das medidas.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, André Luiz Montero. **Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

IEA (International Energy Agency/ Organisation for Economic Co-operation and Development). **Energy Efficiency**. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/energyefficiency/>>. Acesso em 13 de agosto de 2019.

MARTINS, Maria Paula de Souza. **Inovação tecnológica e eficiência energética**. Monografia de Pós-graduação MBA em energia elétrica, Instituto de Economia-UFRJ, 1999.

MENKES, Monica. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. Brasília: UnB, 2004.

SOLA, Antonio Vanderley Herrero; MOTA, C. M. **Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais**. Production, São Paulo, vl, v. 25, 2015.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **EducaClima**. Disponível em: <<http://educaclima.mma.gov.br/graficos-todos/>>. Acesso em: 13 de agosto de 2019.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, 2011.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Uso racional: a fonte energética oculta**. estudos avançados, v. 21, n. 59, p. 91-105, 2007.

PINHEIRO, Damaris Kirsch; KOHLRAUSCH, Fernanda. **Educação ambiental: uso consciente da energia elétrica e aplicação de alternativas para diminuição do consumo**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 4, n. 4, p. 387-397, 2011.

SCHETTINO, Stevon. **Cenários do uso das redes elétricas inteligentes (smart grid): tendências de sua difusão no Brasil**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - UFPB, João Pessoa, 2013.

DEEP LEARNING PARA REGRESSÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA DE UMA USINA DE ENERGIA DE CICLO COMBINADO

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 17/11/2019

Mauro Sérgio dos Santos Moura

Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Laboratório de Inteligência Computacional
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/8032432346264238>

Anderson Alvarenga de Moura Meneses

Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Laboratório de Inteligência Computacional
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/6272872215125680>

RESUMO: O uso da energia elétrica tornou-se vital ao ser humano e, em consequência, a análise dos meios de geração de energia também se mostra essencial. A previsão da potência elétrica de uma usina funcionando com carga total possui grande importância no que diz respeito a maximização de energia líquida gerada por horas disponíveis. Nas últimas décadas, houve um aumento expressivo no desenvolvimento e aplicação de modelos computacionais capazes de modelar, projetar e prever sistemas energéticos com grande eficiência. Uma usina de energia de ciclo combinado é constituída de turbinas a gás,

turbinas a vapor e geradores de vapor para recuperação de calor, a energia é gerada pelas turbinas que são combinadas em um ciclo e transferidas de uma a outra. *Deep Learning* (DL) é um tipo de aprendizado de máquina que visa treinar computadores para realização de tarefas humanas e dentre suas capacidades tem-se a possibilidade de se aplicar regressão. Tendo isso em vista, um modelo de rede neural foi desenvolvido e avaliado utilizando as métricas de *Mean Squared Error* (MSE) e coeficiente de determinação (R^2), com o objetivo de fazer a regressão da Potência. Para isso, foi utilizado um conjunto de dados contidos em um repositório de dados da Universidade da Califórnia, os dados foram obtidos de uma Usina Elétrica de Ciclo Combinado. Por fim, os resultados obtidos foram em média 0,92 para R^2 e 20,779 para MSE, o que demonstra uma boa modelagem do sistema com o uso de uma rede neural utilizando um framework de DL.

PALAVRAS-CHAVE: Energia, Potência Elétrica, Aprendizagem Profunda, Regressão.

DEEP LEARNING FOR REGRESSION OF ELECTRICAL POWER FROM A COMBINED CYCLE POWER PLANT

ABSTRACT: The use of electric energy has become vital to the human being and, consequently, the analysis of the means of energy

generation is also essential. Thus, the prediction of the electric power of a power plant operating at full load is of great importance with regard to the maximization of available energy by hours. In the last decades, there has been an expressive increase in the development and application of computational models capable of modeling, designing and predicting energy systems with great efficiency. A combined cycle power plant is composed of gas turbines, steam turbines and heat recovery steam generators, the turbines are combined in one cycle and transferred from one to another generating the energy. Deep Learning (DL) is a type of machine learning that aims to train computers to perform human tasks and among its capabilities one has the possibility of applying regression. Based on this, a neural network model was developed and evaluated using Mean Squared Error (MSE) and coefficient of determination (R²) metrics, in order to perform the regression of electric energy variable by hour net. For this, a dataset contained in a University of California data repository was used, the data were obtained from a Combined Cycle Power Plant. Finally, the obtained results were on average 0.92 for R² and 20,779 for MSE, which demonstrates a good modeling of the system with the use of a neural network using a DL framework.

KEYWORDS: Energy, Eletric Power, Deep Learning, Regression.

1 | INTRODUÇÃO

Usinas Elétricas de Ciclo Combinado (CCPP, do inglês *Combyned Cycle Power Plant*) têm se tornado cada vez mais relevantes nas últimas décadas, devido a flexibilidade das estruturas para fornecer uma grande faixa de potência e energia térmica (Branco, 2005). Uma das variáveis importantes dentro do estudo de CCPP é a saída de energia por hora (Potência). Assim, é possível obter dados ambientais a partir de sensores e por estes realizar tarefas como regressão para conseguir valores de saída e energia.

Em relação ao uso de dados de CCPP para predição de valores de saída de energia, em (Tüfekci, 2014) é feita uma análise de diversas técnicas de *Machine Learning* (ML) utilizando um *dataset* coletado durante 6 anos em uma CCPP. Além disso, em (Kaya, Tüfekci e Gürgen, 2012) há uma análise do mesmo *dataset* mais abrangente utilizando diversos tipos de Redes Neurais Artificiais (RNAs), realizando comparações entre modelos convencionais de regressão, *feedforward* e clusterização, nesse caso foi observado que utilizando tipos sofisticados de pré-processamento há melhora na performance da RNA. Sendo assim, pode-se observar que RNAs têm grande relevância para a predição de dados da saída de energia em CCPP.

Deep Learning (DL) é uma área que, nos últimos anos apresenta grande potencial para resoluções de problemas de Aprendizado de Máquina. Sendo capaz de resolver problemas de classificação e regressão com alto nível de adaptação aos dados, assim como utilizá-la para grandes quantidades de dados. DL é uma

subárea de ML, que por sua vez é uma subárea de Inteligência Artificial. A grande diferença de DL dentre as técnicas de ML é a presença de várias camadas ocultas, que atualmente podem ultrapassar cem camadas consecutivas (Chollet, 2018). Com isso houve grandes melhoras em diversas áreas do conhecimento que necessitam de técnicas de ML para resolução.

Desse modo é possível aplicar DL nos mesmo dados da CCPP, juntamente de um pré-processamento para realizar a predição com melhor adaptação, criando a oportunidade de aplicação em outros tipos de dados.

Esse trabalho segue a seguinte estrutura: na Seção 2 são abordados os conceitos principais básicos para a compreensão do trabalho. Na seção 3 são apresentados os passos seguidos para a implementação da RNA. A seção 4 apresenta os resultados. Por fim, na seção 5 as conclusões são abordadas.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Usinas Elétricas de Ciclo Combinado

Uma usina termelétrica, pode trabalhar em ciclo aberto ou ciclo combinado, sendo o ciclo aberto o funcionamento somente com uma turbina operando e ciclo combinado, também chamado de ciclo combinado de gás e vapor, onde turbinas de gás e vapor trabalham em conjunto (Çengel e Boles, 2011). Como o nome sugere, uma CCPP funciona baseada na combinação das tecnologias de produção de energia baseadas em turbinas a gás e a vapor associadas na mesma planta, ou seja, ambas as turbinas utilizam o mesmo combustível para gerar energia (Branco, 2005).

Variáveis como Temperatura Ambiente, Pressão Atmosférica e Humidade Relativa são conhecidas como fatores principais durante estudos para predição de geração de energia de uma usina de ciclo combinado (Kaya, Tüfekci e Gürgen, 2012), já que as turbinas dependem das variáveis ambientais.

Um modelo simples de CCPP com apenas uma turbina de gás, uma turbina a vapor e um sistema de recuperação de calor, pode ser encontrado em (“GasNet - site de gás natural e GNV”), a Fig. 1 representa uma adaptação desse modelo, na forma de uma exemplificação esquemática simplificada de como funciona uma CCPP.

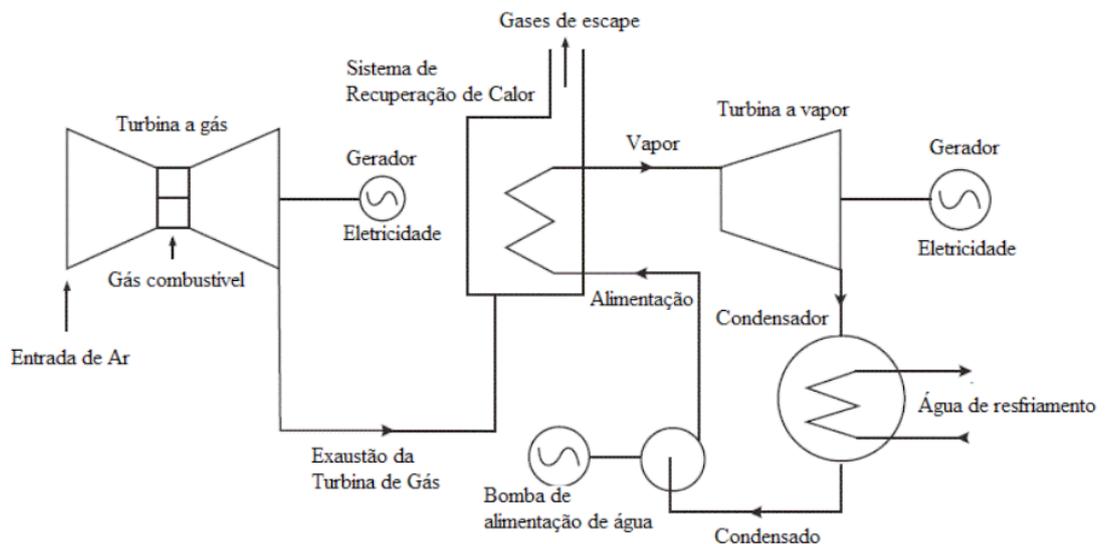


Fig. 1: Modelo adaptado de (GasNet) de uma CCPP simples. Fonte: O Autor.

2.2 MultiLayer Perceptron

Um modelo de RNA bastante utilizado dentro da área de DL é o Multilayer Perceptron (MLP), que consiste em uma RNA semelhante ao modelo perceptron com mais de uma camada de neurônios, o que possibilita resoluções de problemas não lineares. Esse modelo é composto por camadas de neurônios ligadas entre si utilizando funções de soma e ativação para determinar quando o neurônio ativar. O aprendizado nesse tipo de RNA é geralmente feito através do algoritmo de retro-propagação de erro (Haykin, 2005). O processo de treinamento e atualização dos pesos, realizado nas camadas ocultas, não é visível para o usuário, assim, é possível observar somente as entradas e as saídas da rede.

Ajustes podem ser feitos no modelo MLP para se obter melhores resultados, tais ajustes envolvem alteração da taxa de aprendizado, número de camadas, quantidade de neurônios, tipo de função de perda e ativação, número de épocas, dentre outros.

3 | METODOLOGIA

A linguagem de programação utilizada foi Python 3.5 com a IDE Spyder, com o auxílio das bibliotecas Keras, Pandas, Scikit-learn, dentre outras. A biblioteca Pandas foi utilizada para carregamento dos dados para o programa, o Keras foi utilizado para desenvolvimento do modelo de RNA MLP e o Scikit-learn foi utilizado para implementação das métricas.

3.1 Conjunto de Dados

O conjunto de dados está disponível no site UCI *Machine Learning* (<https://>

archive.ics.uci.edu) e consiste em dados coletados de uma CCPP durante 6 anos (2006-2011), quando a usina estava funcionando com carga total. O número de amostras consiste em 9568 instancias ambientais médias por hora.

A CCPP de onde foram coletados os dados, consiste em duas turbinas de gás, uma turbina de vapor e dois sistemas de recuperação de calor (Tüfekci, 2014).

A descrição dos dados com os nomes das variáveis, range, assim como unidade de medida do *dataset*, são apresentados na Tabela 1.

Variável	Range
Temperatura Ambiente	1.81°C até 37.11°C
Pressão Atmosférica	992.89 até 1033.30 milibar
Humidade Relativa	22.56% até 100.16%
Vácuo de Exaustão (Pressão)	25.36 até 81.56 cm Hg
Saída de Energia Elétrica líquida por hora (Potência)	420.26 até 495.76 MW

Tabela 1: Variáveis do *Dataset*

Fonte: O Autor.

Como pode ser observado na Tabela 1, os recursos do *dataset* apresentam escalas diferentes, que quando analisadas fisicamente não podem ser comparadas, mas ao serem aplicadas em uma RNA, podem causar desvio no resultado. Sendo assim necessário um pré-processamento nos dados.

3.2 Implementação do Rede Neural Profunda

O processo de implementação da rede neural consiste em realizar um pré-processamento para normalização dos dados antes de serem submetidos as camadas de entrada. As entradas são repassadas para as camadas ocultas, onde os pesos são calculados, e por fim, os pesos calculados são repassados para as camadas de saída, onde é submetido a uma função de ativação que vai determinar a saída.

3.2.1 Pré-processamento

Antes da utilização do *dataset* na RNA, foi realizado um pré-processamento, aplicando a função *MinMaxScaler* da biblioteca *Scikit-learn* nos preditores, com o objetivo de redimensionar os valores para um mesmo intervalo.

3.2.2 Estrutura da Rede Neural

A estrutura da RNA consiste em um modelo MLP criado utilizando a biblioteca *Keras*, com uma camada de entrada (representada pelos neurônios X1, X2, X3,

X4), 3 camadas ocultas com função de ativação ReLU, e uma camada de saída (representada por Y1) com função de ativação Linear. O modelo foi compilado utilizando a função de perda como *Mean Squared Error* (MSE) e otimizador Adam. O número de neurônios e funções de perda e ativação foram definidos empiricamente a partir de testes. A Fig. 2 representa o modelo MLP da RNA criada.

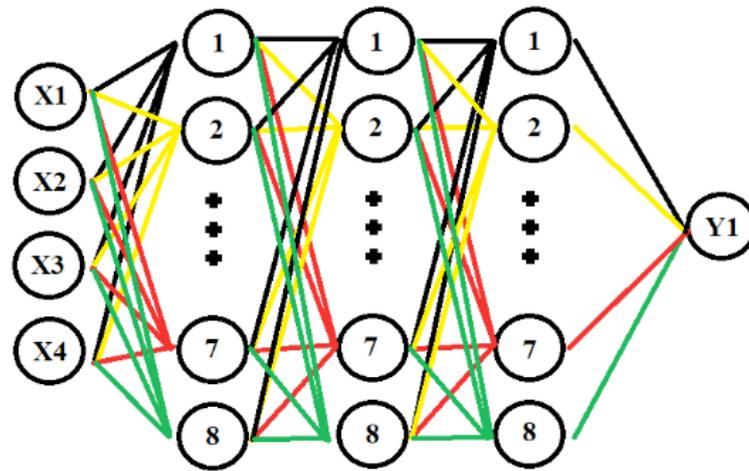


Fig. 2: Estrutura da Rede Neural.

Fonte: O Autor.

3.2.3 Treinamento da Rede Neural

Os parâmetros de treinamento da rede neural foram determinados empiricamente, sendo eles 300 épocas e um *batch size* de 128, porém foram adicionados métodos de incrementação à taxa de aprendizado e de encerrar o processo de treinamento, caso a rede neural não apresente melhoras de métricas entre as épocas.

Para garantir a reprodutibilidade dos resultados a RNA foi realizado um teste com a metodologia da validação cruzada (Kohavi, 1995) utilizando o tempo como semente, executando 10 vezes a RNA e os resultados das métricas para cada execução foram salvos para análise futura.

3.2.4 Métricas

As métricas utilizadas para avaliação dos resultados da RNA foram MSE, *Root Mean Squared Error* (RMSE), Coeficiente de Determinação (R^2) e *Mean Average Error* (MAE), as implementações foram feitas a partir da biblioteca Scikit-learn. As equações das métricas são descritas a seguir Eq. (1 a 4).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (4)$$

Vale ressaltar que as métricas RMSE e R^2 são as métricas mais utilizadas para a análise e comparação dos resultados, sendo RMSE a raiz quadrada da média dos erros quadrados da regressão e R^2 a proporção de adequação do modelo, sendo entre 0 a 1 (Bruce e Bruce, 2017). As demais métricas são utilizadas para confirmar os resultados obtidos. Além do mais, o coeficiente de variação (CV) será utilizado como avaliação dos resultados, o mesmo consiste na razão do desvio padrão pela média. Quanto menor o CV, maior a precisão dos dados.

3.3 Hardware

O hardware utilizado consiste em um desktop HP EliteDesk 800 G3 SFF com um processador Intel core i7 6700, 16 GB de RAM e uma GPU Nvidia Gt730 com 2 GB de memória de vídeo GDDR5.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra os resultados da RNA ao utilizar a validação cruzada. Os dados estão descritos, com o número de vezes que a RNA foi executada, média das métricas, desvio padrão, valor mínimo e máximo atingidos pelas métricas e coeficiente de variação.

	MSE	RMSE	R2	MAE
Contagem	10	10	10	10
Média	20,779	4,556	0,929	3,627
Desvio Padrão	1,272	0,139	0,005	0,065
Mínimo	19,294	4,393	0,918	3,516
Máximo	22,529	4,746	0,936	3,770
CV	0,061	0,031	0,005	0,018

Tabela 2: Resultados de estatística descritiva do conjunto de dados

Fonte: O Autor.

Em (Tüfekci, 2014) é feita uma análise utilizando o mesmo *dataset* da CCPP com técnicas de ML, a métrica utilizada para avaliação, em comum com análise feita neste, foi RMSE. Os resultados no melhor dos casos foi de 3,787, que quando

comparado aos resultados obtidos pela RNA, é observada uma diferença de 0,769. Ainda em (Tüfekci, 2014), uma análise utilizando o modelo MLP foi realizada, onde foi obtido um valor de 5,399, com isso podemos ver uma diferença de 0,843. Quando a RNA é comparada aos resultados de (Tüfekci, 2014), a diferença é pequena, sendo menor que 1. Nesse caso, uma análise estatística deve ser feita para verificar se há diferença significativa ou não desses resultados. Considerando o objetivo da RNA como análise introdutória para futuras aplicações, temos que a diferença entre os resultados do modelo utilizado e a referência apresentou-se menor que 1, que nesse caso, significou uma boa robustez.

Observando a Tabela 2, a RNA profunda conseguiu valores abaixo de 0,07 para CV em todas as métricas, o que indica boa precisão dos resultados, como esperado, já que os erros são próximos de 0 e R^2 próximo de 1.

5 | CONCLUSÃO

Uma RNA profunda foi desenvolvida utilizando DL com a linguagem de programação Python para regressão de valores de saída de energia elétrica de uma CCPP. A RNA é capaz de realizar a regressão com valores de R^2 com média de 0,929, o que representa boa adaptação da rede aos dados fornecidos. Futuramente, é possível realizar estudos utilizando técnicas como *Grid Search* para encontrar parâmetros que possam ser otimizados na rede neural, possibilitando a obtenção de melhores resultados, assim como testes estatísticos para verificar a robustez do modelo.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi parcialmente financiado pelo Banco da Amazônia S.A. (projeto “Sistema para monitoramento de energia usando Internet das Coisas, Big Data e Machine Learning). O autor M. S. S. M. agradece à UFOPA pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BRANCO, F. P. **Thermoeconomical analysis of plant fueled by natural gas operating in combined and opened cycle (in Portuguese)**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Mecânica). UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, 2005.

BRUCE, P.; BRUCE, A. **Practical Statistics for Data Scientists**. O’Reilly Media, Inc., 2017.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 7th Editio ed. New York: MacGraw-Hill, 2011.

CHOLLET, F. **Deep Learning with Phyton**. Maning Publications Co., 2018.

GasNet. **GasNet - site de gás natural e GNV**. Disponível em: <<https://www.gasnet.com.br/termetricas/ciclo.asp>>. Acesso em: 9 de agosto de 2019.

HAYKIN, S. **Neural Networks - A Comprehensive Foundation**. Peason Prentice Hall, 2005.

KAYA, H.; TÜFEKCI, P.; GÜRGEN, S. F. **Local and Global Learning Methods for Predicting Power of a Combined Gas & Steam Turbine**. International Conference on Emerging Trends in Computer and Electronics Engineering (ICETCEE 2012), p. 13–18, 2012.

KOHAVI, R. **A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection**. Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. International Conference on Emerging Trends in Computer and Electronics Engineering (ICETCEE 2012), v. 2, p. 7, 1995.

TÜFEKCI, P. **Prediction of full load electrical power output of a base load operated combined cycle power plant using machine learning methods**. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 60, p. 126–140, 2014.

DEGRADAÇÃO DE CORANTES EM MEIO AQUOSO EMPREGANDO DIÓXIDO DE TITÂNIO NA FORMA DE FILMES FINOS PREPARADOS SOBRE SUBSTRATO CERÂMICO COMERCIAL

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 17/11/2019

Graziele Daiana Sena de Sousa

Universidade Federal do Oeste do Pará,
Instituto de Engenharia e Geociências,
Santarém – PA
<http://lattes.cnpq.br/5710529989215830>

Adriano Cesar Rabelo

Universidade Federal do Oeste do Pará,
Instituto de Ciências da Educação,
Santarém – PA
<http://lattes.cnpq.br/2798126563880292>

RESUMO: Um campo em crescimento nas áreas das engenharias e ciências naturais são as pesquisas por processos que promovam o tratamento de águas residuais que contenham compostos recalcitrantes, os quais são provenientes de uma variada gama de indústrias e processos farmacêuticos. Nas últimas décadas, foram desenvolvidas diversas técnicas capazes de promover a completa remoção de compostos de difícil degradação das águas, entre elas, tem-se os Processos Oxidativos Avançados (POA's), capazes de converter poluentes em CO₂, H₂O e ácidos minerais. Um dos POA's mais conhecidos é a fotocatalise heterogênea. A composição química e estrutura física dos materiais semicondutores afetam diretamente a

eficiência do processo fotocatalítico. Portanto, a aplicação de filmes finos, que são basicamente modificações da estrutura física dos materiais fotocatalíticos, tem provocado um enorme impacto no desenvolvimento de tecnologias no processo de fotocatalise heterogênea. Nesse contexto, durante o desenvolvimento deste trabalho foi construído um fotoreator de baixo custo e avaliou-se a performance de filmes finos de TiO₂ preparados em substrato cerâmico previamente recoberto com CaO. A avaliação da performance foi realizada através de testes de degradação realizados com os corantes Rosa de Bengala e Alaranjado de Metila. Por fim, concluiu-se que a fotólise decorrente da reflexão sobre a camada de CaO predominou sobre a fotocatalise.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de águas residuais; Processos Oxidativos Avançados; Fotocatalise heterogênea; Filmes finos; Substrato Cerâmico.

ABSTRACT: A growing field in engineering and natural sciences are process that promotes the treatment of wastewater containing recalcitrant compounds from a wide range of pharmaceutical industries and processes. In the last decades, several techniques have been developed to promote the complete removal of compounds with difficult water degradation, among them the Advanced Oxidative Processes (POA's), capable

of converting pollutants into CO₂, H₂O and mineral acids. One of the best known POA's is the heterogeneous photocatalysis. The chemical composition and physical structure of semiconductor materials directly affect the efficiency of the photocatalytic process. Therefore, the application of thin films, which are basically modifications of the physical structure of photocatalytic materials, has had a huge impact on the development of technologies in the heterogeneous photocatalysis process. In this context, during the development of this work a low cost photoreactor was built and the performance of thin films of TiO₂ prepared on ceramic substrate previously coated with CaO was evaluated. Performance evaluation was performed through degradation tests performed with the Bengal Rose and Methyl Orange dyes. Finally, it was concluded that the photolysis resulting from the reflection on the CaO layer predominated over photocatalysis.

KEYWORDS: Wastewater treatment; Advanced Oxidative Processes; Heterogeneous photocatalysis; Thin films; Ceramic Substrate.

1 | INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades humanas tem provocado o aparecimento dos chamados poluentes emergentes no ar, solo e ambientes aquáticos. Entre as substâncias encontradas nas águas tem-se a presença de compostos recalcitrantes, como corantes, fármacos, pesticidas, hormônios, entre outros, os quais são originados dos mais diversos tipos de atividades humanas. A presença desses compostos gera inúmeros problemas à fauna, flora e saúde humana. Tendo em vista esses problemas, pesquisadores e empresas estão cada vez mais preocupados com o desenvolvimento de processos e produtos que sejam capazes de promover a limpeza desses efluentes e uma correta destinação de seus rejeitos. No entanto, métodos tradicionais, como filtração, biodegradação, osmose reversa, entre outros, não tem apresentado resultados realmente eficientes (RAJESHWAR, et al., 2008, pp. 171-192), pois não ocorre a degradação dos contaminantes, mas sim uma mudança de fase do poluente.

Nas últimas décadas ocorreu o desenvolvimento dos chamados Processos Oxidativos Avançados (POA's). Esses processos mostram-se importantes meios de mitigação dos impactos ambientais e econômicos gerados pela disseminação de compostos recalcitrantes presentes em águas residuais. Os POA's caracterizam-se por serem capazes de promover a transformação e degradação de compostos poluentes em substâncias não tóxicas, sendo um dos processos mais conhecidos a fotocatalise heterogênea.

2 | REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Processos Oxidativos Avançados (POA's)

A primeira utilização de um Processo Oxidativo Avançado ocorreu em 1886, na França, por De Méritens, através da utilização de ozônio para tratamento de desinfecção de água (NAVES, 2009). No entanto, o termo tornou-se conhecido apenas em 1973 durante o Primeiro Simpósio Internacional em Ozônio para o Tratamento de Água e Efluentes, em um trabalho que tratava da combinação entre ozônio e radiação ultravioleta para oxidar complexos de cianeto.

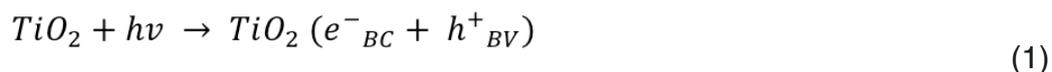
Os POA's caracterizam-se pela formação de espécies altamente reativas, como o radical hidroxila, sendo capazes de promover a mineralização completa de compostos orgânicos, devido ao alto poder oxidante das espécies provenientes da quebra homolítica da molécula de água, transformando a grande maioria dos contaminantes orgânicos em dióxido de carbono, água e espécies inorgânicas. Os POA's se destacam também por serem processos limpos e não seletivos, ou seja, podem degradar inúmeros compostos, independentemente da presença de outros compostos, sendo possível utiliza-los tanto em meio aquoso quanto em fase gasosa (MARTINS, 2011), além de serem capazes de degradar completamente o poluente e não apenas promover a mudança de fase.

De acordo com (ARAÚJO, 2016), os principais POA são os químicos, fotoquímicos, sonoquímicos e eletroquímicos. Dentro dos processos fotoquímicos tem-se a fotocatalise. A fotocatalise pode ser homogênea ou heterogênea. Na fotocatalise homogênea o catalisador encontra-se na mesma fase dos compostos a serem degradados, enquanto no meio heterogêneo o fotocatalisador se encontra disperso no meio aquoso ou afixado a um material suporte e colocado em meio ao fluxo de efluente contendo as espécies que precisam ser degradadas, sendo este último arranjo o principal assunto deste artigo.

2.2 Fotocatalise heterogênea

A fotocatalise heterogênea ficou conhecida na década de 70, com o trabalho de Fujishima e Honda (RAJESHWAR, et al., 2008, pp. 171-192). Desde então, muitos pesquisadores dedicam-se ao entendimento de processos fotocatalíticos. A fotocatalise heterogênea é um POA's fotoquímico que envolve a ativação de um semicondutor por luz natural ou artificial. Uma espécie semicondutora é irradiada para promover os elétrons (e^-) da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC). Durante esse processo, o orbital deixado pelo elétron que migrou fica vazio, sendo conhecido como buraco ou lacuna (h^+), havendo a formação de pares elétrons-buraco, que são os elétrons que migraram para a banda de condução e as lacunas que se formaram na banda de valência. O processo básico de fotocatalise ocorre

conforme a Eq. 1, em que se utiliza como semicondutor o TiO_2 .



A partir dos pares elétron-buraco são criados sítios redutores e oxidantes capazes de catalisar reações químicas. Esses sítios promovem a formação de espécies oxidantes derivadas do oxigênio dissolvido e das moléculas de água.

2.3 Dióxido de Titânio

O dióxido de titânio apresenta três tipos de estruturas cristalinas, sendo elas o rutilo, a anatase e a brookita. Tanto a anatase quanto o rutilo apresentam estruturas tetragonais, enquanto a brookita apresenta uma estrutura ortorrômbica (FELTRIN, 2012).

Cada estrutura cristalina do dióxido de titânio apresenta propriedades físicas distintas e bem definidas, sendo o rutilo considerado a fase estável em condições normais ambientais de temperatura e pressão, enquanto a anatase e a brookita são metaestáveis (Id., 2012). As fases anatase e rutilo são capazes de absorver apenas os raios UV, no entanto, o rutilo absorve fótons com comprimento de onda mais próximos da luz visível. Embora essa característica atribua, teoricamente, uma vantagem na utilização desse tipo de estrutura como fotocatalisador, é a fase anatase que apresenta maior atividade fotocatalítica. Já a fase brookita é complexa, com maior volume de células, além de ser difícil de ser sintetizada (Ibid.). A Tabela 1, de acordo com a referência (Id. et al., 2013, pp 620-632), em que se apresenta algumas propriedades físicas de cada fase.

Propriedades Físicas	Rutilo	Anatase	Brookita
Densidade específica (g/cm ³)	4,13	3,79	3,99
Dureza (Mohs)	6,5	5	5,75
Volume molecular calculado a partir da célula unitária ()	62,430	136,270	257,630
Energia do band gap (eV)	3,02	3,2	2,96
Ti-O comprimento da ligação ()	1,949 (4) 1,980 (2)	1,937 (4) 1,965 (2)	1,870 -2,040
Ti-O-Ti ângulo da ligação ()	81,2° 90,0°	77,7° 90,0°	77,0° 105°
Parâmetro a da célula unitária (nm)	0,4584	0,3782	0,9184
Parâmetro b da célula unitária (nm)	0,4584	0,3782	0,5447
Parâmetro c da célula unitária (nm)	0,2953	0,9502	0,5145

Tabela 1: Principais propriedades físicas do TiO_2 .

Fonte: FELTRIN, et al. 2013.

Estudos com fotocatalisadores de fase mista entre rutilo e anatase apresentaram uma melhorada fotoatividade em comparação com suas monofases (Id., 2012). Degussa P-25 é um material padrão, comercializado como uma fase mista de rutilo e anatase, na proporção de 3:1, em % atômica, na qual 75% é composto de anatase e, 25% de rutilo. O Degussa P-25 é o material de referência mais utilizado em muitos trabalhos, devido suas características estáveis e confiáveis (OHNO, et al. 2001, pp 82-86).

2.4 Filmes finos

No cenário atual, materiais com propriedades ajustáveis e dispositivos flexíveis são essenciais nos estudos de energia e meio ambiente, e a fotocatalise se mostra um processo determinante, principalmente no que diz respeito suas aplicações em escala industrial (SHWETHARANI, et al. 2019). Uma das variáveis a se considerar durante o processo de fotocatalise é a forma de utilização do catalizador, sendo o dióxido de titânio o mais utilizado.

Estudos acerca da utilização de catalisadores em forma de filmes finos imobilizados em substratos está crescendo rapidamente. Essas estruturas já se apresentam como elementos fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento de várias áreas, como na saúde, energia e meio ambiente (Ibid., 2019). A preparação de materiais semicondutores na forma de filmes finos permite fácil incorporação em diferentes substratos, sendo seus principais benefícios a redução de custos com material e a eficiência dos dispositivos (Ibid., 2019).

Para aplicação da fotocatalise na forma de filmes finos é necessário o estudo do substrato utilizado. Diversas pesquisas apontam a utilização de diferentes substratos, sendo os de vidro, alumínio e cerâmica apresentados como promissores para aplicação de TiO_2 na forma imobilizada. Embora diversos materiais tenham sido estudados como suporte para o catalizador, as cerâmicas demonstraram vantagens específicas, uma das principais vantagens reside no fato de que esse tipo de matriz pode atuar simultaneamente como adsorventes. A Tabela 2 mostra alguns dos processos de fotocatalise estudados.

Dentro deste cenário o presente trabalho tem como objetivo preparar filmes finos de TiO_2 sobre substratos cerâmicos comerciais para promover a degradação de corantes em meio aquoso.

Material	Corante	Tipo de Reator	Potência da Lâmpada	Tempo de Reação	Ref.
Anderson-type polyoxomolybdates/ TiO ₂	Azul de metileno	Filme fino em reator fechado	26 W	180 min	(DIAZ-URIBE, et al., 2018)
Ag/ZnO	Mistura de corantes	Filme fino	400 W	120 min	(ABDELSAMAD, et al., 2018)
Ag@AgCl/ZnO	Azul de Metileno (MB) e alaranjado de metila (MO)	Filme fino	300 W	20 min para MB e 40 min para MO	(YU, et al., 2019)
GO/ZnO	Rodamina B	Micronanopartículas sobre luz UV visível	300 W	1h	(WU & WANG, 2019)
Bi ₂ S ₃ /ZnO	Azul de metileno	Filmes finos	300 W	200 min	(VELANGANNI, et al., 2018)
Nano partículas de prata	Alaranjado de metila, azul de metileno, cloreto de rodamina, mistura dos três	<i>Packed bed</i>	100 W/30W	5h	(ZHOU & SRINIVASAN, 2015)
TiO ₂ e TiO ₂ /Ag	Rodamina B	Home-made system	15 W	5h	(BENSOUICI, et al., 2015)

Tabela 2: Processos de fotocatalise.

Fonte: O Autor.

3 | METODOLOGIA

3.1 Materiais

A telha cerâmica comercial da marca Cerâmica Argentina utilizada na construção civil foi escolhida em decorrência de dois principais fatores, sendo eles o baixo custo e a resistência à temperatura, além do formato adequado para a passagem de líquidos, como em uma calha. Foram utilizadas seis diferentes camadas para a telha, sendo que, todas passaram pelo processo de sinterização.

Dióxido de Titânio foi empregado na forma de pasta e gel. Foi utilizado para modificações no substrato cal virgem, composta de óxido de Magnésio e Cálcio aditivado naturalmente, da marca *Whitetintas*.

3.2 Preparação do Substrato

A escolha e preparação do substrato foi baseada no custo e na resistência do substrato às altas temperaturas necessárias no processo de sinterização. Para o aperfeiçoamento do substrato foi realizado o lixamento da superfície interna de modo

a remover o verniz presente na telha e adicionar rugosidade a superfície, sendo este um processo comum para melhorar a fixação de qualquer material aplicado na forma camada, além de remover possíveis contaminações.

Foi aplicada uma camada de CaO, por meio da dispersão do pó comercial em água, utilizando um pincel comum. Esse procedimento tem como objetivo refletir a luz enviada pela fonte UV do reator, permitindo um caminho ótico maior do que seria apenas com a camada de gel. A telha passou por um aquecimento à 250° C durante 15 minutos e, após esse procedimento, foi realizado o resfriamento natural dentro do forno até uma temperatura de 80°C, e fora do forno até seu completo resfriamento. Em seguida, fez-se novamente o aquecimento da mesma telha durante 30 minutos, a 500°C. Após o resfriamento do segundo aquecimento, como o anterior, a telha estava pronta para uso no fotoreator.

3.3 Atividade Fotocatalítica

A atividade fotocatalítica das amostras foi avaliada pelas degradações fotocatalíticas dos corantes Rosa de Bengala e Alaranjado de Metila, na concentração de 10 mg/L. A fonte de luz empregada foi uma lâmpada de iluminação pública sem o bulbo, da marca Philips, de 450 Watts, posicionada 32 cm acima da superfície da telha. A circulação de 1L de solução no reservatório, passando pela telha que foi posicionada com um ângulo de aproximadamente 30°, foi realizado com o uso de uma bomba d'água comercial de aquário. A Fig.1 apresenta o posicionamento da telha no interior do fotoreator de lâmina d'água. Durante a fotodegradação, alíquotas de 2 ml de dispersão foram retiradas regularmente do reator, em intervalos de 20 minutos, somando um total de seis amostras. A concentração do corante foi obtida por espectrofotometria UV-Vis.



Fig. 1: Reator fotocatalítico.

Fonte: o autor.

3.4 Obtenção da concentração de corante

As variações na concentração do corante foram determinadas por espectrofotometria UV-Vis a partir da relação linear entre concentração e a absorvância, dada pela Lei de Lambert-Beer (CANASSA; LAMONATO; RIBEIRO, 2018) e pela relação entre Transmitância e Absorvância conforme mostrado nas Eqs. 2 e 3.

$$Abs = c \cdot \epsilon \cdot l \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Abs = -\text{Log } T \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que Abs representa a Absorvância, l representa o caminho ótico, ϵ o coeficiente de absorvidade molar, c a concentração do corante e T a Transmitância.

3.5 Modelo Cinético de Primeira Ordem

Para a análise da performance do reator foi utilizado dois modelos de decaimento de primeira ordem. O primeiro modelo foi o de decaimento exponencial, conforme a Eq. 4.

$$\frac{C}{C_0} = B \cdot e^{-k.t} + D \quad \text{Eq. (4)}$$

Na Eq. 3, tem-se C sendo a concentração do corante, C_0 a concentração inicial do corante, B e D as constantes de ajuste que devem tender a 1 e 0, respectivamente, k a constante de cinética da reação e t, o tempo de reação.

O segundo modelo foi o de decaimento linear a partir da relação $-\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)$ vs t conforme mostra a Eq. 5.

$$-\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k.t \quad \text{Eq. (5)}$$

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A atividade fotocatalítica foi avaliada a partir da degradação dos corantes sob radiação visível. O processo de degradação fotocatalítica dos corantes Rosa de Bengala e Alaranjado de Metila utilizando o substrato com a camada de CaO após tratamento térmico e o gel de TiO_2 foi monitorado medindo-se a absorção dos corantes nos comprimentos de onda 563 nm para o Rosa de Bengala e 507 nm para o Alaranjado de Metila.

Os valores em porcentagem de transmitância obtidos para os corantes são apresentados na Tabela 3.

Tempo (min)	0	20	40	60	80	100
Rosa de Bengala	69,9	84,9	90,2	91,7	91,7	92,8
Alaranj. de Metila	27,5	31,8	42,6	51,8	54,3	55,6

Tabela 3: Valores de transmitância.

Fonte: o autor.

A partir dos valores de transmitância é possível estimar a taxa de degradação do corante como sendo promissora. Os resultados são apresentados nas Fig. 2, para o corante Rosa de Bengala, e Fig. 3 para o Alaranjado de Metila, e na Tabela 4.

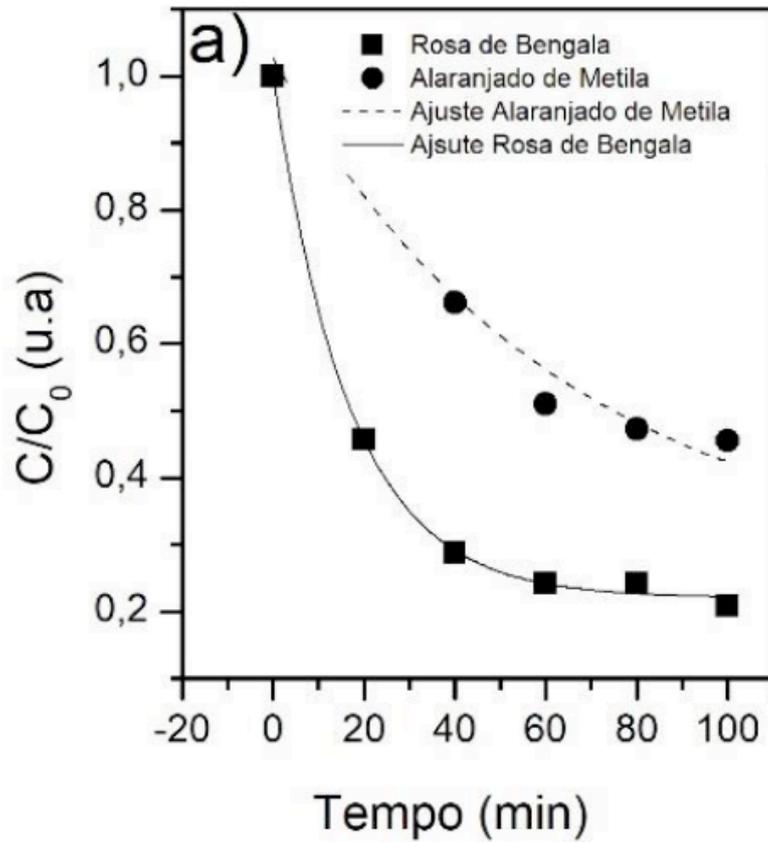


Fig. 2 Representação gráfica dos dados de cinética de degradação por decaimento exponencial.

Fonte: o autor.

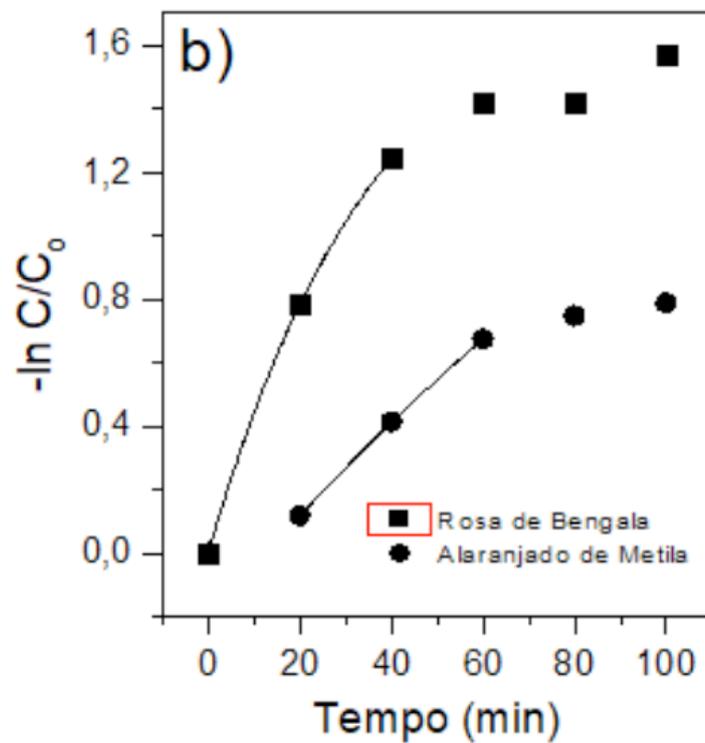


Fig. 3 Representação gráfica dos dados de cinética de degradação por decaimento linear.

Fonte: o autor.

Substrato	k exp. ¹ (10 ⁻³ min ⁻¹)	R ²	k lin. ² (10 ⁻³ min ⁻¹)	R ²
Rosa de Bengala	36,5	0,992	59,7	0,998
Alaranj de Metila	10,9	0,939	15,9	0,944

Tabela 4: Constantes de velocidade de reação.

1k exp. Modelo de decaimento exponencial.

2 Modelo de decaimento linear.

Fonte: o autor.

A partir dos valores de transmitância já é possível estimar a taxa de degradação do corante como sendo promissora, visto que os valores se aproximam de 93%, ou seja, do valor de transmitância da água deionizada, medida inicialmente no comprimento de onda de 563 nm.

A partir da avaliação da cinética de reação foi possível perceber que o corante Rosa de Bengala apresentou um melhor ajuste da curva obtida, para ambos os modelos, com um ajuste de 0,998 para o modelo linearizado e 0,992 para o de decaimento exponencial. Apresentando uma constante de velocidade de 59,7 x 10⁻³ min⁻¹ para o segundo modelo, o corante Rosa de Bengala também apresentou melhores valores de taxa de degradação em relação ao Alaranjado de Metila. A utilização de gel de TiO₂ não apresentou resultados significativos em relação à pasta de TiO₂, conforme observado na literatura estudada. Portanto, são necessários maiores estudos para definir os métodos e materiais com maior eficiência para aplicação com contaminantes reais. Entretanto, é importante notar que o trabalho apresentou resultados significativos para a aplicação futura dessa tecnologia na degradação de diversos poluentes em meio aquoso.

5 | CONCLUSÃO

A capacidade do substrato de refletir a luz incidida pela fonte UV é um importante parâmetro a ser considerado, sendo visto que o uso de uma superfície modificada com CaO possibilitou uma constante cinética significativa para o estudo, indicativo de que a camada de óxido estava estável sobre a telha cerâmica. No entanto, comparando os valores de constante cinética da Tabela 4, é notável que a degradação do corante Rosa de Bengala não apresentou um resultado significativamente maior em relação ao teste de adsorção, indicando que o processo de fotólise predomina sobre o processo de degradação fotocatalítica. Portanto, parâmetros do filme fino (espessura do filme, tipo de material) e da montagem do reator devem ser investigados de modo a obter um desempenho fotocatalítico pronunciável para aplicações em maior escala,

utilizando materiais abundantes na região, tal como a lama vermelha proveniente das atividades de mineração, a qual pode ser utilizada como fonte de materiais fotocatalisadores, como o TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO , entre outros.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Universidade Federal do Oeste do Pará pela bolsa de iniciação científica e ao professor Bruno Apolo Miranda Figueira por toda a infraestrutura oferecida.

REFERÊNCIAS

ABDELSAMAD, A. M. A., et al. (2018). **Enhanced photocatalytic degradation of textile wastewater using Ag/ZnO thin films**. *Journal of Water Process Engineering*, 25(April), pp 88–95.

ARAÚJO, Karla Santos de; ANTONELLI, Raissa; GAYDECZKA, Beatriz. **Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais**. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. v 11. (2016).

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BENSOUICI, F., et al. (2015). **Synthesis, characterization and photocatalytic behavior of Ag doped TiO thin film**. *Superlattices and Microstructures*, pp 255–265.

CANASSA, T. A. LAMONATO, A. L. RIBEIRO, A. V. (2018). **Utilização da Lei de Lambert-Beer para determinação da concentração de soluções**. *Journal of Experimental Techniques and Instrumentation*. JETI, v.1, n.2.

DIAZ-URIBE, C. E., et al. (2018). **Photocatalytic degradation of methylene blue by the Anderson-type polyoxomolybdates/TiO₂ thin films**. *Polyhedron*, v 149, pp 163–170.

FELTRIN, J. **Estabilização a elevadas temperaturas da fase anatase com partículas submicrométricas de SiO₂**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, SC, 2012.

FELTRIN, J. N., et al. **Photocatalytic surfaces of titania on ceramic substrates: Part I: Synthesis, structure and photoactivity**. *Cerâmica*. v 59. pp 620-632 (2013).

FIGUEIRA, Mariele; PEREIRA, Eliane dos Santos; SCHMACHTENBERG, Natana. **Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental**. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. v 18. (2014).

HANAOR, Dorian; SORRELL, Charles. **Review of the anatase to rutile phase transformation**. *Journal of Materials Science*. v 46. pp 855-874 (2011).

MARTINS, Leonardo Madeira. **Estudo de aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando seu reuso**. 2011. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa Regional de Pós-graduação, Universidade Federal do Piauí, Teresina.

NAVES, Fabiano Luiz. **Utilização de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes a base de resina fenólica, proveniente de indústria de tintas e derivados**. 2009. Dissertação (Mestrado em Processos Catalíticos e Biocatalíticos) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2010. doi: 10.11606/D.97.2010.tde-20082013-093154.

OHNO, Teruhisa, et al. **Morphology of a TiO₂ Photocatalyst (Degussa, P-25) Consisting of Anatase and Rutile Crystalline Phases**. Journal of Catalysis. v 203. pp 82-86. (2001).

RAJESHWAR, Krishnan, et al. **Heterogeneous photocatalytic treatment of organic dyes in air and aqueous media**. (2008). Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 9. 171-192. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2008.09.001.

RANI R, Shwetha, et al. **Photocatalytic semiconductor thin films for hydrogen production and environmental applications**, International Journal of Hydrogen Energy. 2019.

SHWETHARANI, R., et al. (2019). **Photocatalytic semiconductor thin films for hydrogen production and environmental applications**. International Journal of Hydrogen Energy.

YU, Jiajie, et al. (2018). **Fabrication of Ag@AgCl/ZnO submicron wire film catalyst on glass substrate with excellent visible light photocatalytic activity and reusability**. Chemical Engineering Journal, 334(March 2017), pp 225–236.

WU, Zhiqiang; WANG, Limin. (2019). **Graphene oxide (GO) doping hexagonal flower-like ZnO as potential enhancer of photocatalytic ability**. Materials Letters, 234(3).

VELANGANNI, Simeyon, et al. (2018). **Nanostructured ZnO coated Bi₂S₃ thin films: Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye**. Physica B: Condensed Matter, 545(June), pp 383–389.

ZHOU, R. SRINIVASAN, M. P. (2015). **Photocatalysis in a packed bed: Degradation of organic dyes by immobilized silver nanoparticles**. Journal of Environmental Chemical Engineering, 3(2), pp 609–616.

FATORES CRÍTICOS QUE INTERFEREM NO GERENCIAMENTO DO TEMPO EM PROJETOS DE ENGENHARIA: ESTUDO DE CASO EM SANTARÉM – PA

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 17/11/2019

Raíssa Coelho Almeida

Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/6842920412816009>

Kevin de Matos Costa

Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/9365258868083759>

RESUMO: O presente trabalho propõe um estudo dos fatores críticos que interferem diretamente na etapa de execução de um projeto, impedindo que o mesmo seja concluído dentro do prazo determinado. Para isto, foi realizada uma revisão aprofundada sobre gerenciamento de projetos, elaboração de cronogramas e cumprimento de prazos no contexto de uma obra pública na cidade de Santarém no Pará. Além disto, foi desenvolvido um modelo de cronograma específico através do software MS Project para o acompanhamento e controle dos serviços executados, que permitiu por meio de análises e relatórios, identificar e avaliar os fatores que causam desvios e atrasos, a fim de minimiza-los e servir de base para propostas de melhorias no processo de gerenciamento do tempo nos mais diversos projetos de

engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia, projetos, gerenciamento, cronogramas, MS Project.

CRITICAL FACTORS THAT INTERFERE IN TIME MANAGEMENT IN ENGINEERING PROJECTS: CASE STUDY IN SANTARÉM - PA

ABSTRACT: The present work proposes a study of the critical factors that interfere directly in the stage of execution of a project, preventing that it is completed within the determined period. In order to achieve this, an in-depth review was carried out on project management, scheduling and deadlines in the context of a public works project in the city of Santarém, Pará. In addition, a specific timetable template was developed through MS Project software for monitoring and control of the services performed, which has allowed, through analyzes and reports, to identify and evaluate the factors that cause deviations and delays, in order to minimize them and serve as a basis for proposals for improvements in the time management process in the most diverse engineering projects.

KEYWORDS: Engineering, projects, management, schedules, MS Project.

1 | INTRODUÇÃO

Um projeto é um empreendimento único, com início e fim definidos, que utiliza recursos limitados e é conduzido por pessoas, visando atingir metas e objetivos pré-definidos estabelecidos dentro de parâmetros de prazo, custo e qualidade (PMI, 2000).

Segundo o Project Management Institute (PMI), o gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas para projetar atividades que visem atingir os requisitos do projeto. Para facilitar o gerenciamento do projeto ele deve ser dividido em fases que constituem seu ciclo de vida (DINSMORE E CAVALIERE, 2003).

O ciclo de vida pode ser dividido em um conjunto de fases, normalmente fixas para todos os tipos de projeto, contendo uma série de passos principais do processo de contextualizar, desenhar, desenvolver e colocar em operação uma determinada necessidade do projeto.

Pode-se dizer que o ciclo de vida de um projeto é composto em geral, pelas seguintes fases: Fase de iniciação: É a fase onde oficialmente o projeto se inicia através do Termo de Abertura. Todas as equipes de trabalho envolvidas nesta fase, reconhecem que um projeto ou fase deve começar e se comprometem em executá-lo.

Fase de planejamento: É a fase responsável por detalhar tudo aquilo que será realizado pelo projeto, incluindo cronogramas, interdependências entre atividades, alocação de recursos envolvidos, análise de custos, etc., para que, no final dessa fase, ele esteja suficientemente detalhado para ser executado, sem dificuldades e imprevistos. Nessa fase, os planos auxiliares de comunicação, qualidade, riscos, suprimentos e recursos humanos também são desenvolvidos.

Fase de execução: É a fase que materializa tudo aquilo que foi planejado anteriormente. Qualquer erro cometido nas fases anteriores fica evidente durante esse processo. Grande parte do orçamento e do esforço do projeto é consumida nessa fase.

Fase de controle: É a fase em que acontece paralelamente as de Planejamento e Execução. Tem como objetivo acompanhar e controlar aquilo que está sendo realizado pelo projeto através da figura do gestor de obras e das equipes de análise e monitoramento de resultados, de modo a propor ações corretivas e preventivas, no menor espaço de tempo possível, após a detecção de anormalidade (gerenciamento).

O objetivo do controle é, portanto, comparar a “Linha de Base”, levantada no início do projeto (Estado Inicial), o seu status real no momento (Estado Atual), com o status previsto pelo planejamento (Estado Desejado), tomando ações corretivas em caso de desvio.

Fase de encerramento: É a fase quando a execução dos trabalhos é avaliada através de uma auditoria interna ou externa (terceiros), os livros e documentos do projeto são encerrados e todas as falhas ocorridas durante o projeto são discutidas e analisadas para que erros similares não ocorram em novos projetos e, melhores estratégias são identificadas e selecionadas como “lições aprendidas”. Aqui, se formaliza a aceitação do projeto ou fase e encerra-se de uma forma organizada, o projeto solicitado.

É exatamente entre a fase de planejamento de execução que entra este estudo, baseado nos cronogramas. A compatibilização serve para verificar e evitar as interferências de um projeto estrutural por exemplo, no arquitetônico ou no elétrico e hidro sanitário. A análise de interferências deve ser realizada antes da execução da obra, afinal, um bom projeto necessita ser preciso para evitar contratempos que encareçam o trabalho, atrasem o cronograma de obras ou que desperdicem o tempo dos profissionais com retrabalho.

O objetivo da compatibilização de projetos, consiste, portanto, em eliminar ou minimizar os conflitos entre especialidades em uma obra, simplificando a execução e otimizando a utilização de materiais e da mão de obra, bem como a subsequente manutenção.

2 | GESTÃO DE OBRAS

A importância da gestão na viabilização dos negócios tem crescido ultimamente e pode ser percebida pelo aumento do número de empresas que estão adotando a metodologia de gerenciamento de projetos (KERZNER, 2000). Para as empresas que buscam uma vantagem competitiva pela inovação, gerar competências na formação de equipes de trabalho passa a ser uma preocupação fundamental, bem como administrar múltiplas funções em diferentes perspectivas (FRAME, 1999).

De acordo com (VIEIRA, 2002), o gerenciamento de empreendimentos na construção civil lida com questões relacionadas à viabilidade de recursos, financiamentos, legislação, especificações de projetos, mão de obra, logística, tempo e qualidade. O segmento possui também outras características importantes, singulares: o produto final envolve recursos de grande porte, as várias etapas da implantação dependem de terceiros (empreiteiros e/ou prestadores de serviço), o produto final tem grande participação de trabalho artesanal e geralmente é único. É o domínio dessas etapas e a perfeita coordenação e integração das diversas pessoas envolvidas que garantem o sucesso do empreendimento, geralmente, medido pelo atendimento do orçamento, do prazo, da qualidade final e da satisfação do cliente.

O gerenciamento de tempo do projeto inclui os processos necessários para realizar o término do projeto no prazo. Um planejamento de obra pode-se classificar

segundo três níveis de detalhamento do qual fazem parte os procedimentos de execução dos serviços, os desenhos e detalhes da execução (GEHBAUER, 2002).

Os cronogramas podem ser classificados de forma geral em:

- a) Cronograma geral;
- b) Cronograma detalhado.

Um cronograma geral indica os prazos das etapas de produção mais importantes, como por exemplo, a execução de pavimentos, mas sem entrar no planejamento de prazos das atividades que compõem estas etapas.

Ele abrange o tempo total de construção e serve como principal instrumento de controle e gerenciamento da execução. Para a elaboração do cronograma geral, são estipulados primeiramente pelos empreendedores a data final e os marcos intermediários. Estes prazos devem ser tão realistas quanto possível.

Já um cronograma detalhado contém os prazos de execução de cada etapa e nele são consideradas também todas as atividades e serviços, fixando-se prazos para as mesmas (SANTOS, 2005).

As inúmeras influências internas e externas que ocorrem durante o período de execução de uma obra, tornam necessárias algumas alterações no cronograma detalhado.

É imprescindível que se tenha uma organização dos processos de trabalho. Neste contexto, vale ressaltar a importância do pré-planejamento diário ou semanal de todos os trabalhos a serem realizados, em que são feitas as seguintes perguntas: quem faz o quê, quando e como?

As análises dos levantamentos e atualizações possibilitam a otimização dos processos durante a execução de qualquer projeto de engenharia.

Essas alterações/ atualizações devem ser adaptadas ao cronograma geral, que permanece em vigor. Assim fica garantido que, apesar destes desvios que ocorrem isoladamente, o tempo total de execução permanece inalterado.

A interdependência entre o grau de precisão do planejamento e o tempo gasto em execução deve ser considerada de forma crítica na elaboração do cronograma.

Exatamente por causa da diferença entre o planejado e o executado, e pela falta de pesquisas de processos de construção sistematicamente registrados, é de extrema importância que sejam feitas estas adaptações no cronograma por meio de controle e gerenciamento do tempo durante a execução de obras no país.

3 | OBJETIVOS

Analisar os fatores críticos que interferem diretamente na execução de projetos de engenharia, a fim de propor um modelo de cronograma que minimize os desvios

e atrasos em obras, permitindo assim, um controle e gerenciamento de projeto mais eficiente.

4 | METODOLOGIA

O presente trabalho foi dividido em três etapas correlacionadas. Na primeira etapa, fez-se um estudo prévio acerca da situação em que a obra pública de uma Universidade Federal em Santarém – PA se encontrava. Nesta ocasião, a empreitada estava atrasada mais de 2 anos, por diversos motivos, dentre eles: falta materiais e insumos na cidade, ausência de comunicação entre a empresa vencedora do processo de licitação da obra e a administração da IES, o que gerava conflitos e atrasos nas tomadas de decisões, etc.

Portanto, fez-se necessário uma atualização das atividades realizadas e por fazer, bem como, uma recontagem de estoque dos insumos, as built dos projetos e um replanejamento da obra como um todo, para finalização em tempo limite de 2 meses. Prazo dado pela Superintendência de Infraestrutura da Universidade.

A segunda etapa consistiu no replanejamento das atividades, com execução e controle de obra rigoroso e para isto, utilizou-se do software de Gerenciamento de tarefas MS PROJECT® 2016. Com isto, foram feitas atualizações diárias no sistema e visitas in loco para garantir o cumprimento dos prazos em tempo hábil para a inauguração do prédio denominado Bloco Modular Tapajós.

A terceira e última etapa corresponde à geração de dados para posterior análises dos resultados. É tão importante quanto as outras etapas, pois a partir destes resultados foi possível propor melhorias no processo de gerenciamento de projetos na construção civil do município em questão.

5 | RESULTADOS

5.1 Gantt com linha do tempo – MS Project

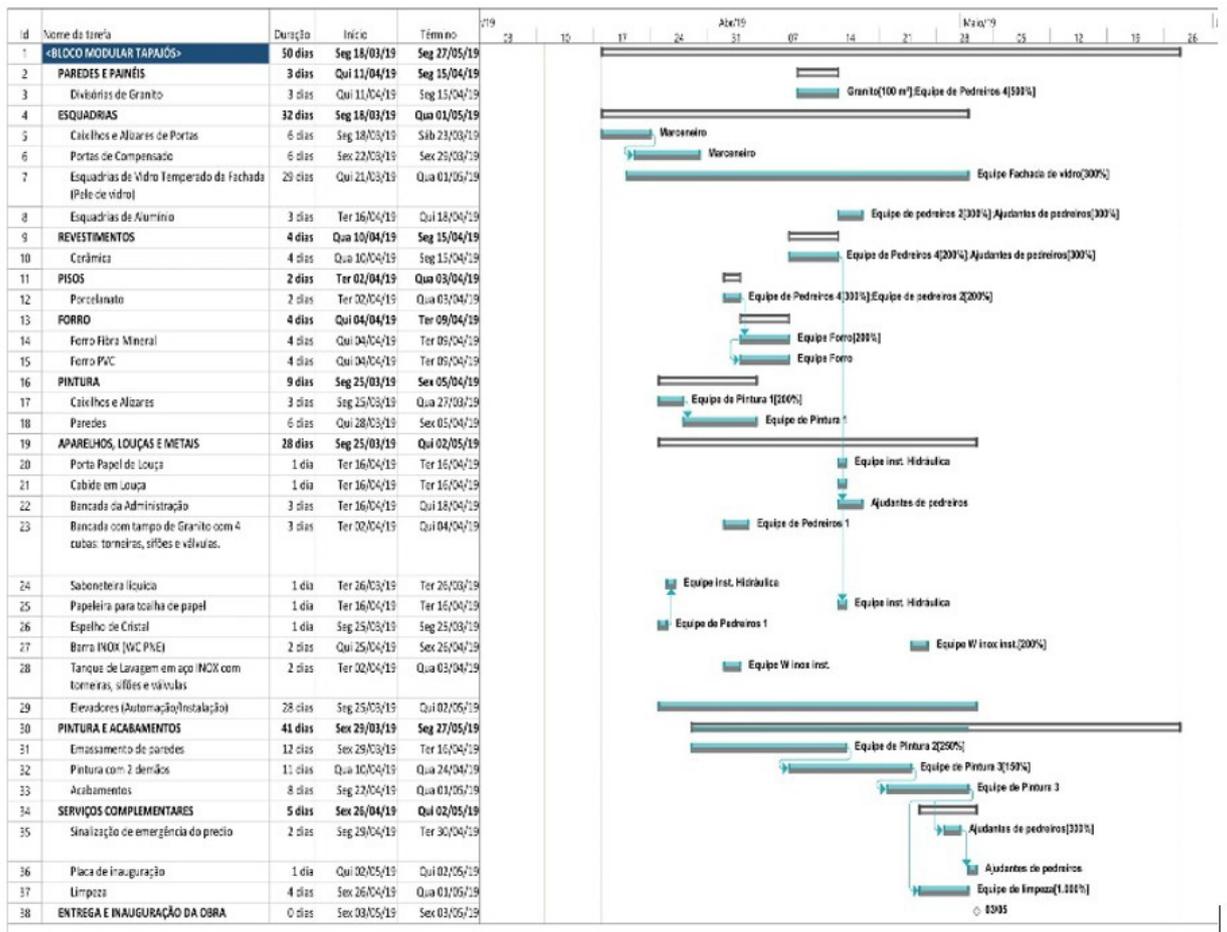


Fig. 1: Cronograma da fase de planejamento

No Cronograma acima é possível visualizar uma proposta de controle detalhada, com as atividades da obra apresentadas de forma organizada, subdivididas em itens, com data prevista para início e data prevista para término ao lado esquerdo.

É possível ainda, notar a criação de uma linha base (em cinza) no gráfico de gantt, para posterior acompanhamento e atualização das datas reais (fase de execução). Essa comparação e análise entre a data planejada e a data executada pode ser vista na tabela e no cronograma apresentados na sequência e atualizados após a conclusão de todas as tarefas.

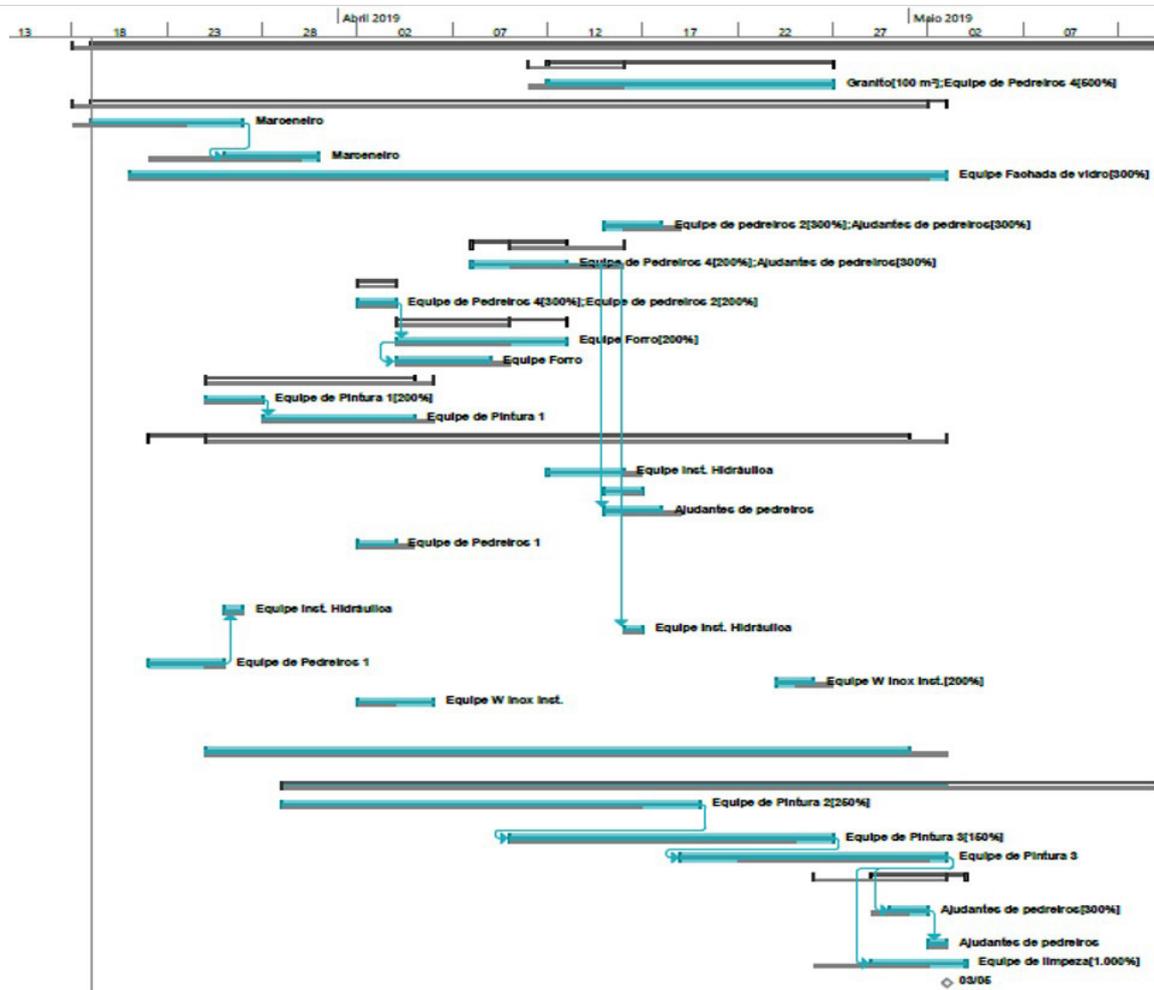


Fig. 2: Cronograma da fase de controle e execução

Na última atualização de cronograma realizada, notou-se que os atrasos (em vermelho) decorreram das atividades terceirizadas. Na maioria das vezes, os atrasos se deram nos serviços de fornecimento de granito, instalação de esquadrias e fornecimento de louças e metais, além da mão de obra terceirizada de marceneiros para colocação de portas no prédio inteiro. Estes atrasos influenciaram diretamente nas atividades de pintura e limpeza para entrega da obra, haja vista que são atividades predecessoras e, portanto, qualquer atraso implica num prejuízo para atividade seguinte. Em contrapartida, as setas em verde representam tarefas com início ou término adiantados.

NOME DA TAREFA	INICIO PLANEJADO	TÉRMINO PLANEJADO	INÍCIO REAL	TÉRMINO REAL	PLANEJADO X EXECUTADO
1 PAREDES E PAINÉIS	Qui 11/04/19	Seg 15/04/19	Sex 12/04/19	Sex 26/04/19	Atrasou 11 dias
1.1 Divisórias de Granito	Qui 11/04/19	Seg 15/04/19	Sex 12/04/19	Sex 26/04/19	Atrasou 11 dias
2 ESQUADRIAS	Ter 19/03/19	Ter 30/04/19	Ter 19/03/19	Qui 02/05/19	Atrasou 02 dias
2.2 Caixilhos e Alizares de Portas	Ter 19/03/19	Sab 23/03/19	Ter 19/03/19	Ter 26/03/19	Atrasou 03 dias
2.3 Portas de Compensado	Seg 25/03/19	Sab 30/03/19	Ter 26/03/19	Sáb 30/03/19	Cumpriu
2.4 Esquadrias de Vidro Temperado da Fachada (Pele de vidro)	Qua 20/03/19	Ter 30/04/19	Qui 21/03/19	Qui 02/05/19	Atrasou 02 dias
2.5 Esquadrias de Alumínio	Ter 16/04/19	Qui 18/04/19	Seg 15/04/19	Qua 17/04/19	Adiantou 01 dia
3 REVESTIMENTOS	Qua 10/04/19	Seg 15/04/19	Seg 08/04/19	Sex 12/04/19	Adiantou 03 dias
3.1 Cerâmica	Qua 10/04/19	Seg 15/04/19	Seg 08/04/19	Sex 12/04/19	Adiantou 03 dias
4 PISOS	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Cumpriu
4.1 Porcelanato	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Cumpriu
5 FORRO	Qua 20/03/19	Seg 25/03/19	Qui 04/04/19	Sex 12/04/19	Atrasou 17 dias
5.1 Forro Fibra Mineral	Qua 20/03/19	Seg 25/03/19	Qui 04/04/19	Sex 12/04/19	Atrasou 17 dias
5.2 Forro PVC	Qua 20/03/19	Seg 25/03/19	Qui 04/04/19	Seg 08/04/19	Atrasou 13 dias
6 PINTURA	Sex 22/03/19	Sab 30/03/19	Seg 25/03/19	Qui 04/04/19	Atrasou 04 dias
6.1 Caixilhos e Alizares	Seg 25/03/19	Qua 27/03/19	Seg 25/03/19	Qua 27/03/19	Cumpriu
6.2 Paredes	Sex 22/03/19	Sab 30/03/19	Qui 28/03/19	Qui 04/04/19	Atrasou 04 dias
7 APARELHOS, LOUÇAS E METAIS	Ter 19/03/19	Sex 26/04/19	Sex 22/03/19	Ter 30/04/19	Atrasou 04 dias
7.1 Porta Papel de Louça	Ter 16/04/19	Ter 16/04/19	Sex 12/04/19	Seg 15/04/19	Adiantou 01 dia
7.2 Cabide em Louça	Ter 16/04/19	Ter 16/04/19	Seg 15/04/19	Ter 16/04/19	Cumpriu
7.3 Bancada da Administração	Ter 02/04/19	Qui 04/04/19	Seg 15/04/19	Qua 17/04/19	Atrasou 13 dias
7.4 Bancada com tampo de Granito com 4 cubas: torneiras, sifões e válvulas.	Ter 02/04/19	Qui 04/04/19	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Adiantou 01 dia
7.5 Barra INOX (WC PNE)	Seg 25/03/19	Ter 26/03/19	Qua 24/04/19	Qui 25/04/19	Adiantou 01 dia
7.6 Tanque de Lavagem em aço INOX com torneiras, sifões e válvulas	Ter 02/04/19	Qua 03/04/19	Ter 02/04/19	Sex 05/04/19	Atrasou 02 dias
7.7 Elevadores (Automação/Instalação)	Ter 19/03/19	Sex 26/04/19	Seg 25/03/19	Ter 30/04/19	Atrasou 04 dias
8 PINTURA E ACABAMENTOS	Ter 19/03/19	Qua 29/04/19	Sex 29/03/19	Qui 02/05/19	Atrasou 03 dias
8.1 Emassamento de paredes	Ter 19/03/19	Qua 29/04/19	Sex 29/03/19	Sex 19/04/19	Adiantou 10 dias
8.2 Pintura com 2 demãos	Ter 19/03/19	Qua 29/04/19	Qua 10/04/19	Sex 26/04/19	Adiantou 03 dias
9 SERVIÇOS COMPLEMENTARES	Sex 26/04/19	Qui 02/05/19	Seg 29/04/19	Sex 03/05/19	Atrasou 01 dia
9.1 Placa de inauguração	Sex 26/04/19	Sex 26/04/19	Qui 02/05/19	Qui 02/05/19	Atrasou 06 dias
9.2 Limpeza	Sex 26/04/19	Qui 02/05/19	Seg 29/04/19	Sex 03/05/19	Atrasou 01 dia
10 ENTREGA E INAUGURAÇÃO DA OBRA	Sex 03/05/19	Sex 03/05/19	Sex 03/05/19	Sex 03/05/19	Cumpriu

Tabela 1: Cronograma

5.2 Diagrama de Ishikawa (Produção)

Ainda foi possível acompanhar o desenvolvimento da obra através de uma outra ferramenta mais estratégica, que é a análise do diagrama de Ishikawa.

Após serem analisados os diversos fatores que causam atrasos na obra, faz-

se necessário entender suas causas para que estas sejam evitadas nos próximos processos dentro da corporação. Para isto, O diagrama de espinha de peixe a seguir apresentou as causas dos problemas e os efeitos na produção:

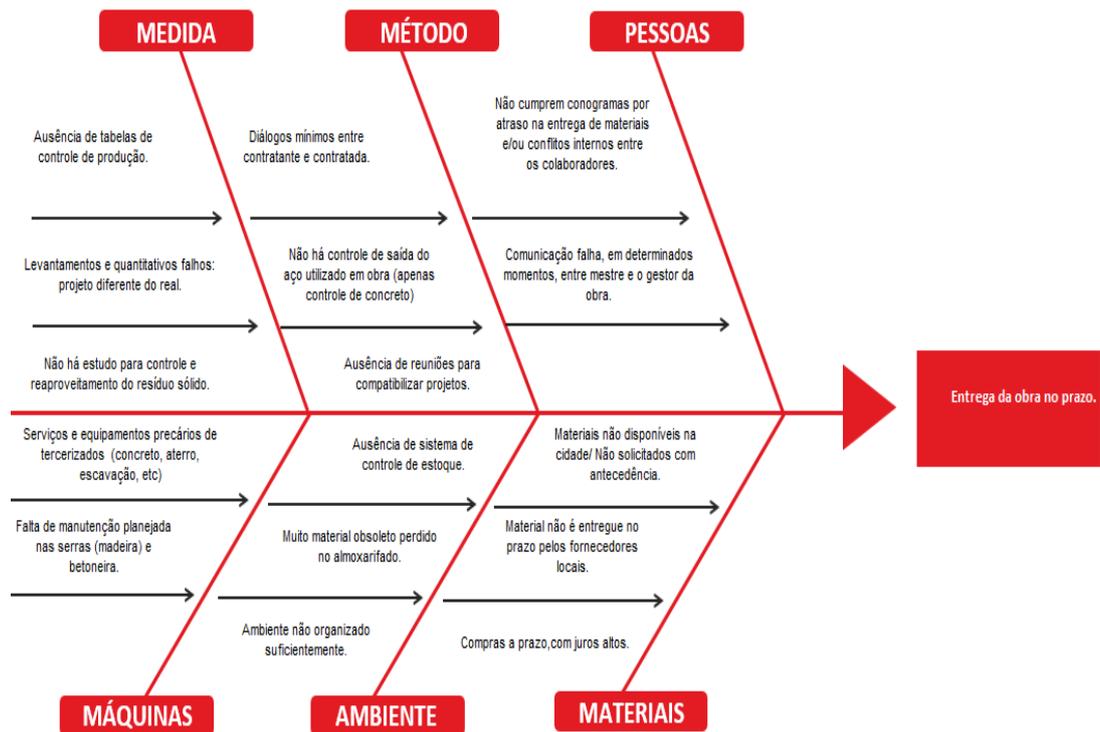


Fig. 3: Diagrama de causa e efeito

Por meio do diagrama acima, pôde-se identificar vários problemas que interferem diretamente no não cumprimento do cronograma proposto, entre eles estão principalmente: O não fornecimento de materiais e insumos pelas empresas contratadas no prazo determinado, o que atrasa a produtividade na obra e conseqüentemente o cronograma previsto; A comunicação, muitas das vezes falha, do gestor de obras com os demais líderes de setores, entre eles: mestre de obras, administrativo, central de concreto, carpintaria e serralheria; A não compatibilização de projetos arquitetônicos, estruturais e de instalações, ocasionando em erros de levantamentos e quantitativos; Serviços locais (terceirizados) precários tanto no quesito maquinário, quanto no cumprimento de prazos; Pessoal sem treinamento e capacitação em leitura de cronogramas.

Os fatores críticos descritos acima são, portanto, os grandes responsáveis pela baixa produtividade da obra, haja vista que muitas das tarefas não são independentes. Além do mais, alguns dos serviços não são entregues no tempo previsto e conseqüentemente as medições e boletins também sofrem alterações, o que implica diretamente na redução do saldo a faturar pela construtora, além de ocasionar eventuais multas para a mesma.

Logo, se não corrigidos o mais breve, não só influenciarão nesta etapa, mas também nas demais etapas, visto que esta obra é composta por mais 03(três) prédios

de 04(quatro) pavimentos.

6 | CONCLUSÃO

A importância dos projetos na viabilização dos negócios tem crescido ultimamente e pode ser percebida pelo aumento do número de empresas que estão adotando a metodologia de gerenciamento de projetos (KERZNER, 2000).

Para as empresas que buscam uma vantagem competitiva pela inovação, gerar competências na formação de equipes de trabalho passa a ser uma preocupação fundamental, bem como administrar múltiplas funções em diferentes perspectivas (FRAME, 1999).

Por meio do acompanhamento e gerenciamento na fase de execução da obra do Bloco Modular Tapajós, na cidade de Santarém, foi possível realizar o controle do que foi planejado, com análises feitas em cima de resultados e atualizações diárias.

Muitos dos fatores que ocasionam atrasos na obra, são possíveis de se corrigir e a escolha de fornecedores e terceirizados, passa sem dúvida, pela análise de preços e qualidade dos serviços.

Além disto, a comunicação entre os diversos níveis hierárquicos é essencial para o bom andamento da produção, de forma a evitar erros de execução e controle de materiais e insumos que entram e que saem do estoque.

É de fundamental importância hoje, uma equipe de gerencia capacitada (gestores de obra), no controle das atividades planejadas, bem como uma equipe responsável pelas análises dos resultados, que indicarão as causas dos problemas, de forma a propor melhorias para o processo produtivo da corporação.

Portanto, o gerenciamento do tempo na construção civil, passa sobretudo, pela organização das tarefas, pelo acompanhamento e controle dos processos. O modelo de cronograma apresentado neste trabalho é o que de mais atual se utiliza no mercado, um software de gerenciamento capaz de controlar o tempo e recursos (mão de obra e materiais), de modo, a reduzir prejuízos e corrigir os desvios e atrasos de obra.

REFERÊNCIAS

DINSMORE, C. e CAVALIERI, A. **Como se Tornar um Profissional em Gerenciamento de Projetos: Livro-Base de “Preparação para Certificação PMP Project Management Professional”**. Rio de Janeiro, QualityMark, 2003.

FRAME, J.D. **Project Management Competence: Building Key Skills for Individuals, Teams, and Organizations**. Jossey-Bass Publishers, San Francisco, 1999.

GEHBAUER. F. **Planejamento e Gestão de Obras**. Curitiba CEFET-PR, 2002.

KERZNER, H. Project Management – **A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling**. 6th Edition. John Wiley & sons. USA, New York NY, John Willey & Sons, 2000.

PMI 2000, PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **A guide to the project management body of knowledge**. Syba: PMI Publishing Division, 2000. Disponível em: <http://www.pmi.org>. Acessado em: setembro de 2019.

SANTOS, D. **Gerenciamento de Obras**. Universidade Federal do Sergipe, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Sergipe, 2005.

VIEIRA, E. **Gerenciando Projetos na Era de Grandes Mudanças – Uma breve abordagem do panorama atual**. PMI Journal – PMI-RS 3, 2002. pp. 7-16.

OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE KLEIN-GORDON-FOCK EM COORDENADAS DO CONE DE LUZ

Data de aceite: 27/01/2020

Jorge Kysnney Santos Kamassury

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC,
Centro Tecnológico - CTC
Florianópolis – Santa Catarina
<http://lattes.cnpq.br/1350512148935889>

Damião Pedro Meira Filho

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Pará - IFPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/2267580178817640>

Sérgio Antônio de Souza Farias

Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA,
Instituto de Ciências da Educação - ICED
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/8423926486006264>

Natalie Von Paraski

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Pará - IFPA
Santarém – Pará
<http://lattes.cnpq.br/5662091583286508>

RESUMO: O presente trabalho apresenta os passos e as considerações físico-matemáticas necessárias para a obtenção da famosa equação quântica relativística de Klein-Gordon-Fock (KGF) fazendo uso das coordenadas do cone de luz. Na abordagem proposta, destacamos inicialmente algumas propriedades

algébricas da Teoria da Relatividade Restrita assim como apresentamos resumidamente as coordenadas do cone de luz em termos das coordenadas (t, x) , isto é, do espaço-tempo de Minkowski. Em seguida, calculamos a equação de KGF tanto em coordenadas usuais do espaço-tempo de Minkowski quanto em coordenadas do cone de luz. Ademais, considerando essas últimas coordenadas, obtemos com detalhes a equação diferencial de KGF para uma partícula quântica eletricamente carregada em regime de relatividade restrita e sob influência de um campo eletromagnético clássico geral. Por fim, alcançamos a equação de KGF com estrutura análoga a uma equação de Schrödinger. A abordagem desenvolvida no texto apresenta assim as vantagens do formalismo das coordenadas do cone de luz para os estudos dos fenômenos relativísticos tão úteis nas pesquisas contemporâneas da Física de Partículas Elementares e Campos.

PALAVRAS-CHAVE: Equação de Klein-Gordon-Fock; Coordenadas do Cone de Luz; Campo eletromagnético clássico.

OBTAINING THE KLEIN-GORDON-FOCK EQUATION IN LIGHT CONE COORDINATES

ABSTRACT: The present work presents the steps and the physical-mathematical considerations necessary to obtain the famous

Klein-Gordon-Fock (KGF) relativistic quantum equation using the light cone coordinates. In the proposed approach, we first highlight some algebraic properties of the Theory of Constrained Relativity as well as briefly present the cone of light coordinates in terms of the coordinates (t, \mathbf{x}) , that is, of Minkowski spacetime. We then calculate the KGF equation in both the usual Minkowski spacetime coordinates and the cone of light coordinates. Moreover, considering these latter coordinates, we obtain in detail the differential equation of KGF for an electrically charged quantum particle in a restricted relativity regime and under the influence of a general classical electromagnetic field. Finally, we reach the KGF equation with structure analogous to a Schrödinger equation. The approach developed in the text thus presents the advantages of the cone of light coordinate formalism for the study of relativistic phenomena so useful in contemporary research in Elementary and Field Particle Physics.

KEYWORDS: Klein-Gordon-Fock Equation; Coordinates of the Cone of Light; Classical Electromagnetic Field.

1 | INTRODUÇÃO

Reconhecidamente uma das principais indagações que emergem quando estudamos mudanças de coordenadas é qual a vantagem de tal abordagem, ou seja, qual o interesse físico e/ou matemático em promover uma mudança de coordenadas e quais as suas implicações.

Matematicamente, por exemplo, a simples mudança de coordenadas cartesianas para coordenadas polares/esféricas tem seu apelo por facilitar consideravelmente a descrição de sistemas simétricos. Sob esse enfoque, a mudança de coordenadas do espaço-tempo de Minkowski para as coordenadas do cone de luz também tem sua utilidade. Naturalmente, a física é inalterável, porém a descrição analítica e a compreensão de fenômenos relativísticos tornam-se mais fáceis (SALES, SUZUKI e SORIANO, 2015). De fato, as coordenadas do cone de luz são bastante úteis, por exemplo, no estudo de colisões relativísticas, em especial, para eventos onde a velocidade relativa é muito próxima da velocidade da luz.

Embasado nesse contexto, apresentamos no presente trabalho um exemplo detalhado de como realizar a mudança de coordenadas do espaço-tempo de Minkowski para as coordenadas do cone de luz. Para tal propósito, usaremos a famosa equação quântica relativística de Klein-Gordon.

A equação de Klein-Gordon foi originalmente proposta em 1926 pelo físico sueco Oskar Klein (KLEIN, 1926) e o físico alemão Walter Gordon (GORDON, 1926) para descrever elétrons relativísticos. Muitas vezes essa equação também é chamada de equação de Klein-Gordon-Fock (KGF) devido à contribuição do físico soviético Vladimir Fock (FOCK, 1926). Apesar de não ser bem-sucedida ao abordar os elétrons em condições relativísticas, a equação de KGF sob a interpretação de

Feynman-Stueckelberg permite-nos, por exemplo, descrever o comportamento das partículas com spin 0, como os mésons (π e η) e assim abordar certos campos bosônicos (MEIRA FILHO e KAMASSURY, 2018).

Além de calcularmos a equação de KGF em coordenadas do cone de luz, estendemos nossa abordagem e obtemos com detalhes a equação diferencial de KGF para uma partícula quântica eletricamente carregada em regime de relatividade restrita e sob influência de um campo eletromagnético clássico geral. Por fim, alcançamos a equação de KGF com estrutura análoga a uma equação de Schroedinger.

2 | ESPAÇO-TEMPO DE MINKOWSKI

O espaço quadridimensional de Minkowski é um espaço-tempo plano e, portanto, de curvatura nula e é definido por coordenadas contravariantes (x^0, x^1, x^2, x^3) e covariantes (x_0, x_1, x_2, x_3) . Estas coordenadas (contravariantes e covariantes) relacionam-se com o parâmetro temporal t e com as coordenadas cartesianas em três dimensões (x, y, z) da seguinte forma

$$\begin{cases} x^0 = c \cdot t = +x_0 \\ x^1 = x = -x_1 \\ x^2 = y = -x_2 \\ x^3 = z = -x_3 \end{cases}$$

onde a constante c representa a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo.

Considerando as variações infinitesimais dessas coordenadas, temos:

$$\begin{cases} dx^0 = c \cdot dt = +dx_0 \\ dx^1 = dx = -dx_1 \\ dx^2 = dy = -dx_2 \\ dx^3 = dz = -dx_3 \end{cases}$$

De modo geral, sabe-se que as características e peculiaridades de um determinado espaço-tempo podem ser obtidas através de seu elemento de linha que, por sua vez, é invariante sob transformações específicas desse espaço-tempo, a exemplo das transformações de Lorentz (INVERNO, 1992). Nesse sentido, para um espaço-tempo quadridimensional genérico, o seu respectivo elemento de linha pode ser expresso por

$$ds^2 = \sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 g_{\alpha\beta}(x) dx^\alpha dx^\beta \quad (1)$$

onde $g_{\alpha\beta}$ representa as componentes do tensor métrico do referido espaço tempo (MEIRA FILHO e KAMASSURY, 2018).

Sabendo que o tensor métrico pode ser aplicado para baixar e elevar índices, conforme as expressões

$$x^\alpha = \sum_{\beta=0}^3 g^{\alpha\beta} x_\beta \quad (2)$$

$$x_\alpha = \sum_{\beta=0}^3 g_{\alpha\beta} x^\beta \quad (3)$$

e considerando o espaço-tempo de Minkowski, temos

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} = g^{\alpha\beta} = \eta^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

para o qual vale a seguinte propriedade:

$$\sum_{\mu=0}^3 \eta_{\alpha\mu} \eta^{\mu\beta} = \delta_\alpha^\beta \quad (5)$$

Isto posto, a equação (1) pode ser reescrita como se segue:

$$ds^2 = c^2(dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 \quad (6)$$

De fato, ainda é possível escrever os operadores diferenciais no espaço quadridimensional

$$\frac{\partial}{\partial x^\alpha} = \partial_\alpha \quad , \quad \frac{\partial}{\partial x_\alpha} = \partial^\alpha \quad (7)$$

assim como o operador d'Alembertiano:

$$\partial_\alpha \partial^\alpha = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \quad (8)$$

Para efeitos de simplificação, podemos utilizar um subespaço bidimensional (z e ct) cujo elemento de linha é dado por

$$(ds)^2 = c^2(dt)^2 - (dz)^2 \quad (9)$$

e o diagrama do cone de luz é ilustrado na Figura 1, no qual, o elemento de

linha (ou a distância no espaço-tempo) é classificado como:

- Distância tipo-tempo $(ds)^2 > 0$: associada à dinâmica espaço-temporal de estruturas massivas, as quais, propagam-se com velocidade $|\vec{v}| < c$. Os eventos que são separados por uma distância tipo-tempo são ditos *eventos com relação causal*;
- Distância tipo-espaço $(ds)^2 < 0$: associada à dinâmica espaço-temporal de estruturas que se propagam com $|\vec{v}| > c$. Eventos separados pela distância tipo-espaço são denominados de *eventos sem relação causal*;
- Distância tipo-luz $(ds)^2 = 0$: associada à dinâmica de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo com $|\vec{v}| = c$.

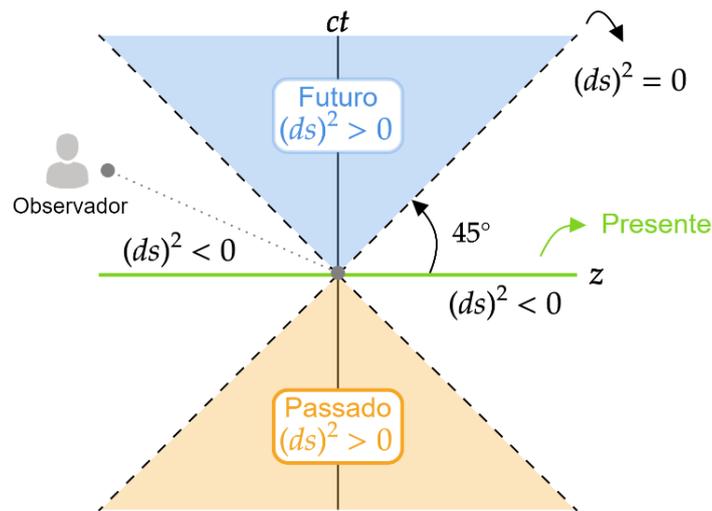


Figura 1: Diagrama do cone de luz

Fonte: Autores

Consideremos as coordenadas do cone de luz conforme apresentado na Figura 2. Relacionando as coordenadas do cone de luz (u^0 e u^3) com as coordenadas (z e $x^0 = ct$), alcançamos:

$$u^0 = +z \cos(45^\circ) + x^0 \sin(45^\circ) = \frac{x^0 + z}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$$u^3 = -z \cos(45^\circ) + x^0 \sin(45^\circ) = \frac{x^0 - z}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

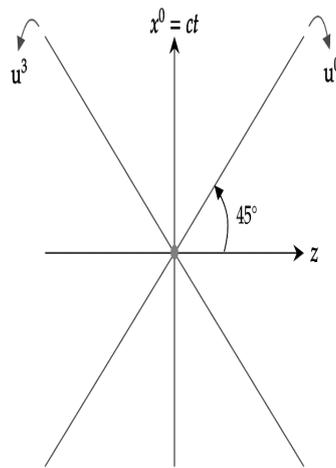


Figura 2: Coordenadas do cone de luz

Fonte: Autores

Nesse sentido, generalizando para quatro dimensões, obtemos as coordenadas no espaço-tempo de Minkowski

$$x^\mu = (x^0, x^1, x^2, x^3) = (ct, x, y, z) \quad (12)$$

e as coordenadas do cone de luz:

$$\begin{aligned} u^\mu &= (u^0, u^1, u^2, u^3) \\ &= \left(\frac{x^0 + z}{\sqrt{2}}, x, y, \frac{x^0 - z}{\sqrt{2}} \right) \\ &= \left(\frac{ct + z}{\sqrt{2}}, x, y, \frac{ct - z}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

3 I EQUAÇÃO DE KGF PARA UMA PARTÍCULA LIVRE EM COORDENADAS CARTESIANAS

Seja o espaço-tempo quadridimensional (plano e de curvatura nula) descrito na seção anterior, os passos iniciais para a obtenção da equação de KGF para uma partícula livre nas coordenadas (x, y, z, ct) correspondem ao uso da expressão da energia relativística para partícula livre dada por

$$\sum_{\mu=0}^3 p^\mu p_\mu = m_0^2 c^2$$

e da seguinte estrutura de operador diferencial quântico para o momento linear

quadridimensional:

$$\begin{cases} \hat{p}^\mu = i\hbar \partial / \partial x_\mu = i\hbar \partial^\mu \\ \hat{p}_\mu = i\hbar \partial / \partial x^\mu = i\hbar \partial_\mu \end{cases}$$

Desse modo, a partir da aplicação da relação operacional sobre as funções de onda Ψ , obtemos a expressão

$$\sum_{\mu=0}^3 \hat{p}^\mu \hat{p}_\mu = m_0^2 c^2 \Psi \quad (14)$$

que consiste em uma equação de onda quântica em regime relativístico para partícula livre de spin zero e é tradicionalmente denominada como *equação de Klein-Gordon-Fock*.

Reescrevendo a equação (14) como se segue

$$\sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g^{\mu\nu} \partial_\mu \partial_\nu \Psi + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0 \quad (15)$$

e considerando a métrica dada na equação (4), alcançamos

$$\partial_0 \partial_0 \Psi - \partial_1 \partial_1 \Psi - \partial_2 \partial_2 \Psi - \partial_3 \partial_3 \Psi + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0$$

ou, alternativamente

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^0} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x^0} \right) - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x^i} \right) + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0 \\ \left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right] + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Na literatura, essa última expressão é conhecida como a equação de KGF para uma partícula livre em coordenadas cartesianas.

4 | EQUAÇÃO DE KGF PARA UMA PARTÍCULA LIVRE EM COORDENADAS DO CONE DE LUZ

Considerando as coordenadas curvilíneas generalizadas u^μ em termos das coordenadas cartesianas x^μ , a equação de KGF para uma partícula quântica livre e relativística pode ser escrita como

$$\sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 \tilde{g}^{\mu\nu} \left(\tilde{p}_\mu \tilde{p}_\nu - i \sum_{\alpha=0}^3 \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \tilde{p}_\alpha \right) \Psi = m_0^2 c^2 \Psi \quad (17)$$

sendo o tensor métrico $\tilde{g}^{\mu\nu}$, dado por

$$\tilde{g}^{\mu\nu} = \sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 \frac{\partial u^\mu}{\partial x^\alpha} \frac{\partial u^\nu}{\partial x^\beta} \eta^{\alpha\beta}$$

o símbolo de Christoffel $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ (CHRISTOFFEL, 1869) expresso por

$$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu = \frac{1}{2} \sum_{\nu=0}^3 \tilde{g}^{\mu\nu} (\partial_\alpha \tilde{g}_{\nu\beta} + \partial_\beta \tilde{g}_{\nu\alpha} - \partial_\nu \tilde{g}_{\alpha\beta}) \quad (18)$$

e o termo \tilde{p}_μ como:

$$\tilde{p}_\mu = i\hbar \frac{\partial}{\partial u^\mu}$$

Fazendo uso das relações expressas em (13) e sabendo que as componentes não-nulas da métrica $\eta^{\mu\nu}$ são

$$\eta^{00} = -\eta^{11} = -\eta^{22} = -\eta^{33} = 1$$

obtemos

$$\begin{aligned} g^{00} &= g^{01} = g^{02} = g^{10} = g^{12} = g^{13} = g^{20} \\ &= g^{21} = g^{23} = g^{31} = g^{32} = g^{33} = 0 \end{aligned}$$

e

$$g^{03} = -g^{11} = -g^{22} = g^{30} = 1$$

Nesse caso, podemos concluir que os componentes do símbolo de Christoffel são todos nulos, isto é

$$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu = 0$$

o que nos possibilita reescrever a equação (17) como:

$$\sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 \tilde{g}^{\mu\nu} \tilde{p}_\mu \tilde{p}_\nu \Psi = m_0^2 c^2 \Psi \quad (19)$$

Considerando novamente as relações entre as coordenadas cartesianas e as coordenadas do cone de luz, verifica-se as seguintes relações entre os operadores

diferenciais:

- Para a coordenada x :

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial u^1}{\partial x} \frac{\partial}{\partial u^1} = \frac{\partial}{\partial u^1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) = \frac{\partial u^1}{\partial x} \frac{\partial}{\partial u^1} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial u^1} \left(\frac{\partial}{\partial u^1} \right) = \frac{\partial^2}{\partial u^{12}}$$

- Para a coordenada y :

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial u^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial u^2} = \frac{\partial}{\partial u^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{\partial u^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial u^2} \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial u^2} \left(\frac{\partial}{\partial u^2} \right) = \frac{\partial^2}{\partial u^{22}}$$

- Para a coordenada $x^0 = ct$:

$$\frac{\partial}{\partial x^0} = \frac{\partial u^0}{\partial x^0} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\partial u^3}{\partial x^0} \frac{\partial}{\partial u^3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x^0} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^{02}} = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3} \right] \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3} \right]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^{02}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2}{\partial u^{02}} + 2 \frac{\partial^2}{\partial u^0 \partial u^3} + \frac{\partial^2}{\partial u^{32}} \right]$$

- Para a coordenada z :

$$\frac{\partial}{\partial x^3} = \frac{\partial u^0}{\partial x^3} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\partial u^3}{\partial x^3} \frac{\partial}{\partial u^3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x^3} = -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^{32}} = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3} \right] \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^0} + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\partial}{\partial u^3} \right]$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^{32}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2}{\partial u^{02}} - 2 \frac{\partial^2}{\partial u^0 \partial u^3} + \frac{\partial^2}{\partial u^{32}} \right]$$

Isto posto, podemos substituir as relações dos operadores diferenciais em coordenadas do cone de luz na equação (19) como se segue

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial u^{0^2}} + 2 \frac{\partial^2}{\partial u^0 \partial u^3} + \frac{\partial^2}{\partial u^{3^2}} \right) \Psi - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{1^2}} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{2^2}} -$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2}{\partial u^{0^2}} - 2 \frac{\partial^2}{\partial u^0 \partial u^3} + \frac{\partial^2}{\partial u^{3^2}} \right) \Psi = - \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi$$

alcançando a expressão

$$2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^0 \partial u^3} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{1^2}} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{2^2}} = - \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi \quad (20)$$

ou de forma equivalente:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial u^0} = \left(\frac{\partial}{\partial u^3} \right)^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{1^2}} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial u^{2^2}} - \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \Psi \right) \right] \quad (21)$$

A expressão (21) representa a equação de KGF para partícula livre escrita em termos das coordenadas do cone de luz. Alternativamente, é possível reescrever a equação de KGF de modo algebricamente similar à famosa equação de Schroedinger (BAGROV, BUCHBINDER e GITMAN, 1976)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial u^0} = \hat{H} \Psi \quad (22)$$

sendo o operador do tipo hamiltoniano \hat{H} dado por:

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial u^3} \right)^{-1} \left(\frac{\partial^2}{\partial u^{1^2}} + \frac{\partial^2}{\partial u^{2^2}} - \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \right)$$

5 | EQUAÇÃO DE KGF PARA UMA PARTÍCULA CARREGADA SUBMETIDA A CAMPO ELETROMAGNÉTICO EM COORDENADAS DO CONE DE LUZ

Generalizando a equação (17) para o caso de uma partícula quântica eletricamente carregada de spin-zero, em regime relativístico e sob influência de um campo eletromagnético clássico, temos

$$\sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 \tilde{g}^{\mu\nu} \left(\tilde{P}_\mu \tilde{P}_\nu - i \sum_{\alpha=0}^3 \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \tilde{p}_\alpha \right) \Psi = m_0^2 c^2 \Psi \quad (23)$$

onde o termo \tilde{P}_μ é dado por:

$$\tilde{P}_\mu = i\hbar \frac{\partial}{\partial u^\mu} - \frac{q}{c} \tilde{A}_\mu$$

Usando os resultados apresentados na secção 4, pode-se alcançar:

$$\sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 \tilde{g}^{\mu\nu} \tilde{P}_\mu \tilde{P}_\nu \Psi = m_0^2 c^2 \Psi$$

Nesse caso, verifica-se que

$$(\tilde{g}^{00} \tilde{P}_0 \tilde{P}_3 + \tilde{g}^{11} \tilde{P}_1 \tilde{P}_1 + \tilde{g}^{22} \tilde{P}_2 \tilde{P}_2 + \tilde{g}^{30} \tilde{P}_3 \tilde{P}_0) \Psi = m_0^2 c^2 \Psi$$

de modo que

$$(\tilde{P}_0 \tilde{P}_3 + \tilde{P}_3 \tilde{P}_0) \Psi = (\tilde{P}_1 \tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 \tilde{P}_2 + m_0^2 c^2) \Psi \quad (24)$$

Sabendo que

$$\begin{aligned} \tilde{P}_0 &= i\hbar \frac{\partial}{\partial u^0} - \frac{q}{c} \tilde{A}_0, & \tilde{P}_1 &= i\hbar \frac{\partial}{\partial u^1} - \frac{q}{c} \tilde{A}_1 \\ \tilde{P}_2 &= i\hbar \frac{\partial}{\partial u^2} - \frac{q}{c} \tilde{A}_2, & \tilde{P}_3 &= i\hbar \frac{\partial}{\partial u^3} - \frac{q}{c} \tilde{A}_3 \end{aligned}$$

podemos escrever

$$\begin{aligned} \tilde{P}_0 \tilde{P}_3 \Psi &= \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial u^0} - \frac{q}{c} \tilde{A}_3 \right) \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial u^3} - \frac{q}{c} \tilde{A}_0 \right) \Psi \\ &= (i\hbar)^2 \frac{\partial}{\partial u^0} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial u^3} \right) - i\hbar \frac{q}{c} \left(\frac{\partial \tilde{A}_3}{\partial u^0} \right) \Psi - i\hbar \frac{q}{c} \tilde{A}_3 \frac{\partial \Psi}{\partial u^0} \\ &\quad - i\hbar \frac{q}{c} \tilde{A}_0 \frac{\partial \Psi}{\partial u^3} + \frac{q^2}{c^2} \tilde{A}_0 \tilde{A}_3 \Psi \end{aligned} \quad (25)$$

e

$$\begin{aligned} \tilde{P}_3 \tilde{P}_0 \Psi &= \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial u^3} - \frac{q}{c} \tilde{A}_3 \right) \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial u^0} - \frac{q}{c} \tilde{A}_0 \right) \Psi \\ &= (i\hbar)^2 \frac{\partial}{\partial u^3} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial u^0} \right) - i\hbar \frac{q}{c} \left(\frac{\partial \tilde{A}_0}{\partial u^3} \right) \Psi - i\hbar \frac{q}{c} \tilde{A}_0 \frac{\partial \Psi}{\partial u^3} \\ &\quad - i\hbar \frac{q}{c} \tilde{A}_3 \frac{\partial \Psi}{\partial u^0} + \frac{q^2}{c^2} \tilde{A}_3 \tilde{A}_0 \Psi \end{aligned} \quad (26)$$

A partir das equações (25) e (26), reescrevemos a equação (24) como

$$2\tilde{P}_3 \tilde{P}_0 \Psi = \left[\tilde{P}_1 \tilde{P}_1 + \tilde{P}_2 \tilde{P}_2 + m_0^2 c^2 - i\hbar \frac{q}{c} \left(\frac{\partial \tilde{A}_0}{\partial u^3} - \frac{\partial \tilde{A}_3}{\partial u^0} \right) \right] \Psi$$

Com base no eletromagnetismo clássico, sabemos que

$$\tilde{F}_{\mu\nu} = \frac{\partial \tilde{A}_\nu}{\partial u^\mu} - \frac{\partial \tilde{A}_\mu}{\partial u^\nu}$$

e

$$\tilde{F}_{03} = \frac{\partial \tilde{A}_3}{\partial u^0} - \frac{\partial \tilde{A}_0}{\partial u^3} = - \left(\frac{\partial \tilde{A}_0}{\partial u^3} - \frac{\partial \tilde{A}_3}{\partial u^0} \right)$$

o que nos permite obter:

$$2\tilde{P}_3\tilde{P}_0\Psi = \left[\tilde{P}_1\tilde{P}_1 + \tilde{P}_2\tilde{P}_2 + m_0^2c^2 + i\hbar\frac{q}{c}\tilde{F}_{03} \right] \Psi \quad (27)$$

De fato, podemos ainda escrever alternativamente a equação (27) no seguinte formato

$$\frac{\partial \Psi}{\partial u^0} = \tilde{H}\Psi \quad (28)$$

no qual, o operador do tipo hamiltoniano \tilde{H} corresponde a

$$\tilde{H} = - \left\{ \frac{iq}{\hbar c} \tilde{A}_0 + \frac{i}{2\hbar} (\tilde{P}_3)^{-1} \left[\sum_{i=1}^2 \tilde{P}_i\tilde{P}_i + m_0^2c^2 + i\hbar\frac{q}{c}\tilde{F}_{03} \right] \right\}$$

A equação (28) apresenta-se como uma equação de KGF sob a configuração de uma equação diferencial de primeira ordem na coordenada u^0 em plena similaridade com a equação de Schroedinger.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do referido trabalho, apresentamos os passos necessários para a obtenção da equação de KFG em coordenadas do cone de luz. Além disso, estendemos nossa abordagem, desenvolvendo as considerações físicas e matemáticas para obter a equação diferencial de KGF para uma partícula quântica carregada, em regime de Relatividade Restrita e sob influência de um campo eletromagnético clássico geral.

REFERÊNCIAS

BAGROV, V. G.; BUCHBINDER, I. L.; GITMAN, D. M. Coherent States of a Relativistic Particle in an External Electromagnetic Field. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, v. 9, n. 11, p. 1955-1965, 1976.

CHRISTOFFEL, E. Ueber die Transformation der Homogenen Differentialausdrücke zweiten Grades. **Journal für die reine und angewandte Mathematik**, v. 70, p. 46-70, 1869.

FOCK, V. Zur Schrödingerschen Wellenmechanik. **Zeitschrift Für Physik**, v. 38, p. 242-250, 1926.

GORDON, W. Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie. **Zeitschrift Für Physik**, v. 40, p. 117-133, 1926.

INVERNO, R. D. **Introducing Einstein's Relativity**. 1. ed. Oxford: Clarendon Press, 1992.

KLEIN, O. Quantentheorie und Fünfdimensionale Relativitätstheorie. **Zeitschrift Für Physik**, v. 37, p. 895-906, 1926.

MEIRA FILHO, D. P.; KAMASSURY, J. K. S. Potência Irradiada por uma Partícula Elétrica Acelerada no Espaço-Tempo de Minkowski. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, p. e3316, Abril 2018.

SALES, J. H.; SUZUKI, A.; SORIANO, L. Partículas e Antipartículas do Cone de Luz. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 3309, 2015.

RÁPIDO RECONHECIMENTO DE MODULAÇÕES ANALÓGICAS E DIGITAIS VIA REDES RESIDUAIS PROFUNDAS

Data de aceite: 27/01/2020

Jorge Kysnney Santos Kamassury

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC,
Centro Tecnológico - CTC
Florianópolis – Santa Catarina
<http://lattes.cnpq.br/1350512148935889>

Vinícius Felipe de Oliveira da Silva

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC,
Centro Tecnológico - CTC
Florianópolis – Santa Catarina
<http://lattes.cnpq.br/5788623208337073>

RESUMO: O reconhecimento automático de modulação (AMR), empregado em sistemas de comunicação para o processo de demodulação no receptor, tem notáveis aplicações no contexto militar e civil. Todavia, em virtude do elevado desenvolvimento de técnicas de comunicação sem fio, a quantidade de métodos e parâmetros de modulação tem aumentado rapidamente, tornando o reconhecimento de modulação uma tarefa desafiadora. Esse aspecto torna-se ainda mais agravante pelo fato de que os métodos convencionais para esse reconhecimento, exigem quase sempre o conhecimento prévio dos parâmetros do canal e do sinal, podendo ser imprecisos até mesmo para condições moderadas. Assim, para sistemas de comunicação sem fio,

onde os esquemas de modulação mudam conforme o ambiente, a necessidade de AMR é indiscutível, exigindo novas abordagens, como é o caso do uso de técnicas de aprendizado de máquina, especialmente, as redes neurais convolucionais. Na prática, um dos grandes desafios enfrentados por essas redes para AMR reside no elevado tempo que elas demandam para treinamento, fato esse que dificulta sua aplicação em tempo real. Desse modo, visando alcançar um trade-off entre o desempenho de reconhecimento e o tempo para treinamento, projetamos duas arquiteturas de redes residuais profundas que além de exigirem menos tempo para treinamento, retornam desempenhos equivalentes às mais recentes arquiteturas da literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Reconhecimento Automático de Modulações; Aprendizado de Máquina; ResNet; Tempo de Treinamento.

FAST RECOGNITION OF ANALOG AND DIGITAL MODULATIONS VIA DEEP RESIDUAL NETWORKS

ABSTRACT: Automatic Modulation Recognition (AMR), used in communication systems for the receiver demodulation process, has notable applications in the military and civil contexts. However, due to the high development of wireless communication techniques, the

number of modulation methods and parameters has been increasing rapidly, making modulation recognition a challenging task. This aspect is further aggravated by the fact that conventional methods for this recognition almost always require prior knowledge of channel and signal parameters and may be inaccurate even under moderate conditions. Thus, for wireless communication systems, where modulation schemes change according to the environment, the need for AMR is unquestionable, requiring new approaches, such as the use of machine learning techniques, especially convolutional neural networks. In practice, one of the major challenges faced by these AMR networks is their high training time, which makes their application difficult in real time. Thus, in order to achieve a trade-off between recognition performance and training time, we designed two deep residual network architectures that, in addition to requiring less training time, return performances equivalent to the latest literature architectures.

KEYWORDS: Automatic Modulation Recognition; Machine Learning; ResNet; Training Time.

1 | INTRODUÇÃO

O reconhecimento automático de modulação (*automatic modulation recognition*, AMR) conceituado como a identificação autônoma de modulação no receptor em um sistema de comunicação, tem sido tradicionalmente empregado em sistemas de comunicações militares (análise de ameaças, vigilância e guerra eletrônica) (ZHU e NANDI, 2015). Além dessa clássica aplicação, nos últimos anos, o AMR tem recebido especial atenção por assessorar sistemas de Rádio Cognitivo (RC), uma tecnologia de comunicação sem fio que interage de modo inteligente com o ambiente de operação com enfoque tanto no acesso oportunista quanto na utilização eficiente do espectro de frequência (DOBRE, ABDI, *et al.*, 2007). Auxiliando RCs na etapa de sensoriamento espectral, o processo de AMR permite identificar usuários primários e obter ganho de eficiência espectral pela não adição de *overhead* para estimação do meio (BAHRANI, DERAUGHTIAN e ZOLGHADRASLI, 2017).

Na literatura, as técnicas de AMR mais convencionais estão categorizadas em: métodos baseados em verossimilhança (*likelihood-based*, LB) e métodos baseados em características (*feature-based*, FB) (WU, LI e FANG, 2018). Embora teoricamente alcancem a solução ideal, os métodos LB demandam elevado esforço computacional e quase sempre necessitam de informações prévias dos transmissores, o que pode ser fatalmente inviável para diversas aplicações. Os métodos FB, por sua vez, atuam na extração de características e nos critérios de classificação, sendo, em geral, constituídos de dois subsistemas, a saber: o extrator de características e o classificador (por exemplo, árvore de decisão, máquinas de vetores de suporte, redes neurais artificiais, etc.). De fato, apesar de serem mais fáceis de implementar, o desempenho dos métodos FB depende diretamente das características extraídas

e do tipo de classificador, o que afeta a robustez da abordagem visto que, na maioria dos casos, as características extraídas devem ser projetadas manualmente para a modulação e canal correspondentes (ZHOU, YIN, *et al.*, 2019). Assim, diante do atual cenário, no qual há um crescente desenvolvimento de técnicas de comunicação sem fio e, por consequência, a quantidade de métodos e parâmetros de modulação, o reconhecimento de modulação tem se tornado uma tarefa desafiadora para os métodos tradicionais (O'SHEA, CORGAN e CLANCY, 2016).

Nesse contexto, os métodos de aprendizado profundo (*deep learning*, DL) vêm se manifestando como uma ferramenta alternativa e robusta para AMR. Empregando redes multicamadas para extrair a representação interna dos dados brutos, os métodos DL aprendem as características automaticamente (vide Figura 1).

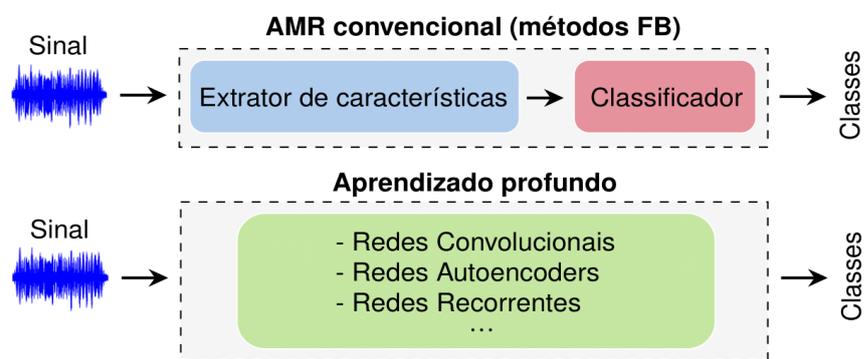


Figura 1: Métodos convencionais (FB) em comparação com os métodos de aprendizado profundo.

Fonte: Autores

Dentre alguns métodos DL recentemente aplicados para AMR, citam-se: *deep belief network* (MENDIS, WEI e MADANAYAKE, 2016), *autoencoders* (DAI, ZHANG e SUN, 2016), redes neurais convolucionais (*convolutional neural network*, CNN) (O'SHEA, CORGAN e CLANCY, 2016) e redes neurais recorrentes (*recurrent neural network*, RNN) (WU, LI e FANG, 2018). Recentemente, outras arquiteturas como DenseNet (*densely connected networks*) (LIU, YANG e GAMAL, 2017), CLDNN (*convolutional long short-term deep neural network*) (WEST e O'SHEA, 2017) e ResNet (*residual network*) (O'SHEA, ROY e CLANCY, 2018), também foram empregadas para a referida tarefa.

Reconhecendo que o tempo de treinamento é um fator determinante para o uso dos métodos DL em aplicações de tempo real, Ramjee et al. (2019) recentemente empregou técnicas de redução de dimensionalidade e subamostragem para reduzir o tempo de treinamento/validação de arquiteturas como CLDNN e ResNet (sendo essa última a mais rápida). Nesse sentido, propomos nesse trabalho duas arquiteturas ResNet que exigem menos tempo para treinamento, bem como retornam

desempenhos similares ao resultado obtido pela arquitetura proposta em Ramjee et al. (2019).

2 | MODELO DO SISTEMA DE MODULAÇÃO

Em geral, o reconhecimento de modulação pode ser analisado como um problema de classificação de N classes. Uma representação genérica do sinal recebido $r(t)$ pode ser expressa por

$$r(t) = \alpha(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \theta_0(t))] s(t) + n(t) \quad (1)$$

onde $s(t)$ denota o envelope complexo em banda-base do sinal transmitido, $\alpha(t)$ é a resposta ao impulso do canal, $\theta_0(t)$ e f_0 representam as compensações de fase e frequência da portadora devidas ao oscilador local e efeito Doppler díspares causadas pelo movimento e $n(t)$ é o ruído instantâneo do canal.

Isto posto, o objetivo fundamental de qualquer classificador de modulações incorre em fornecer a probabilidade $P(s(t) \in N_i | r(t))$ para o sinal recebido $r(t)$, onde $N_i(t)$ representa a i -ésima modulação (classe). Para tal propósito, podemos recorrer aos métodos DL, para os quais, processa-se inicialmente um conjunto de dados de treinamento para definir os parâmetros da rede, e em seguida, a acurácia de classificação é calculada para um conjunto de dados de teste (GOODFELLOW, BENGIO e COURVILLE, 2016).

2.1 Conjunto de dados

Neste trabalho, utilizaremos o conjunto de dados que possui 10 tipos de modulações, a saber:

- Digitais: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM, BFSK, CPFSK e PAM4;
- Analógicas: WB-FM e AM-DSB.

Incluindo parâmetros de modulações usados comercialmente e imperfeições realistas de canal como deslocamento de taxa de amostragem, AWGN, desvanecimento de múltiplos caminhos e desvio de frequência, esse conjunto de dados foi gerado sinteticamente através do GNU Radio (O'SHEA e WEST, 2016).

O referido conjunto possui 1.200.000 exemplos normalizados (cada um com 128 amostras, sendo 8 amostras por símbolo) que estão estruturados em vetores 2128 com as partes real e imaginária separadas em amostras de tempo complexas (1 μ s de intervalo de amostragem). Em razão da simplicidade e flexibilidade tanto para operações matemáticas quanto para o projeto de *hardware*, $r(t)$ é usualmente representado no formato IQ (fase e quadratura). Os rótulos desses exemplos incluem tanto a razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) quanto o tipo de modulação. As

SNRs das amostras estão distribuídas uniformemente no intervalo $[-20, +18]$ com passo de 2 dB.

3 I REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS

As CNNs são redes neurais que empregam a convolução em vez da multiplicação geral de matrizes em pelo menos uma de suas camadas (GOODFELLOW, BENGIO e COURVILLE, 2016). O emprego da operação de convolução, que é linear, permite que as CNNs explorem informações em estruturas organizadas no tempo e no espaço. Dessa forma, essas redes são capazes de aprenderem representações invariantes à escala, translação, rotação e transformação.

Em geral, as arquiteturas das CNNs são constituídas de três tipos de camadas: camada convolucional, camada de agrupamento (*pooling*) e camada densa (*fully connected*).

3.2 Camadas convolucionais

Em detalhe, as camadas convolucionais possuem filtros (núcleos de convolução) para processar o sinal recebido, onde para cada filtro, um neurônio está conectado a apenas um subconjunto dos neurônios da camada anterior. Os filtros são os responsáveis pela formação dos mapas de características.

Para compreendermos como esses núcleos de convolução atuam, suponhamos que a l -ésima camada de uma rede seja uma camada convolucional, para a qual, N_k^l e L_k^l denotam a quantidade e o tamanho dos filtros, enquanto N_s e L_s^l correspondem à quantidade e ao tamanho das entradas. Nesse ínterim, a operação de convolução na l -ésima camada é definida por

$$h_k^l = \sigma(u^l \times W_k^l + b_k^l) \quad (2)$$

onde

$$(u^l \times W_k^l)_i = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u(j)W_k^l(i-j) \quad (3)$$

Nas equações acima:

- $u \in \mathcal{R}^{N_s \times L_s^l}$ é o conjunto de entradas;
- $W \in \mathcal{R}^{N_k \times L_k^l}$ é o conjunto de filtros;
- $b \in \mathcal{R}^{N_s}$ é o *bias* para cada saída;
- $h^l \in \mathcal{R}^{N_k \times L_0^l}$ é o conjunto da saída (mapa de características), onde L_0^l é o tamanho da saída;
- $\sigma(\cdot)$ é a função de ativação.

Na prática, a função de ativação mais empregada para esse tipo de camada é a ReLU (*rectified linear unit*) que supera o problema do desvanecimento do gradiente e converge bem mais rápido do que as funções sigmóide e tangente hiperbólica.

3.3 Camadas de agrupamento

Essas camadas são usualmente empregadas imediatamente depois das camadas convolucionais e atuam modificando o conjunto de saída da camada convolucional de uma determinada região por uma estatística resumida das saídas mais próximas (GOODFELLOW, BENGIO e COURVILLE, 2016). A média, a média ponderada e *max pooling* são algumas das funções que podem ser empregadas por esse tipo de camada para realizar tal estatística.

Por exemplo, supondo que a saída de uma camada convolucional seja seguida por uma camada de agrupamento que use a função *max pooling*, nesse caso, a saída h^{l+1} será dada por

$$h_k^{l+1}(i) = \max\{h_k^l[m^{l+1}(i-1)+1], \dots, h_k^l[m^{l+1}(i-1)+L_p]\} \quad (4)$$

tal que

$$i \leq \frac{L_0^l - L_p^{l+1}}{m^{l+1}} + 1 \quad (5)$$

onde L_p^{l+1} é o tamanho da janela de agrupamento e m^{l+1} é o *stride*, ou seja, a margem entre duas janelas adjacentes. Desse modo, com a aplicação da função *max pooling*, a informação reportada é o valor máximo de uma vizinhança retangular.

3.4 Normalização em lote

A camada de normalização em lote (*batch normalization*, BN) atua acelerando o aprendizado profundo da rede a partir da redução interna da covariância (IOFFE e SZEGEDY, 2015), alterando assim a distribuição de saída de cada camada durante a etapa de treinamento.

Para entendermos a ação da camada BN, considere um único minilote dado por $B = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ e a saída da camada BN como y_i . Nesse caso, sejam a média (μ_B) e a variância (σ_B^2) para B dadas por

$$\mu_B = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i, \quad \sigma_B^2 = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d (x_i - \mu_B)^2 \quad (6)$$

a normalização será obtida pela relação

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}} \quad (7)$$

e a saída y_i alcançada através da expressão:

$$y_i = \gamma \hat{x}_i + \beta$$

onde γ e β devem ser aprendidos durante o treinamento da arquitetura. O termo ϵ é uma pequena quantidade usada para evitar a divisão por zero.

3.5 Camada densa e a função softmax

Em geral, as CNNs possuem uma ou mais camadas totalmente conectadas (*fully connected*). Nesse tipo de camada, cada neurônio da camada anterior é conectado a cada um dos neurônios da próxima camada. Desse modo, o resultado para cada um deles pode ser obtido a partir da equação (2).

Na prática, as camadas densas são usadas no final das redes a fim de mapear os valores intermediários para cada uma das saídas finais possíveis. Para um problema de classificação, por exemplo, objetiva-se que somente uma classe seja ativada no final, de modo que, para forçar esse resultado usualmente é acoplada uma função à última camada densa. Para o aprendizado supervisionado, a regressão *softmax* é uma das funções mais utilizadas. Essa função é um classificador multiclasse generalizado da regressão logística cuja saída é um conjunto de distribuições de probabilidade de diferentes classes. Nesse caso, supondo que h_L seja a entrada para uma camada com *softmax*, essa função retorna y_o que pode ser denotada por

$$P(y_o = c | h_L, W_L, b_L) = \frac{\exp(W_{Lc} h_L + b_{Lc})}{\sum_{i=1}^n \exp(W_{Li} h_L + b_{Li})}$$

onde $c = 1, \dots, n$. Conforme indica a equação (9), o neurônio com saída máxima é selecionado como resultado da classificação

3.6 Resnet

Desenvolvida recentemente para permitir a propagação eficiente de atributos em redes profundas, a ResNet funciona a partir da criação de caminhos de atalho entre diferentes camadas na rede (HE *et al.*, 2016). A Figura 2 ilustra um exemplo de bloco residual; nesse caso, o bloco é constituído de duas camadas convolucionais, para o qual, u e $H(u)$ denotam respectivamente a entrada e saída do bloco residual, enquanto $F(u)$ refere-se à saída da primeira camada (função de mapeamento residual).

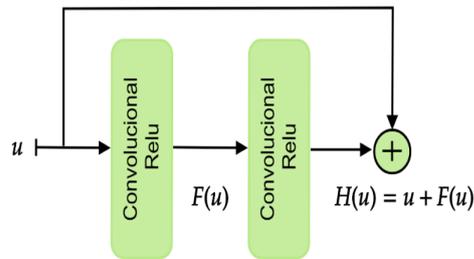


Figura 2: Bloco residual.

Fonte: Autores

Em vez de aprender o mapeamento $H(u) = u$ que é mais complicado para a rede profunda, a ResNet adiciona um caminho de atalho conectando a entrada à saída do bloco residual, isto é

$$H(u) = F(u) + u \quad (10)$$

de forma que a rede aprenda o mapeamento dado por:

$$F(u) = H(u) - u \quad (11)$$

De fato, ao adicionar esse atalho, um mapeamento de identidade é criado, viabilizando assim que uma rede profunda possa ter a mesma capacidade de aprendizado que uma rede rasa.

4 | ARQUITETURAS PROPOSTAS

Inspirados pela arquitetura apresentada por O'Shea et al. (2018), projetamos duas ResNets usando somente cinco pilhas residuais seguidas por duas camadas densas.

4.1 Resnet-P1

A primeira arquitetura proposta está ilustrada na Figura 3. Nessa arquitetura, cada pilha residual é composta por: uma camada convolucional (com função de ativação linear), uma camada de normalização em lote, uma unidade residual e uma camada de agrupamento. Em cada unidade residual, há duas conexões de atalho: a primeira adiciona a entrada da unidade a sua respectiva saída, enquanto a segunda conexão adiciona a saída da camada de normalização da segunda camada convolucional à saída da unidade residual. Nas duas primeiras camadas convolucionais da unidade residual, utiliza-se a função ReLU, enquanto na terceira camada aplica-se a função linear. Todas as camadas convolucionais da unidade residual são seguidas por camadas de normalização para evitar *overfitting* e acelerar

o aprendizado da rede.

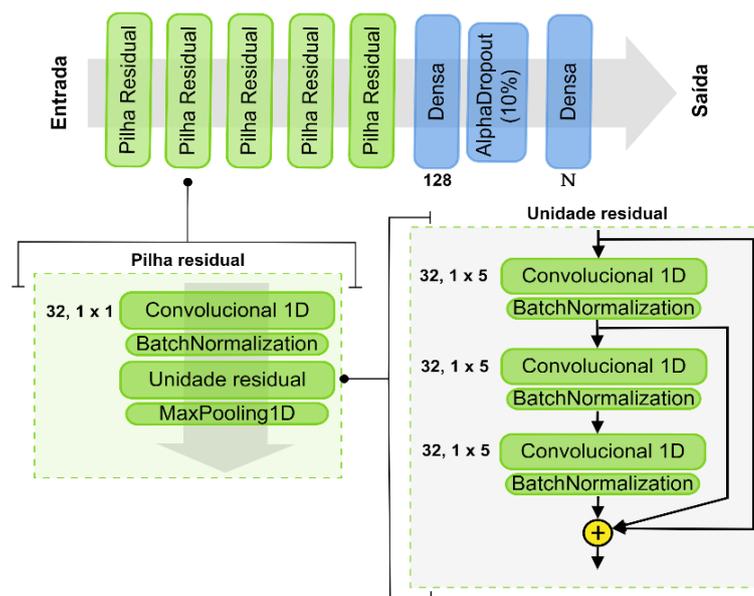


Figura 3: ResNet – P1.

Fonte: Autores

No que se refere às camadas densas, a penúltima camada usa uma função de ativação SELU (*scaled exponential linear unit*) sendo seguida por *Alphadropout* (KLAMBAUER, UNTERTHINER e MAYR, 2017) de 10% que empregamos para aumentar a capacidade de generalização da rede. Para a última camada, aplicamos a função *softmax*.

O primeiro parâmetro de cada camada convolucional da Figura 3. representa a quantidade de filtros enquanto o segundo parâmetro denota o tamanho de cada filtro. Para as duas camadas densas, utilizamos 128 e N neurônios, em ordem de profundidade da rede, onde N refere-se à quantidade de classes de modulações do conjunto de dados.

4.2 Resnet-P2

De modo a reduzir ainda mais a complexidade da primeira rede proposta, projetamos a ResNet apresentada na Figura 4. De fato, as principais diferenças dessa arquitetura em relação à ResNet-P1 são:

- Remoção da camada convolucional intermediária (bem como a camada de normalização) da unidade residual;
- Inclusão de mais uma camada densa à rede principal;
- Aplicação da função ReLU para a camada convolucional da pilha residual.

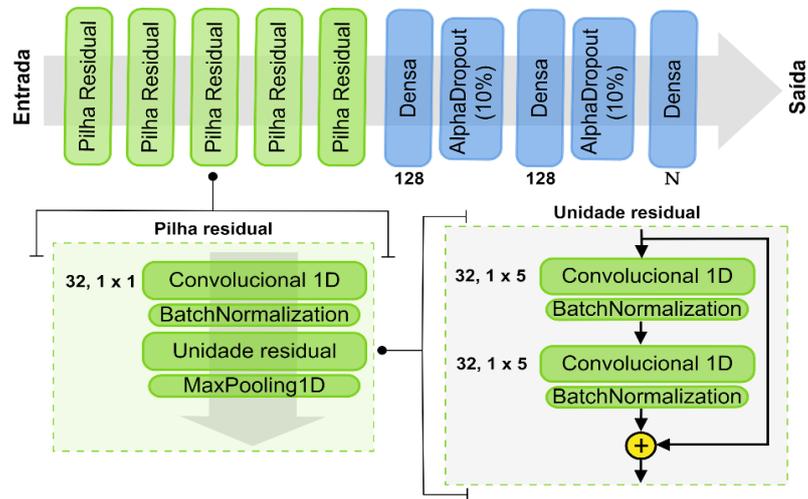


Figura 4: ResNet – P2.

Fonte: Autores

5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

As etapas de treinamento e teste com o conjunto de dados descrito na subseção 3.1 foram realizadas usando a biblioteca Keras com Tensorflow como *backend*. Para todas as arquiteturas usamos a função Adam para a otimização dos pesos das redes - com uma taxa de aprendizagem de 0.001 - e entropia cruzada categórica para avaliar a função perda (*loss*). Ademais, usamos um *batch size* de 1024, bem como 30 épocas para o processo de treinamento (quantidade média de épocas observada para a convergência da rede). As implementações foram feitas na plataforma colab (*google colaboratory*) que nos permitiu o uso da GPU Tesla K80.

Para realizar as simulações, o conjunto de dados foi dividido em 50% para treinamento e 50% para validação e teste. Vale mencionar que os exemplos para treinamento e teste são selecionados aleatoriamente.

A quantidade de parâmetros treináveis (N_p) e o percentual de redução do tempo médio de treinamento (T_m) de cada arquitetura estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que ambas as arquiteturas propostas demandam menos tempo para treinamento quando comparadas com a ResNet otimizada apresentada por Ramjee et al. (2019). A ResNet-P2, por exemplo, exige apenas 43% do tempo de treinamento que a arquitetura de referência demanda.

Arquitetura	N_p	$T_m(\%)$
ResNet - Ramjee	144.154	_____
ResNet - P1	101.386	≈ 25 ↓
ResNet - P2	91.642	≈ 43 ↓

Tabela 1: Treinamento das arquiteturas.

Fonte: Autores

No que concerne à acurácia de classificação (ilustrada na Figura 5), verifica-se que as arquiteturas propostas alcançam desempenhos similares ao resultado obtido usando a rede de referência.

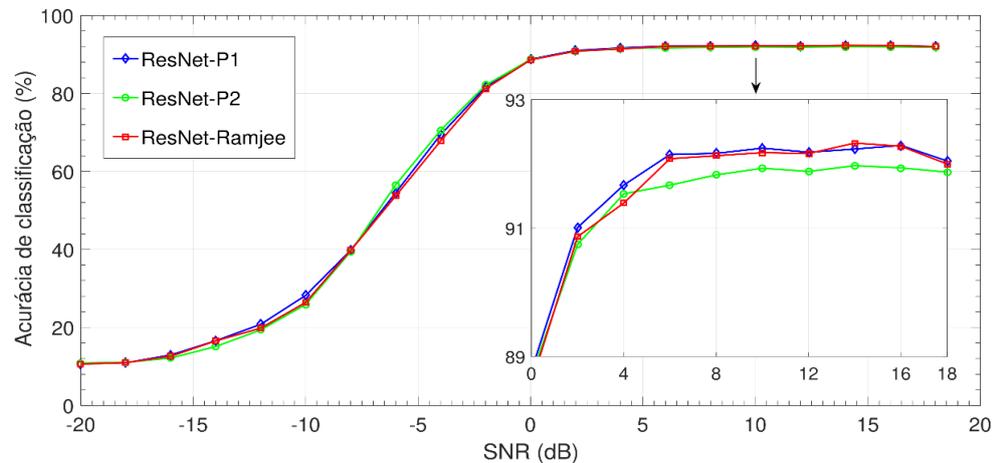


Figura 5: Comparação das acurácias de classificação das arquiteturas propostas com a ResNet usada por Ramjee et al. (2019)

Fonte: Autores

Para avaliar o quão efetiva é a classificação obtida através das arquiteturas propostas para cada tipo de modulação do conjunto de dados, fazemos uso da matriz de confusão (especificamente para as SNRs $\{-4, 8\}$ dB). Nessa matriz, as linhas e colunas correspondem às modulações corretas (rótulos verdadeiros) e às modulações previstas (rótulos preditos), nessa ordem, enquanto a diagonal principal representa, para cada modulação, o percentual de classificações corretas da modulação em relação à quantidade total de dados dessa modulação. As Figuras 6 e 7, por exemplo, apresentam as matrizes de confusão obtidas a partir da ResNet-P2.

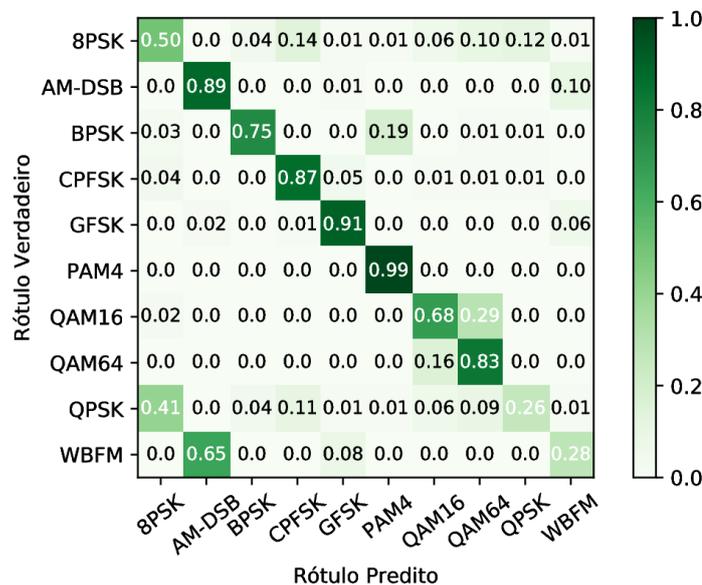


Figura 6: Matriz de confusão da ResNet-P2 em SNR -4 dB.

Fonte: Autores

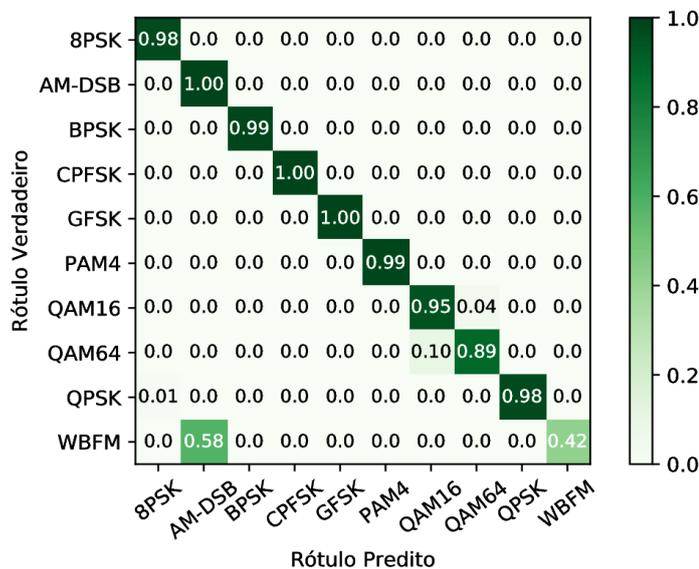


Figura 7: Matriz de confusão da ResNet-P2 em SNR +8 dB.

Fonte: Autores

É possível observar que as maiores confusões ocorrem entre as modulações digitais 16-QAM e 64-QAM e as modulações analógicas AM-DSB e WBFM. A confusão entre as modulações QAM se deve ao fato de elas eventualmente ocuparem a mesma região com uma combinação de símbolos específicos, visto que a constelação 16-QAM está contida na constelação 64-QAM. Já a confusão entre as modulações analógicas ocorre pelo fato de a mensagem ser um sinal de voz. Nesse caso, temos períodos de silêncio onde apenas a portadora está sendo enviada (O'SHEA e HOYDIS, 2017).

De fato, recorrendo-se às técnicas de redução de dimensionalidade e subamostragem, podemos diminuir ainda mais o tempo de treinamento das redes. Entretanto, conforme é demonstrado por Ramjee et al. (2019), o uso dessas técnicas pode prejudicar significativamente o desempenho das redes, em especial, para baixas SNRs. Para efeitos de comparação e a fim de replicar os melhores resultados obtidos por Ramjee et al. (2019), reduzimos a dimensionalidade de cada entrada de amostra vetorial usando a técnica de subamostragem uniforme (ELDAR, 2015) e treinamos a ResNet de referência. Nesse caso, usamos vetores de amostras com dimensão (264). Observou-se que apesar de reduzir o tempo de treinamento em aproximadamente 30% em relação à ResNet-Ramjee, essa abordagem reduz a acurácia de classificação dessa arquitetura para baixas SNRs. Conforme visualiza-se na Figura 8, para o intervalo de $[-8,0]$ dB, a arquitetura que faz uso da subamostragem (ResNet-SU) tem desempenho inferior - em torno de 8% - quando comparado com às demais arquiteturas.

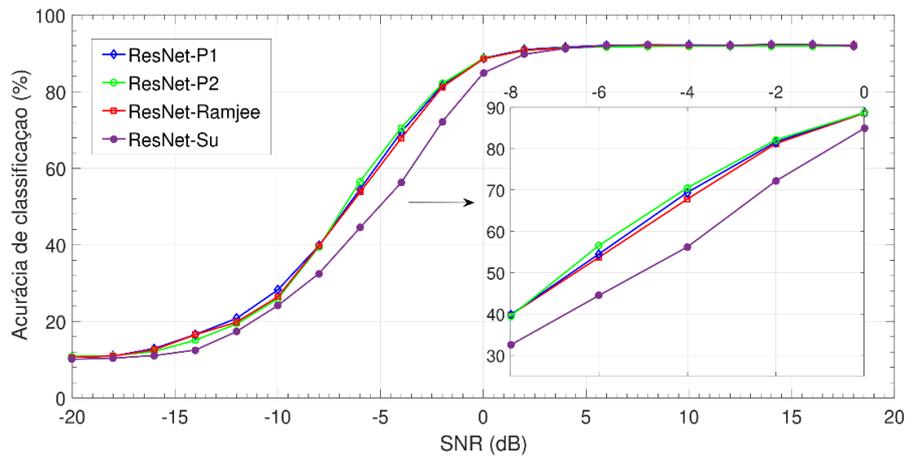


Figura 8: Comparação das acurácias de classificação das arquiteturas propostas com a ResNet usada por Ramjee et al (2019) (2128 e 264).

Fonte: Autores

Confrontando as matrizes de confusão apresentadas nas Figuras 6 e 9, tem-se uma noção do quão essa redução de desempenho afeta a classificação correta das modulações, em particular, as modulações BPSK e CPFSK.

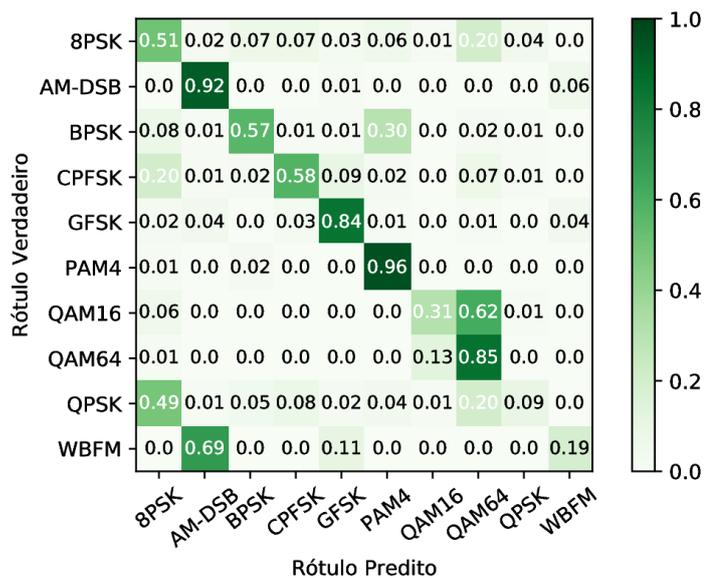


Figura 9: Matriz de confusão da ResNet-Ramjee em SNR -4 dB com subamostragem uniforme.

Fonte: Autores

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, propomos duas diferentes arquiteturas de redes residuais profundas para a tarefa de AMR. As arquiteturas propostas alcançaram desempenhos similares àqueles obtidos por Ramjee et al. (2019), com a vantagem de demandar menos tempo na etapa de treinamento. A ResNet-P2, por exemplo, exigiu somente 43% do tempo que a arquitetura de referência levou para treinar, e não comprometeu

a acurácia de classificação para baixas SNRs que, por sua vez, são reconhecidamente de interesse prático. Os resultados obtidos evidenciam assim que as arquiteturas propostas são bem-sucedidas em estabelecer um compromisso entre a acurácia de classificação e o tempo gasto para treinamento.

REFERÊNCIAS

BAHRANI, S.; DERAKHTIAN, M.; ZOLGHADRASLI, A. Effect of channel prediction on automatic modulation classification for adaptive OFDM systems. In: IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 20., 2012, Tehran. **Proceedings** ... Tehran: IEEE, 2012. p. 1280-1285.

DAI, A.; ZHANG, H.; SUN, H. Automatic modulation classification using stacked sparse auto-encoders. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING, 13., 2016, Chengdu. **Proceedings**... Chengdu: IEEE, 2016. p. 248-252.

DOBRE, O. A. et al. Survey of automatic modulation classification techniques: classical approaches and new trends. **IET Communications**, v. 1, n. 1, p. 137-156, April 2007.

ELDAR, Y. C. **Sampling Theory: Beyond Bandlimited Systems**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep Learning**. [S.l.]: MIT Press, 2016. Disponível em: <<http://www.deeplearningbook.org>>. Acesso em: 12 jun. 2019

HE, K. et al. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2016, Las Vegas. **Proceedings**... Las Vegas: IEEE, 2016. p. 770-778.

IOFFE, S.; SZEGEDY, C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 32, 2015, Lille. **Proceedings**... Lille: JMLR, 2015. p. 448-456.

KLAMBAUER, G.; UNTERTHINER, T.; MAYR, A. Self-Normalizing Neural Networks. In: CONFERENCE ON NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS, 31., 2017, Long Beach. **Proceedings**... Long Beach: NIPS, 2017. p. 1-10.

LIU, X.; YANG, D.; GAMAL, A. E. Deep neural network architectures for modulation classification. In: ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS, AND COMPUTERS, 51., 2017, Pacific Grove. **Proceedings**... Pacific Grove: IEEE, 2017. p. 915-919.

MENDIS, G. J.; WEI, J.; MADANAYAKE, A. Deep learning-based automated modulation classification for cognitive radio. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION SYSTEMS, 2016, Shenzhen. **Proceedings**... Shenzhen: IEEE, 2016. p. 1-6.

O'SHEA, T. J.; CORGAN, J.; CLANCY, T. C. Convolutional radio modulation recognition networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING APPLICATIONS OF NEURAL NETWORKS, 17., 2016, Aberdeen. **Proceedings**... Aberdeen: Springer, 2016. p. 213-226.

O'SHEA, T.; HOYDIS, J. An introduction to deep learning for the physical layer. **IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking**, v. 3, n. 4, p. 563-575, Dec 2017.

O'SHEA, T. J.; ROY, T.; CLANCY, T. C. Over-the-air deep learning based radio signal classification. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, v. 12, n. 1, p. 168-179, Feb 2018.

O'SHEA, T. J.; WEST, N. Radio Machine Learning Dataset Generation with GNU Radio. **Proceedings of the GNU Radio Conference**, v. 1, n. 1, Sep 2016.

RAMJEE, S. et. al. **Fast deep learning for automatic modulation classification**. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1901.05850>. Acesso em: 2 jun. 2019

WEST, N.; O'SHEA, T. Deep architectures for modulation recognition. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DYNAMIC SPECTRUM ACCESS NETWORKS, 2017, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2017. p 1-6.

WU, Y.; LI, X.; FANG, J. A deep learning Approach for modulation recognition via exploiting temporal correlations. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SIGNAL PROCESSING ADVANCES IN WIRELESS COMMUNICATIONS, 19., 2018, Kalamata. **Proceedings...** Kalamata: IEEE, 2018. p. 1-5.

ZHOU, S. et al. A robust modulation classification method using convolutional neural networks. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v. 1, n. 1, p. 21, Mar 2019.

ZHU, Z.; NANDI, A. **Automatic Modulation Classification: Principles, Algorithms and Applications**. 1. ed. West Sussex: Wiley, 2015.

REVISÃO DE LITERATURA SOBRE A AUTOMAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA NO BRASIL

Data de aceite: 27/01/2020

Data de submissão: 17/11/2019

Davi Henrique da Silva Pedroso

Universidade Federal do Oeste do
Pará Santarém-Pará [http://lattes.cnpq.
br/3207714152051279](http://lattes.cnpq.br/3207714152051279)

Gabriel Gonçalves da Silva

Universidade Federal do Oeste do
Pará Santarém-Pará [http://lattes.cnpq.
br/9581241978512215](http://lattes.cnpq.br/9581241978512215)

Gilson Fernandes Braga Junior

Universidade Federal do Oeste do
Pará Santarém-Pará [http://lattes.cnpq.
br/1245638286855885](http://lattes.cnpq.br/1245638286855885)

RESUMO: As metodologias de ensino de ciências no Brasil precisam de melhorias. Para viabilizar e melhorar esse cenário, a automação torna-se suporte como uma fonte estimuladora da busca de conhecimento e aprendizado. Assim, este trabalho tem como objetivo revisar um panorama atual a respeito da automação no ensino de física, abordando os modelos mais usuais. O levantamento bibliográfico foi realizado do período de 2010 a 2018, através da consulta de artigos em periódicos da área de ensino, com o estrato Qualis A1, A2 e B2. Como resultado foi possível subdividir nas áreas temáticas: microcontroladores,

vídeoanálise e robótica educacional. Diante disso, constatamos que com a utilização dessas ferramentas é possível controlar algum processo ou aspecto do ambiente, ao mesmo tempo em que promove o domínio experimental e teórico, desenvolve a interdisciplinaridade e reestrutura a metodologia para que o aluno materialize os conceitos vistos em conteúdos curriculares e extracurriculares. Em geral, a pesquisa fomenta a necessidade de aprimorar o uso da automação para aplicar e contribuir com o avanço tecnológico e o ensino-aprendizado dentro da sala de aula e no laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Ensino-aprendizado, Experimento, Interdisciplinaridade, Tecnologia.

A LITERATURE REVIEW OF THE AUTOMATION IN THE TEACHING OF PHYSICS IN BRAZIL

ABSTRACT: Science teaching methodologies in Brazil need improvement. To enable and improve this scenario, automation becomes support as a stimulating source for the pursuit of knowledge and learning. Thus, this paper aims to review a current panorama regarding automation in physics teaching, addressing the most common models. The bibliographic survey was conducted from 2010 to 2018, by consulting articles in educational journals, with the Qualis stratum A1, A2 and B2. As a result it

was possible to subdivide into the thematic areas: microcontrollers, video analysis and educational robotics. Given this, we find that using these tools it is possible to control some process or aspect of the environment, while promoting the experimental and theoretical domain, develops interdisciplinarity and restructures the methodology for the student to materialize the concepts seen in curriculum content and extra-curricular activities. In general, research fosters the need to improve the use of automation to apply and contribute to technological advancement and teaching-learning within the classroom and laboratory.

KEYWORDS: Teaching-learning, Technology, Experiment, Interdisciplinarity.

1 | INTRODUÇÃO

No atual cenário do Brasil o ensino de ciências está caracterizado como um dos mais precários do mundo (MATSUURA, 2016). Isto é, há uma forte reação desfavorável em aprender os conteúdos. Os alunos não estão encarando com tanto entusiasmo o rigor necessário nos raciocínios, bem como com o cuidado exigido nas observações e medidas (BETEZ; TEIXEIRA, 2012), desse modo, é agravado a falta de conexão do conteúdo com a realidade.

Eventualmente, as aulas práticas e o uso do computador para a aquisição de dados nos laboratórios (JR BEZERRA et al., 2012) torna-se um auxiliador para promover o interesse do aluno, estimular a busca pelo conhecimento, para compreender novos conceitos, transformando consumidores da tecnologia em produtores dela.

Nesse âmbito, é necessária uma troca de informações com a máquina para que seja formado um sistema automático de controle, cujos mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuam medições e introduzem correções, ou seja, uma automação no processo.

E nesse cenário, que de forma geral, há um resquício de desídia com o tema da mecânica, onde o estudo de cinemática é realizado de modo superficial no Ensino Médio, onde é alocado até um panorama de Ensino Superior, deixando de lados conceitos e discussões a respeito de referencial, velocidade média e instantânea e aceleração.

MONTEIRO et al. (2018) e VASCONCELLOS et al. (2014) afirmam que o estudo de mecânica ajuda a refletir sobre a relação entre as grandezas fundamentais e sua importância histórica e epistemológica.

Assim, estão em expansão novas maneiras de ensino com o propósito de estimular os alunos a rever seus conceitos e conceder um olhar criterioso para o conteúdo abordado. Diante desse cenário de oito anos, o trabalho visa apresentar um panorama atual sobre a automação no ensino de física com um enfoque para a mecânica destacando os tipos de automação mais usados e como são utilizados no aspecto ensino-aprendizagem, principalmente aquela lecionada em laboratório.

2 | REFERENCIALTEÓRICO

Ao passo que a sociedade progride, a educação e os computadores avançam tecnologicamente, não só ajudando, mas também desempenhando um papel importante e com vigor em todas as áreas dos conhecimentos (CRAVO; TONINI, 2010). Desde o primeiro computador digital eletrônico na década de 40, o amparo desse equipamento na sala de aula transfigura-se mais viável e aceitável. De 2015 até hoje, a sua incorporação aponta a quebra de estigma no modelo pedagógico que era vigente até então, com a utilização apenas do quadro e giz.

Não só o computador se tornou um meio de intensificar e melhorar as aulas, como também ocorreu um crescimento de equipamentos que facilitassem automação no experimento, por exemplo, o uso de equipamentos eletrônicos para emular, transferir, receber determinada grandeza física e manipular esses valores através de software, criando o ensino de física em tempo real (FTR) (ROCHA; GUADAGNINI, 2013).

Logo, acentua-se que a utilização da automação acarreta melhorias pedagógicas e abordagens didáticas eficazes que tendem a levar o estudante a sentir-se estimulado ativamente com a sua própria aprendizagem (ROCHA; GUADAGNINI, 2013).

2.1 Microcontrolador

É possível observar o surgimento de diversos equipamentos com uma ótima tecnologia e de desempenho, no qual, são designados e projetados para o ensino de física experimental (ROCHA; GUADAGNINI, 2013). Tais experimentos na área de ensino de física contêm projetos que têm como aplicação dos computadores no controle de processos e na aquisição de valores das variáveis físicas, transferido por conexões diretas com a máquina através da porta Universal Serial Bus (USB) e da conexão sem fio (CRAVO; TONINI, 2010). Diante desse surgimento, Moreira et al. (2018) aponta que para deixar as atividades experimentais mais elaboradas deve-se inserir a automação nos experimentos. Sendo assim, como consequência, o aluno aprende a utilizar esquemas, aplicar relações matemáticas, ou seja, compreende melhor a linguagem simbólica na aprendizagem da Física. Ao mesmo tempo em que é estimulado a não permanecer apenas no mundo dos conceitos e das linguagens, possui a oportunidade de relacionar esses dois mundos com o mundo empírico (MOREIRA et al., 2018).

E para enfatizar essa utilização desses equipamentos e como são aplicados em sala de aula, Rocha e Guadagnini (2013) afirma que:

Estes instrumentos didáticos são projetados, na maioria dos casos, a partir de componentes eletrônicos e módulos sensores de baixo custo financeiro, baseados em princípios físicos bem conhecidos. O mercado internacional tem disponibilizado módulos sensores que, se interligados a uma eletrônica adequada, podem medir diversas grandezas físicas. Estes módulos eletrônicos sensores

Diante disso, os microcontroladores, tem como propósito executar tarefas de processamento de dados matemáticos, conversão entre sinais analógicos e digitais, envio e recebimento de comandos de um computador através de uma conexão física devidamente projetada (ROCHA; GUADAGNINI, 2013).

Ademais, dispõe de uma boa relação custo-benefício na área de automação na física, principalmente, a sua elevada abordagem na literatura técnico-científicos (ANDRADES; SHIAPPACASSA, 2013).

Além disso, os microcontroladores são dispositivos utilizados para controlar processos e aspecto do ambiente (CRAVO; TONINI, 2010). Logo, com a utilização dos sensores acoplados nos microcontroladores, é possível ter entrada e saída de informações, automatizando o processo ou ambiente físico.

O mercado disponibiliza uma gama de produtos, como arduino, PIC e ATMEEL, por exemplo, com características próprias. Desses, o arduino é a plataforma mais utilizada no ensino (DWORAKOWSKI et al., 2016), principalmente na prerrogativa da dificuldade da aprendizagem no conteúdo de mecânica, e dessa forma, Moreira et al. (2018) finaliza que esse equipamento pode ser considerado uma alternativa nas aulas de física, de modo que forneça todo um aparato desde técnicos e teóricos para as práticas dentro do laboratório. Portanto, esse mecanismo é uma plataforma de prototipagem muito usual quando pretende-se manipular entrada e saída de dados a partir de suas portas digitais e analógicas, principalmente quando são envolvidos sensores, das quais podemos citar o de pressão, temperatura, luminosidade e entre outros (MARTINAZZO; TRENTIN; FERRARI, 2014).

2.2 Vídeobanálise

Tradicionalmente, os vídeos possuem um papel de destaque, pois oferecem recursos de mídias importantes para fins didáticos. Desse modo, observa-se a corriqueira utilização da videobanálise no ensino da física. A ideia possui um baixo custo financeiro, além de fácil implementação, podendo ser usado no ambiente escolar como um método de incentivo, além de facilitar o aprendizado para os discentes, já que eles entrariam em contato com outras visões e outros discursos que não o do docente. Entretanto para que se tenha resultado esperado, é preciso compromisso e responsabilidade do profissional da educação ao incluir os vídeos em suas aulas, não apenas para preencher o horário, mas sim articula-los com o assunto e explicação, para assim, promover um ensino mais variado e articulado para sua turma.

Deste tópico, escolheu-se um trabalho que fornece instruções para usar a

vídeoanálise com diferentes tipos de *software* de modo a incentivar o usuário a criar os próprios materiais didáticos para uso na sua prática docente (BETEZ; TEIXEIRA, 2012) e outros quatro artigos que usufruem deste recurso para implementá-lo nos experimentos físicos na área da mecânica.

A vídeoanálise na educação pode ser descrita como fazer um vídeo do objeto a ser estudado, um experimento ou fenômeno e após isso, fazer a análise do que é visto nesse vídeo com as ferramentas necessárias para relacionar o experimento com as grandezas da física. E este recurso é ainda mais propício a ser utilizado no tema da mecânica, como aceleração, posição e velocidade, pois são grandezas mais fáceis de serem analisadas por vídeo.

A importância da vídeoanálise e de qualquer outro meio experimental para ajudar os alunos são extremamente válidos, como afirma Rosa (2003):

A importância da realização de uma atividade experimental parece ser inegável se considerarmos que os professores, ao exercerem a docência, são formadores de pessoas que desenvolverão papel fundamental na sociedade em que estão inseridas. Nessa perspectiva, têm-se jovens que, independentemente da profissão que escolheram, atuarão na sociedade, a qual se encontra em processo constante de transformação, principalmente na área tecnológica, da qual a experimentação é base. Desenvolver atividades que permitam ao aluno refletir, questionar, entre outros aspectos, deve ser o papel do componente experimental no processo ensino-aprendizagem (ROSA, 2003).

2.3 Robótica educacional

Atualmente é crescente o uso de novas tecnologias para auxiliar o processo de ensino e aprendizagem em diversas partes do mundo. Neste contexto, a Robótica Educacional tem mostrado notáveis progressos em diversos contextos educacionais.

Apesar da vasta utilidade da utilização da robótica no ensino, ainda não é possível implementá-la de maneira eficaz devido seu alto custo, porém, foram selecionados artigos que abordam a robótica educacional com o objetivo de apresentar *kits* de robôs de baixo custo (SILVA; BARRETO, 2016), além de promover a interdisciplinaridade, como o Robô Tesla. Referindo-se ao Tesla, ele é bem simples, possui uma estrutura de acrílico, de 10 cm x 5 cm de base e 15 cm de altura, com módulos de controle, potência, sensores, entradas e saídas, de interface e do braço mecânico e o seu microcontrolador pode ter o seu *software* alterado como desejar, o que facilita a interação com a disciplina de programação.

Desta maneira, a robótica pode mudar a forma de aprender, se for utilizado por meio da criação, reflexão e depuração das ideias. A contribuição da robótica móvel na prática de ensino é evidenciada por Zilli e Lambert (2010), pois proporciona facilidade na exploração de conceitos matemáticos, ambientes de *software*, dispositivos eletrônicos, sensores, motores elétricos, conversão de sinais analógicos/digitais e digitais/analógicos, projeto de *hardware*, inteligência artificial, microprocessadores,

projeto em equipe, entre outras, o que torna a robótica móvel um catalisador eficiente e motivador para a aquisição de novos conhecimentos (ZILLI; LAMBERT, 2010).

O ideal é que os alunos vão às aulas de teoria, para depois irem ao laboratório construir um aparato tecnológico com o objetivo de evidenciar e/ou pôr em prática o que foi visto em sala de aula. E ao construir um objeto com a função de se deslocar, pode-se calcular a velocidade, aceleração, atrito, entre outros, através das fórmulas vistas em aula.

A Robótica Educacional tem ganhado destaque no processo de ensino-aprendizagem, pois além promover a interdisciplinaridade entre diferentes áreas do conhecimento, desenvolve a participação dos alunos e incentiva o trabalho coletivo (SILVA; BARRETO, 2016).

Por isso, a robótica deve ser trabalhada também para desenvolver habilidades como, resolver um problema atual, a adquirir independência e estimular a criatividade e o pensamento crítico do aluno. Dessa maneira, para a utilização da robótica nas escolas é necessário possuir um diferencial para que não seja tratada como método de aprendizagem mais rápida.

Diferentes modelos educacionais da robótica móvel são apresentadas, e visam o desenvolvimento de robôs que estejam interligados com ideias teóricas dos currículos das disciplinas como, a inclusão de um componente criativo (filosofia de aprendizado construtivista), onde os estudantes podem definir seus próprios caminhos para alcançar as metas propostas de forma a encorajar a diversidade de projetos; confiança quanto as suas habilidades; e suporte para o desenvolvimento de trabalhos em equipe, senão a robótica no ensino só vai reforçar o modelo tradicional de dar aula (ZILLI; LAMBERT, 2010).

3 | MATERIAL EMÉTODOS

Neste trabalho, fez-se uma revisão bibliográfica a respeito do tema automação no ensino de física classificados com A1, A2 e B2 no Qualis Capes.

Diante disso, foi feita uma pesquisa em periódicos na área do ensino de física e de engenharia, dentre as quais estão o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, ABENGE e Revista Brasileira de Ensino de Física. Estipulou-se um intervalo de tempo para a seleção dos artigos, de 2010 até 2018, pois havia interesse em investigar um panorama mais atual dessa área de pesquisa. O método de seleção dos artigos foi realizado através de palavras chaves, como, “automação”, “ensino de física” e “automação na física”. E como critério de seleção foi adotado a condição de que o artigo tivesse uma ligação entre a automação com aplicação ao ensino de física e como critério de exclusão aqueles artigos que não oferecessem alguma ligação com o tema sejam eles com automação ou aplicações da automação no ensino de física.

Somando todos os dados, foram encontrados sessenta e oito artigos.

4 | RESULTADOS EDISCUSSÃO

Ao realizar a busca pelos artigos, em cada periódico, foram encontrados artigos que abordavam a temática nos seguintes periódicos: ABENGE (B2); Caderno Brasileiro de Ensino de Física (A2); Revista Brasileira de Ensino de Física (A1).

Os artigos selecionados nos periódicos foram particionados com base nos dados e sua Área Temática vigente.

a. Área Temática 1(AT1):

Na Área Temática 1, AT1, foram aproveitados onze artigos que abordaram de forma sucinta o tema automação no ensino de física, com a utilização de mecanismos de entrada e saída de dados que estavam acoplados com algum sensor e um microcontrolador, cujos títulos estão nas referências : (ANDRADES; SHIAPPACASSA, 2013);(ALMEIDA; DIAS, 2017);(CORDOWA; TORTA,2016); (CRAVO; TONINI,2010); (DWORAKOWSKI et al.2016);(GILI et al.2011);(MOREIRA et al.2018); (ROCHA; GUADAGNINI, 2013); (SOARES; BORGES, 2010); (SZMOSKI et al.2018); (VASCONCELLOS et al.2014).

Em aspectos gerais, esses trabalhos discutem as aplicações e novos meios de automatizar os laboratórios. Na qual constituem mecanismos inovadores e que interligam diversos métodos como, emular um problema físico, acoplar sensores com os microprocessadores para a coleta e análise de dados, e também auxiliar a compreensão do aluno:

A utilização de sensores conjuntamente com sistemas de aquisição automática de dados em tempo real na construção de práticas de laboratório de física tem representado inovação nas formas de ensinar e de aprender ainda muito pouco difundidas, e contribui na difusão de novas práticas integrando mais tecnologia, teoria e experimento. (ROCHA; GUADAGNINI, 2013, p.127)

Alguns artigos discutem uma breve análise, principalmente as características físicas e operacionais do experimento, bem como discutem um aspecto geral do modelo de microcontrolador que fora utilizado.

Outros abordam uma solução de baixo custo para um laboratório portátil com múltiplas aplicações, podendo ser utilizado desde o ensino básico até o ensino superior.

Também foi discutido que apesar do Arduino ser uma tecnologia relativamente nova, já existem muitas publicações na área, com possíveis aplicações no ensino de Física. A maioria, com propostas metodológicas voltadas para a prática experimental, bem como, a automatização dos laboratórios didáticos.

Entre esses trabalhos de natureza totalmente teórica, no qual o autor induz uma discussão no próprio estudante no intuito de instigar nele o que está sendo analisado e observado, assim, desenvolve no aluno uma construção cognitiva a respeito dos fenômenos físicos.

Para finalizar a discussão dessa unidade, Moreira et al. (2018) sintetiza esse dilema com a necessidade da abordagem prática experimental no processo de ensino-aprendizagem, bem como elucida uma estratégia que seja mais amena na passagem do real para o abstrato. E assim, a vivência de uma física mais prazerosa e cheia de significados.

Em suma, o uso desta plataforma em sala de aula possibilita uma melhor interação do aluno com o conteúdo exposto, pois fará com que este se aproprie da tecnologia de forma a construir o conhecimento.

b. Área Temática 2(AT2):

Na Área Temática 2, AT2, foram aproveitados cinco artigos que abordaram o tema automação no ensino de física, sobre a aquisição de dados feitos por vídeoanálise, cujos títulos estão nas referências: (BETEZ; TEIXEIRA, 2012); (DUARTE, 2012); (HEIDEMANN; ARAUJO; ELIANE, 2012); (JR BEZERRA et al.,2012); (MENDES; COSTA; SOUSA, 2012).

Estes trabalhos tiveram como proposta estimular os alunos a serem mais autônomos e críticos em relação à educação e potencializa-la com as TICs (tecnologias) e os diferentes tipos de ferramentas, como os softwares Tracker e Modellus. Fazer isso com os discentes vai prepara-los para o futuro deles, quando, nem sempre e eles vão trabalhar recebendo ajuda de alguém e ainda vai deixá-los seguros sobre algum resultado que eles tenham achado a partir de uma experiência nova, pois atualmente o ensino faz com que o aluno grave uma fórmula, dificultando a criação de soluções dos problemas que essas fórmulas não resolvem.

Essas atividades experimentais com modelagem computacional parecem ser a mais efetiva para promover a aprendizagem, segundo os resultados de Mendes; Costa; Sousa(2012): os dados obtidos com os questionários de opinião mostram que a articulação entre o domínio experimental e o domínio teórico através da modelagem e simulação computacional com o software Modellus em mecânica torna as aulas mais interessantes, motiva mais os alunos, facilita a aprendizagem e desperta nos alunos o interesse em aprender, algo que é raro no ensino de física.

c. Área Temática 3 (AT3):

Na Área Temática 3, AT3, foram aproveitados três artigos que abordaram o tema automação no ensino de física, que discute a respeito da robótica educacional, cujos títulos estão nas referências: (SILVA; BARRETO, 2016); (SILVA; BARRETO,

2011); (ZILLI; LAMBERT, 2010).

Tais artigos abordam o crescimento dessa tecnologia no ensino e propõem novas ideias para implementar um kit de robótica de baixo custo nas escolas, além da interdisciplinaridade com outras áreas do conhecimento, também há incentivo a participação de projetos e a inserção dos trabalhos em grupo.

Desenvolvendo uma plataforma robótica, estudantes têm a possibilidade de aplicar e integrar concretamente conhecimentos de conteúdos aprendidos em semestres anteriores, como por exemplo: microcontroladores, sensores e atuadores, comunicações sem fios, programação de computadores, sistema de tempo real, modelagem cinemática e dinâmica de robôs, inteligência artificial, sistemas embarcados, eletrônica analógica e digital, projetos de circuitos, instrumentação, e teoria de controle (SILVA; BARRETO, 2016).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas seções anteriores foi realizado um levantamento de 68 artigos, que abordaram o tema automação no ensino de física. Além disso, também pôde-se organizá-lo em três áreas temáticas, na qual pudemos analisar a sua importância e tendo como objetivo de verificar o emprego da automação nas aulas práticas, ou seja, dentro do laboratório. Diante disto, foi possível verificar uma contingência de artigos que relacionavam a utilização dos microcontroladores na arquitetura do seu projeto e como esse mecanismo possibilita um avanço no processo de ensino e aprendizado. Em adição, teve artigos que discutiram e abordaram a aquisição de dados feita por vídeoanálise e como tornaram-se um elemento importante para potencializar o aluno na sua relação com o aspecto educacional. E artigos de natureza da robótica educacional, como uma forma de interdisciplinaridade com outras áreas do conhecimento. Pelo caráter dessa pesquisa, muitos fenômenos físicos são fáceis de serem constatados, bastando apenas que o professor utilize as tecnologias de informação e comunicação para que este processo seja possível. Portanto, acreditamos que se torna necessário uma incorporação ainda mais da automação no ensino da física como um viés para estimular o aprendizado do aluno e quebrar o estigma que a educação perpassa atualmente, as aulas com o quadro negro e giz. Este estudo pode contribuir para difundir a inclusão de sistemas de automação no ensino de física, além de fomentar o avanço tecnológico com o processo de ensino e aprendizado.

REFERÊNCIAS

ANDRADES, J. Carlos; SHIAPPACASSA, A; SANTOS, P.Freire.

Desenvolvimento de um periodímetro microcontrolado para aplicações em física experimental. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2. 2013

ALMEIDA, T. Corrêa; DIAS, E. Carvalho; JULIÃO, A.Silva. **Um laboratório portátil de baixo custo: medição de g utilizando um pêndulo e a placa Raspberry Pi.** Caderno Brasileiro de Ensino Física, vol. 34, no. 2, p. 590, 2017.

BETEZ, M.Emile; TEIXEIRA, R.M.Ribeiro. **Material instrucional apresentando conteúdos de métodos computacionais para o ensino de física.** Caderno Brasileiro de Ensino Física, vol. 29, no. 0, pp. 787–811, 2012.

CAMARGO, J.T.Franco. **Ensino de física em engenharia: uma abordagem interdisciplinar apoiada em novas tecnologias.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 44,2016, Natal – RN. Anais...Natal – RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2016.

CLEBSCH, A.Benetti; MORS, P. Machado. **Explorando recursos simples de informática e audiovisuais: uma experiência no ensino de Fluidos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 4, p. 323 - 333, 2004.

CORDOWA. H; TORTA. A.C. **Medida de g com a placa Arduino em um experimento simples de queda livre.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 2, e2308 (2016)

CRAVO, G.L.; TONINI, E.V. **Coletor / analisador de dados para experimentos físicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA,38., 2010, Fortaleza. Anais... Fortaleza-Ceará: Hotel Gran Marquise, 2010

DUARTE, S. Eduardo. **Física para o ensino médio usando simulações e experimentos de baixo custo: um exemplo abordando dinâmica da rotação.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física., v. 29, n. Especial 1: p. 525-542, set. 2012.

DWORAKOWSKI, L. Antonio. et al. **Uso da plataforma Arduino e do software PLX-DAQ para construção de gráficos de movimento em tempo real.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 3, e3503 (2016)

GILI, Cleiton.et al. **Automação de experimento para o ensino de física.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 39,2011, Blumenau/SC.

HEIDEMANN, L. Albuquerque; ARAUJO Ives Solano;ELIANE A. Veit. **Ciclos de modelagem: uma proposta para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de física.** Caderno Brasileiro de Ensino Física., v. 29, n. Especial 2: p. 965-1007, out. 2012

JR, A. G. Bezerra. et al. **Videoanálise com o software livre Tracker no laboratório didático de Física: movimento parabólico e segunda lei de Newton.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 29, no. 0, pp. 469–490, 2012.

LEMES, M. Ruv; JÚNIOR, A.D. Pino. **Iniciação Tecnológica: uma forma lúdica de aprender Física.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 27, no. 2, Ago. 2011.

MATSUURA, Sérgio. **Ensino de ciências no Brasil está entre os piores do mundo.** Disponível em:<<https://oglobo.globo.com/sociedade/educacao/en-ino-de-ciencias-no-brasil-esta-entre-os-piores-do-mundo-20596414>>Acesso em: 30 de julho 2016.

MARTINAZZO, C. A.; TRENTIN, D. S.; Douglas FERRARI, D.; PIAIA. M. M.

Arduino: Uma tecnologia no ensino de Física. Perspectiva, Erechim, v. 38, n. 143, p. 21-30, set. 2014.

MASSONI, N. Teresinha. **Ensino de laboratório em uma disciplina de Física Básica voltada para cursos de Engenharias: análises e perspectivas.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 31, no. 2, p. 258, 2014.

MENDES, J.Farias; COSTA, F.Ivan; SOUSA, M.S.G. Célia. **O uso do software Modellus na integração entre conhecimentos teóricos e atividades experimentais de tópicos de mecânica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 1, 2402 (2012)

MONTEIRO, M.A. Alvarenga. et al. **Estudo da queda livre em aulas de Física do Ensino Médio a partir de um marcador de tempo e da História da Ciência.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 35, no. 3, pp. 1004–1019, 2018.

MOREIRA, M.M.P. Carneiro. et al. **Contribuições do Arduino no ensino de Física: uma revisão sistemática de publicações na área do ensino.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 35, n. 3, p. 721-745, dez. 2018

ROCHA, F. Saraiva; GUADAGNINI, P. Henrique. **Projeto de um sensor de pressão manométrica para ensino de física em tempo real.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, vol. 31, no. 1, pp. 124–148, 2013.

Rosa, c. Werner. **Concepções teórico metodológicas no laboratório didático de física na universidade de passo fundo**. Revista Ensaio, Belo Horizonte, v.05, n.02, p.94-108, 2003

SACERDOTE, H.C. Souza. **Análise do vídeo como recurso tecnológico educacional.** Revista de Educação, Linguagem e Literatura da UEG, v. 2, n. 1 , março de 2010 – p. 28-37

SILVA, S.R. Xavier; BARRETO, L.Porto. **Protótipo De Um Robô Móvel Interdisciplinar De Baixo Custo Para Uso Educacional Em Cursos Superiores De Engenharia E Computação**. 2016

SILVA, S.R. Xavier; BARRETO, L.Porto. **Análise comparativa de kits de robótica educativa.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA,39,2011,Blumenau/SC.

SOARES, R. Reginaldo; BORGES,F.Paulo. **O plano inclinado de Galileu: uma medida manual e uma medida com aquisição automática de dados.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 32, n.2,2501, 2010.

SZMOSKI, M. Romeu.et al. **Desenvolvimento de um aparato experimental de baixo custo para o estudo de objetos em queda: análise do movimento de magnetos em tubos verticalmente orientados.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, nº 1, e1505, 2018.

VASCONCELLOS, B.S. et al. **Protótipo Didático Para Comprovação Das Características Do Movimento Uniformemente Variado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 42., 2014, Juiz de Fora. Anais...Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2014.p. 1-2

ZILLI, G.Martignago; LAMBERT, Gustavo. **Desenvolvendo a educação através da robótica móvel: uma proposta pedagógica para o ensino de engenharia.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA,38, 2010, Fortaleza. Anais...Fortaleza-Ceará: Hotel Gran Marquise, 2010.p.1-4

DIAGNÓSTICO DOS MICROSSISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO INSTALADOS NAS COMUNIDADES RURAIS DO MUNICÍPIO DE SANTARÉM

Data de aceite: 27/01/2020

Fabiane da Conceição Almeida

Universidade Federal do Oeste do Pará
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/3857707361453131>

Manoel Roberval Pimentel Santos

Universidade Federal do Oeste do Pará
Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/4389055765529053>

RESUMO: Este trabalho objetivou o levantamento dos microssistemas de energia solar fotovoltaica instalados nas comunidades rurais de Santarém, de modo particular nos centros comunitários, bem como avaliação das condições de funcionamento dos microssistemas e identificar os principais problemas existentes. Muitas dessas comunidades, por conta de seu isolamento geográfico, encontram-se, também, isoladas do ponto de vista do abastecimento elétrico e, conseqüentemente, estão desprovidas de todos os benefícios que se pode ter através da utilização de energia elétrica, desde o simples acesso aos principais meios de comunicação, passando pela precariedade da educação, até mesmo à falta das mínimas condições de moradia necessárias a todo cidadão. Em algumas destas comunidades, foram instalados nos últimos anos microssistemas

de energia solar fotovoltaica para atender, principalmente, às necessidades das escolas e postos de saúde. Muitos dos microssistemas foram instalados de maneira inapropriada e os responsáveis pelos microssistemas na comunidade não receberam o treinamento necessário para identificar as falhas nos equipamentos, ocasionando a paralisação dos microssistemas e um funcionamento ineficiente. Diante disso, a ausência de manutenção foi a principal falha diagnosticada nos sistemas. Outro problema excessivo, foi o armazenamento e dimensionamento incorreto dos componentes do sistema, destacando-se a alta falta de atenção ao banco de baterias. Por fim, inúmeras falhas humanas, dentre elas destaca-se o uso indevido do sistema através do uso excessivo de energias com cargas acima das previstas no dimensionamento e furto de componentes de armazenamento e de controle e condicionamento de potências essenciais ao funcionamento do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar, comunidades rurais, falhas

DIAGNOSIS OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY MICROSYSTEMS INSTALLED IN THE RURAL COMMUNITIES OF THE MUNICIPALITY OF SANTARÉM

ABSTRACT: This study aimed to survey the

photovoltaic solar energy microsystems installed in the rural communities of Santarém, particularly in the community centers, as well as to evaluate the operating conditions of the microsystems and identify the main existing problems. Many of these communities, because of their geographical isolation, are also isolated from the point of view of electricity supply and, consequently, are deprived of all the benefits that can be obtained through the use of electricity, from simple access. the main means of communication, including the precariousness of education, even the lack of minimum living conditions necessary for every citizen. In some of these communities, solar photovoltaic microsystems have been installed in recent years to meet mainly the needs of schools and health posts. Many of the microsystems were improperly installed and those responsible for the microsystems in the community did not receive the necessary training to identify equipment failures, causing the microsystems to stop and inefficient operation. Given this, the lack of maintenance was the main failure diagnosed in the systems. Another excessive problem was the incorrect storage and sizing of the system components, highlighting the high lack of attention to the battery bank. Finally, numerous human failures, including the misuse of the system through the excessive use of energies with loads higher than expected in the design and theft of storage components and control and conditioning of power essential to the system operation.

KEYWORDS: Solar energy, rural communities, failures

INTRODUÇÃO

O município de Santarém, localizado na região Oeste estado do Pará, possui uma área territorial de 22.886,76 km² segundo o Censo de 2010. Além de sua sede, o município é composto por inúmeras comunidades rurais e grande parte destas, encontra-se nas margens dos rios que atravessam o município, dos quais se destacam o Amazonas, o Tapajós, o Arapíuns e o Curuá-úna.

Muitas dessas comunidades, por conta de seu isolamento geográfico, encontram-se, também, isoladas do ponto de vista do abastecimento elétrico e, conseqüentemente, estão desprovidas de todos os benefícios que se pode ter através da utilização de energia elétrica, desde o simples acesso aos principais meios de comunicação, passando pela precariedade da educação, até mesmo à falta das mínimas condições de moradia necessárias a todo cidadão (PINHO et al.,2008).

O acesso a fontes de energia tem sido visto, cada vez mais, como fundamental para uma existência digna. Al-Nasser, Ex-Presidente da Assembleia Geral da ONU, afirmou em entrevista que quanto mais energia disponível para as comunidades, maior o impacto sobre a segurança alimentar, saúde, educação, transportes, comunicações, água e saneamento (ONU BRASIL, 2012).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo

de conversão. O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar (ou outras formas apropriadas de energia). A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células apresentam um índice de eficiência de 25% (CRESESB/CEPEL, 2014).

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento. O bloco gerador contém arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos de diferentes associações, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores corrente contínua – corrente alternada, seguidor de ponto de potência máxima, inversores, controladores de carga (se houver armazenamento) e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Finalmente, o bloco de armazenamento é constituído por acumuladores elétricos (baterias) e/ou outras formas de armazenamento (BESSO, 2017).

METODOLOGIA

I – Embasamento teórico e prático

A compreensão detalhada do processo de conversão de energia solar em elétrica, composição, montagem e manutenção de sistemas fotovoltaicos isolados e a familiarização com todos os aspectos de funcionamento de um microssistema de geração fotovoltaico isolado, tais como aqueles que estão instalados nas comunidades a serem estudadas.

II – Levantamento dos microssistemas instalados nas comunidades

Levantamento junto aos órgãos da Prefeitura Municipal de Santarém e organizações não governamentais sobre os microssistemas e as comunidades onde estes foram instalados.

III – Visita as comunidades

Nesta etapa foram feitas visitas a estas comunidades para fazer um diagnóstico das condições de funcionamento dos microssistemas. Para isso, foi realizado um treinamento a operação de equipamentos de teste de geração dos microssistemas. Com este levantamento foi possível identificar e classificar com relação às condições de funcionamento e as necessidades de cada microssistema. O apoio logístico da Prefeitura e da ONG Saúde e Alegria foi fundamental para o cumprimento desta etapa do trabalho.

RESULTADOS

A Comunidade de Anã , localiza-se às margens do rio Arapiuns. A comunidade foi beneficiada em 2014, com um sistema composto inicialmente por 10 módulos de 140 Wp (Figura 1), 10 baterias de 165 Ah/12V, 1 inversor de 1500 W, 2 controladores de carga de 45 A, para abastecer a pousada turística. O sistema de 1400 Wp foi instalado e entregue a comunidade pela ONG Saúde e Alegria. Após instalado, em apenas alguns meses de funcionamento o sistema apresentou problemas ocasionados pelo uso indevido do sistema com consumo superior a capacidade produzida.

A falta de manutenção capacitada ocasionou a paralização do sistema. Posteriormente , o sistema voltou a funcionar após uma manutenção realizada por profissionais enviados pela ONG Saúde e Alegria. O sistema foi todo readaptado e atualmente funciona com 4 baterias de 165 Ah/12v , 1 inversor de 1500 W, 1 controlador de carga de 45 A como mostrado na figura 3 e 10 módulos de 140 Wp mostrado na (Figura 1).



Figura 1- Gerador Fotovoltaico do Sistema de Anã

Fonte: Autoria Própria.

No sistema de armazenamento, foram indentificadas baterias com contínuo estado de carga baixa. A causa dessa anomalia se dá em decorrência do uso excessivo de energia, cargas acima das previstas no dimensionamento do sistema, cargas ligadas por tempo superior ao previsto no dimensionamento e cargas muito potentes instaladas a grandes distâncias. Como consequência ocorreu a redução da vida útil da bateria. A ação de correção é reduzir as potências das cargas (manter as cargas previstas no dimensionamento), explicar aos usuários as limitações do sistema em termo de potências e tempo de utilização , desligar as cargas e trocar as baterias.

Foram identificadas baterias com elevada taxa de auto descarga, ocasionando a redução da vida útil do item, ocasionando a trocar das baterias. A princípio conjunto

operava com 10 bateria, que foram substituídas porque apontaram os distúrbios descritos anteriormente. A (Figura 2) mostra como o sistema funciona no momento atual com apenas 4 baterias, que representa menos de 50% da capacidade inicial.



Figura 2 - Banco de baterias

Fonte: Autoria Própria

No Sistema de controle e condicionamento de potência, foi identificado a queima do fusível colocado no circuito que alimenta o gerador, proveniente da corrente da corrente de saída do gerador ser muito elevada para o controlador de carga. Inicialmente o sistema contava com 2 controladores de carga, porém devidos aos problemas, um dos equipamentos parou de funcionar e o sistema foi readaptado para trabalhar apenas com 1 controlador, como mostra Figura 3.

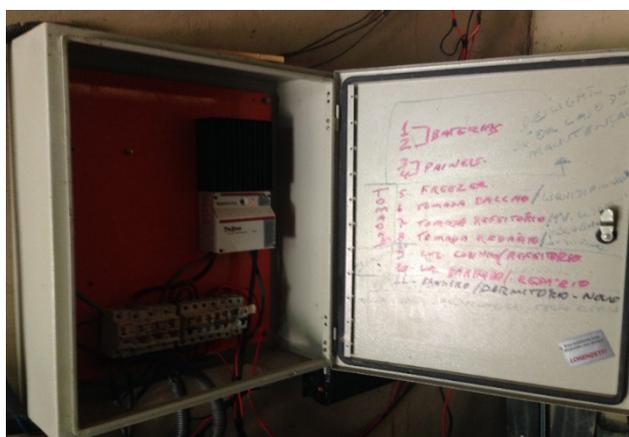


Figura 3 - Quadro de disjuntores do Sistema de Anã

Fonte: Autoria Própria

Na (Figura 4), é possível observar o armazenamento incorreto dos componentes do sistema. Os componentes de controle e condicionamento de potencia não devem estar instalados no mesmo compartimento das baterias, pois estas podem produzir um ambiente corrosivo (líquidos e gases). Além disso, dispositivos elétricos e eletrônicos podem produzir centelhas que podem causas explosões em contato com gases desprendidos pelas baterias.



Figura 4 - Banco de baterias, controlador de carga e quadro de disjuntores do Sistema de Anã
Fonte: Autoria Própria

O sistema da comunidade Tapará Grande foi instalado em 2016 para atender as necessidades do posto de saúde da comunidade, e encontra-se em funcionamento .

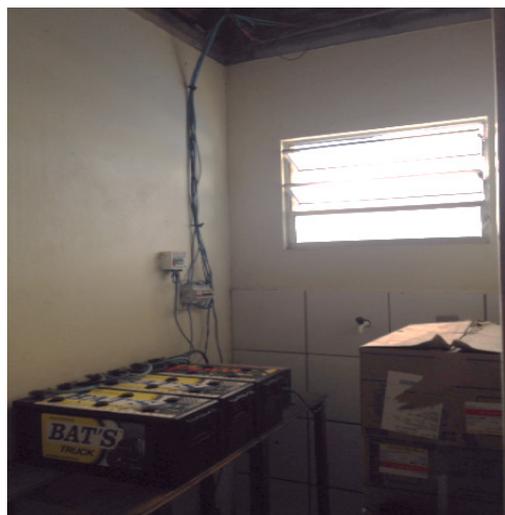


Figura 6 - Controlador de carga e banco de baterias do sistema
Fonte: Autoria Própria

A instalação ficou a cargo da parceria entre a Prefeitura Municipal de Santarém e a comunidade local. Os principais componentes do sistema são: 8 módulos de 60 Wp, Inversor de 300 W e 3 baterias de 150 Ah e 1 controlador de carga de 24 A, no posto de saúde conforme mostrado na (Figura 6 e Figura 7).

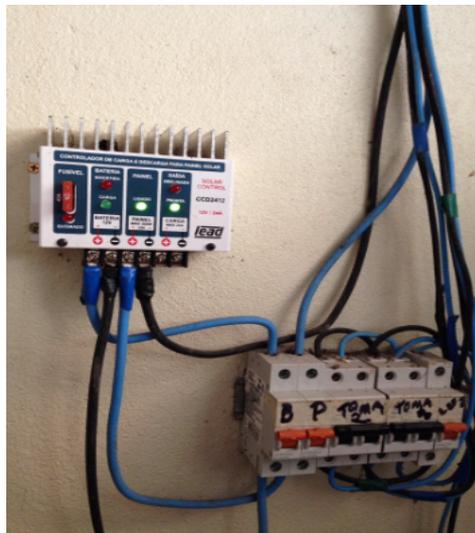


Figura 7 - Controlador de Carga e Disjuntores

Fonte: Autoria Própria

A (Figura 8) mostra o banco de baterias do sistema do posto de saúde, que estão com sintomas de elevada perda de água. A causa dessa falha se dá em decorrência de baterias operando com altas temperaturas e manutenção pouco frequente, ocasionando baixos níveis de água e danos a bateria. A ação corretiva apropriada a esse tipo de falha, é o isolamento do compartimento das baterias e/ou fornecimento de ventilação adequada e diminuição do tempo entre os intervalos de manutenção.



Figura 8 - Banco de baterias

Fonte: Autoria Própria

No sistema da Escola São Jorge, localizada na comunidade foram indetificadas falhas no armazenamento e instalação incorreta dos componentes, conforme a (Figura 9) . As baterias não devem ser montadas diretamente sobre o solo ou em locais umidos para não elevar a taxa de autodescarga e comprometendo sua eficiência;

A (Figura 9) mostra também que os componentes de condicionamento de potência estão instalados no mesmo compartimento que as baterias, o que não pode ocorrer, pois estas podem produzir um ambiente corrosivo (líquidos e gases). Além disso, dispositivos elétricos e eletrônicos podem produzir centelhas que podem causar explosões em contato com gases desprendidos pelas baterias.

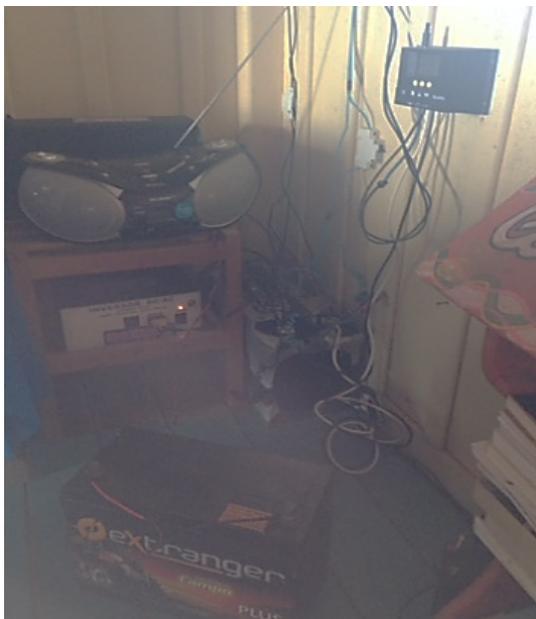


Figura 9 - Agrupamento dos componentes do sistema da Escola São Jorge

Fonte: Autoria Própria

O compartimento de baterias não está lacrados, não evitando o contato casual por pessoas não autorizadas, também não estão utilizadas telas ou gadres para evitar a entrada de insetos. O sistema não possui aterramento elétrico nas instalações, dos equipamentos e das estruturas metálicas.

O indevido do sistema, através do uso excessivo de energia, cargas acima das previstas no dimensionamento do sistema, cargas ligadas por tempo superior ao previsto no dimensionamento.

O sistema foi instalado pela Operadora Oi, em 2014, para garantir o acesso ao sistema de comunicação de orelhões na comunidade. Atualmente o sistema encontra-se abandonado, sem manutenção. O sistema possui 12 módulos de 135 Wp e 2 controladores de carga, os demais componentes do sistema (bateria e inversor) foram furtados. O sistema foi instalado mas nunca funcionou. As principais falhas diagnosticadas desse sistema foram falhas humanas: furto de componentes de armazenamento e controle e condicionamento de potência essenciais ao funcionamento do sistema e ausência de manutenção.

A comunidade foi contemplada com um sistema da Operadora Oi, em 2014. O sistema não funciona pois os itens do conjunto fotovoltaico foram furtados, ficando apenas os módulos fotovoltaicos que encontram-se guardados na cozinha da

comunidade Escola São Benedito.

Para os sistemas fotovoltaicos isolados recomenda-se que as cargas tenham a mesma quantidade, potência e tipo das que foram especificadas originalmente. Um problema comum a todos os sistemas visitados, foi o mal uso do sistema provocados por acréscimo indevidos de cargas, cargas ligadas durante mais horas por dia que o originalmente previsto, ou ainda ligadas incorretamente. É sempre importante informar aos usuários os benefícios do consumo eficiente e racional da energia elétrica, especialmente nos sistemas individuais com disponibilidade mais restrita de energia e potência.

A falta de atenção especial ao banco de baterias é notória, o componente de menor vida útil e de maiores necessidades de manutenção do sistema, as baterias geralmente são o principal causas de problemas ocorridos em SFI's.

Outro problema presente em todos os sistemas é a falta de manutenção, todo sistema fotovoltaico deve passar por inspeção e manutenção regularmente, de forma a garantir uma operação eficiente e impedirá ocorrência de problemas futuros. Para isso recomenda-se elaborar e seguir um plano de operação e manutenção, baseando-se nas recomendações feitas pelos fabricantes dos equipamentos utilizados no sistema e nas normas pertinentes à segurança e a utilização dos equipamentos envolvidos na instalação fotovoltaica.

CONCLUSÃO

Foi possível concluir com a realização deste trabalho que :

- Todos os sistemas instalados nas comunidades visitadas apresentam falhas;
- Precisa-se elaborar um plano de operação e manutenção para os sistemas das comunidades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Saúde e Alegria pelo apoio na hospedagem na Comunidade Anã.

Os autores agradecem a Prefeitura Municipal de Santarém pelo apoio no transporte as comunidades de várzea.

REFERÊNCIAS

BESSO, R. **Sistema solar fotovoltaico conectado à rede – Estudo de caso no centro de tecnologia da UFRJ**. Rio de Janeiro, 2017.

Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL) - **“Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”**, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>, acessado em 29/04/19.

PINHO, João Tavares, et al, **Sistemas híbridos - soluções energéticas para a Amazônia Híbrido.** Programa Luz Para Todos, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2008

SOBRE OS ORGANIZADORES

Fernando Manuel Araújo Moreira - Professor Titular (Full Professor of Physics) do Departamento de Física da UFSCar. Colaborador do Núcleo de Estudos Estratégicos do Comando Militar do Sudeste (CMSE). Pesquisador colaborador do Instituto Meira Mattos (Ciências Militares, na área de Gestão de Defesa) da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME). Sócio efetivo da Associação Brasileira de Estudos de Defesa (ABEDef). Docente e Pesquisador no PPG-Biotecnologia da UFSCar. Engenheiro de Materiais (UFSCar, 1988); Mestre (UFSCar, 1990) e Doutor em Física (UFSCar, 1995); Pós-Doutorado em Física (na posição de Visiting Professor) e Research Scientist (NSF/National Science Foundation e USAF-OSR/United State Air Force-Office for Scientific Research) no Center for Superconductivity Research, University of Maryland/USA (1995-1998).

Carlos Célio Sousa da Cruz - Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará (2003), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará (2007) e doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela Universidade Federal do Pará (2015). Atualmente é professor adjunto II da Universidade Federal do Oeste do Pará. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Transferência de Calor e Massa e Mecânica dos Fluidos. Atua também na área de geração de energia com biomassa.

Ubiraelson de Lima Ruela - Licenciado em Matemática pela Universidade Federal do Pará (2006). Possui especialização em Matemática elementar pela Universidade Federal do Pará (2006). Mestre em Matemática pela Universidade Federal do Oeste do Pará (2013). Atualmente é professor Assistente da Universidade Federal do Oeste do Pará.

Paula Renatha Nunes da Silva - Professora Assistente na Universidade Federal do Oeste do Pará na disciplina de Sinais e Sistemas. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2003) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2007). De Novembro de 2013 a Março de 2014 ocupou o cargo de Diretora do Instituto de Engenharia e Geociências da UFOPA. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instalações Elétricas Prediais e Industriais, Automação, Controle e Supervisão de Processos, atuando principalmente nos seguintes temas: Diagnóstico de Falhas, Automação de Sistemas e Processos, Eficiência Energética e Qualidade de Energia.

José Roberto Branco Ramos Filho - Possui graduação em Engenharia, áreas Elétrica e Mecânica, habilitação em Controle e Automação pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007) e graduação em Administração pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2004). É Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2009). É Doutor em Ciências na linha de pesquisa Gestão

do Conhecimento e Inovação para o Desenvolvimento Sustentável pela Universidade Federal do Oeste do Pará e em Engenharia Electrotécnica e Computadores pela Universidade Nova de Lisboa (co-tutela).

Vicente Moreira Rodrigues - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1995) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2013), atuando principalmente nos seguintes temas: resfriamento, aletas, ventilação, fotovoltaico e pv-t. Possui experiência de 12 anos em chão de fábrica atuando como engenheiro industrial nas áreas de manutenção, elaboração de projetos e execução de obras de utilidades industriais.

Nelson de Souza Amorim - Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará (2006), Mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Pará (2009) e Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais (2016). Atualmente é Professor Assistente da Universidade Federal do Oeste do Pará. Desenvolve trabalhos na área de modelagem e simulação de processos, usando métodos híbridos numéricos-analíticos, métodos de computação simbólica e utilização de simuladores de processos químicos.

Thiago Augusto de Sousa Moreira - Professor Assistente na Universidade Federal do Oeste do Pará - Campus Santarém, mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - Rede Temática Engenharia de Materiais (REDEMAT), graduado em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) - Campus Belém. Desenvolve pesquisas em Processamento de materiais de fontes renováveis, reaproveitamento de resíduos para desenvolvimento de novos materiais.

Gilson Fernandes Braga Junior - Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Faculdade Estácio de Belém (Antigo Instituto de Estudos Superiores da Amazônia) (2010) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2013) na área de concentração Sistemas de Energia Elétrica e linha de pesquisa Controle e Automação. Atualmente é professor da Universidade Federal do Oeste do Pará, coordenador do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação e coordenador do laboratório de Sinais e Sistemas.

Estefany Couto Miléo - Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade da Amazônia (2009). Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em Patrimônio Histórico. Atualmente concursada na Universidade Federal do Oeste do Pará como Professora de Magistério Superior na disciplina de desenho técnico.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acompanhamento do consumo 28, 30
Aprendizado de máquina 19, 20, 21, 22, 37, 38, 83
Aprendizagem profunda 37

C

Campo eletromagnético clássico 70, 72, 79, 81
Ciclo de rankine 1, 4
Ciência de dados 19, 20
Comunidades rurais 109, 110
Constante dielétrica 11, 12, 13, 14, 15, 17
Coordenadas do cone de luz 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81
Cronogramas 59, 60, 61, 62, 67

E

Ees 1, 2, 4, 5, 9
Eficiência 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 28, 29, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 46, 50, 56, 84, 111, 115, 119
Eficiência energética 28, 29, 30, 31, 33, 35, 36, 119
Energia 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 44, 49, 50, 75, 109, 110, 111, 112, 116, 117, 118, 119, 120
Energia elétrica 2, 3, 28, 29, 36, 37, 41, 44, 109, 110, 111, 117, 120
Energia solar 109, 110, 111, 117
Engenharia 7, 10, 11, 18, 36, 37, 44, 46, 58, 59, 62, 69, 103, 107, 108, 117, 119, 120
Ensino-aprendizado 98
Equação de klein-gordon-fock 70
Experimento 98, 100, 102, 104, 107

F

Falhas 61, 109, 115, 116, 117, 119
Fator de perda 11, 12, 13, 15, 16, 17
Filmes finos 46, 50, 51
Fotocatálise heterogênea 46, 47, 48

G

Gerenciamento 28, 29, 33, 59, 60, 61, 62, 63, 68, 69

I

Interdisciplinaridade 98, 102, 103, 106
Internet das coisas 26, 28, 30, 36, 44

K

K-nearest neighbors 19, 20, 21

M

Macaúba 11, 12, 13, 17, 18

Marketing bancário 19

Ms project 63

P

Potência elétrica 37

Processos oxidativos avançados 46, 47, 48, 57, 58

Projetos 30, 59, 60, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 100, 103, 106, 120

Propriedades dielétricas 11, 12, 18

R

Realimentador 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9

Reconhecimento automático de modulações 83

Redes neurais 19, 21, 25, 38, 83, 84, 85, 87

Regressão 20, 37, 38, 43, 44, 89

Resnet 89, 90, 91

S

Substrato cerâmico 46

T

Tecnologia 1, 29, 36, 56, 57, 69, 70, 84, 98, 99, 100, 104, 105, 106, 107, 117, 120

Tempo de treinamento 83, 85, 92, 94

Tratamento de águas residuais 46, 57

 **Atena**
Editora

2 0 2 0