

Organizadores:

Eduardo Mendonça Pinheiro

Patrício Moreira de Araújo Filho

Glauber Tulio Fonseca Coelho

ENGENHARIA 4.0

a era da produção inteligente



2024


Pascal
Editora

13
Volume

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

ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

VOLUME 13

EDITORA PASCAL

2024

2024 - Copyright© da Editora Pascal

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

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

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

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Dr. Raimundo Luna Neres

Dr. Saulo José Figueredo Mendes

Dr. Fabio Antonio da Silva Arruda

Dr^a. Selma Maria Rodrigues

Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57prod

Engenharia 4.0: a era da produção inteligente / Eduardo Mendonça Pinheiro, Patrício Moreira de Araújo Filho, Glauber Tulio Fonseca Coelho (Orgs). São Luís - Editora Pascal, 2024.

92 f. : il. (Engenharia 4.0; v. 13)

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-070-8

D.O.I.: 10.29327/5407566

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

CDU: 089.3

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

2024

www.editorapascal.com.br

contato@editorapascal.com.br

APRESENTAÇÃO

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

O presente volume é composto por 6 capítulos que foram apresentados em eventos regionais, nacionais e internacionais, além de estudos inéditos, e aqui estão agrupados segundo temática para facilitar a leitura quanto aos interesses difundidos em cada artigo, transformado em capítulo de livro e direcionados a discentes, docentes, pesquisadores e profissionais de Engenharia e áreas afins.

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

Os Organizadores

ORGANIZADORES

Eduardo Mendonça Pinheiro



Doutor em Agroecologia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, 2023). Mestre em Agroecologia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, 2017). Pós Graduação em Gestão de Projetos pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER, 2021). Especialista em Gestão Agroindustrial pela Universidade Federal de Lavras -MG (UFLA, 2006), Especialista em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER, 2017). Graduado em Agronomia pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA, 2004), Licenciatura Plena pela Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL, 2008). Mestrado em Engenharia pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA, interrompido em 2014). Engenheiro Agrônomo concursado pela Secretaria Municipal de Agricultura, Pesca e Abastecimento de São Luís (SEMAPA). Sócio Proprietário da Editora Pascal LTDA. Professor substituto da Universidade Estadual do Maranhão. Professor pela Faculdade Pitágoras/Anhanguera. Professor Conteudista pela UEMANET. Consultor pelo Programa Alimentos Seguros (PAS).

Patrício Moreira de Araújo Filho



Doutor e Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Projetos e Materiais, pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Licenciado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa no Maranhão (FAPEMA), é Professor/pesquisador Adjunto na Universidade do CEUMA (UniCeuma), Líder de grupo de pesquisa em engenharia aeronáutica e aeroespacial (GPEAA) e Coordena o Projeto SAE-UniCeuma desenvolvendo atividades nas áreas de Engenharia e Ensino.

Glauber Tulio Fonseca Coelho



Possui Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional - UNIDERP (2020), mestrado em Engenharia Civil (Concentração: Saneamento Ambiental) pela Universidade Federal do Ceará - UFC (2009), MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas - FGV e graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (2006). Graduado em Ciências Econômicas da Universidade Federal do Maranhão (UFMA, 2023). Atualmente é Coordenador Acadêmico da Faculdade Anhanguera de São Luís, bem como professor de disciplinas na área de Meio Ambiente e Tecnologia da Construção. Possui experiência em Construção Civil, Gestão de Projetos, Meio Ambiente, Hidrologia e Drenagem. Empresário no setor de livros virtuais científicos, sócio proprietário da Editora Pascal LTDA.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	8
MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MONOCAMADA TMD 1T'-RuOsSe₂ E SUAS APLICAÇÕES: UM ESTUDO DFT	
<i>Caleb Nathan Navis</i>	
<i>Luana Roberta Pacheco Bittencourt</i>	
<i>Pedro Afonso da Silva Batista</i>	
<i>Carolina Vitoria Lopes de Abreu</i>	
<i>Edvan Moreira</i>	
<i>David Lima Azevedo</i>	
CAPÍTULO 2	24
MANUTENÇÃO PREDITIVA NO SETOR INDUSTRIAL	
<i>Welton Gomes Pereira</i>	
CAPÍTULO 3	34
USO DE LOCAL BINARY PATTERN COMO EXTRATOR DE CARACTERÍSTICAS PARA CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE TEXTURAS DE CASCOS DE TARTARUGAS MARINHAS	
<i>Amanda Pereira Sampaio</i>	
<i>Cristina Klippel Dominicini</i>	
<i>Karin Satie Komati</i>	
CAPÍTULO 4	53
DESAFIOS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL NO SETOR DE FÁBRICAS DE BEBIDAS	
<i>Anderson Martins Campos</i>	
CAPÍTULO 5	70
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA NO CONTROLE DE MOTORES	
<i>João Guilherme Andrade Barros</i>	
<i>Lilian Barros Santiago</i>	

CAPÍTULO 6.....79
A IMPORTÂNCIA DO PLANO DE MANUTENÇÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRE-
TO

Felipe Zamorano Silva Carvalho



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

1

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA MONOCAMADA TMD $1T'$ -RuOsSe₂ E SUAS APLICAÇÕES: UM ESTUDO DFT

COMPUTATIONAL MODELING OF THE TMD $1T'$ -RuOsSe₂
MONOLAYER AND ITS APPLICATIONS: A DFT STUDY

Caleb Nathan Navis¹

Luana Roberta Pacheco Bittencourt²

Pedro Afonso da Silva Batista³

Carolina Vitoria Lopes de Abreu³

Edvan Moreira⁴

David Lima Azevedo⁵

1 Mestre em Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial/UEMA, São Luís-MA

2 Mestra em Engenharia Aeroespacial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial/UEMA, São Luís-MA

3 Curso de Física Licenciatura, UEMA, São Luís-MA

4 Doutor em Física, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial/DFIS-UEMA, São Luís-MA

5 Doutor em Física, Instituto de Física – Núcleo de Estrutura da Matéria / UnB, Brasília-DF



[10.29327/5407566.1-1](https://doi.org/10.29327/5407566.1-1)

Resumo

Os dicalcogenetos de metais de transição (*transition metal dichalcogenides*-TMDs) possuem a forma estrutural XY_2 , em que X é um metal de transição e Y equivale a um elemento calcogênico. Estes materiais são caracterizados por ligações covalentes entre os elementos X e Y apresentando polarização causada pela transferência eletrônica entre os átomos metálicos e calcogênicos. Neste estudo, realiza-se a modelagem computacional e análise de propriedades físicas das monocamadas monoclinicas bidimensionais TMDs, $1T'$ -RuOsSe₂, $1T'$ -OsSe₂, e $1T'$ -RuSe₂, via formalismo da teoria do funcional da densidade (*density functional theory*-DFT), considerando principalmente a aproximação do gradiente generalizado (GGA) e adota-se o funcional híbrido HSE06 para estimativa de *bandgap*, a partir das nanoestruturas no estado de mínima energia. Os parâmetros de rede calculados para o TMD $1T'$ -RuOsSe₂ são comparáveis com as estruturas conhecidas na literatura, $1T'$ -OsSe₂ e $1T'$ -RuSe₂. Os *bandgaps* estimados são: 1,0, 0,96 e 0,93 eV, na aproximação GGA, e 1,81, 1,77 e 1,66 eV, com o funcional HSE06, para os TMDs $1T'$ -RuOsSe₂, $1T'$ -OsSe₂ e $1T'$ -RuSe₂, respectivamente, caracterizando-os como nanomateriais semicondutores, no mesmo intervalo do TMD hexagonal WSe₂, que possui estimativa de aplicações desde a indústria aeroespacial à eletrônica. Analisou-se outras propriedades físicas, que indicam potencial síntese do TMD proposto $1T'$ -RuOsSe₂, bem como novas aplicações tecnológicas como nanodispositivo optoeletrônico e capacidade térmica similar ao TMD $1T'$ -RuSe₂.

Palavras-chave: Nanomateriais, Dicalcogenetos, $1T'$ -RuOsSe₂, DFT, propriedades físicas.

Abstract

Transition metal dichalcogenides (TMDs) have the structural form XY_2 , where X is a transition metal and Y is a chalcogen element. These materials are characterized by covalent bonds between elements X and Y, presenting polarization caused by electronic transfer between metallic and chalcogen atoms. In this study, computational modeling and analysis of physical properties of the two-dimensional monoclinic monolayers TMDs, $1T'$ -RuOsSe₂, $1T'$ -OsSe₂, and $1T'$ -RuSe₂, are carried out via density functional theory (DFT) formalism, considering mainly the generalized gradient approximation (GGA) and adopting the HSE06 hybrid functional for bandgap estimation, based on nanostructures in the minimum energy state. The lattice parameters calculated for the $1T'$ -RuOsSe₂ TMD are comparable with the structures known in the literature, $1T'$ -OsSe₂ and $1T'$ -RuSe₂. The estimated bandgaps are 1.0, 0.96, and 0.93 eV, in the GGA approximation, and 1.81, 1.77, and 1.66 eV, with the HSE06 functional, for the $1T'$ -RuOsSe₂, $1T'$ -OsSe₂, and $1T'$ -RuSe₂ TMDs, respectively, characterizing them as semiconductor nanomaterials, in the same range as the WSe₂ hexagonal TMD, which is estimated to have applications in the aerospace and electronics industries. Other physical properties were analyzed, which indicate potential synthesis of the proposed $1T'$ -RuOsSe₂ TMD, as well as new technological applications such as optoelectronic nanodevice and thermal capacity like the $1T'$ -RuSe₂ TMD.

Keywords: Nanomaterials, Dichalcogenides, $1T'$ -RuOsSe₂, DFT, physical properties.



1. INTRODUÇÃO

O grafeno foi primeiro obtido pelos pesquisadores Andre Geim e Konstantir Novoselov em 2004, levando os autores a receberem o Prêmio Nobel de Física [1]. O grafeno é composto por uma camada pura de átomos de carbono ligados covalentemente com hibridização sp^2 , com estrutura hexagonal e espessura de um átomo [2]. Devido ao confinamento quântico, o grafeno possui propriedades mecânicas, óticas e elétricas excepcionais que o distingue de outros tipos de metais [3]. Esses fatores bidimensionais e propriedades desejáveis não só fornecem aplicações potenciais em eletrônica, optoeletrônica, piezoeletrônica, valetrônica, spintrônica e muitos outros, mas também fornecem excelentes plataformas de pesquisa para novas descobertas da física [4]. No entanto, o grafeno é um material de *bandgap* nulo [2], limitando seu uso direto em aplicações que necessitem de materiais semicondutores, como é o caso dos dispositivos optoeletrônicos (células solares, diodos emissores de luz, e outros).

Recentemente, materiais 2D do tipo Dicalcogenetos de Metais de Transição (TMDs) têm surgido como uma alternativa ao grafeno, para uso em aplicações no campo de nanodispositivos semicondutores [5]. Eles apresentam fórmula química XY_2 , onde X representa um átomo de metal de transição do grupo IV, V ou VI da tabela periódica, e Y um átomo da família dos calcogênios (como S, Se e Te). TMDs podem ser metais, semicondutores ou supercondutores com uma forma da banda de energia direta ou indireta [6-8]. A monocamada XY_2 é formada por três camadas atômicas, onde os átomos dos metais de transição (X) estão dispostos na camada central entre duas camadas de átomos do grupo calcogênio (Y). Semicondutores TMD exibem propriedades marcantes como maior *bandgap*, possibilitando sua aplicação não só em dispositivos semicondutores, mas também em lubrificantes [9], catalisadores [10], transistores [11], baterias de íon de lítio [12].

Um fator que tem contribuído para o estudo dos materiais bidimensionais é que suas propriedades podem ser previstas e calculadas através de simulações computacionais por meio da Teoria do Funcional da Densidade (DFT), por exemplo, que apresenta razoável precisão nos cálculos quando comparados com resultados experimentais [4,13]. Isso levou a exploração de novas possibilidades com diferentes monocamadas, como TMDs contendo metais de transição como Ósmio (OsS_2 , $OsSe_2$ e $OsTe_2$) [14], Rutênio ($RuSe_2$) [15], investigando as propriedades estruturais, eletrônicas, vibracionais e termodinâmicas com o intuito de desenvolver novas estruturas 2D que apresentassem novas características atraentes.

Neste estudo, seguindo a similaridade estrutural, ou seja, a mesma simetria entre os TMDs $1T'$ - $RuOsSe_2$, $1T'$ - $OsSe_2$ e $1T'$ - $RuSe_2$, realizou-se a modelagem computacional e análise de propriedades físicas das células primitivas das nanoestruturas, a saber, propriedades estruturais, eletrônicas, ópticas e termodinâmicas, por meio do formalismo da teoria do funcional da densidade considerando os funcionais GGA-PBE e HSE06, em consonância com trabalhos publicados recentemente [16,17].

2. METODOLOGIA

A configuração inicial da rede cristalina, para as nanoestruturas monoclinicas (Figura 1a) de dicalcogenetos metais de transição (TMD) de $1T'$ - $RuOsSe_2$, $1T'$ - $OsSe_2$, e $1T'$ - $RuSe_2$, foi obtida via dados de raios-X de Schutte et al. [18], modelados a partir da nanoestrutura de

$1T'$ -OsSe₂, com grupo espacial C_{2h} e pontos de alta simetria especificados na primeira zona de Brillouin, conforme a Figura 1b. Os parâmetros de rede iniciais e pós otimização de geometria, para atingir o estado fundamental de energia, são apresentados e comparados na Tabela 1.

Os cálculos realizados por meio de simulação computacional estão alicerçados no formalismo da teoria do funcional da densidade (DFT), implementado no código computacional CASTEP [19]. O funcional de troca e correlação utilizado foi o Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) vinculado à aproximação do gradiente generalizado (GGA) [20]. Empregou-se uma série de critérios de convergência para minimizar as nanoestruturas, promovendo a interação atômica para que alcancem o estado fundamental de mínima energia [16, 17, 21]. A energia de corte adotada para atender aos critérios de convergência foi de 500 eV, suficiente para os cálculos das propriedades estruturais, optoeletrônicas e termodinâmicas.

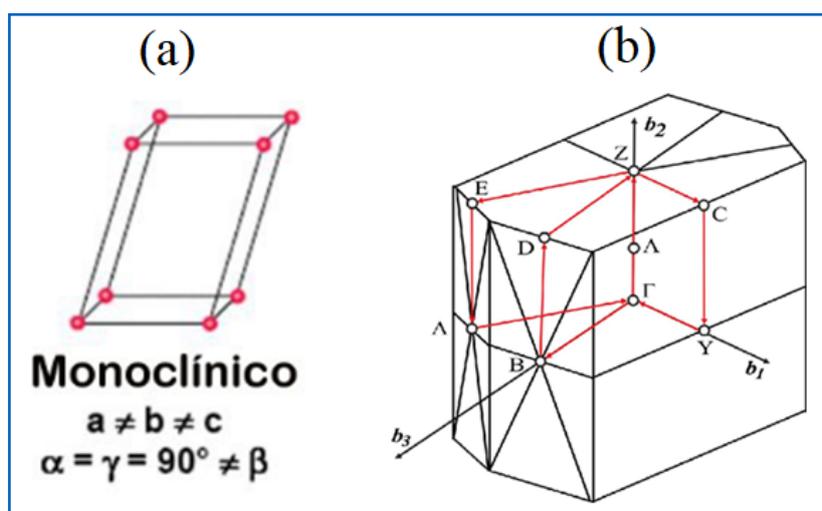


Figura 1. (a) rede cristalina monoclinica, e (b) primeira zona de Brillouin [22] para a rede monoclinica com a indicação dos pontos de alta simetria.

Fonte: (a) <<https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/difracao-de-raio-x/>>; (b) Ref.[23].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Geometria de Estado Fundamental

A partir dos valores de parâmetros de rede experimentais da célula primitiva da nanoestrutura TMD $1T'$ -OsSe₂, realizou-se o design e modelagem do TMD $1T'$ -RuOsSe₂, e ainda, comparou-se os dados com os parâmetros do TMD $1T'$ -RuSe₂ (Tabela 1). Pode-se observar e comparar os dados na Tabela 1 às células primitivas das nanoestruturas TMD, conforme as Figuras 2, 3, e 4, que apresentam (a) as células primitivas, (b) as vistas laterais, e (c) as replicações das células em direções específicas, caracterizando as células unidades básicas de monocamadas 2D, análogas às nanoestruturas 2D da literatura, tais como o grafeno e similares [16,17].

Os parâmetros de rede das nanoestruturas, apresentados na Tabela 1, diferenciam-se uns dos outros pela relação entre os parâmetros a , b , e c , que indicam o comprimento dos três eixos na rede real, enquanto os parâmetros, α , β , e γ , existentes nos vértices indicam os ângulos entre os eixos da célula. Outros parâmetros são apresentados também, tais como

os números de átomos, grupos pontuais de simetria e volumes.

Nesta tabela, percebe-se a diferença entre os resultados obtidos por meio da aproximação GGA-PBE. Constata-se que para a célula $1T'$ -RuOsSe₂, houve diminuições nos parâmetros a , V e ângulo β , enquanto os parâmetros b e c aumentaram. Porém, apesar de alguns aumentos e diminuições dos parâmetros, sejam nesta estrutura ou para os TMDs $1T'$ -OsSe₂ e $1T'$ -RuSe₂, todos os resultados estão dentro de uma margem aceitável de variação que não ultrapassam 7,5%.

$1T'$-RuOsSe₂ / sistema cristalino Monoclínico								
Fórmula	Nº de átomos	Grupo pontual	Parâmetro a	Parâmetro b	Parâmetro c	Volume V	Ângulo $\alpha = \gamma$	Ângulo β
RuOsSe ₄	6	C_s	6,258Å	3,606Å	20,478Å	462,144Å ³	90°	89,7°
Pós-Cálculo/ funcional PBE								
			5,484Å (-7,5%)	3,612Å (+0,16%)	21,137Å (+3,1%)	441,481Å ³ (-4,4%)	90°	88,4° -1,3%
$1T'$-OsSe₂ / sistema cristalino Monoclínico								
Fórmula	Nº de átomos	Grupo pontual	Parâmetro a	Parâmetro b	Parâmetro c	Volume V	Ângulo $\alpha = \gamma$	Ângulo β
Os ₂ Se ₄	6	C_{2h}	17,604Å	3,626Å	5,718Å	365,083Å ³	90°	89,8°
Pós-Cálculo/ funcional PBE								
			17,614Å (+0,05%)	3,624Å (-0,05%)	5,715Å (-0,04%)	364,926Å ³ (-0,04%)	90°	89,8°
$1T'$-RuSe₂ / sistema cristalino Monoclínico								
Fórmula	Nº de átomos	Grupo pontual	Parâmetro a	Parâmetro b	Parâmetro c	Volume V	Ângulo $\alpha = \gamma$	Ângulo β
Ru ₂ Se ₄	6	C_{2h}	18,321Å	3,595Å	5,792Å	381,565Å ³	90°	90°
Pós-Cálculo/ funcional PBE								
			18,416Å (+0,5%)	3,599Å (+0,1%)	5,826Å (+0,5%)	386,246Å ³ (+1,2%)	90°	89,7° -0,2%

Tabela 1: Parâmetros de rede para as fases monoclínicas de $1T'$ -RuOsSe₂, $1T'$ -OsSe₂, e $1T'$ -RuSe₂. Os comprimentos dos parâmetros de rede (a , b , c) estão em Å, volumes (V) em Å³, e os ângulos (α , β , γ) em graus.

Fonte: Autoria própria (2024).

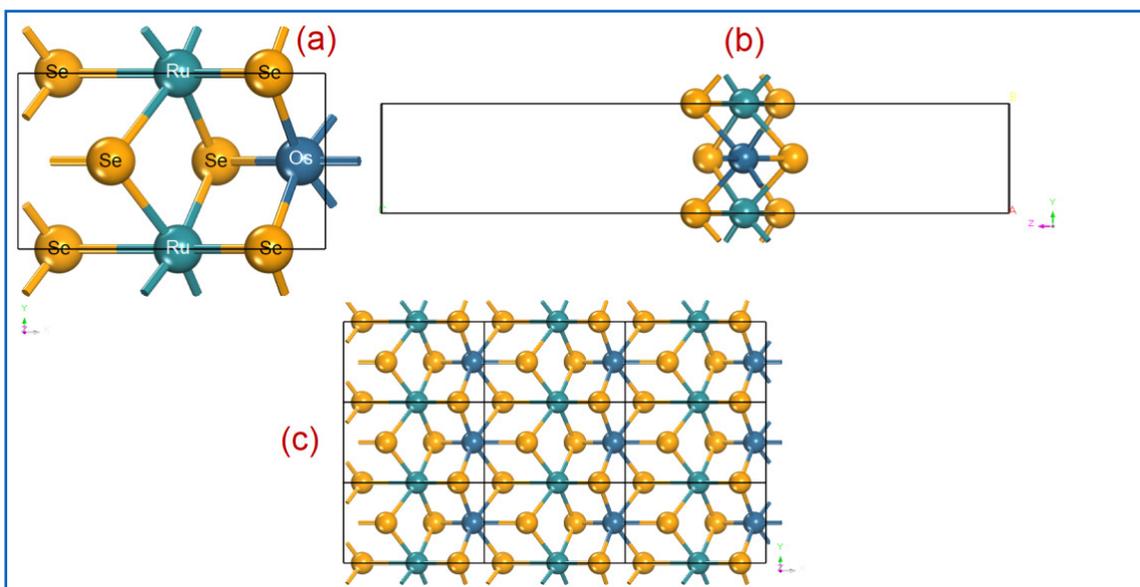


Figura 2. (a) Célula primitiva do TMD monoclinico 1T'-RuOsSe₂, (b) vista lateral da célula, e (c) replicação da célula nas direções A e B, ao longo das coordenadas x e y, respectivamente.

Fonte: Autoria própria (2024).

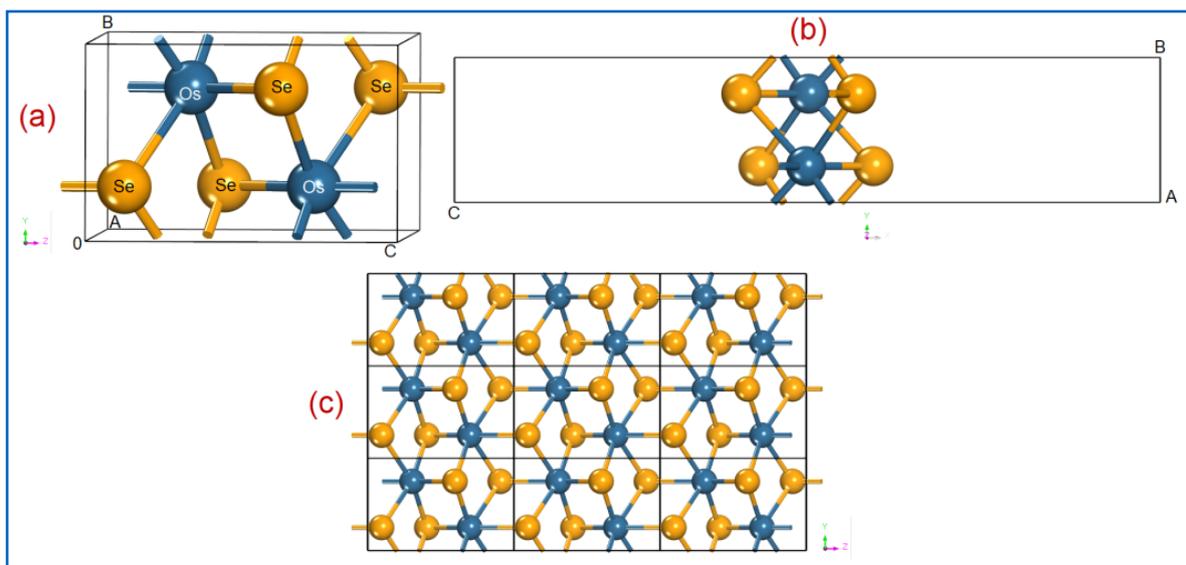


Figura 3. (a) Célula primitiva do TMD monoclinico 1T'-OsSe₂, (b) vista lateral da célula, e (c) replicação da célula nas direções B e C, ao longo das coordenadas y e z, respectivamente.

Fonte: Autoria própria (2024).

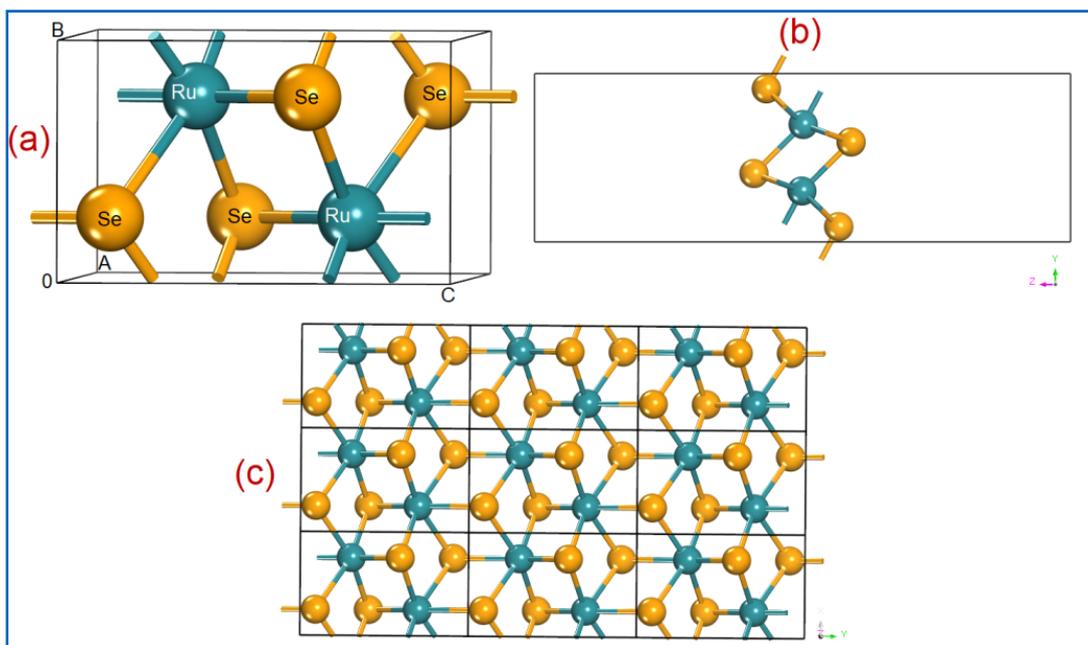


Figura 4. (a) Célula primitiva do TMD monoclinico 1T'-RuSe₂, (b) vista lateral da célula, e (c) replicação da célula nas direções A e B, ao longo das coordenadas x e y, respectivamente.

Fonte: Autoria própria (2024).

Após os procedimentos de cálculo para a otimização de geometria, atingiu-se os estados de mínima energia para as células primitivas TMD de 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, com valores em torno de -1.890, -1.860 e -1.918 eV, respectivamente, para os critérios de convergência adotados (Figura 5).

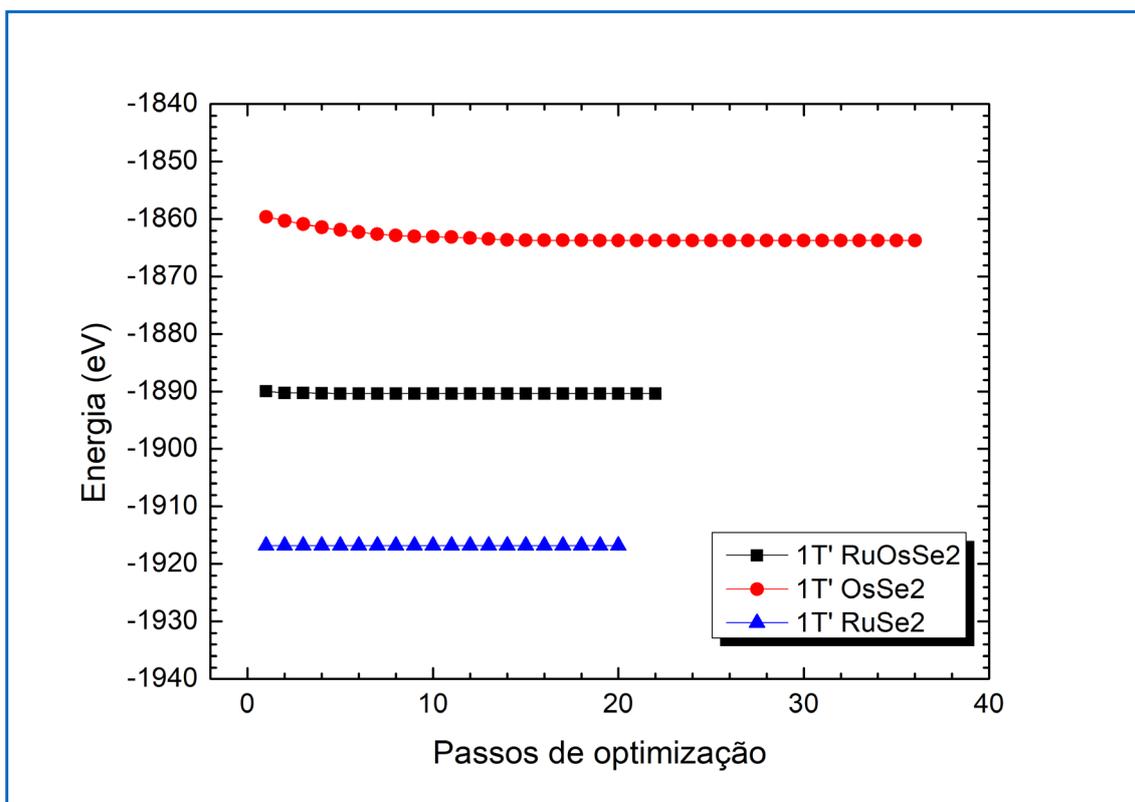


Figura 5. Convergência da energia das nanoestruturas TMD 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.2 Bandas de energia de Kohn-Sham e densidade de estados

Para obtenção das bandas de energia e densidades de estados adotou-se os critérios de cálculo via simulação computacional em conformidade com trabalhos anteriores [24-29]. As Figuras 6 e 7 demonstram as estruturas de bandas eletrônicas e densidades de estados totais – DOS, lado direito da Figura 6, para as nanoestruturas TMD 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, obtidas através das aproximações GGA-PBE (Figura 6) e HSE06 (Figura 7) entre os intervalos de -2 e 3 eV ao longo dos pontos de alta simetria (Z- Γ -Y-A-B-D-E-C) na primeira zona de Brillouin [22] para estes sistemas monoclinicos. Os pontos foram escolhidos seguindo o caminho: Z(0,000; 0,000; 0,500), Γ (0,000; 0,000; 0,000), Y(0,000; 0,500; 0,000), A(0,500; 0,500; 0,000), B(0,500; 0,000; 0,000), D(0,500; 0,000; 0,500), E(0,500; 0,500; 0,500), e C(0,000; 0,500; 0,500). Marca-se uma linha tracejada (cor verde) em 0,0 eV ao centro das Figuras 6 e 7, demarcando o maior nível de energia nas bandas de valência (nível de Fermi).

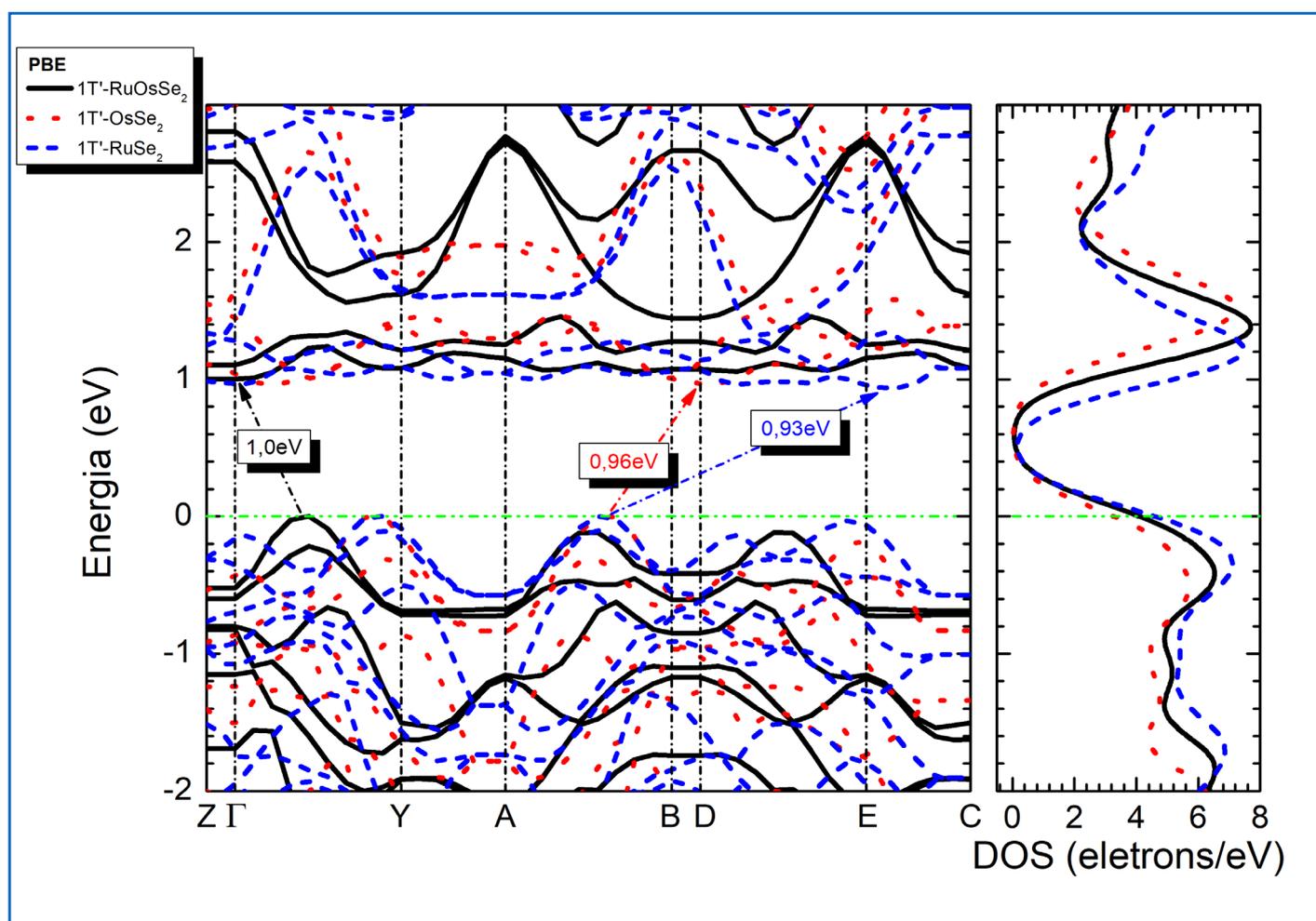


Figura 6. Estrutura de bandas de energia dos TMDs monoclinicos 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

Diante dos resultados obtidos por meio da aproximação GGA-PBE (Figura 6), as estruturas de bandas eletrônicas apresentam *bandgaps* indiretos para as nanoestruturas TMD 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, com valores de 1,0, 0,96, e 0,93 eV, respectivamente, sendo o limite superior de energia na banda de valência entre os pontos de alta simetria Γ -Y, e limite inferior de energia na banda de condução no ponto Γ , para o TMD 1T'-RuOsSe₂ (Γ -Y \rightarrow Γ =1,0 eV); o TMD 1T'-OsSe₂ possui o limite superior de energia na banda de valência

entre os pontos de alta simetria **A-B**, e limite inferior de energia na banda de condução no ponto **D** ($A-B \rightarrow D=0,96$ eV); e ainda, o TMD $1T'-RuSe_2$ possui limite superior de energia na banda de valência entre os pontos de alta simetria **A-B**, e limite inferior de energia na banda de condução entre os pontos **E-C** ($A-B \rightarrow E-C=0,93$ eV).

Considerando a aproximação híbrida HSE06 (Figura 7), as estruturas de bandas eletrônicas apresentam *bandgaps* indiretos para as nanoestruturas TMD $1T'-RuOsSe_2$, $1T'-OsSe_2$, e $1T'-RuSe_2$, com valores de 1,81, 1,77 e 1,66 eV, respectivamente, com o limite superior de energia na banda de valência entre os pontos de alta simetria ΓY , e limite inferior de energia na banda de condução no ponto Γ ($\Gamma-Y \rightarrow \Gamma=1,81$ eV); para o TMD $1T'-OsSe_2$ temos ($A-B \rightarrow D=1,77$ eV), e para o TMD $1T'-RuSe_2$, os limites superior e inferior são de **M** para **E-C**, respectivamente ($M \rightarrow E-C=1,66$ eV). Os valores obtidos com a utilização da aproximação HSE06 foram próximos de 45% maiores que os resultados obtidos com a aproximação GGA, conforme prevê a literatura [27,28], mas preservando o caráter semiconductor dessas nanoestruturas TMD com aplicações na indústria eletroeletrônica.

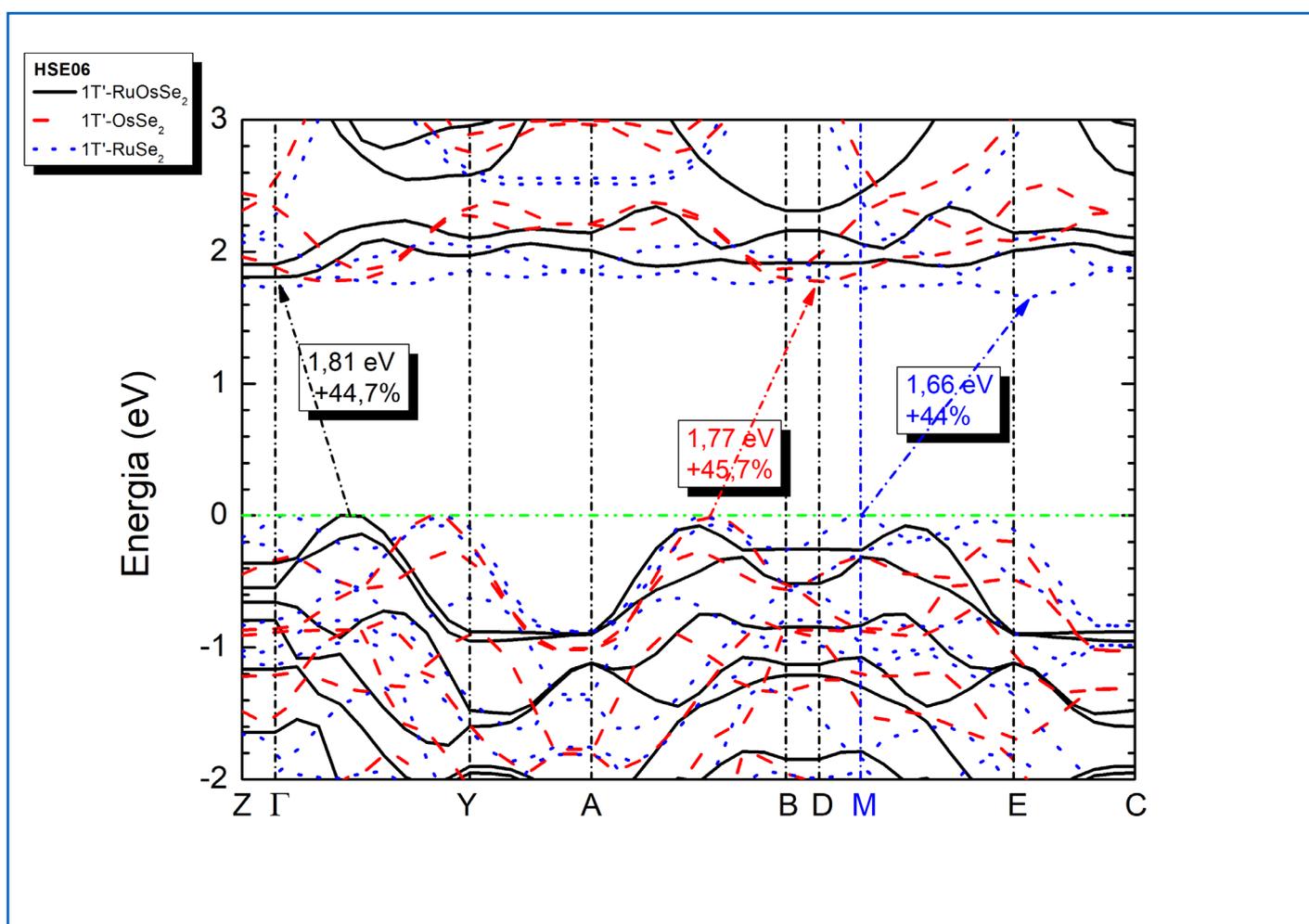


Figura 7. Estrutura de bandas de energia dos TMDs monoclinicos $1T'-RuOsSe_2$, $1T'-OsSe_2$, e $1T'-RuSe_2$, utilizando o funcional HSE06.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.3 Densidade de estados parciais (PDOS)

A DOS, na Figura 6, representa a contribuição dos orbitais atômicos de cada nanoestrutura TMD [26,28], segundo a aproximação GGA, enquanto a densidade de estados parciais – PDOS, por sua vez, permite a verificação da contribuição de cada orbital atômico. A Figura 8 apresenta a PDOS da nanoestrutura TMD 1T'-RuOsSe₂, utilizando o funcional PBE, para cada átomo no intervalo de -2,0 a 3,0 eV, próximo ao nível de Fermi. Inicialmente, observam-se as maiores contribuições dos orbitais 4d⁷ e 5d⁶, para os átomos metais de transição, Rutênio (Ru) e Ósmio (Os), respectivamente, no topo das bandas de valência e na faixa mínima (entre 1,0 e 2,0 eV) das bandas de condução, com uma contribuição do orbital 4p⁴ do átomo de Selênio (Se), responsáveis pelo caráter semicondutor deste TMD.

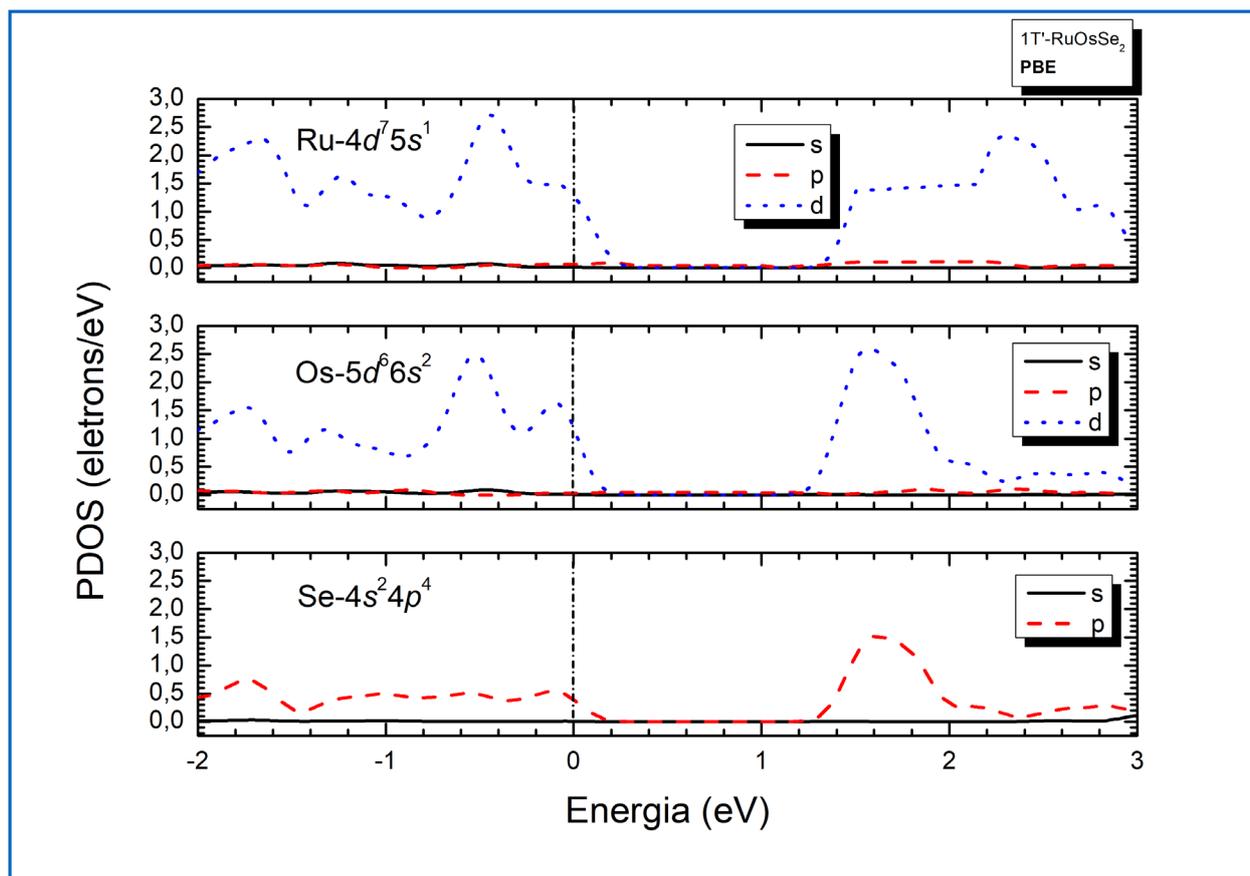


Figura 8. Densidades de estados parciais (PDOS) para os átomos de Rutênio (Ru), Ósmio (Os), e Selênio (Se) que constituem o TMD 1T'-RuOsSe₂, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 9 apresentam-se as PDOS em função da energia (eV) para as nanoestruturas TMDs 1T'-OsSe₂ e 1T'-RuSe₂, utilizando o funcional PBE no intervalo entre -2,0 e 3,0 eV. Os resultados são similares, pois as maiores contribuições referem-se aos orbitais 4d⁷ e 5d⁶, para os átomos de Rutênio (Ru) e Ósmio (Os), respectivamente, tanto na banda de valência quanto na banda de condução, e menores contribuições do orbital 4p⁴ do átomo de Selênio (Se). Por meio das PDOS constatam-se os intervalos (*bandgaps*) em que não há picos, e consequentemente, confirma-se o caráter semicondutor de cada TMD apresentado neste estudo.

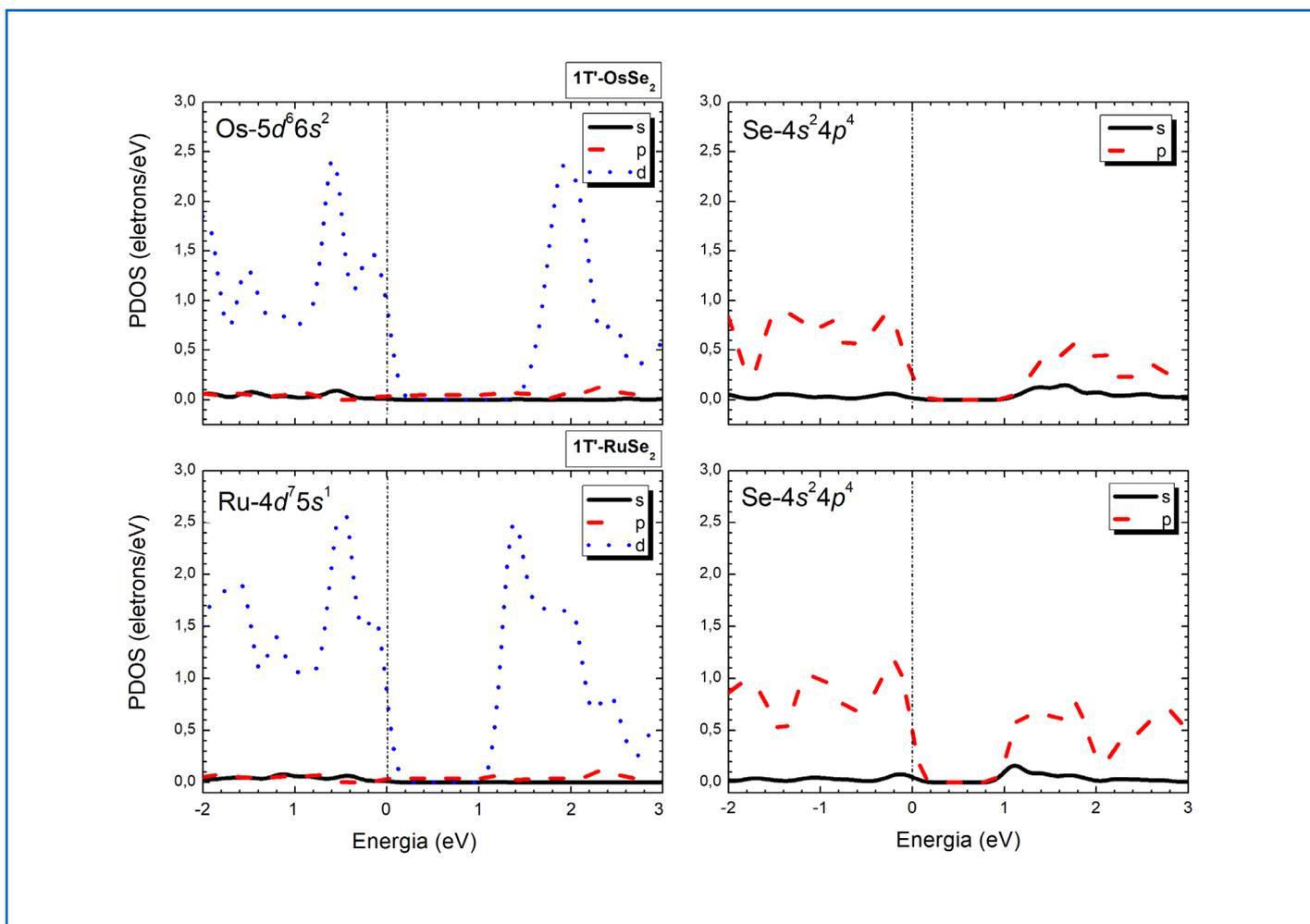


Figura 9. Densidades de estados parciais (PDOS) para os átomos de Rutênio (Ru), Ósmio (Os), e Selênio (Se) que constituem os TMDs 1T'-OsSe₂ e 1T'-RuSe₂, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.4 Propriedades ópticas

3.4.1 Absorção óptica

A absorção óptica de radiação por átomos e moléculas deve estar relacionada à frequência (ν) ou comprimento de onda (λ), pois a energia é $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, sendo h a constante de Plank, desde que as transições relacionadas à absorção de radiação correspondem às excitações eletrônicas, ou seja, os átomos e moléculas absorvem energia na forma de radiação e os seus respectivos elétrons são excitados para estados mais elevados de energia [30].

As excitações eletrônicas estão abrangendo as regiões de ultravioleta (UV) e visível (Vis), conforme os resultados apresentados na Figura 10, por meio da aproximação GGA, para cada nanoestrutura TMD [16,17]. A partir da região de UV-B até o Vis para a monocamada 1T'-RuOsSe₂, ocorre maior absorção nas seguintes direções cristalográficas: [010], [110], [100], e [poly]. Enquanto, para as monocamadas TMD 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, as direções de maior absorção são: [010], [011], [001], e [poly]. Assim, as direções comuns em que ocorre maior absorção óptica incluindo as regiões UV-B, UV-A e Vis são [010] e [poly].

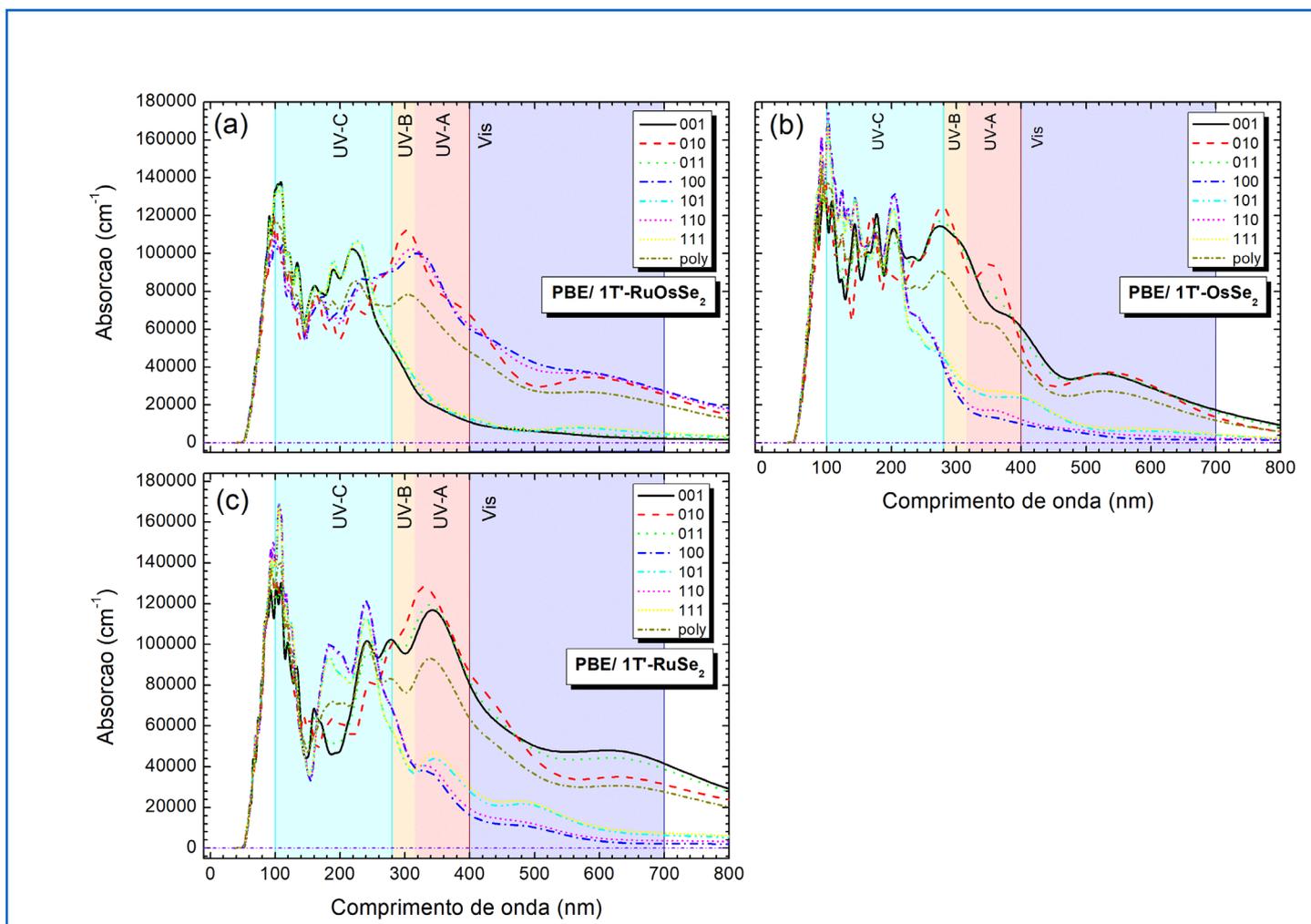


Figura 10. Absorção óptica (cm^{-1}) em função do comprimento de onda (nm) das nanoestruturas TMD (a) $1\text{T}'\text{-RuOsSe}_2$, (b) $1\text{T}'\text{-OsSe}_2$, e (c) $1\text{T}'\text{-RuSe}_2$, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.4.2 Refletividade

Devido à interação da luz (radiação) com um sólido cristalino, uma parte da radiação é transmitida (T) através do meio, uma parte é absorvida (A) pelo material, e a outra parte será refletida (R) pela superfície da estrutura, cumprindo a relação fundamental: $T + A + R = 1$. Logo, materiais com uma boa refletividade podem fazer com que sua cor seja percebida, sendo esta determinada pela distribuição dos comprimentos de onda da radiação refletida [30].

Na Figura 11 demonstra-se a refletividade (u.a.) em função do comprimento de onda (nm) para as monocamadas TMD $1\text{T}'\text{-RuOsSe}_2$, $1\text{T}'\text{-OsSe}_2$, e $1\text{T}'\text{-RuSe}_2$, utilizando o funcional PBE, nas várias direções cristalográficas abrangendo as regiões UV-B, UV-A e Vis. As curvas indicam maior refletividade desde a região de UV-B até o Vis para a monocamada $1\text{T}'\text{-RuOsSe}_2$ nas direções [010], [110] e [100], variando entre 25 e 35%. Observando as monocamadas $1\text{T}'\text{-OsSe}_2$ e $1\text{T}'\text{-RuSe}_2$, os picos de maior refletividade estão nas direções [010], [011] e [001], compreendendo um intervalo entre 25 e 35% para o OsSe_2 , e de 30 a 50% para o RuSe_2 .

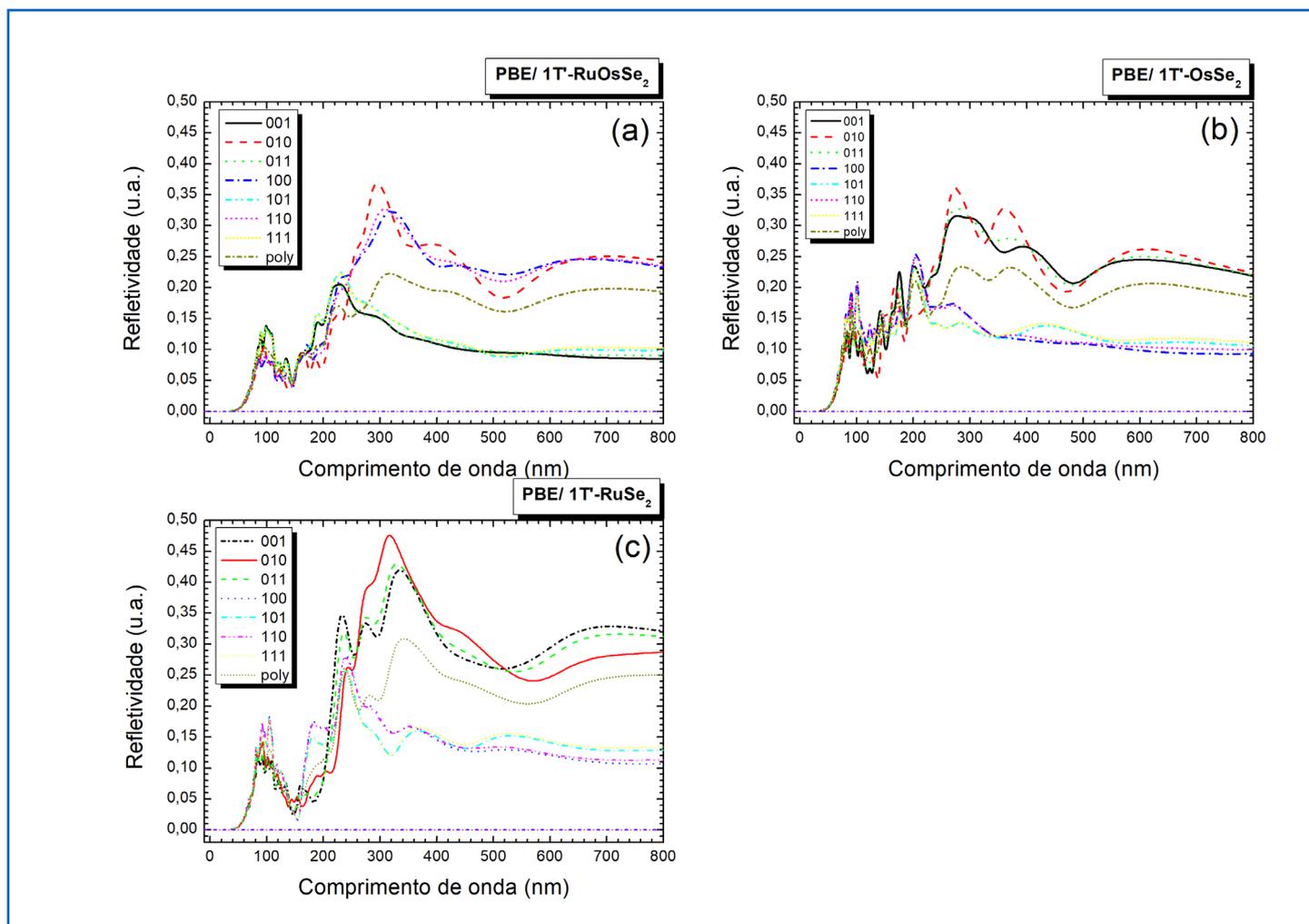


Figura 11. Refletividade óptica (u.a.) das nanoestruturas TMD (a) $1T'$ -RuOsSe₂, (b) $1T'$ -OsSe₂, e (c) $1T'$ -RuSe₂, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.5 Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas indicam as respostas dos materiais quando submetidos à variações de temperatura [31]. Assim, por meio da teoria DFT estima-se a Entalpia (Figura 12a), que mede a máxima energia do sistema passível de remoção na forma de calor, com um comportamento quase linear em função da temperatura, de 0 a 1000 K, sendo que o TMD $1T'$ -OsSe₂ alcança maiores valores de energia e, os TMDs $1T'$ -RuOsSe₂ e $1T'$ -RuSe₂ possuem comportamentos similares. Na Figura 12b constata-se a energia livre de Gibbs que está relacionada à quantidade de energia que o sistema dispõe para realização de trabalho útil, e ainda, conforme os resultados apresentados, as reações para a formação destas nanoestruturas de TMD podem ser espontâneas com o aumento de temperatura. A temperatura vezes a entropia, $T \times$ Entropia (Figura 12c), mede a quantidade de energia que não está disponível para a realização de trabalho, sendo a ordem de intensidade como função da temperatura: $1T'$ -OsSe₂ > $1T'$ -RuOsSe₂ > $1T'$ -RuSe₂. Por último, a Figura 12d apresenta a capacidade térmica como função da temperatura, que indica se o material possui habilidade de absorver calor de sua vizinhança externa, sendo que o TMD $1T'$ -OsSe₂ absorve calor mais rapidamente, em relação aos outros dois TMDs, atingindo uma capacidade térmica maior [17].

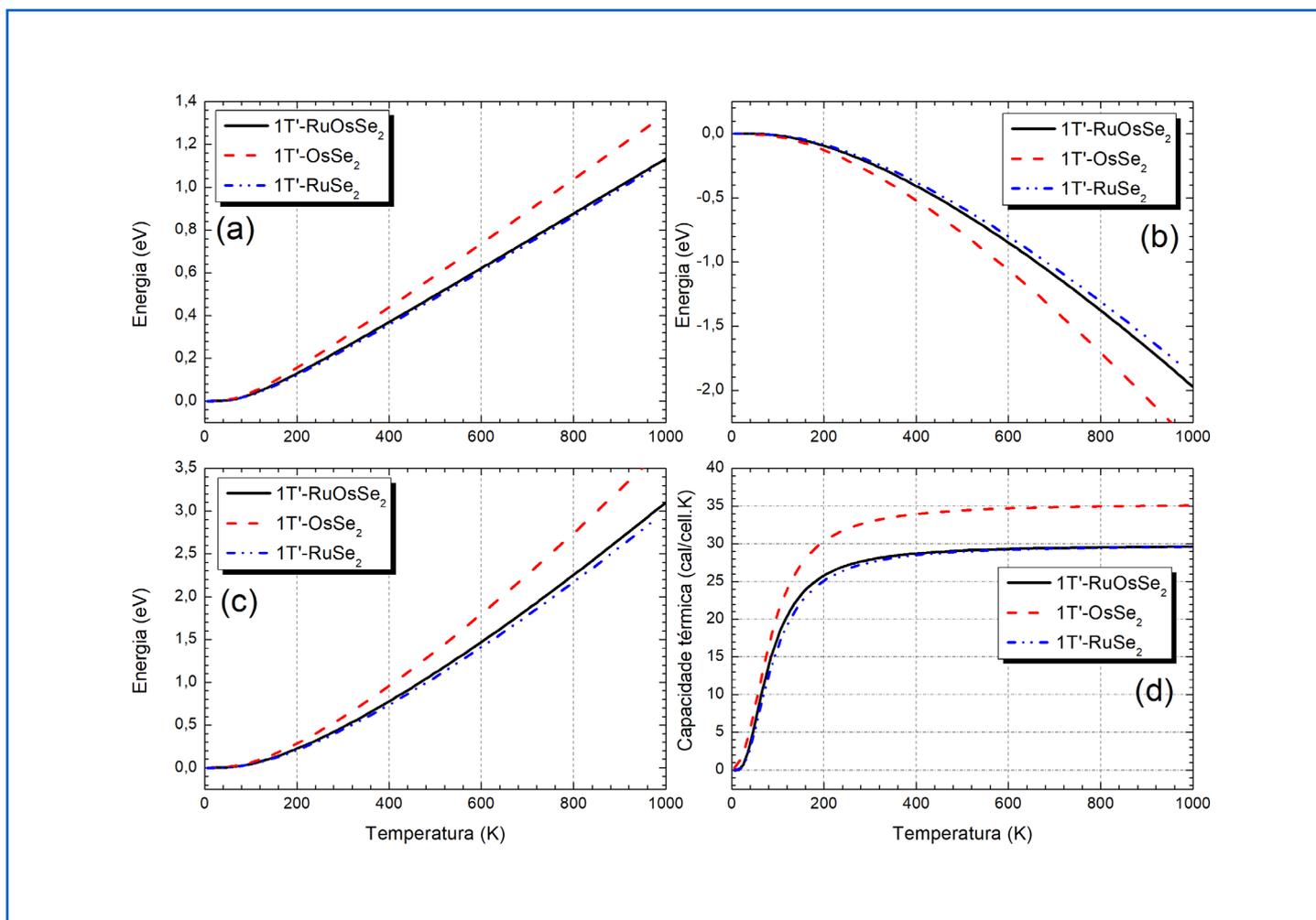


Figura 12. (a) Entalpia (eV), (b) energia livre de Gibbs (eV), (c) $T \times$ Entropia (eV), e (d) capacidade térmica (cal/cell.K) em função da temperatura (K) das nanoestruturas TMD 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂, e 1T'-RuSe₂, utilizando o funcional PBE.

Fonte: Autoria própria (2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta investigação, apresentam-se os seguintes resultados para os TMDs monoclinicos 1T'-RuOsSe₂, 1T'-OsSe₂ e 1T'-RuSe₂, após modelagem computacional via formalismo DFT: geometria das nanoestruturas, estruturas de bandas de energia, densidades de estados, absorção óptica, refletividade, entalpia, entropia, energia livre e capacidade térmica. Após o cálculo do mínimo de energia das nanoestruturas, constataram-se pequenas variações em seus parâmetros de rede, mas dentro do limite aceitável na literatura, abaixo de 10%. Os TMDs apresentam *bandgap* entre 0,93 e 1,81 eV, conforme as aproximações bem estabelecidas e adotadas neste trabalho, caracterizando-os como materiais semicondutores. Os resultados para propriedades ópticas revelam que os TMDs absorvem mais luz em comprimentos de onda ao redor de ~100 nm e têm boa refletividade na região de ultravioleta – UV e visível – Vis(300 – 500 nm), variando entre 25 e 35% para o TMD proposto, 1T'-RuOsSe₂. Por fim, dentre as propriedades termodinâmicas destacam-se: a possibilidade de síntese para os TMDs estudados, e ainda, o TMD 1T'-OsSe₂ necessita de mais energia térmica no processo de formação. Assim, tanto o TMD proposto, 1T'-RuOsSe₂, quanto os demais, podem ser aplicados na indústria de dispositivos optoeletrônicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro das agências de pesquisa: Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão-FAPEMA (Universal-01108/19), Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso-FAPEMAT (PRONEX CNPq/ FAPEMAT 850109/2009), Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal-FAP-DF (Edital 04/2017), Universidade Estadual do Maranhão (chamada interna n.04/2021-PPG/UEMA), Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho em São Paulo-CENAPAD-SP, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq (Proc.315623/2021-7-PQ-2).

Referências

- [1] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Dubonos, S. V., Zhang, Y., Jiang, D. Room-temperature electric field effect and carrier-type inversion in graphene films. **arXiv preprint cond-mat/0410631**, 2004. DOI: 10.48550/arXiv.cond-mat/0410631
- [2] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D. E., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... Firsov, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. **science**, v. 306, n. 5696, p. 666-669, 2004. DOI: 10.1126/science.1102896
- [3] Geim, A. K., Novoselov, K. S. The rise of graphene. **Nature materials**, v. 6, n. 3, p. 183-191, 2007. DOI: 10.1038/nmat1849
- [4] Xu, R., Zou, X., Liu, B., Cheng, H. M. Computational design and property predictions for two-dimensional nanostructures. **Materials Today**, v. 21, n. 4, p. 391-418, 2018. DOI: 10.1016/j.mattod.2018.03.003
- [5] Jariwala, D., Sangwan, V. K., Lauhon, L. J., Marks, T. J., Hersam, M. C. Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides. **ACS nano**, v. 8, n. 2, p. 1102-1120, 2014. DOI: 10.1021/nn500064s
- [6] Malakar, P., Thakur, M. S. H., Nahid, S. M., Islam, M. M. Data-Driven Machine Learning to Predict Mechanical Properties of Monolayer Transition-Metal Dichalcogenides for Applications in Flexible Electronics. **ACS Applied Nano Materials**, v. 5, n. 11, p. 16489-16499, 2022. DOI: 10.1021/acsanm.2c03564
- [7] Griffith, M. A. R., Rufo, S., Dias, A. C., Da Silva, J. L. Enhancing topological Weyl Semimetals by Janus transition-metal dichalcogenides structures. **Computational Materials Science**, v. 218, p. 112004, 2023. DOI: 10.1016/j.commatsci.2022.112004
- [8] Silveira, J. F., Besse, R., Dias, A. C., Caturello, N. A., Da Silva, J. L. Tailoring excitonic and optoelectronic properties of transition metal dichalcogenide bilayers. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 126, n. 21, p. 9173-9184, 2022. DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c02023
- [9] Lee, C., Li, Q., Kalb, W., Liu, X. Z., Berger, H., Carpick, R. W., Hone, J. Frictional characteristics of atomically thin sheets. **science**, v. 328, n. 5974, p. 76-80, 2010. DOI: 10.1126/science.1184167
- [10] Laursen, A. B., Kegnæs, S., Dahl, S., Chorkendorff, I. Molybdenum sulfides—efficient and viable materials for electro- and photoelectrocatalytic hydrogen evolution. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 2, p. 5577-5591, 2012. DOI: 10.1039/C2EE02618J
- [11] Yoon, Y., Ganapathi, K., Salahuddin, S. How good can monolayer MoS₂ transistors be?. **Nano letters**, v. 11, n. 9, p. 3768-3773, 2011. DOI: 10.1021/nl2018178
- [12] Chang, K., Chen, W. In situ synthesis of MoS₂/graphene nanosheet composites with extraordinarily high electrochemical performance for lithium ion batteries. **Chemical Communications**, v. 47, n. 14, p. 4252-4254, 2011. DOI: 10.1039/C1CC10631G
- [13] Mishra, P., Singh, D., Sonvane, Y., Ahuja, R. Excitonic effects in the optoelectronic properties of graphene-like BC monolayer. **Optical Materials**, v. 110, p. 110476, 2020. DOI: 10.1016/j.optmat.2020.110476
- [14] AZEVEDO, H. B. D. **Estudo teórico das propriedades eletrônicas, ópticas, vibracionais e termodinâmicas de monocamadas de TMDs do Tipo OsX₂ (X= S, Se, Te) usando o formalismo DFT**. 2021.
- [15] Zhao, Y., Cong, H., Li, P., Wu, D., Chen, S., Luo, W. Hexagonal RuSe₂ nanosheets for highly efficient hydrogen

- evolution electrocatalysis. **Angewandte Chemie**, v. 133, n. 13, p. 7089-7093, 2021. DOI: 10.1002/ange.202016207
- [16] Bittencourt, L. R. P., Santos, W. O., Moucherek, F. M. O., Moreira, E., Barbosa, L. S., Azevedo, D. L. First-principles calculations to investigate optoelectronic and thermodynamic properties of new 1T'-RuOsSe₂ hybrid monolayer. **International Journal of Modern Physics C (IJMPC)**, v. 35, n. 01, p. 1-11, 2024. DOI: 10.1142/S0129183124500013
- [17] Moucherek, F. M. O., Santos, W. O., Novais, A. L. F., Moreira, E., Azevedo, D. L. Prediction of electronic and optical properties of monoclinic 1T'-phase OsSe₂ monolayer using DFT principles. **Materials Today Communications**, p. 104764, 2022. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104764
- [18] Schutte, W. J., De Boer, J. L., Jellinek, F. Crystal structures of tungsten disulfide and diselenide. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 70, n. 2, p. 207-209, 1987. DOI: 10.1016/0022-4596(87)90057-0
- [19] Clark, S. J., Segall, M. D., Pickard, C. J., Hasnip, P. J., Probert, M. I., Refson, K., Payne, M. C. First principles methods using CASTEP. **Zeitschrift für kristallographie-crystalline materials**, v. 220, n. 5-6, p. 567-570, 2005. DOI: 10.1524/zkri.220.5.567.65075
- [20] Perdew, J. P., Burke, K., Ernzerhof, M. Generalized gradient approximation made simple. **Physical review letters**, v. 77, n. 18, p. 3865, 1996. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.3865
- [21] Pfrommer, B. G., Côté, M., Louie, S. G., Cohen, M. L. Relaxation of crystals with the quasi-Newton method. **Journal of Computational Physics**, v. 131, n. 1, p. 233-240, 1997. DOI: 10.1006/jcph.1996.5612
- [22] Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. **Solid state physics**. Cengage Learning, 2022.
- [23] Bletskan, D. I., Vakulchak, V. V., Kabatsii, V. M. Electronic structure of sodium thiogermanate. **Open Journal of Inorganic Non-metallic Materials**, v. 5, n. 02, p. 31, 2015. DOI: 10.4236/ojinm.2015.52004
- [24] MOREIRA, E.; FREITAS, D.; AZEVEDO, D. **Nanoestrutura 2-D do Dissulfeto de Molibdênio: Um Estudo via Teoria do Funcional da Densidade**. OmniScriptum GmbH & Co. KG – Riga Letónia, 2020. 92p.
- [25] Carvalho, R. C., Mendonça, M. E. V., Tavares, M. S., Moreira, E., Azevedo, D. L. Optoelectronic and thermodynamic properties, infrared and Raman spectra of NbO₂ and Nb₂O₅ from DFT formalism. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 163, p. 110549, 2022. DOI: 10.1016/j.jpcs.2021.110549
- [26] Santos, W. O., Moucherek, F. M. O., Dias, A. C., Moreira, E., Azevedo, D. L. 1T'-RuO₂ monolayer: First-principles study of excitonic, optoelectronic, vibrational, and thermodynamic properties. **Journal of Materials Research**, v. 38, n. 15, p. 3677-3689, 2023. DOI: 10.1557/s43578-023-01091-w
- [27] Santos, W. O., Moucherek, F. M. O., Dias, A. C., Moreira, E., Azevedo, D. L. Structural, optoelectronic, excitonic, vibrational, and thermodynamic properties of 1T'-OsO₂ monolayer via ab initio calculations. **Journal of Applied Physics**, v. 134, n. 7, 2023. DOI: 10.1063/5.0156245
- [28] Santos, W. O., Pereira, M. V. D., Frazão, N. F., Moreira, E., Azevedo, D. L. 1T'-RuWTe₂ hybrid monolayer as a novel magnetic material: A first principles study. **Materials Today Communications**, v. 38, p. 107784, 2024. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107784
- [29] Mathias, A. L. R., Moucherek, F. M. O., Santos, W. O., Costa, F. S., Tavares, M. S., Moreira, E., & Azevedo, D. L. Two-dimensional dichalcogenides of type XY₂ (X= Mo, W; Y= S, Se): A DFT study of the structural, optoelectronic, thermodynamic properties, infrared, and Raman spectra. **Journal of Materials Research**, v. 38, n. 8, p. 2072-2083, 2023. DOI: 10.1557/s43578-023-00947-5
- [30] Klein, M. V., Furtak, T. E. **Optik**. Springer-Verlag, 2013.
- [31] Kittel, C. **Introduction to solid state physics**. John Wiley & sons, inc, 2005.



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

2

MANUTENÇÃO PREDITIVA NO SETOR INDUSTRIAL

PREDICTIVE MAINTENANCE IN THE INDUSTRIAL SECTOR

Welton Gomes Pereira¹

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís-Maranhão



[10.29327/5407566.1-2](https://doi.org/10.29327/5407566.1-2)

Resumo

Diante do aumento da competição na área industrial, as empresas têm buscado equipamentos que apresentem eficiência superior e custos mais baixos. Nesse cenário, a manutenção das instalações fabris surge como um elemento chave para auxiliar as empresas a obterem vantagem competitiva. Surge, então, a pergunta sobre os ganhos proporcionados pela manutenção preditiva na melhoria dos resultados nos processos de produção das empresas industriais. Diante disso, o objetivo central deste estudo foi compreender de que maneira a adoção da manutenção preditiva contribui para o aprimoramento dos processos de produção nas indústrias. Para desenvolver esta pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica consultando artigos, livros, monografias e dissertações disponíveis em plataformas como Google Scholar, Scielo, Lilacs e nos bancos de teses e dissertações de diversas universidades brasileiras. Uma das principais vantagens da implementação da manutenção preditiva é a redução das manutenções corretivas. Essas últimas, normalmente, apresentam custos mais elevados devido à natureza emergencial, além de causarem prejuízos decorrentes de paradas não programadas e substituição de equipamentos pela falta de monitoramento adequado. Dessa forma, a adoção da manutenção preditiva se apresenta como uma estratégia fundamental para as indústrias que desejam alcançar alta produtividade com otimização de custos. Ao integrar a manutenção preditiva na rotina operacional, as empresas podem melhorar a disponibilidade das máquinas utilizadas nos processos produtivos e reduzir os custos relacionados com a manutenção. As técnicas preditivas de manutenção são utilizadas com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva, proporcionando uma gestão mais eficiente dos recursos e uma operação mais confiável dos equipamentos industriais.

Palavras-chave: Manutenção, Indústrias, Preditiva, Equipamentos.

Abstract

Faced with increased competition in the industrial area, companies have sought equipment that presents superior efficiency and lower costs. In this scenario, the maintenance of manufacturing facilities appears as a key element to help companies gain a competitive advantage. The question then arises about the gains provided by predictive maintenance in improving results in the production processes of industrial companies. Therefore, the central objective of this study was to understand how the adoption of predictive maintenance contributes to the improvement of production processes in industries. To develop this research, a bibliographical review was carried out consulting articles, books, monographs and dissertations available on platforms such as Google Scholar, Scielo, Lilacs and in the thesis and dissertation databases of several Brazilian universities. One of the main advantages of implementing predictive maintenance is the reduction of corrective maintenance. The latter typically have higher costs due to their emergency nature, in addition to causing losses resulting from unscheduled stops and equipment replacement due to the lack of adequate monitoring. Therefore, the adoption of predictive maintenance presents itself as a fundamental strategy for industries that wish to achieve high productivity with cost optimization. By integrating predictive maintenance into the operational routine, companies can improve the availability of machines used in production processes and reduce maintenance-related costs. Predictive maintenance techniques are used with the aim of increasing production efficiency, providing more efficient management of resources and more reliable operation of industrial equipment.

Keywords: Formatting Maintenance, Industries, Predictive, Equipment.



1. INTRODUÇÃO

No atual cenário industrial, a busca pela eficiência operacional é essencial para garantir a competitividade e viabilidade das organizações. Neste contexto, a manutenção preditiva surge como uma ferramenta de gestão estratégica que permite prever falhas e maximizar o desempenho dos equipamentos. Num ambiente operacional cada vez mais exigente, a manutenção industrial é uma parte importante da estratégia de qualquer indústria que visa otimizar a eficiência dos seus produtos e serviços.

O principal objetivo da manutenção preditiva é prevenir e identificar a origem dos problemas da máquina antes que eles se tornem aparentes como possíveis erros que afetem os estágios iniciais dos sintomas. O propósito da manutenção é, primariamente, otimizar a disponibilidade dos equipamentos, assegurando que estes estejam operacionais nas condições originais ou, ao menos, nas condições necessárias para o seu funcionamento adequado.

Ao longo do tempo, a prática da manutenção tem passado por transformações significativas, mais do que qualquer outra atividade relacionada. Este fenômeno é atribuído a um aumento substancial no número e na diversidade de itens físicos presentes em instalações, equipamentos e edificações que necessitam de cuidados de manutenção. Além disso, a crescente complexidade dos projetos tem exigido o desenvolvimento de novas técnicas e uma abordagem renovada na estruturação e organização das atividades de manutenção.

A manutenção preditiva na indústria, que utiliza dados e técnicas para prever falhas de equipamentos, oferece benefícios significativos, como redução de custos, melhor gerenciamento de *lead time* e operação mais estável. Este estudo não só aumenta a eficiência empresarial, mas também enriquece o conhecimento acadêmico no planejamento de cuidados, promove pesquisas futuras e contribui para o desenvolvimento científico.

Ao detectar precocemente potenciais problemas e tomar as medidas adequadas, a manutenção preditiva ajuda a prevenir danos mais graves ao equipamento, prolongar sua vida útil e reduzir a necessidade de investimentos para substituição ou reparo de peças. Foi feita a seguinte pergunta: Quais os benefícios da manutenção preditiva nos processos produtivos das empresas industriais?

O objetivo geral deste artigo é estudar o papel da manutenção preditiva na melhoria dos processos de produção industrial e também discutir o conceito histórico de manutenção preditiva. Para alcançar tal intento, delineou-se um objetivo específico, que consiste em descrever as técnicas de manutenção preditiva aplicáveis às empresas do setor industrial.

2. MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL

Conforme apontado por Soeiro, Olivio e Lucato (2017), a atividade de manutenção passou por uma transformação significativa nas últimas décadas, deixando de ser apenas uma simples ação de reparo para se tornar um componente fundamental na consecução dos objetivos e metas das organizações. A gestão eficaz desses modernos meios de produção requer conhecimento profundo de métodos e sistemas de planejamento, progra-

manutenção, controle e execução que sejam tanto eficientes quanto economicamente viáveis.

A manutenção abrange um conjunto de cuidados e procedimentos técnicos essenciais para garantir o bom funcionamento, bem como para realizar reparos em máquinas, equipamentos, peças, moldes e ferramentas. Ela não se limita apenas à intervenção em máquinas e equipamentos em operação, mas também desempenha um papel crucial desde a concepção do projeto (Almeida, 2014).

Segundo Kardec e Nascif (2019), a área de manutenção passou por transformações significativas nos últimos 70 anos, tornando-se uma das mais importantes para o aumento da produtividade. Ao longo dos anos, várias indústrias enfrentaram problemas com a quebra de equipamentos em momentos críticos de produção, resultando em paradas não programadas que geraram custos elevados de manutenção, impactando diretamente o faturamento das empresas.

A manutenção deve estar alinhada com os objetivos da organização, especialmente no que diz respeito ao cumprimento do programa de produção, ao controle de custos planejados e à garantia da qualidade exigida. É responsabilidade da área de manutenção buscar uma maior eficácia na alocação de recursos, além de estabelecer uma relação entre custos e vida útil dos equipamentos que represente o menor custo no ciclo de vida dos mesmos (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

Para Moraes (2014), a engenharia da manutenção é fundamental para o futuro em um mundo globalizado. Isso implica em uma manutenção centrada na confiabilidade, com a garantia de que os equipamentos permanecerão disponíveis e operacionais, cumprindo assim o ciclo de produção conforme programado pelo pcp - planejador e controlador de produção.

Conforme destacado por Teles (2017), à medida que novas abordagens de manutenção foram sendo desenvolvidas, como a manutenção preventiva, preditiva e corretiva planejada, juntamente com a engenharia de manutenção e TPM, os custos associados à manutenção foram gradualmente reduzidos, garantindo maior disponibilidade dos equipamentos. Tais equipamentos, sejam eles elétricos, pneumáticos, hidráulicos ou de outra natureza, estão sujeitos à degradação ao longo do tempo ou devido ao uso.

Teles (2017) também ressalta que, enquanto a manutenção corretiva não planejada lida com situações de emergência, lidando constantemente com problemas imprevistos e seus custos associados, a manutenção preventiva visa evitar tais problemas, antecipando-se a eles e, conseqüentemente, reduzindo os custos de reparo. Por outro lado, Almeida (2014) destaca que a manutenção preditiva oferece a capacidade de avaliar as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados coletados a partir de fenômenos que ocorrem quando uma peça começa a se desgastar ou quando ajustes são necessários. Essa abordagem permite uma intervenção proativa, identificando potenciais problemas antes que eles causem falhas significativas, o que contribui para a eficiência operacional e reduz custos associados à manutenção corretiva não planejada.

Segundo Kardec e Nascif (2019), a manutenção preditiva representa uma revolução no campo da manutenção, especialmente à medida que avanços tecnológicos permitem a avaliação confiável de instalações e sistemas em funcionamento. Seu propósito é evitar falhas ao acompanhar uma variedade de parâmetros, garantindo assim a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível. De acordo com Teles (2017), a característica distintiva da manutenção preditiva é sua capacidade de prever a deterioração de peças e equipamentos, evitando falhas por meio do monitoramento contínuo dos principais parâmetros enquanto os equipamentos estão em operação. Essa abordagem visa prever o tempo de vida útil dos componentes e garantir que esse tempo seja plenamente

aproveitado.

A implementação da manutenção preditiva requer instrumentos e equipamentos específicos, bem como treinamento adequado para os técnicos encarregados de realizar análises e avaliações de fenômenos como vibração excessiva, variações de temperatura, ruídos anormais e imprecisões na produção (Teles, 2017). Com base na análise desses fenômenos, torna-se possível antecipar potenciais defeitos ou falhas nos equipamentos. A abordagem da manutenção preditiva envolve dois passos: diagnóstico e análise de tendências. Quando a degradação atinge ou se aproxima do limite estabelecido, a intervenção é decidida, o que, na prática, se traduz em uma forma de manutenção corretiva planejada (Almeida, 2014).

Os dados coletados por meio de medições de campo, como temperatura, vibração, análise de óleo, ultrassom e termografia, possibilitam um diagnóstico preciso. Isso resulta em intervalos prolongados entre as manutenções corretivas e preventivas, além de um aumento na eficiência do processo produtivo, pois os equipamentos permanecem disponíveis por períodos mais longos (Teles, 2017).

Para colher benefícios tangíveis, é essencial ter uma equipe treinada dedicada à coleta de dados, buscando identificar a causa raiz das falhas. O apoio dos gestores ao plano de manutenção, o investimento em equipamentos de diagnóstico e a capacitação contínua dos profissionais podem levar a resultados excepcionais em um curto espaço de tempo (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

Segundo Kardec e Nascif (2019), é crucial que os técnicos de manutenção responsáveis pela análise e diagnóstico sejam bem treinados. Não basta apenas coletar dados; é necessário interpretá-los e formular diagnósticos. Isso resulta em uma redução significativa de acidentes causados por falhas catastróficas nos equipamentos e na minimização de paradas de produção não programadas devido a falhas inesperadas. A frequência das inspeções é determinada de acordo com o tipo de máquina e os dados coletados, garantindo assim que os equipamentos permaneçam em condições operacionais normais sem comprometer a qualidade ou a segurança das operações (Almeida, 2014).

A manutenção preditiva, conforme descrita por Soeiro (2017), se fundamenta na previsão de falhas em estágios iniciais, permitindo a intervenção antes que esses problemas se tornem falhas funcionais. Isso é alcançado por meio do monitoramento contínuo das condições dos equipamentos e da análise das tendências das variáveis relevantes. Essa abordagem não apenas reduz o tempo de inatividade, mas também minimiza custos associados a reparos de emergência.

Além da detecção precoce de falhas, a manutenção preditiva oferece uma série de benefícios adicionais, como mencionado por Teles (2017) e Almeida (2014). Isso inclui o planejamento mais eficaz da manutenção, aumento da disponibilidade dos equipamentos, redução dos custos de reparo e melhoria da segurança no local de trabalho. Essa estratégia também contribui para uma maior confiabilidade dos produtos ou serviços oferecidos pela empresa.

Para implementar a manutenção preditiva, são necessários dispositivos especializados que possam monitorar uma variedade de fenômenos, como vibração, temperatura e contaminação de fluidos, como destacado por Teles (2017). Além disso, conforme apontado por Kardac e Nascif (2019), certas condições devem ser atendidas, incluindo a capacidade de monitoramento dos equipamentos, a viabilidade econômica da abordagem e a disponibilidade de um programa de acompanhamento e diagnóstico.

Embora os custos iniciais de implementação da manutenção preditiva possam ser

mais elevados, os benefícios a longo prazo geralmente compensam esse investimento, como observado por Kardac e Nasfic (2019). Essa abordagem oferece uma vantagem significativa em relação à manutenção corretiva tradicional, pois permite uma intervenção mais proativa e planejada, minimizando o tempo de inatividade e os custos associados. Além disso, o monitoramento contínuo por meio de software e gerenciamento eletrônico permite intervenções automáticas com base nos dados coletados. Essas tecnologias são importantes para diagnósticos precisos e implementação eficaz de medidas de cuidados preventivos (Richter, 2019).

2.1 Técnicas da Manutenção Preditiva

Soeiro, Olivio e Lucato (2017) indicam que as técnicas preditivas mais utilizadas são a análise de óleo, a análise de vibração e a termografia. A escolha do método ideal depende do tipo de indústria, do tipo de maquinário e da equipe disponível. Para obter benefícios, uma equipe treinada e capacitada deve ser dedicada à coleta de dados, a fim de identificar a causa raiz da falha. A análise de óleo é uma técnica preditiva na qual uma amostra de óleo lubrificante retirada do equipamento é analisada, podendo indicar desgaste de componentes em rolamentos, engrenagens e outras partes móveis dos equipamentos. Além de avaliar as propriedades do lubrificante, a análise de óleo indica as condições dos componentes mecânicos do equipamento (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

A análise de óleo lubrificante é uma prática essencial na manutenção preditiva de equipamentos industriais, oferecendo uma visão detalhada das condições físicas e químicas do lubrificante. Ao identificar potenciais problemas em estágios iniciais, essa técnica possibilita intervenções preventivas, mitigando o risco de falhas catastróficas e otimizando a eficiência operacional (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

Realizada por profissionais capacitados, a análise de óleo envolve a coleta padronizada de amostras seguida pela avaliação laboratorial em dispositivos especializados. Esses dispositivos identificam contaminantes, como água e partículas metálicas, além de avaliar características como viscosidade, acidez e ponto de fulgor, fornecendo uma compreensão abrangente da qualidade do lubrificante e seu impacto no desempenho dos equipamentos.

Diversas técnicas são empregadas na análise, desde métodos físico-químicos até espectrometria e ferrografia, permitindo a detecção precisa de desgaste, contaminação e outros problemas potenciais. Essas informações não apenas antecipam falhas, mas também permitem planejar intervenções de manutenção de forma eficiente, reduzindo o tempo de inatividade e os custos associados à manutenção corretiva (Kardec; Nasfic, 2019).

As análises físico-químicas de óleo envolvem a retirada de amostras em intervalos regulares para acompanhar as características do óleo ao longo do tempo. Se o lubrificante mantiver suas características, pode continuar em uso, garantindo a condição de lubrificação adequada (Kardec; Nasfic, 2019). Os mecanismos que contribuem para o desgaste de um componente incluem desalinhamento, desbalanceamento e uso em condições de sobrecarga ou superaquecimento. Diferentes tipos de desgaste podem ocorrer, como abrasão, corrosão, cavitação, fadiga e fricção. A análise de óleo pode identificar desgaste anormal de componentes rotativos, como motores a diesel, antes mesmo de ser identificado por meio da análise de vibração (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

2.2 Análise de Vibrações e Termografia



A análise de vibração é uma técnica preditiva não invasiva eficaz na identificação de falhas potenciais em equipamentos mecânicos rotativos. Ela pode detectar folgas mecânicas, quebras em engrenagens, desalinhamento, desbalanceamento e falhas em rolamentos (Kardec, 2019).

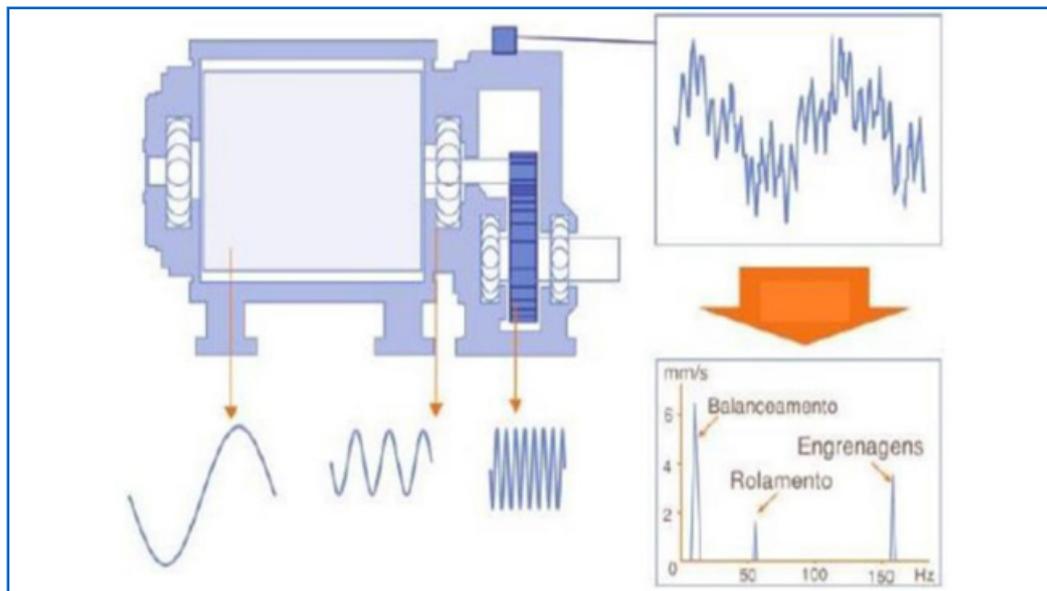


Figura 1. Análise de vibrações

Fonte: Richter (2019)

Quando a análise de vibração é integrada ao gerenciamento de manutenção preditiva, os benefícios vão além da melhoria da produtividade. Segundo Kardec, Nascif e Baron (2014), isso ocorre porque os relatórios periódicos gerados durante cada análise auxiliam as empresas no planejamento. Essa prática reduz o custo com manutenções emergenciais e de reparo, que na maioria dos casos podem danificar outras partes do aparelho e encarecer o serviço. Segundo Richter (2019), a análise de vibrações é uma das técnicas mais antigas na área de manutenção industrial. Nos primeiros dias de construção das primeiras máquinas, os usuários notaram que vibrações excessivas ou ruídos incomuns indicavam possíveis problemas de funcionamento.

As principais causas destas vibrações são o desalinhamento, o desequilíbrio e a folga, que podem levar ao desgaste prematuro e até mesmo a danos catastróficos. Essa abordagem preditiva concentra-se na análise da frequência de vibração gerada pelos componentes do equipamento por meio de sensores montados em máquinas ou operados manualmente (Richter, 2019). Além disso, Kardec, Nascif e Baroni (2014) enfatizam que a análise de vibrações possibilita uma rotina onde tanto as máquinas quanto o trabalho estão mais disponíveis. Isso ocorre porque as paradas de análise e manutenção são planejadas com antecedência para evitar interrupções.

As vantagens da termografia incluem a ausência de contato físico com a superfície da peça ou equipamento, segurança para os seres humanos, monitoramento em operação e em plena carga, armazenamento de dados em formato digital e redução de custos com manutenção e reparos. No entanto, há desvantagens, como o alto custo de aquisição do equipamento e a influência de fatores externos na coleta de dados (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

Um dos principais métodos é a termografia, uma técnica não destrutiva que utiliza radiação infravermelha emitida pelos corpos para medir a temperatura e observar discrepâncias na distribuição térmica. Seu objetivo primordial é fornecer informações sobre

a condição operacional de um equipamento. A temperatura é um dos parâmetros mais facilmente compreendidos e o acompanhamento de suas variações permite detectar alterações na condição de equipamentos, componentes e no próprio processo (Soeiro; Olivio; Lucato, 2017).

A termografia encontra aplicação em diversos setores. Na indústria automobilística, é empregada no desenvolvimento e análise de pneus, no desembaçamento de vidros traseiros, na avaliação de sistemas de freios, entre outros. Na siderurgia, é utilizada para mapear o perfil térmico de fundições durante o processo de solidificação e inspecionar revestimentos refratários em fornos (Cyrino, 2015). Na indústria aeronáutica, a termografia é aplicada na avaliação de materiais compostos para detectar defeitos como dupla laminação ou rupturas. Também é útil na identificação de pontos quentes e falhas de coesão em componentes elétricos e eletrônicos (Cyrino, 2015).

A radiação infravermelha, invisível a olho nu, pode ser sentida na forma de calor, e quanto maior a temperatura de um objeto, maior será a radiação infravermelha emitida por ele (Diegoli; Gavlaki, 2018). A Figura 2 ilustra o espectro eletromagnético com suas diferentes faixas de frequência.

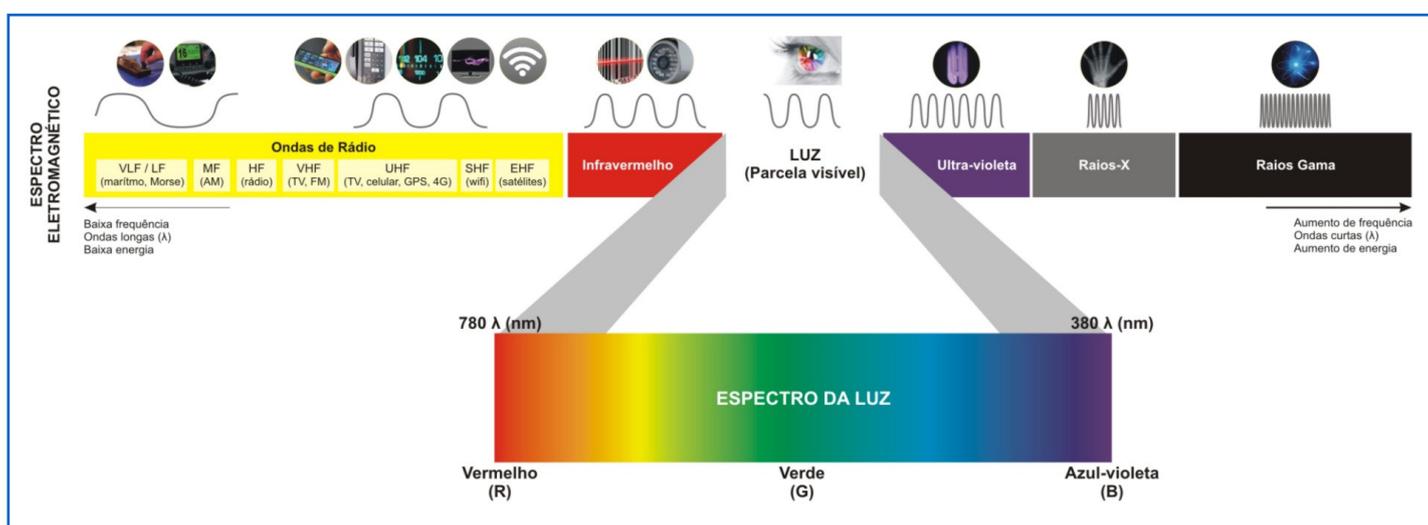


Figura 2. Espectro eletromagnético

Fonte: Diegoli e Gavlaki (2018)

A termografia pode ser categorizada em dois enfoques distintos: o qualitativo e o quantitativo. No método qualitativo, a análise se concentra principalmente na interpretação visual e na comparação das temperaturas entre equipamentos similares, fornecendo relatórios instantâneos. Por outro lado, o método quantitativo exhibe os valores de temperatura para cada ponto da superfície do equipamento, permitindo a determinação do grau de gravidade de uma anomalia (Cyrino, 2015).

Segundo Reis e Contrate (2014), a análise termográfica oferece várias vantagens. Em primeiro lugar, proporciona maior segurança, uma vez que é uma inspeção realizada sem contato físico. Além disso, é mais simples de ser conduzida. Adicionalmente, apresenta alto desempenho e economia, pois antecipa a identificação de danos que poderiam resultar em custos elevados de manutenção corretiva. Também permite a correção de problemas que causam perda e consumo excessivo de energia.

A implementação da manutenção preditiva nos processos produtivos das empresas industriais traz uma série de benefícios significativos. Primeiramente, ao antecipar falhas potenciais em estágios iniciais, a manutenção preditiva permite intervenções proativas,

evitando paradas não planejadas na produção. Isso resulta em uma maior disponibilidade operacional das máquinas e equipamentos, garantindo a continuidade da produção e reduzindo os custos associados à interrupção não programada das atividades (Teles, 2017).

Além disso, ao adotar técnicas preditivas como análise de óleo, análise de vibração e termografia, as empresas podem monitorar de forma eficaz o estado de seus equipamentos. Isso proporciona uma compreensão mais precisa das condições de funcionamento, permitindo uma manutenção precisa e direcionada. Com a identificação precoce de pequenas irregularidades, os problemas podem ser corrigidos antes que se tornem falhas críticas, evitando assim danos mais graves aos equipamentos e reduzindo os custos de reparo e substituição de peças (Diegoli; Gavlaki, 2014).

Por fim, a manutenção preditiva não apenas aumenta a confiabilidade dos equipamentos, mas também contribui para a segurança no ambiente de trabalho. Ao prever e prevenir falhas, os riscos de acidentes são minimizados, protegendo tanto os funcionários quanto os ativos da empresa. Isso cria um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente, promovendo a produtividade e o bem-estar geral dentro da organização. Em suma, a adoção da manutenção preditiva é essencial para garantir a competitividade e a sustentabilidade das operações industriais (Albuquerque, 2014).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram amplamente alcançados, uma vez que forneceram uma variedade de informações teóricas que são fundamentais para compreender o assunto pesquisado. A revisão de literatura realizada permitiu destacar a importância da manutenção preditiva na indústria como uma atividade crucial para prevenir paradas e falhas, operando com base no desempenho dos equipamentos. Este foco na produtividade pode resultar em retornos significativos, desde que seja integrado de forma associada com medidas preventivas e corretivas.

Uma das principais vantagens é a redução das manutenções corretivas, que geralmente são mais dispendiosas devido à sua natureza emergencial, além dos prejuízos causados por paradas produtivas e substituição de equipamentos por falta de monitoramento. Portanto, a manutenção preditiva emerge como uma ação fundamental para indústrias que almejam alta produtividade com otimização de custos.

É importante ressaltar que este trabalho não esgota o assunto abordado, podendo servir de base para estudos futuros. Dessa forma, recomenda-se explorar temas que visem disseminar e aprofundar ainda mais o conhecimento nessa área. Uma temática interessante para estudos futuros poderia ser os benefícios gerados pela implementação da Manutenção Centrada na Confiabilidade nas indústrias brasileiras.

Referências

ALBUQUERQUE, Carlos Jesivan Marques; FORTES, Marcio Zamboti; DE SOUZA, Marcos Paulo. Ações Preditivas na Manutenção – Termografia: Uma Visualização de Oportunidade de Ganhos Energéticos. **IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – IV CBEE**. 2014.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção Mecânica Industrial**: Conceitos básicos e tecnologia aplicada. São Paulo: Érica, 2014.

- CYRINO, L. **Termografia, conceitos e aplicações**. São Paulo, 2015. DHILLON, B. Engenharia de confiabilidade no projeto e operação de sistemas. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 2009.
- DIEGOLI, B; GAVLAKI, D. **Indústria 4.0: Manufatura Avançada**. [S.l.]. 2018.
- FARIA, J. **Administração da manutenção: sistema P.I.S.** São Paulo: E. Blücher, 2014.
- KARDEC, A.; NASCIF, J.; BARONI, T. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Quality, 2014.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função estratégica**, - 3.ed. rev. E ampl. Rio de Janeiro. Qualitymark, 2019
- MORAES, P. **Manutenção produtiva total: estudo de caso em uma empresa automobilística**. Taubaté: UNI-TAU, 2014.
- REIS, V; CONTRATE, D. **Emprego da termografia na inspeção preditiva**, Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, 2014.
- RICHTER, I. **Atingindo zero tempo de inatividade não planejado com análise de manutenção preditiva**. In: Industry 4.0 Insights, [S.l.], 3 de junho. 2019
- SOEIRO, Marco Vinícius de Abreu; OLIVIO, Amauri; LUCATO, André Vicente Ricco. **Gestão da manutenção**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
- TELES, Jhonata. **Manutenção Preditiva: O que é e como ela pode te ajudar**. 2017.



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

3

**USO DE LOCAL BINARY PATTERN COMO
EXTRATOR DE CARACTERÍSTICAS PARA
CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE TEXTURAS DE
CASCO DE TARTARUGAS MARINHAS**

*USE OF LOCAL BINARY PATTERN AS A FEATURE EXTRACTOR
FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF SEA TURTLE SHELL
TEXTURES*

Amanda Pereira Sampaio¹
Cristina Klippel Dominicini²
Karin Satie Komati²

¹ Bacharel em Sistemas de Informação, Instituto Federal do Espírito Santo, Serra-Vitória

² Doutora em Ciência da Computação, Instituto Federal do Espírito Santo, Serra-Vitória



[10.29327/5407566.1-3](https://doi.org/10.29327/5407566.1-3)

Resumo

Nos anos 80, começou o levantamento sobre tartarugas marinhas no litoral brasileiro, que identificou cinco espécies ameaçadas ou vulneráveis. O crescimento da quantidade de tartarugas marinhas somado à baixa quantidade de especialistas disponíveis gerou a necessidade de um sistema de informação colaborativo para auxiliar no monitoramento dessas espécies. O sistema deve possibilitar a classificação automática das espécies a partir do envio de fotos de tartarugas por usuários leigos, usando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) e reconhecimento de padrões para classificação das espécies de animais que possuem em sua formação corpórea, um padrão de cor e textura distintos. Esse sistema contempla as seguintes etapas: (i) extração de características das imagens, que gera um vetor de características; e (ii) classificação, onde o reconhecimento de padrões identifica, por exemplo, qual é a espécie da tartaruga, baseada nas características extraídas. Este trabalho usa técnicas de extração de características baseadas em textura: o Padrão Binário Local, o Padrão Binário Local Invariante à Rotação, e o Padrão Binário Local Uniforme, aplicados aos espaços de cores RGB e YCbCr. Optou-se pelos métodos de classificação K-vizinhos mais próximos (k-NN) e Máquina de Vetores de Suporte (MVS), além da técnica *K-fold* para testes. O método de LBP com RGB combinado com k-NN apresentou piores resultados, enquanto o método LBP com YCbCr aliado ao classificador MVS apresentou os melhores resultados.

Palavras-chave: Padrão binário local, Máquina de vetores de suporte, K vizinhos mais próximos.

Abstract

In the 1980s, a survey of sea turtles began on the Brazilian coast, which identified five threatened or vulnerable species. The growth in the number of sea turtles combined with the low number of available specialists demanded a collaborative information system to assist in monitoring these species. The system must enable the automatic classification of species based on photos of turtles by non-specialist users, using Digital Image Processing (DIP) techniques and pattern recognition to classify species of animals that have, in their body formation, a distinct color pattern and texture. This system must include the following steps: (i) feature extraction from images, which generates a feature vector; and (ii) classification, where pattern recognition identifies, for example, the species, based on the extracted characteristics. This work uses texture-based feature extraction techniques: the Local Binary Pattern, the Rotation-Invariant Local Binary Pattern, and the Uniform Local Binary Pattern, applied to the RGB and YCbCr color spaces. We chose the K-Nearest Neighbors (k-NN) and Support Vector Machine (SVM) classification methods, in addition to the K-fold technique for testing. The LBP method with RGB combined with k-NN presented the worst results, while the LBP method with YCbCr combined with the SVM classifier presented the best results.

Keywords: Local Binary Pattern, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors.



1. INTRODUÇÃO

Dentre as sete espécies de tartarugas marinhas existentes no mundo, cinco são encontradas no Brasil, e todas estão listadas como ameaçadas ou vulneráveis pela IUCN (União Mundial para a Conservação da Natureza – *International Union for Conservation of Nature*) (IUCN, 2017). As espécies são: *Caretta caretta* (nomes comuns: Cabeçuda ou Mestiça), a *Chelonia mydas* (nomes comuns: Verde ou Aruanã), a *Eretmochelys imbricata* (nomes comuns: de pente ou legítima), a *Dermochelys coriacea* (nomes comuns: de couro ou gigante) a *Lepidochelys olivacea* (nome comum: Oliva). As duas primeiras espécies são mostradas na Figura 1.



Figura 1. *Caretta caretta* (esquerda) e *Chelonia mydas* (direita).

Fonte: Paixão (2015).

Além disso, tartarugas marinhas possuem um ciclo de vida longo e complexo, no qual a vida adulta e sexual destes animais se inicia após os 25 (vinte e cinco) anos, dificultando o desenvolvimento da espécie. Na busca pela conservação da biodiversidade marinha, várias ações são realizadas pelo projeto Tamar-ICMBio (TAMAR-CIMBIO, 2024) — Programa Nacional de Conservação de Tartarugas Marinhas vinculado à Diretoria de Biodiversidade do Instituto Chico Mendes da Biodiversidade (ICMBio) — tal como descrito no “Plano de Ação Nacional para Conservação das Tartarugas Marinhas” (SANTOS *et al.*, 2011).

O levantamento sobre informações de tartarugas marinhas no Brasil começou no início dos anos 80, identificando as áreas de reprodução no litoral e confirmando a ocorrência das cinco espécies que estão no litoral brasileiro. Os primeiros centros de pesquisa, sensibilização e educação ambiental foram então criados, nas principais áreas de reprodução. Com o passar dos anos o Tamar-ICMBio melhorou e aumentou o levantamento de informações fazendo uma coleta de dados sistematizada, através da marcação das fêmeas, parâmetros de incubação dos ninhos e o comportamento na fase de desova, mapeando o ciclo de vida destes animais. O rastreamento por satélite revelou suas rotas e comportamento no mar; estudos genéticos demonstraram as diferenças entre as populações; e assim, um novo sistema de informação integrado foi criado e desenvolvido (SITAMAR, 2017).

Durante o trabalho, os pesquisadores chegaram à conclusão de que qualquer plano para a conservação das tartarugas marinhas precisaria da participação das comunidades costeiras, que possuem maior contato com tartarugas marinhas. Para aumentar a abrangência das pesquisas de conservação marinha, uma possibilidade seria permitir que elas pudessem enviar dados para a base de dados do projeto Tamar. Entretanto, as informações devem ser validadas por um especialista antes de serem inseridas na base de informações para garantir a consistência de dados. Para garantir a escalabilidade, um sistema automático pode auxiliar o trabalho dos especialistas na classificação das espécies de tar-

tarugas, pois os especialistas poderiam classificar apenas os resultados nos quais o sistema indicasse baixa certeza. Conforme Paixão e Komati (2016), é possível utilizar técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) e reconhecimento de padrões para este fim.

O método de classificação de espécies usado pelos biólogos é baseado na contagem de escamas dos cascos das tartarugas aliado ao formato de sua cabeça. Já para um sistema automático, em geral, usa-se descritores de características categorizadas em: descritores de cor, descritores de textura e descritores de forma (TORRES; FALCÃO, 2008). Neste trabalho são investigadas três técnicas de extração de características baseadas em textura: a versão original do *Local Binary Pattern* (LBP) (OJALA; PIETIKÄINEN; HARWOOD, 1996) e duas variações. Além disso, o extrator foi utilizado em dois espaços de cores, RGB e o YCbCr. Esta decisão é baseada na pressuposição decorrente da observação de que cada espécie de tartaruga marinha possui em seu casco um padrão de textura e cor diferenciados. Além disso, comparou-se dois métodos de classificação, separadamente e independentemente, o K-vizinhos mais próximos (KNN ou k-NN) (COVER; HART, 1967) e Máquina de Vetores de Suporte (SVM, do inglês: *Support Vector Machine*) (BOSER; GUYON; VAPNIK, 1992).

O objetivo geral deste trabalho é investigar a viabilidade de extratores de características de textura baseados em LBP para o problema de classificação de texturas dos cascos das cinco espécies das tartarugas marinhas encontradas no litoral brasileiro. Como objetivos específicos, este trabalho propõe: (i) comparar técnicas de extração de características baseados em LBP e duas de suas variações: a invariante à rotação (denominada por LBP^{ri}) e a invariante à rotação com Padrões “Uniforme” (denominada por LBP^{riu2}) avaliando sua precisão, qualidade e limitações; (ii) comparar técnicas de extração de características em dois diferentes espaços de cores, RGB e YCbCr, avaliando sua precisão, qualidade e limitações; comparar o resultados de dois classificadores, um linear (SVM) e outro não-linear (KNN), com as características do LBP e suas variações com dois diferentes espaços de cores, avaliando sua precisão, qualidade e limitações; e verificar o desempenho dos classificadores propostos por meio da técnica *k-folds* de validação cruzada (REFAEILZADEH; TANG; LIU, 2009).

Este trabalho está dividido em cinco seções. A seção 2 apresenta a metodologia. Em seguida, a seção 3 traz o desenvolvimento do sistema, com detalhes de codificação em Python. A seção 4 traz os experimentos, os resultados e a discussão dos resultados alcançados. Por fim, na seção 5 são tecidas as considerações finais e os trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

Um sistema de classificação automática tem algumas etapas básicas. A primeira etapa é a aquisição, no qual, a imagem física é transformada em uma imagem digital através de um sensor, por exemplo, uma câmera fotográfica. Depois, acontece o pré-processamento, onde aplicam-se técnicas de PDI na imagem para assegurar que ela satisfaça algumas condições, tais como redução de ruídos, aumento de contraste e seleção de regiões de interesse específicas. A próxima etapa é a extração de características, que consiste em extrair atributos das imagens, transformando a informação da imagem em uma assinatura - o vetor de características. Finalmente, a última etapa é a classificação, onde o reconhecimento de padrões é a tarefa que identifica, por exemplo, qual é a espécie da tartaruga, baseada nas características extraídas (CHACON *et al.*, 2011).

Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de classificador de espécies de tartarugas, cujo objetivo é classificar as espécies de tartarugas utilizando recortes de fotos de

cascos de tartarugas. Computa-se os vetores de características a partir das imagens da base de treinamento, que serão usados para treinar os classificadores. Então, de forma semelhante, às imagens de teste também serão convertidas para vetores de características, que posteriormente serão categorizadas pelo classificadores treinados anteriormente.

O trabalho apresentado é uma continuação do trabalho desenvolvido por Wdnei Ribeiro da Paixão (PAIXÃO; KOMATI, 2016), que utilizava apenas descritores baseados em características de cor para as texturas dos cascos de tartarugas. O diferencial desta proposta é o uso de descritores baseados em textura e cor. A base desse sistema foi adaptada de Paixão e Komati (2016), por ser uma base composta por recortes de cascos de imagens de tartarugas, com o intuito de comparar as técnicas usadas pelos trabalhos. São 90 (noventa) recortes, onde 18 (dezoito) recortes para cada espécie de tartaruga marinha. Cada recorte tem 80×80 pixels de tamanho. A etapa de pré-processamento não foi desenvolvida, pois as imagens da base de dados são de boa qualidade e sem ruído.

Neste trabalho, optou-se por investigar o algoritmo *Local Binary Pattern* (LBP) (OJALA; PIETIKÄINEN; HARWOOD, 1996) e duas variações (LBP^{ri} e LBP^{riu2}), aplicadas a cada canal de cor de dois diferentes espaços de cores (RGB e YCbCr). Neste trabalho são usados dois espaços de cor, RGB (vermelho, verde e azul) e YCbCr (luminância, diferença de azul e diferença de vermelho). Mesmo sendo dois padrões que podem representar cores a partir de três vetores, estes são diferentes entre si. RGB é representado por três cores primárias, que juntas formam outras cores, mas que não demonstram de forma clara a intensidade da luminância. Por outro lado, YCbCr representa cada cor num espaço uniforme, mas não as suas reais magnitudes, e é estrito a cores com a mesma luminância.

O LBP codifica os dados dos pixels em imagens texturizadas e monocromáticas. As imagens são percorridas pixel a pixel computando o valor do pixel central. A Figura 2 mostra as etapas: a imagem de entrada é a imagem original colorida, depois a imagem convertida em escala de cinza, a imagem resultante do operador LBP e, por último, o histograma da textura.

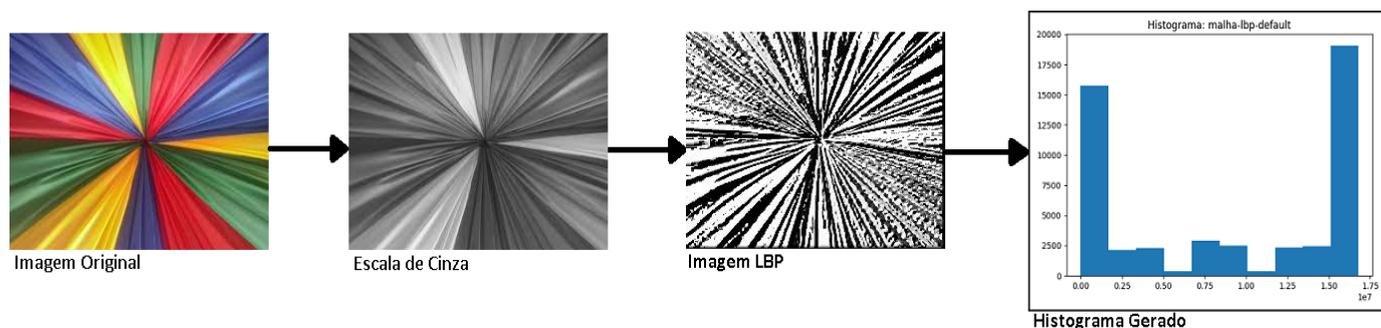


Figura 2. Texturas diferentes utilizando LBP.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

O cálculo do operador de textura em escala de cinza e rotação invariante inicia-se definindo uma vizinhança P com uma textura T de uma imagem em níveis de cinza de P ($P > 1$) pixels de imagem:

$$T = t(g_c, g_0, \dots, g_{P-1}) \tag{1}$$

onde g_c corresponde ao valor de cinza do pixel central da vizinhança local e g_p ($P = 0, \dots, P - 1$) correspondem aos valores de cinza de P igualmente espaçado em um círculo de raio R ($R > 0$) que formam um conjunto de vizinhança circularmente simétrico.

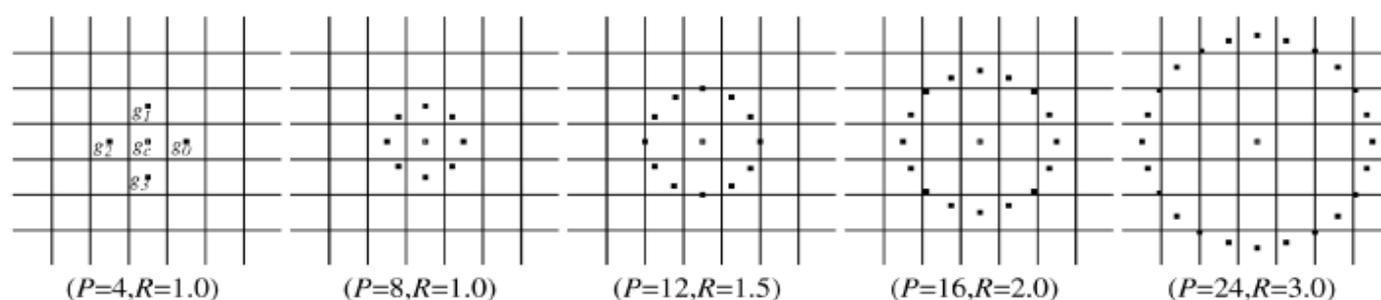


Figura 3. Conjunto de vizinhança simétrica circular para diferentes (P, R).

Fonte: Ojala, Pietikainen e Maenpaa (2002).

A Figura 3 ilustra conjuntos de vizinhança simétrica circular para vários (P, R). Os valores dos vizinhos que não caem exatamente no centro do pixel são estimados por interpolação. O nome “Padrão Binário Local” reflete a funcionalidade do operador, ou seja, uma vizinhança local é limitada para o valor cinza do pixel central em um padrão binário. O operador $LBP_{P,R}$ é, por definição, invariante a qualquer transformação monotônica da escala de cinza, isto é, desde que a ordem dos valores de cinza na imagem permaneça igual, a saída do operador $LBP_{P,R}$ permanece constante. Na prática isso significa que o operador de padrão local ($LBP_{P,R}$) descreve os relacionamentos entre um pixel central (g_c) e seus pixels vizinhos (g_1, \dots, g_{P-1}).

O operador convencional LBP possui algumas limitações, pois produz um histograma grande e sensível à rotação da imagem, possui um suporte espacial pequeno, perde a informação da textura local, e é bastante sensível ao ruído da imagem. Neste trabalho, exploramos dois métodos invariantes a rotação que resolvem alguns dos problemas citados, conforme proposto por Ojala, Pietikainen e Maenpaa (2002): LBP^{ri} , que produz histogramas com até 36 valores possíveis para o pixel central, diferente do LBP básico com 2^P valores possíveis; e a variação LBP^{riu2} para melhoria da invariância de rotação com Padrões “Uniformes” e quantificação mais fina do espaço angular do que o método LBP^{ri} .

No sistema, primeiramente é feita a separação dos canais de cores dos recortes dos cascos, e conseqüentemente há 3 (três) matrizes para cada canal de cor. A partir disso, aplicamos o algoritmo LBP (raio igual a 3 e 8 vizinhos) para cada uma das matrizes, assim para cada imagem colorida de entrada, separa-se em três matrizes e cada matriz gera uma imagem texturizada LBP. É importante ressaltar que esta parte se diferencia da proposta clássica do LBP, que converte a imagem em escala de cinza e aplica o operador LBP. Neste trabalho, não se faz a conversão em escala de cinza, isto é, não se perde a informação de cor, e aplica-se o operador LBP nos três canais de cada espaço de cor. Assim, houve uma diferença nos passos originais do LBP, da seguinte forma: (1) Carregar uma imagem colorida. (2) Separar os canais de cores. (3) Calcular a imagem de Textura utilizando o LBP. (4) Calcular o histograma do LBP para cada canal. (5) Concatenar os vetores de características de cada canal.

Uma vez que a imagem textura LBP é calculada, gera-se o histograma desta imagem textura. Os valores dos bits da imagem de textura do LBP estão entre 0 e 255, então o tamanho do vetor de características é 256 para cada canal de cor, como os vetores referentes a cada canal de cor são concatenados, o vetor possui no total 768 itens. O vetor de características produzido alimentará um classificador, que então determinará a classe do item. A geração dos vetores de características é aplicado aos canais RGB e o aos canais YCbCr. A extração é feita com o LBP e com duas variações do mesmo. Ao fim, os vetores de características alimentam os classificadores KNN (COVER; HART, 1967) e SVM (BOSER; GUYON;

VAPNIK, 1992). O resultado do classificador é associar uma imagem com uma classe, sendo a classe a espécie de tartarugas, para este trabalho.

O sistema desenvolvido possui doze variações de técnicas, sendo duas variações de espaço de cores, três variações de extração de características e dois classificadores ($2 \times 3 \times 2 = 12$), ilustrado na Figura 4. Para validação de sistemas de classificação usou-se a Validação Cruzada, uma técnica para avaliar a capacidade de generalização de um modelo, a partir de um conjunto de dados. O conceito central das técnicas de validação cruzada é o particionamento do conjunto de dados em subconjuntos mutuamente exclusivos, e posteriormente, utiliza-se alguns destes subconjuntos para a estimação dos parâmetros do modelo (dados de treinamento) e o restante dos subconjuntos (dados de validação) são empregados nos testes (REFAEILZADEH; TANG; LIU, 2009). Busca-se estimar o quão preciso é o sistema na prática, ou seja, o seu desempenho para um novo conjunto de dados.

Nos experimentos, usou-se a técnica de *K-fold* com $k = 10$, logo, para cada uma das doze variações do sistema, os testes foram repetidos dez vezes, totalizando 120 (cento e vinte) execuções. Portanto, para cada variação do sistema, as dez repetições referentes ao *K-fold* são unidas pela soma, e logo, analisa-se apenas uma única matriz de confusão por variação do sistema. Ao final dos experimentos, têm-se doze conjuntos de métricas estatísticas: as matrizes de confusão e a acurácia do sistema.

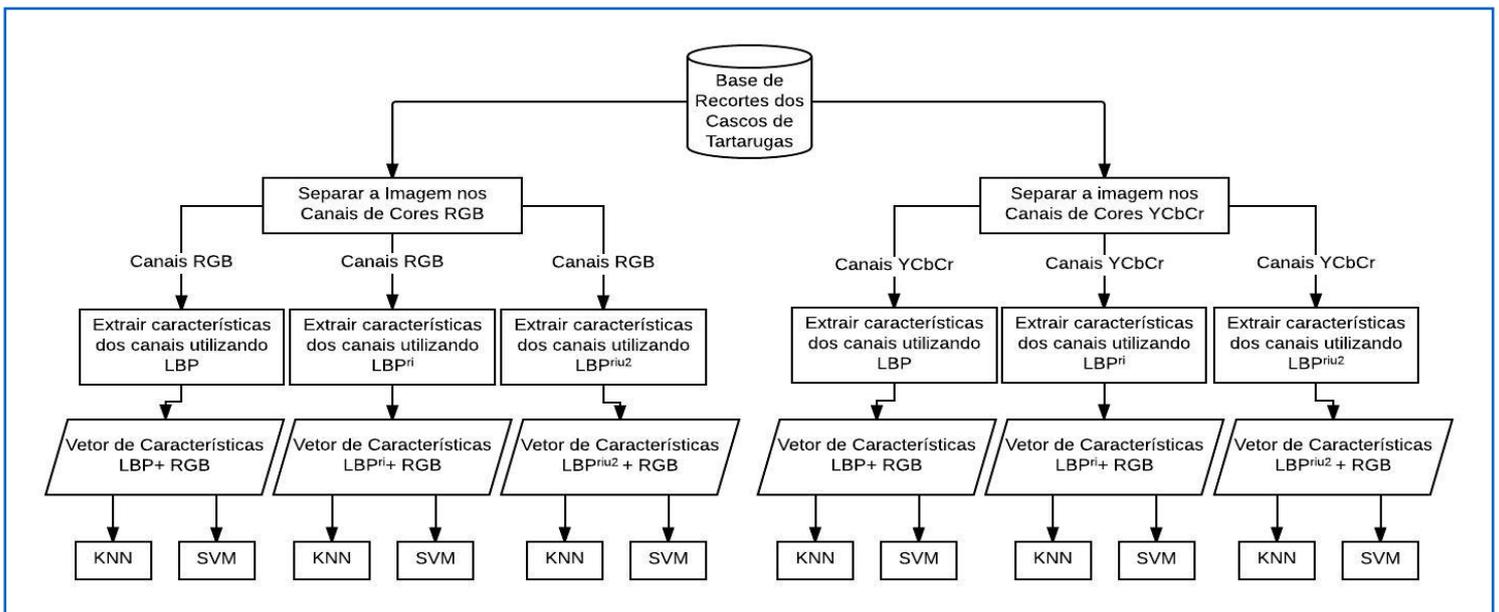


Figura 4. Diagrama esquemático das variações do sistema testado.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

3. DESENVOLVIMENTO

O sistema foi desenvolvido na linguagem Python, utilizando o Scipy (SciPy Developers, 2017) para tratamento dos dados e algoritmos matemáticos, e a biblioteca *SciKit-learn* (PEDREGOSA et al., 2011) para os algoritmos de Aprendizado de Máquina. SciPy é uma coleção de algoritmos matemáticos e funções construídas sobre a extensão Numpy (WALT; COLBERT; VAROQUAUX, 2011) do Python. A biblioteca *open source* de Python voltada a Aprendizado de Máquina é a união do Numpy, Scipy, Matplotlib. No projeto, foram utilizados a ferramenta de validação cruzada *K-fold*, os extratores de características LBP,

LBP^{ri} e LBP^{riu2} do módulo (WALT et al., 2014), os classificadores SVM e KNN.

O algoritmo de LBP já se encontra na biblioteca “scikit-image”. A configuração do LBP_{P,R} precisa da imagem (“img”), do número de pontos P representado pela variável “n_points”, o tamanho do raio R representado pela variável “radius”, e o tipo do LBP representado pela variável “lbp”. A quantidade de bins utilizada para calcular o histograma foi de 256 bins. Foram usados os seguintes algoritmos do método “local_binary_pattern”: ‘default’, ‘ror’ e ‘uniform’, por serem os algoritmos tanto invariante a rotação quanto a escala de cinza.

```

1 from sklearn import svm
2 from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
3
4 def accuracy_KNN(lista, target, file, nome, save = False, random = True,
5     kfold_update=False, lbp='default'):
6     clf = KNeighborsClassifier(n_neighbors=5, weights='uniform', algorithm=
7         'ball_tree')
8     return kfold(clf, lista, target, file, 'KNN', nome, random, save=save,
9         kfold_update=kfold_update, lbp=lbp)
10
11 def accuracy_SVM(lista, target, file, nome, save=False, random = True,
12     kfold_update=False, lbp='default'):
13     clf = svm.SVC(probability=True, class_weight='balanced', C=1, kernel='
14         linear')
15     return kfold(clf, lista, target, file, 'SVM', nome, random, save = save
16         , kfold_update=kfold_update, lbp=lbp)

```

Figura 5. Algoritmo de Classificação.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A biblioteca Scipy possui funções para os classificadores deste trabalho: KNN e SVM. Para fácil uso e reuso de código foram criadas dois métodos “accuracy_KNN” e “accuracy_SVM”, conforme Figura 5. No método “accuracy_KNN” é instanciado o objeto do classificador “KNN” utilizado com as suas configurações, e a quantidade de vizinhos utilizada neste projeto foi de 5. No método “accuracy_SVM” também encontrado na Figura 5. é instanciado o objeto do classificador “SVM” com as suas configurações. As configurações permitidas para esse classificador são um pouco diferentes do anterior, é definido se permite a estimativa probabilística (“probability”), se as entradas possuem pesos (“class_weight”), e qual o algoritmo utilizado (“kernel”). O algoritmo utilizado foi a forma linear do “svm”.

4. EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A extração de características foi feita utilizando três formas: $LBP_{P,R}$, $LBP_{P,R}^{ri}$ e $LBP_{P,R}^{riu2}$, com dois espaços de cores, RGB e YCbCr. As características são a entrada do classificador, neste trabalho foram usados o KNN e o SVM. A Figura 6 representa o processo das variações dos experimentos, ao final, há doze matrizes de confusão. No projeto, foi utilizada a técnica de validação cruzada *k-fold* com $k = 10$, assim, é realizada uma análise sobre a variação completa dos dados, pois os dados de treinamento e teste são escolhidos de forma aleatória fazendo uma variação no número de imagens usadas para cada classe no conjunto de treinamento. Nas seções posteriores, os resultados serão apresentados de acordo

com quatro variações: extração de características, espaço de cores e classificador, e ainda por espécie de tartaruga, avaliando as melhores taxas de acerto.

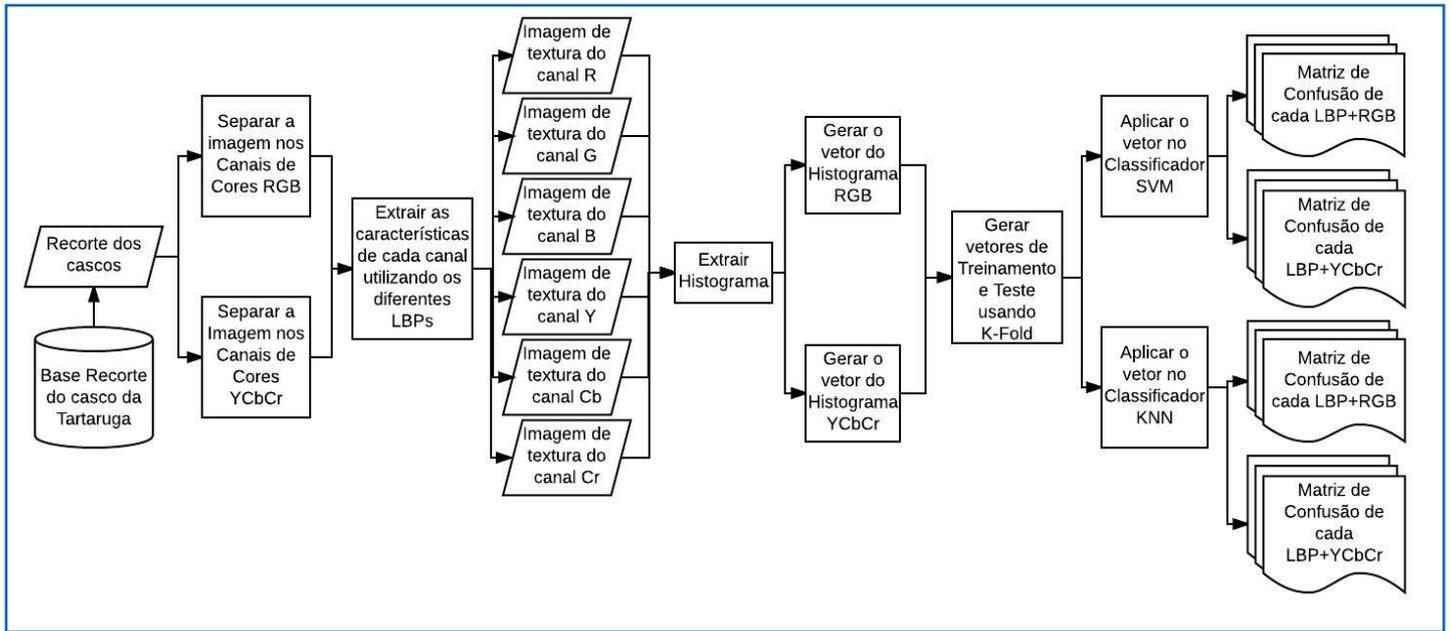


Figura 6. Diagrama com o funcionamento geral.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.1 Resultados de acordo com o extrator de características

Esta seção apresenta os resultados das doze variações do sistema. Calculou-se a exatidão global das dez matrizes de confusão, conforme resumo da Tabela 1. Os resultados em negrito são os melhores para cada extrator de características. Com a aplicação do $LPB_{P,R}^{ri}$, todas as variações melhoraram ou se mantiveram iguais (variação com RGB e SVM) com relação aos resultados utilizando o LBP. Quando foi aplicado o $LPB_{P,R}^{riu2}$, todos os resultados das exatidão global foram melhores que os resultados do LBP padrão. Já a comparação com a exatidão global do $LPB_{P,R}^{ri}$ e do $LPB_{P,R}^{riu2}$ teve melhoras e piores. O $LPB_{P,R}^{riu2}$ melhorou nos dois casos com o uso do SVM. Com o KNN, o resultado se manteve com YCbCr e piorou com o RGB.

Extrator de Características	Espaço de Cor	Classificador	Exatidão Global.
$LPB_{P,R}^{ri}$	RGB	SVM	83,33 %
		KNN	60,00%
	YCbCr	SVM	73,33%
		KNN	58,89%
$LPB_{P,R}^{riu2}$	RGB	SVM	83,33%
		KNN	72,22%
	YCbCr	SVM	92,22 %
		KNN	71,11%

$LPB_{P,R}^{riu2}$	RGB	SVM	86, 67%
		KNN	67, 78%
	YCbCr	SVM	93,33 %
		KNN	71, 11%

Tabela 1 – Valores de acertos para cada tipo de LBP

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

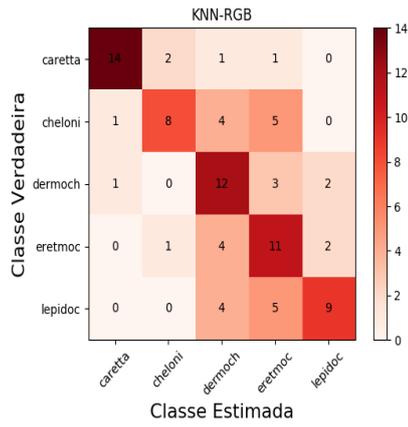
4.2 Resultados de acordo com a espécie de tartaruga

Esta seção detalha os resultados apresentados na seção anterior, com as matrizes de confusão, possibilitando avaliar como os resultados variaram de acordo com a espécie de tartaruga. Para as matrizes e gráficos, adotou-se um apelido mais curto para as espécies de tartarugas: *Caretta caretta* (caretta), *Chelonia mydas* (cheloni), *Dermochelys coriacea* (dermoch), *Eretmochelys imbricata* (eretmoc) e *Lepidochelys olivacea* (lepidoc).

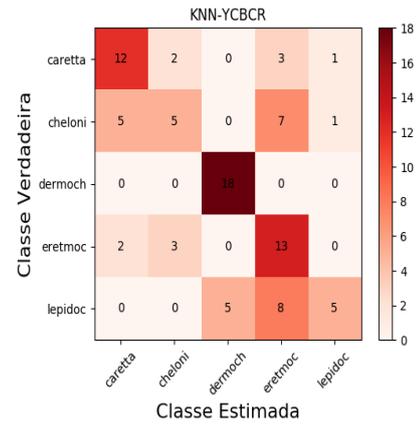
As Figuras 7, 8 e 9 ilustram as matrizes de confusão obtidas pelo $k=fold$ 10 para as técnicas de LBP. Quanto mais escuro for a célula da matriz, maior o seu valor, assim a matriz com melhor resultado possui a diagonal principal com maior quantidade de tons escuros, e conseqüentemente, o restante da matriz com tons mais claros. Pelas matrizes de confusão é possível verificar que há muita confusão entre as classes com KNN, pois há muitos valores altos fora da diagonal principal. Situação que melhora com SVM. Da mesma forma que o LBP, no $LPB_{P,R}^{ri}$ há muita confusão entre as classes com o KNN, mas esta se ameniza muito com o SVM. A mesma situação é verificada com o uso do $LPB_{P,R}^{riu2}$.

De uma outra forma, apresenta-se os resultados de acurácia nos gráficos em rede das Figuras 10, 11 e 12 para os resultados das três técnicas de LBP. Neste gráfico cada ponta da rede está associada a uma espécie de tartaruga e quanto mais próximo do valor máximo de 0,2 (melhor resultado do extrator/classificador/espaco de cores). Logo, o melhor resultado seria um pentágono no qual todos os vértices estivessem no extremo, como é o maior pentágono em cinza que serve de eixo.

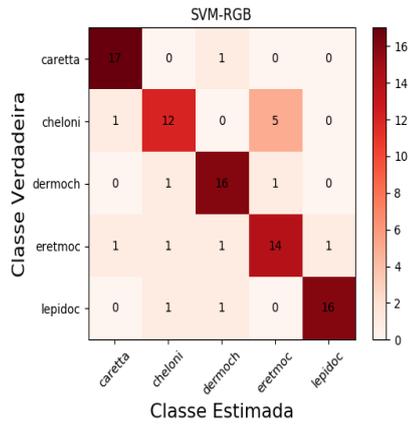
O melhor resultado é de 0,2, pois é o valor referente ao acerto de 18/90, há 90 (noventa) recortes na base de dados, com 18 (dezoito) imagens de cada espécie de tartaruga. É interessante reiterar que as áreas das figuras dos pentágonos são menores para os resultados obtidos pelo uso do LBP, logo, no geral tem resultados piores que as variações do LBP. Na Figura 10 é possível verificar que a curva amarela, referente à combinação YCbCr e KNN encosta no ponto extremo da espécie dermoch, mesmo esta combinação tendo a pior exatidão global. Neste mesmo gráfico, pode-se verificar que o pentágono de maior área é a curva vermelha, da combinação RGB e SVM. Analisando o gráfico dos resultados do $LPB_{P,R}^{ri}$ (Figura 11), o pentágono de maior área é a curva verde, da combinação YCbCr com SVM, que alcança o máximo para a classe eretmoc. Observa-se novamente que a curva amarela está no extremo da espécie dermoch, e a curva vermelha (RGB com SVM) está ligeiramente mais perto do extremos na lepidoc.



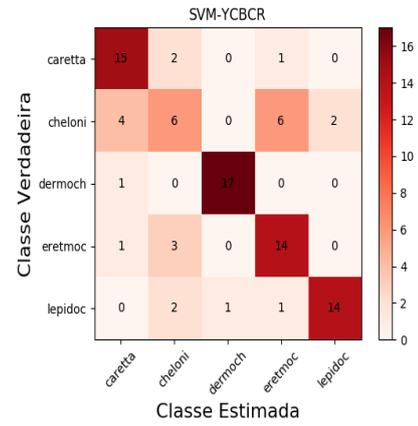
(a) RGB com KNN (60,00%)



(b) YCbCr com KNN (58,89%)



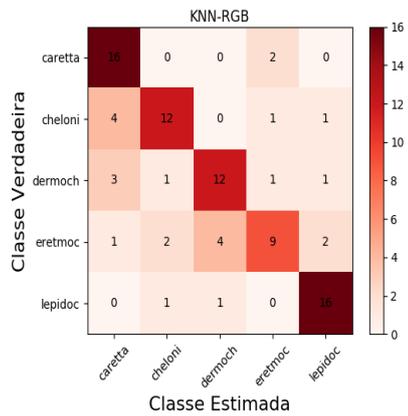
(c) RGB com SVM (83,33%)



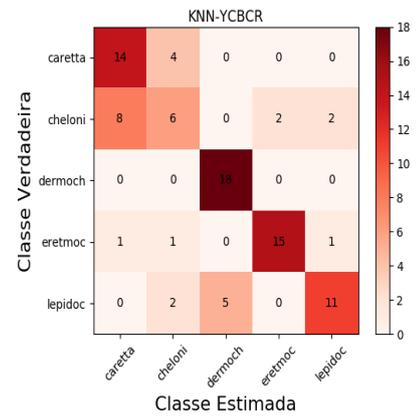
(d) YCbCr com SVM (73,33%)

Figura 7. Matrizes de Confusão do LPB_{P.R.}

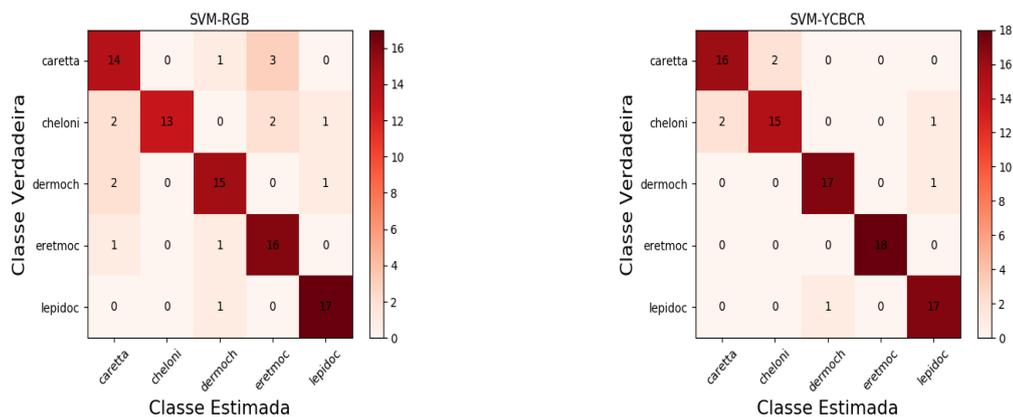
Fonte: Elaborado pela autora (2017).



(a) RGB com KNN (72,22%)



(b) YCbCr com KNN (71,11%)

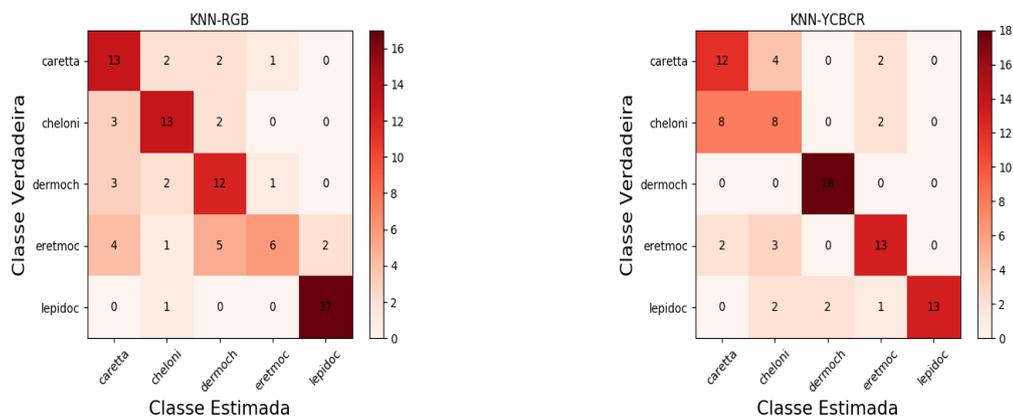


(c) RGB com SVM (83,33%)

(d) YCbCr com SVM (92,22%)

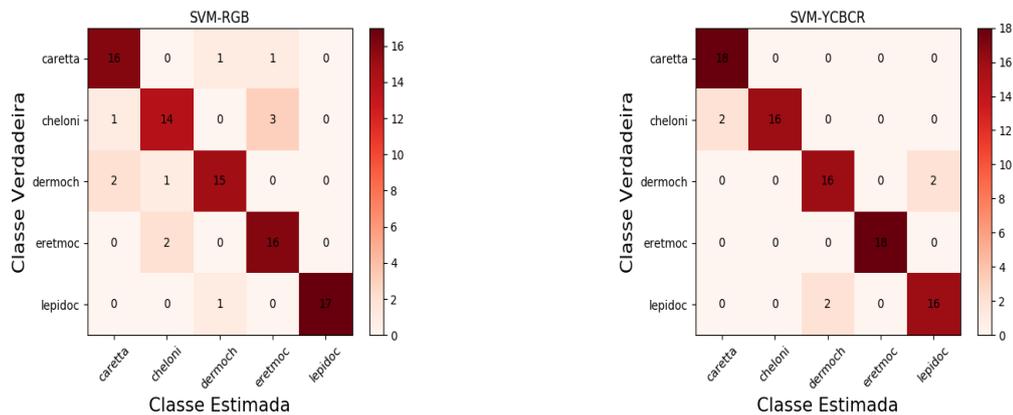
Figura 8. Matrizes de Confusão do $LPB_{P,R}^{ri}$.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).



(a) RGB com KNN (67,78%)

(b) YCbCr com KNN (71,11%)



(c) RGB com SVM (86,67%)

(d) YCbCr com SVM (93,33%)

Figura 9. Matrizes de Confusão do $LPB_{P,R}^{riu2}$.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

No gráfico dos resultados do $LPB_{P,R}^{riu2}$ (Figura 12), o pentágono de maior área continua sendo a curva verde, da combinação YCbCr com SVM, e de novo está no ponto extremo da eretmoc. De novo, a curva amarela está no extremo da espécie dermoch, e as curvas vermelhas (RGB com SVM) e azul (RGB com KNN) estão ligeiramente mais perto dos extremos na lepidoc. A Figura 13 apresenta as métricas plotadas nos gráficos em rede. Cada quadro contém as taxas de acerto das três variações do LBP, cada coluna representa a combina-

ção de espaço de cores e classificador, e em cada linha encontram-se os resultados por tartaruga.

A marcação em amarelo-vivo são os melhores resultados, as em laranja são os piores resultados, em bege são os melhores resultados do LBP e em cinza é o pior resultado do tipo do LBP. É possível constatar o que já foi analisado nos gráficos em rede, para a classe dermoch o resultado perfeito sempre é da combinação YCbCr com KNN, independente do extrator de características. E que o resultado de 0,2 para a classe eretmoc é para a combinação YCbCr com SVM e extrator variante do LBP. A classe lepidoc apresenta melhores resultados na combinação RGB com variante do LBP.

No geral, a combinação $LPB_{P,R}^{riu2}$, YCbCr e SVM apresentou os melhores resultados. Mesmo avaliando por classe de tartaruga, seus resultados foram os melhores em três das cinco classes. Nas duas nas quais não apresentaram os melhores resultados, o valor 0,178 representa que acertou 16 das 18 imagens.

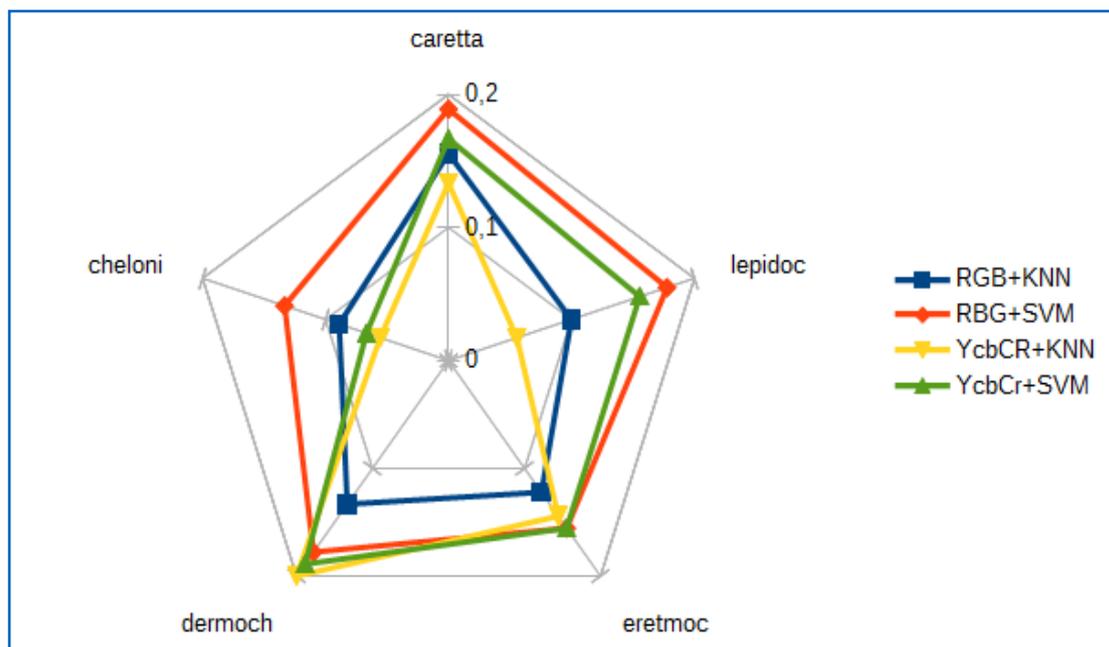


Figura 10. Gráfico em rede dos resultados do $LPB_{P,R}^{riu2}$, por tartaruga.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

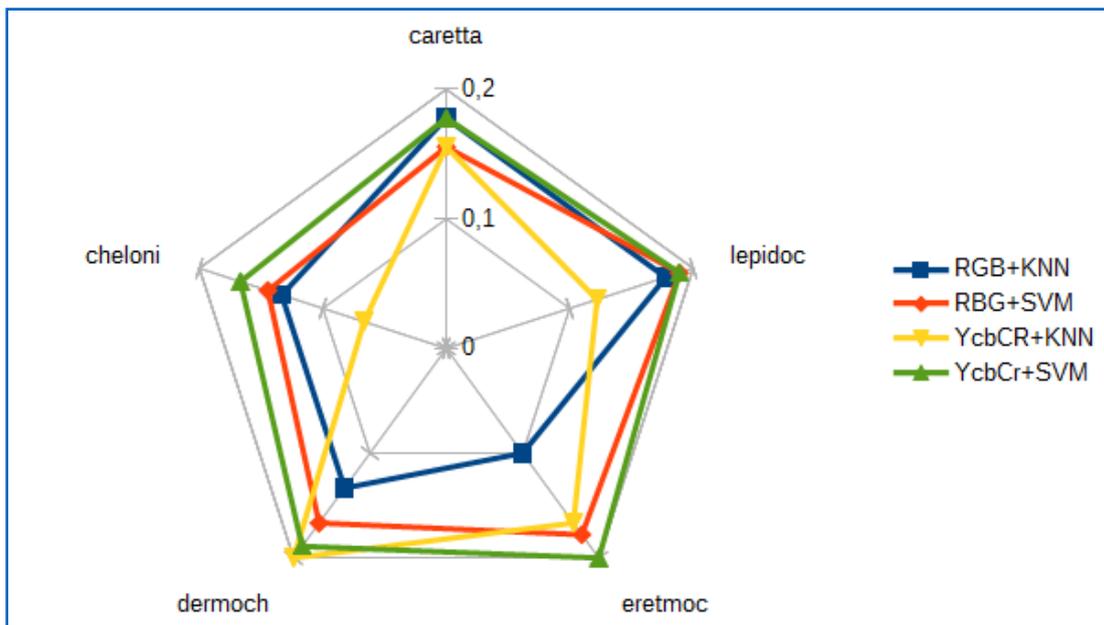


Figura 11. Gráfico em rede dos resultados do $LPB_{P,R}^{ri}$, por tartaruga.
 Fonte: Elaborado pela autora (2017).

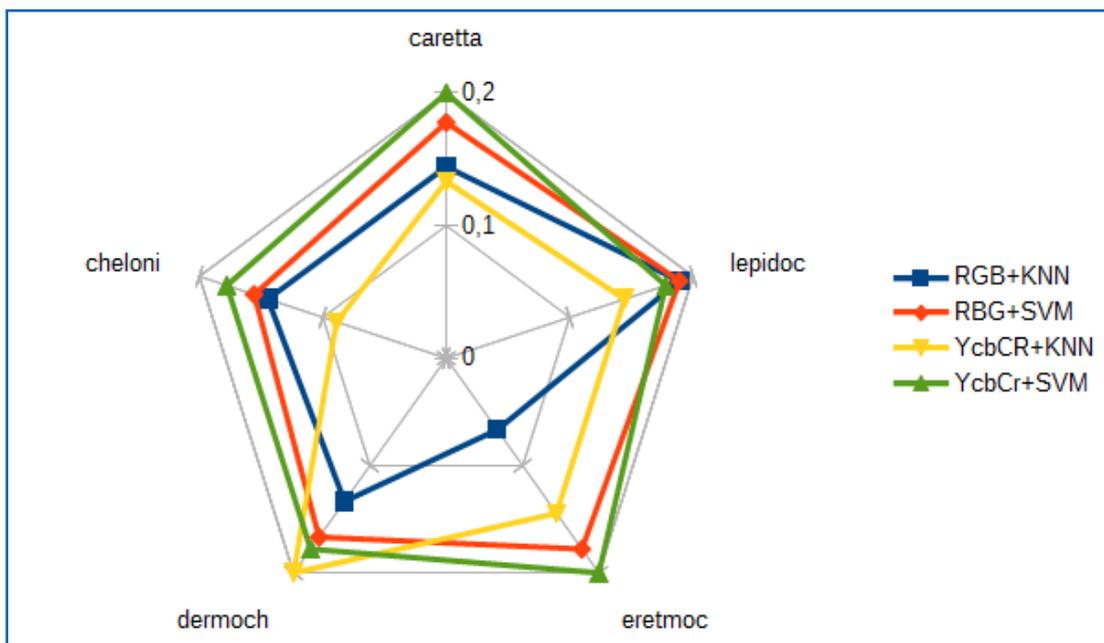


Figura 12. Gráfico em rede dos resultados do $LPB_{P,R}^{riu2}$, por tartaruga.
 Fonte: Elaborado pela autora (2017).

LBP	RGB+KNN	RBG+SVM	YcbCR+KNN	YcbCr+SVM
caretta	0,156	0,189	0,133	0,167
cheloni	0,089	0,133	0,056	0,067
dermoch	0,133	0,178	0,200	0,189
eretmoc	0,122	0,156	0,144	0,156
lepidoc	0,100	0,178	0,056	0,156
	0,600	0,833	0,589	0,733
LBP^r	RGB+KNN	RBG+SVM	YcbCR+KNN	YcbCr+SVM
caretta	0,178	0,156	0,156	0,178
cheloni	0,133	0,144	0,067	0,167
dermoch	0,133	0,167	0,200	0,189
eretmoc	0,100	0,178	0,167	0,200
lepidoc	0,178	0,189	0,122	0,189
	0,722	0,833	0,711	0,922
LBP^{r2}	RGB+KNN	RBG+SVM	YcbCR+KNN	YcbCr+SVM
caretta	0,144	0,178	0,133	0,200
cheloni	0,144	0,156	0,089	0,178
dermoch	0,133	0,167	0,200	0,178
eretmoc	0,067	0,178	0,144	0,200
lepidoc	0,189	0,189	0,144	0,178
	0,678	0,867	0,711	0,933

Figura 13. Taxas de acerto por classe de tartaruga e combinação tipo de LBP, classificador e espaço de cores.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.3 Resultados de acordo com o classificador

Esta seção analisa os mesmos resultados da Tabela 1 da Seção 4.1 sob o ponto de vista do classificador, apresentados na Tabela 2, ordenados em ordem crescente de acordo com o valor da exatidão global, a última coluna. A combinação de pior desempenho para o SVM (73,33%) foi superior à melhor combinação para o KNN (72,22%). O SVM classifica melhor os resultados com o espaço de cores YCbCr, com variação de LBP que seja invariante à rotação, o qual podemos inferir que são vetores linearmente separáveis. O KNN também apresenta melhores resultados com versão de LBP que seja invariante à rotação, mas não apresenta padrão quanto ao espaço de cores.

Classificador	Extrator de Característica	Espaço de Cores	Exatidão Global em ordem crescente
KNN	LBP	YCbCr	58,89
	LBP	RGB	60,00
	$LBP_{P,R}^{riu2}$	RGB	67,78
	$LBP_{P,R}^r$	YCbCr	71,11
	$LBP_{P,R}^{riu2}$	YCbCr	71,11
	$LBP_{P,R}^r$	RGB	72,22

SVM	LBP	YCbCr	73,33
	LBP	RGB	83,33
	$LBP_{P,R}^{ri}$	RGB	83,33
	$LBP_{P,R}^{riu2}$	RGB	86,67
	$LBP_{P,R}^{ri}$	YCbCr	92,22
	$LBP_{P,R}^{riu2}$	YCbCr	93,33

Tabela 2. Exatidão Global de acordo com o classificador.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.4 Comparação dos resultados com trabalho anterior

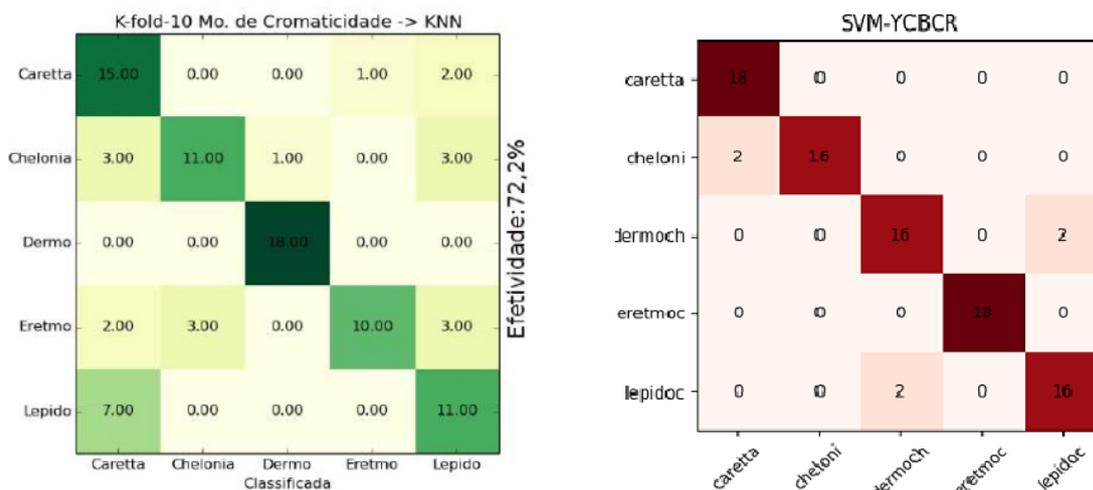
O melhor resultado do trabalho anterior obteve uma taxa de acertos menor do que o melhor resultado no presente trabalho. Em Paixão e Komati (2016) foram utilizados dois extratores de características baseado apenas em cor, Momentos de Cromaticidade e Histogramas de cor, enquanto neste trabalho foram utilizados extratores de baseados em textura combinados com informações de cor contido nas imagens referente a cada canal.

A taxa de acertos mostrada pela matriz de confusão na Figura 14a se refere à combinação de um classificador não-linear (KNN) com o vetor de características gerado pelo algoritmo “Momentos de Cromaticidade”. Essa taxa demonstra como o uso de um descritor de características baseado em cor, torna o conjunto de itens estudados menos linear. Enquanto, a taxa de acertos mostrada pela matriz de confusão na Figura 14b se refere à combinação de um classificador linear (SVM) com o vetor de características gerado pelo algoritmo LBP^{ri2} aplicado ao YCbCr. Essa outra taxa demonstra como o uso de uma combinação de descritores de características, a cor e a textura, torna o conjunto de itens estudados mais linear.

Também houve diferenças consideráveis entre os acertos das classes definidas. A classe “dermoch”, possui a maior assertividade (18 acertos) na solução Momentos de Cromaticidade + KNN (Figura 14a), enquanto a combinação YCbCr+SVM (Figura 14b) obteve um dos menores acerto (16 acertos), o que demonstra que a classe “dermoch” possui características menos lineares comparado às outras classes das matrizes ou que a sua cor o diferencia muito mais do que a textura combinada com cor.

Já a classe “eretmoc” na matriz Momentos de Cromaticidade + KNN (Figura 14a) obteve os menores acertos (10 acertos), enquanto na matriz dos resultados YCbCr+SVM (Figura 14b) não existiram erros, o que demonstra que a classe “eretmoc” possui características mais lineares ou que as características de textura é que o diferenciam das outras classes.

As exatidão global referente a cada matriz também foi diferente, enquanto os resultados da Figura 14a a taxa de acerto foi de 72,20% de acertos, na Figura 14b foi de 93,33%, ao fim mostrando como as informações de textura dos recortes dos cascos de tartarugas possuem muita informação relevante para a classificação correta das tartarugas.



Melhores Resultados (72, 20%) do trabalho de Paixão e Komati (2016).

(b) Melhores Resultados (93,33%) deste trabalho.

Figura 14. Matrizes de Confusão do trabalho atual em comparação com o trabalho de Paixão e Komati (2016).

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram comparados os resultados obtidos do uso de uma técnica de extração de características baseadas em textura aplicada a tipos diferentes de canais de cores e dois diferentes classificadores, com o intuito de analisar qual combinação de extrator de característica e classificador se destaca no reconhecimento das espécies de tartarugas. O LBP e suas variações foram aplicados a dois tipos de canais de cores, o RGB e o YCbCr, e a partir das imagens resultantes foram extraídos os histogramas. Com isso, houve a combinação de dois métodos de classificação K-vizinhos mais próximos (KNN) e Máquina de Vetores de Suporte (SVM) com abordagem linear, ao fim obtendo 12 matrizes de confusão.

O modelo LBP+YCbCr+KNN teve o pior desempenho, pressupõe-se ao fato das características das imagens serem lineares e o classificador ser não linear. O modelo LBP+RGB+KNN apresentou o segundo pior desempenho e também se trata de um classificador não-linear. Todas as técnicas de classificação de características usadas são invariantes à iluminação da imagem, ou seja, tanto uma imagem mais escura quanto uma imagem mais clara têm vetores de características semelhantes, logo a claridade da imagem teve uma interferência mínima na classificação. Os resultados do modelo LBP^{riu2+} YCbCr+SVM foram muito melhores que as outras combinações, provavelmente devido a uma separação de classes mais precisa feita pelo classificador. Para as classes *caretta* e *eretmoc*, os resultados chegaram a uma classificação de 100%, enquanto as classes *lepidoc*, *cheloni* e *dermoch* obtiveram menor desempenho, errando 2 imagens dentre as 18. Com isso, conclui-se que a abordagem baseada em textura e cor é viável para identificação de espécies de tartarugas.

Como trabalhos futuros destacamos: desenvolver um sistema *mobile* para que o usuário pudesse enviar a foto da tartaruga; investigar a relação entre a luminosidade da imagem com a assertividade da classificação utilizando classificadores lineares ou não-lineares; investigar outros extratores de textura combinados com cor, a fim de verificar a

relação entre um classificador não linear com essa combinação de extratores; investigar a combinação dos modelos testados neste trabalho. Fundir os resultados da combinação de YCbCr+KNN (que discrimina muito bem a classe *dermoch*) com o melhor modelo LBP^{riu2}+YCbCr+SVM (que é muito boa para as classes *caretta* e *eretmoc*) com o modelo LBP^{riu2}+RGB+SVM (que foi melhor para a classe *lepidoc*) poderia gerar um sistema com uma maior Exatidão Global; aumentar a base de dados, para dar mais robustez aos resultados; e investigar técnicas de cálculo de confiabilidade das respostas do sistema.

Agradecimentos

A professora Komati agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa DT-2 (nº 302726/2023-3) e pelo projeto nº302726/2023-3; também agradece à FAPES pelo projeto nº 1023/2022 P:2022-8TZV6. A professora Dominicini agradece ao Ifes pelo apoio por meio do Programa Pesquisador de Produtividade.

Referências

- BOSE, B. E.; GUYON, I. M.; VAPNIK, V. N. **A training algorithm for optimal margin classifiers**. In: Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory. New York, NY, USA: ACM, 1992. (COLT '92), p. 144–152. ISBN 0-89791-497-X.
- CHACON, G. et al. **Aplicação da técnica de momentos invariantes no reconhecimento de padrões em imagens digitais**. v. 1, p. 1–12, 10 2011.
- COVER, T.; HART, P. **Nearest neighbor pattern classification**. IEEE transactions on information theory, IEEE, v. 13, n. 1, p. 21–27, 1967.
- IUCN. **The IUCN Red List of Threatened Species**. 2017. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/>>. Acesso em: 14 mai. 2017.
- OJALA, T.; PIETIKÄINEN, M.; HARWOOD, D. **A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions**. Pattern recognition, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 51–59, 1996.
- OJALA, T.; PIETIKAINEN, M.; MAENPAA, T. **Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns**. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, IEEE, v. 24, n. 7, p. 971–987, 2002.
- PAIXÃO, W. R.; KOMATI, K. S. **Um estudo da classificação de texturas de casco de tartarugas marinhas baseados em características de cor**. Bachelor's Thesis — Bacharel em Sistemas de Informação, Ifes Campus Serra, 2016.
- PEDREGOSA, F. et al. **Scikit-learn: Machine learning in Python**. Journal of Machine Learning Research, v. 12, p. 2825–2830, 2011.
- REFAEILZADEH, P.; TANG, L.; LIU, H. **Cross-validation**. In: **Encyclopedia of database systems**. [S.l.]: Springer, 2009. p. 532–538.
- SANTOS, A. S. et al. **Plano de Ação Nacional para Conservação das Tartarugas Marinhas**. 2011. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/pan-tartarugas/livro_tartarugas.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2015.
- SciPy Developers. **SciPy: Open source scientific tools for Python**. 2017. Disponível em: <<http://www.scipy.org/>>. Acesso em: 16 jun. 2017.
- SITAMAR. **Sistema de Informação Sobre Tartarugas Marinhas**. 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/tamar_icmbio_72.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2017.
- TAMAR-ICMBIO. **Programa Nacional de Conservação de Tartarugas Marinhas**. 2024. Disponível em: <<http://www.tamar.org.br/>>. Acesso em: 14 mai. 2024.

TORRES, R.; FALCÃO, A. X. **Recuperação de imagens baseada em conteúdo**. In: Workshop de Visão Computacional. [S.l.: s.n.], 2008. v. 4.

WALT, S. v. d.; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. **The numpy array: a structure for efficient numerical computation**. Computing in Science & Engineering, IEEE, v. 13, n. 2, p. 22–30, 2011.

WALT, S. Van der et al. **scikit-image: image processing in python**. PeerJ, PeerJ Inc., v. 2, p. e453, 2014.



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

4

DESAFIOS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL NO SETOR DE FÁBRICAS DE BEBIDAS

*CHALLENGES IN INDUSTRIAL MAINTENANCE MANAGEMENT
IN THE BEVERAGE FACTORIES SECTOR*

Anderson Martins Campos¹

¹ Engenharia Mecânica, Faculdade Anhanguera, São Luís-Maranhão



[10.29327/5407566.1-4](https://doi.org/10.29327/5407566.1-4)

Resumo

O artigo aborda a importância da gestão eficiente da manutenção industrial nas fábricas de bebidas, destacando os desafios enfrentados e propondo soluções para melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos. São discutidas diversas metodologias de manutenção, como corretiva, preventiva, preditiva, manutenção produtiva total e centrada em confiabilidade, assim como ferramentas de gestão, incluindo o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), FMEA, indicadores de desempenho e análise de Pareto. A implementação de tecnologias como monitoramento remoto, análise de dados em tempo real e manutenção preditiva é sugerida para identificar precocemente falhas nos equipamentos e minimizar paradas não planejadas. Além disso, a aplicação do Kaizen é discutida como uma estratégia para melhorar continuamente os processos, com um estudo de caso sobre a redução de tombamento de garrafas em uma linha de produção. A manutenção específica de sistemas como o de membranas de fibra oca de PES também é abordada, ressaltando a importância da manutenção regular para garantir o desempenho e a eficiência do processo de filtração. O artigo destaca a necessidade de uma gestão eficaz da manutenção industrial nas fábricas de bebidas, propondo metodologias e tecnologias específicas para enfrentar os desafios do setor e garantir a qualidade, eficiência e competitividade das empresas.

Palavras-chave: Manutenção, Gestão, Fabricas.

Abstract

The article discusses the importance of efficient industrial maintenance management in beverage factories, highlighting the challenges faced and proposing solutions to improve operational efficiency, reduce costs, and enhance product quality. Various maintenance methodologies are discussed, such as corrective, preventive, predictive, total productive maintenance, and reliability-centered maintenance, as well as management tools including Maintenance Planning and Control (MPC), FMEA, performance indicators, and Pareto analysis. The implementation of technologies such as remote monitoring, real-time data analysis, and predictive maintenance is suggested to early identify equipment failures and minimize unplanned downtime. Additionally, the application of Kaizen is discussed as a strategy for continuously improving processes, with a case study on reducing bottle tipping on a production line. Specific maintenance of systems such as hollow fiber PES membrane is also addressed, emphasizing the importance of regular maintenance to ensure the performance and efficiency of the filtration process. The article highlights the need for effective industrial maintenance management in beverage factories, proposing specific methodologies and technologies to tackle the sector's challenges and ensure the quality, efficiency, and competitiveness of companies.

Keywords: Maintenance, Management, Factories.

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficiente da manutenção industrial é um desafio crucial para as fábricas de bebidas, visto que essas indústrias enfrentam demandas rigorosas de produção, qualidade e segurança. No setor de bebidas, a manutenção desempenha um papel fundamental na garantia da operacionalidade contínua das linhas de produção, na prevenção de falhas e na redução de custos. No entanto, diversos desafios surgem nesse contexto, exigindo abordagens estratégicas e métodos eficazes para garantir a eficiência e a competitividade das empresas.

Apesar da importância da manutenção industrial, as fábricas de bebidas frequentemente enfrentam desafios que impactam diretamente sua produtividade e lucratividade. A falta de uma metodologia eficaz de gestão da manutenção muitas vezes resulta em paradas não programadas, aumento dos custos operacionais e queda na qualidade do produto. A gestão eficiente da manutenção industrial é crucial para as fábricas de bebidas, enfrentando desafios constantes. Como melhorar a gestão da manutenção para garantir a operacionalidade contínua e a qualidade dos produtos?

Conforme Ozelim (2017), diante desse cenário, é fundamental desenvolver e aplicar metodologias de gestão da manutenção industrial que sejam adequadas às necessidades específicas das fábricas de bebidas. Uma abordagem eficaz pode contribuir significativamente para a redução de custos, aumento da disponibilidade dos equipamentos e melhoria geral da eficiência produtiva. A gestão no setor de manutenção industrial enfrenta uma série de desafios complexos que demandam uma abordagem cuidadosa e estratégica.

Segundo Pinto *et al.* (2022), a implementação de uma aplicação na indústria de bebidas, com foco na gestão de manutenção, surge como uma estratégia promissora para otimizar processos existentes e aprimorar a eficiência operacional. Essa iniciativa, baseada em uma revisão de literatura especializada em fábricas de bebidas, propõe a integração de tecnologias de monitoramento remoto, análise de dados em tempo real e manutenção preditiva. Tais recursos possibilitariam uma identificação precoce de possíveis falhas nos equipamentos, contribuindo para minimizar paradas não planejadas.

De acordo com Queiroz (2018), pretende-se avaliar as práticas de manutenção preventiva e corretiva atualmente adotadas, buscando identificar pontos de ineficiência e propor possíveis soluções. Isso envolverá uma análise minuciosa dos procedimentos existentes, desde a identificação de falhas até a execução das intervenções corretivas e preventivas.

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar os desafios enfrentados na gestão da manutenção industrial nas fábricas de bebidas e propor uma metodologia que promova a eficiência operacional, redução de custos e melhoria da qualidade dos produtos. Para alcançar esse propósito, os objetivos específicos são: identificar os principais desafios enfrentados pelas fábricas de bebidas na gestão da manutenção industrial e analisar as metodologias atualmente utilizadas no setor de bebidas.

2. ASPECTOS GERAIS DA MANUTENÇÃO

Remédios (2018) destaca a importância dos processos de manutenção no desenvolvimento das atividades industriais, salientando que diferentes metodologias contribuem de



maneira distinta para esse processo. A responsabilidade dos gestores é implementar essas metodologias conforme as necessidades específicas das máquinas e ambientes de trabalho. Apesar de algumas máquinas compartilharem princípios semelhantes, peculiaridades únicas em determinadas situações exigem abordagens distintas.

A manutenção corretiva é realizada em resposta a uma falha ou mau funcionamento em um equipamento. Conforme apontado por Zhao *et al.* (2019), essa intervenção ocorre quando a máquina já está sem condições de operar, sendo uma reação ao problema em si. Santos (2021) ressalta que esse tipo de manutenção é conduzido apenas quando soluções paliativas já não são mais viáveis, o que pode resultar em atrasos na produção e falta de controle visual sobre o estado dos equipamentos.

Diferentemente da manutenção corretiva, a manutenção preditiva é uma abordagem proativa. Remédios (2018) destaca que essa técnica busca agir antes que ocorram paradas não programadas, utilizando dados para prever o momento ideal para intervenções. Oliveira *et al.* (2020) enfatizam a importância de monitorar o perfil de vida útil dos elementos e equipamentos, permitindo a substituição de materiais antes que causem falhas.

Conforme Ribeiro *et al.* (2017) destacam que essa abordagem é preferível para empresas que buscam investir na prevenção de problemas, garantindo um acompanhamento contínuo e um desenvolvimento aprimorado das ferramentas de manutenção. Queiroz (2018) ressalta a importância de tratar com precisão os elementos que demandam cuidados especiais, permitindo a liberação das máquinas para operar por períodos mais longos.

Segundo Queiroz (2018), a manutenção corretiva é realizada para corrigir falhas em equipamentos sem tempo para preparação de peças ou planejamento do serviço. Trata-se da forma mais antiga de manutenção, com o objetivo de restaurar o funcionamento o mais rápido possível. No entanto, essa abordagem geralmente tem alto custo devido às grandes perdas de produção ou qualidade do produto geradas pela parada ou falha, além de exigir paralisações mais longas e estoques significativos de peças de reposição, o que acarreta custos adicionais.

De acordo com Júnior *et al.* (2022), o alto custo da manutenção corretiva tem levado à busca pela manutenção preventiva, que visa evitar ou reduzir falhas e queda de desempenho, seguindo um planejamento estabelecido em intervalos determinados. Este tipo de manutenção é mais barato e oferece uma gestão mais eficiente de recursos como mão de obra, estoque de peças, financeiro e produtivo.

A manutenção preditiva, segundo Almeida (2014), é uma abordagem que visa verificar as condições reais de componentes de máquinas, equipamentos e instalações. Baseia-se em inspeções regulares onde fenômenos como temperatura, vibração e ruídos excessivos são analisados utilizando equipamentos que permitem avaliar as condições e acompanhar a evolução de defeitos.

De acordo com Volante *et al.* (2019), a manutenção produtiva total, originária do Japão, é vista como uma evolução da manutenção corretiva para a preventiva. Esse método foca em evitar que defeitos sejam causados por desgaste ou mau funcionamento dos equipamentos. Reconhece que os operadores possuem um conhecimento aprofundado sobre os equipamentos que operam, o que permite que recomendem modificações e reparos, colaborando para melhorias na qualidade e na produtividade.

Segundo Ribeiro *et al.* (2017) a manutenção centrada em confiabilidade é um programa que utiliza diversas técnicas de engenharia para garantir que os equipamentos de uma planta industrial continuem realizando suas funções especificadas. Essa abordagem tem sido reconhecida como a forma mais eficiente de tratar questões de manutenção,

possibilitando que as empresas alcancem a excelência em suas atividades de manutenção, expandindo a disponibilidade de equipamentos e reduzindo custos.

3. FERRAMENTAS DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO

De acordo com Almeida (2018), o surgimento das máquinas e a revolução industrial provocaram uma mudança significativa no cenário empresarial, tornando o processo de manutenção um fator crucial para o desempenho e lucratividade das organizações. Investir em planejamento de manutenção passou a ser uma estratégia fundamental para garantir a qualidade dos produtos, especialmente em um mercado altamente competitivo com clientes cada vez mais exigentes.

Dentro desse contexto, o Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) desempenha um papel vital. Este estudo visa destacar a importância do PCM e da gestão de manutenção, demonstrando como as empresas que investiram nesse processo obtiveram melhorias significativas na redução de falhas e contribuíram para o crescimento sustentável das empresas.

Segundo Queiroz (2018), o planejamento de manutenção não apenas minimiza custos operacionais, mas também aumenta a eficiência dos equipamentos, prolonga sua vida útil e, conseqüentemente, eleva a qualidade dos produtos finais. Além disso, uma gestão eficaz da manutenção permite uma melhor alocação de recursos, reduzindo tempo de inatividade não planejado e aumentando a produtividade geral da empresa.

O (PCM), conforme definido por Freitas (2021):

Um conjunto estratégico de ações cruciais para o sucesso operacional de uma organização. Por meio de um rigoroso planejamento, programação, controle e verificação das atividades de manutenção em relação aos valores pré-estabelecidos, o PCM visa garantir que as metas e objetivos da produção sejam alcançados, alinhando-se assim à missão da empresa. Esta abordagem fortalece o ciclo de gerenciamento da manutenção ao integrar atividades como assessoria à gerência, gestão sobre a manutenção, negociação entre as áreas de manutenção e produção, revisão e coordenação de planos e instruções, além de identificação e correção de pontos de perda de produtividade (Freitas, 2021, p. 25).

A implantação efetiva do PCM, conforme destacado Oliveira *et al.* (2023), requer a estruturação de um Sistema de Planejamento e Controle robusto, podendo ser tanto manual quanto informatizado. Essa estruturação não apenas facilita o planejamento e a execução das atividades de manutenção, mas também proporciona uma base sólida para a identificação de áreas de melhoria e a implementação de medidas corretivas eficazes. Assim, ao adotar uma abordagem abrangente e sistêmica, o PCM não apenas otimiza a eficiência operacional, mas também contribui significativamente para a consecução dos objetivos organizacionais de longo prazo.

Teles (2020) destaca que os resultados revelaram uma drástica redução no número de paradas de máquinas para 2500, representando uma impressionante diminuição de 90% após a implementação do PCM. Isso evidencia não apenas a eficácia do PCM, mas também sua importância crucial na otimização dos processos de manutenção e na maximização da eficiência operacional da empresa.



Beserra (2018) afirma que a metodologia FMEA (Análise de Modo e Efeitos de Falha) emerge como uma ferramenta indispensável para prevenir falhas tanto no projeto do produto quanto no processo de produção. Seu principal propósito é identificar potenciais falhas e suas origens, possibilitando intervenções que elevem a confiabilidade, produtividade e disponibilidade do produto ou processo.

Júnior (2022) explica que a FMEA de Produto se concentra nas falhas que podem ocorrer diretamente no produto final, desde falhas em componentes individuais até problemas que afetem a funcionalidade global do produto. Por outro lado, a FMEA de Processo concentra-se nas falhas que podem surgir durante o processo de fabricação ou montagem do produto, abrangendo desde falhas nas máquinas e equipamentos até problemas relacionados aos procedimentos de produção. Ambos os tipos de FMEA seguem um processo similar de análise, identificação de potenciais falhas, avaliação de seus impactos e estabelecimento de ações corretivas ou preventivas.

Munaro *et al.* (2018) destacam que os Indicadores Chave de Desempenho (KPIs) desempenham um papel vital na avaliação do sucesso dos processos empresariais, pois estão estreitamente alinhados com as estratégias e metas da organização. Eles proporcionam uma visão clara do desempenho, permitindo comparações diretas com os objetivos estabelecidos e identificando quaisquer desvios que possam ocorrer. Mais do que simples métricas, os KPIs guiam as decisões dos responsáveis, fornecendo insights valiosos para ajustes e melhorias contínuas.

Bax (2019) destaca que no cerne dos KPIs está a distinção crucial entre objetivos e métricas. Enquanto os objetivos delineiam as aspirações e o destino desejado, os KPIs são os indicadores tangíveis que apontam se estamos avançando na direção certa para alcançá-los. Essa clareza conceitual é essencial para manter o foco e a precisão na avaliação do progresso e na tomada de decisões estratégicas.

A análise de Pareto é uma ferramenta crucial na indústria de manutenção mecânica, pois permite uma abordagem sistemática para identificar e priorizar os problemas mais impactantes. Baseada no princípio conhecido como a “regra 80/20”, essa técnica sugere que aproximadamente 80% dos problemas podem ser atribuídos a apenas 20% das causas. Na manutenção mecânica, isso significa que a maioria das falhas e problemas recorrentes podem ser rastreados até um conjunto relativamente pequeno de fontes ou causas subjacentes (Gonçalves, 2020).

Baldissarelli e Fabro (2019) destacam que na indústria de manutenção mecânica, os gestores podem concentrar seus esforços nos problemas que têm o maior impacto na eficiência e na operação geral da planta através da aplicação da análise de Pareto. Identificando e abordando essas causas principais, é possível reduzir significativamente o tempo de inatividade da máquina, os custos de reparo e as interrupções na produção.

Conforme Baldissarelli e Fabro (2019), uma visão clara e objetiva dos problemas mais críticos na manutenção mecânica é uma das vantagens mais marcantes da análise de Pareto. Isso permite que as equipes de manutenção ajam de forma proativa, priorizando ações corretivas e preventivas que tenham o maior potencial de impacto positivo. Além disso, ao longo do tempo, a análise de Pareto pode ajudar a melhorar continuamente os processos de manutenção, identificando padrões e tendências que podem indicar áreas de melhoria.

Domingues (2020) ressalta que o *Lean Manufacturing*, originado na década de 1950, tem como objetivo aprimorar a eficiência das linhas de produção e o uso de matérias-primas. Seus princípios fundamentais giram em torno da redução de desperdícios, otimização de custos e melhoria da eficiência geral nas operações fabris.

Segundo Domingues (2020), ao adotar os princípios do Lean, as empresas podem manter suas equipes focalizadas na eficiência e na fluidez do processo de trabalho. Isso não apenas aumenta a produtividade, mas também torna as empresas mais atraentes para profissionais talentosos. Esses mesmos princípios estão conduzindo organizações a otimizar seus processos, encurtando o tempo necessário para levar um produto ao mercado, reduzindo custos e aprimorando a qualidade.

De acordo com Correia, Deus e Baptista (2016), a manufatura enxuta tem como objetivos básicos a redução dos desperdícios do sistema de produção, a obtenção de maior qualidade nos produtos e a diminuição do tempo de entrega dos produtos aos clientes, com menor número de defeitos. Além disso, busca estabelecer um processo de inovação incremental contínuo.

Correia, Deus e Baptista (2016) afirmam que para uma gestão sustentável utilizando-se de ferramentas do *lean manufacturing*, o Kaizen se apresenta como uma constante de melhoria dentro de uma organização. Ele se baseia na aplicação do método científico para uniformizar os processos da organização, centralizando os colaboradores e introduzindo melhorias contínuas.

Segundo Justa (2016), a combinação do Kaizen com 5S e MPT (Manutenção Produtiva Total), alinhados ao modelo de gestão, internaliza os conceitos e a filosofia dessas aplicações, conscientizando os colaboradores por meio de práticas no ambiente de trabalho. O Kaizen apresenta um ciclo completo de modelo para o avanço do aprendizado organizacional, contribuindo para a transformação das operações de manufatura em vantagens competitivas.

De acordo com Mostafa *et al.* (2015), adotando a hipótese de Womack, os princípios do *lean manufacturing* podem ser implementados em todas as organizações, baseando-se nos 5 princípios de produção lean. Através do modelo de implementação, os princípios do *lean manufacturing* foram definidos de forma a seguirem uma lógica de implementação, o que faz com que sua execução apresente dificuldades em algumas organizações.

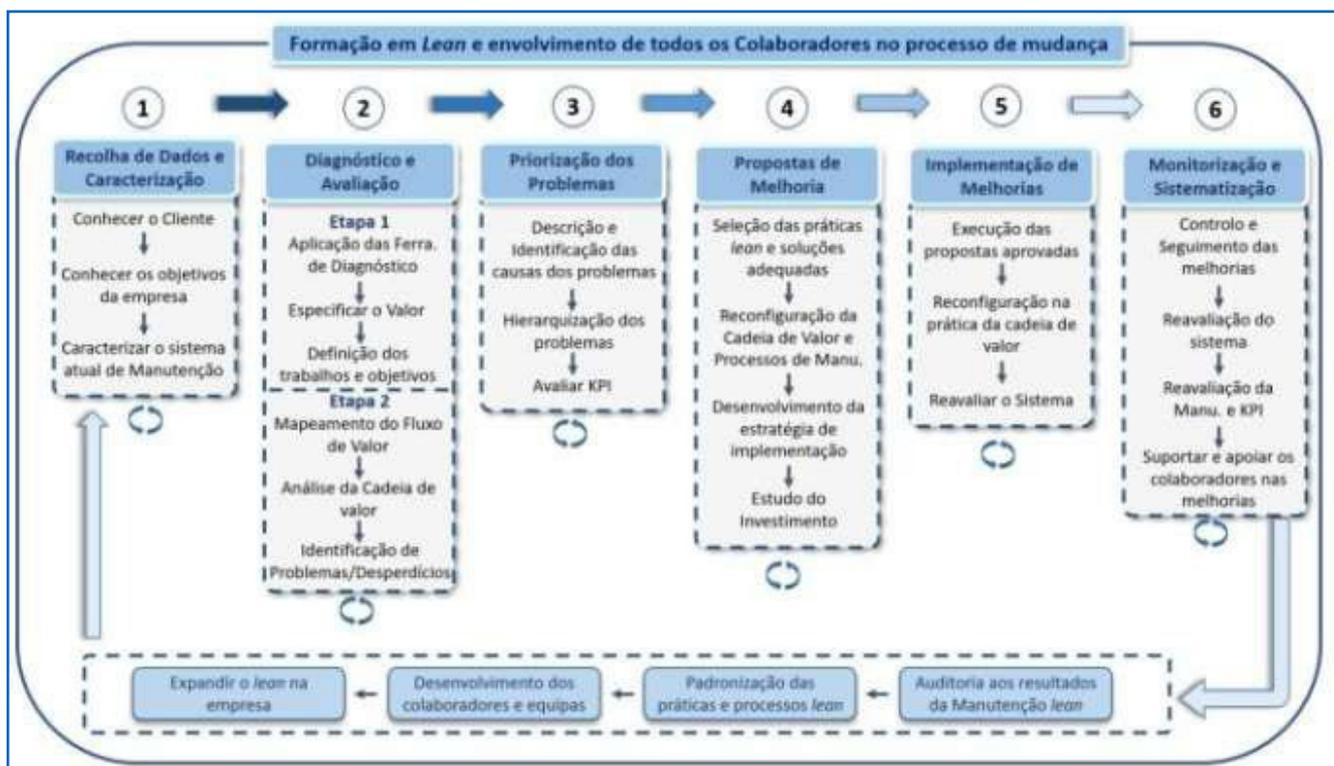


Figura 1. Modelo Proposto para a Implementação do lean na Gestão da Manutenção Fonte: Volante (2019)

Conforme Volante (2019), a gestão é uma atividade dinâmica que engloba funções como planejamento, coordenação, controle de recursos e monitoramento. Na gestão da manutenção, são estabelecidos objetivos, estratégias e responsabilidades por meio da implementação de planejamento, controle e supervisão. O método da melhoria contínua da organização também inclui fatores econômicos, buscando eficiência e otimização dos recursos.

Gedela (2018) afirma que o *lean manufacturing*, ao recolher dados, fazer diagnósticos, avaliações, priorizações de problemas, propostas de melhorias e sua implementação, proporciona um método eficiente para alcançar uma gestão mais enxuta e eficaz. Os benefícios do lean na gestão de uma organização acrescentam valor e dinamismo ao processo, envolvendo os colaboradores e adaptando-se às suas necessidades.

4. MANUTENÇÃO EM FABRICAS DE BEBIDAS

Cappi (2022) destaca a importância da indústria de bebidas, ressaltando seu papel dinâmico e essencial na oferta de uma ampla variedade de produtos, desde água e refrigerantes até cervejas e destilados. O autor enfatiza a necessidade crucial de investir em manutenção adequada nas fábricas de bebidas para garantir a eficiência e qualidade dos produtos.

Sacomano *et al.* (2020) complementam essa visão, destacando o papel fundamental da manutenção na garantia da produção contínua, eficiência operacional e conformidade com padrões de qualidade e regulamentações governamentais. Eles também destacam a integração do método Kaizen ao Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) como uma abordagem essencial para otimizar o fluxo de informações e identificar gargalos nas instalações, permitindo uma atenção direcionada para resolver problemas rapidamente.

Na produção de cerveja, diversos equipamentos desempenham funções essenciais. O fermentador é fundamental, onde o mosto fermenta para se tornar cerveja. Sua manutenção é crucial, exigindo limpeza cuidadosa para evitar contaminação, além da verificação regular das vedações e dos dispositivos de controle de temperatura e pressão. Qualquer desgaste nas peças deve ser corrigido prontamente para garantir um ambiente de fermentação adequado (Gadella, 2018).

Sacomano *et al.* (2020), outro equipamento importante é o arrolhador, responsável por selar as garrafas hermeticamente. Para seu bom funcionamento, é necessário realizar a limpeza das peças e verificar a pressão regularmente. A calibração do equipamento é essencial para inserir as rolhas corretamente e evitar falhas durante o engarrafamento, sendo crucial substituir peças desgastadas.

De acordo com Mostafa *et al.* (2015), durante o processo de produção, o caldeirão é utilizado para o cozimento do mosto, e sua manutenção envolve a limpeza para evitar resíduos que possam afetar o sabor da cerveja. Verificar as condições internas do caldeirão regularmente é importante para garantir eficiência no cozimento.

De acordo com Correia, Deus e Baptista (2016), além disso, o moedor de grãos, usado para moer os maltes, requer limpeza das lâminas e ajustes regulares para garantir uma moagem consistente. E o resfriador, para baixar a temperatura do mosto, precisa de limpeza regular e verificação das conexões para um resfriamento eficiente.

4.1 HEUFT InLine e Seus Componentes Essenciais

O sistema HEUFT InLine é uma solução avançada para inspeção e controle de qualidade nas linhas de produção de bebidas, projetada para garantir que apenas produtos de alta qualidade cheguem aos consumidores. Utilizando tecnologia de raios X, o sistema é capaz de detectar corpos estranhos, como pedaços de vidro, metal ou plástico, dentro das garrafas. Além disso, verifica a integridade estrutural das garrafas, identificando fissuras, rachaduras e outros defeitos que possam comprometer a segurança e a qualidade do produto final.

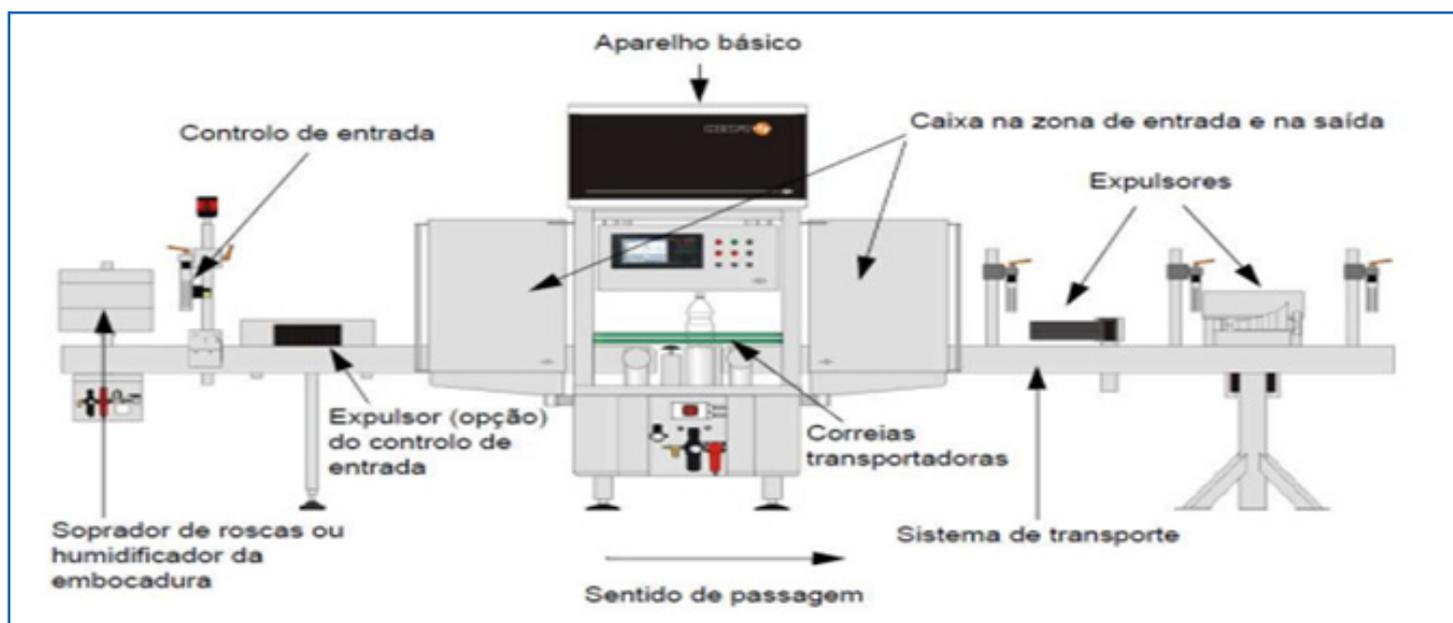


Figura 2. RPMHEUFT InLine e seus componentes essenciais

Fonte: Adaptado Oliveira (2018)

Conforme Oliveira (2018), as câmeras de alta resolução são outro componente essencial do HEUFT InLine, capturando imagens das garrafas em alta velocidade para uma inspeção detalhada da superfície externa. Essas câmeras são capazes de detectar rótulos desalinhados, tampas mal colocadas e outras imperfeições visuais que podem afetar a apresentação e a qualidade percebida do produto. Com essas imagens, o sistema garante que cada garrafa atenda aos padrões visuais exigidos antes de seguir para a próxima etapa da produção.

De acordo com Mostafa *et al.* (2015), os sensores de pressão são incorporados para monitorar a pressão interna das garrafas, assegurando que estejam dentro dos parâmetros de segurança e qualidade. Esses sensores ajudam a identificar garrafas com vazamentos ou pressurização inadequada, prevenindo potenciais problemas de segurança e garantindo a satisfação do consumidor.

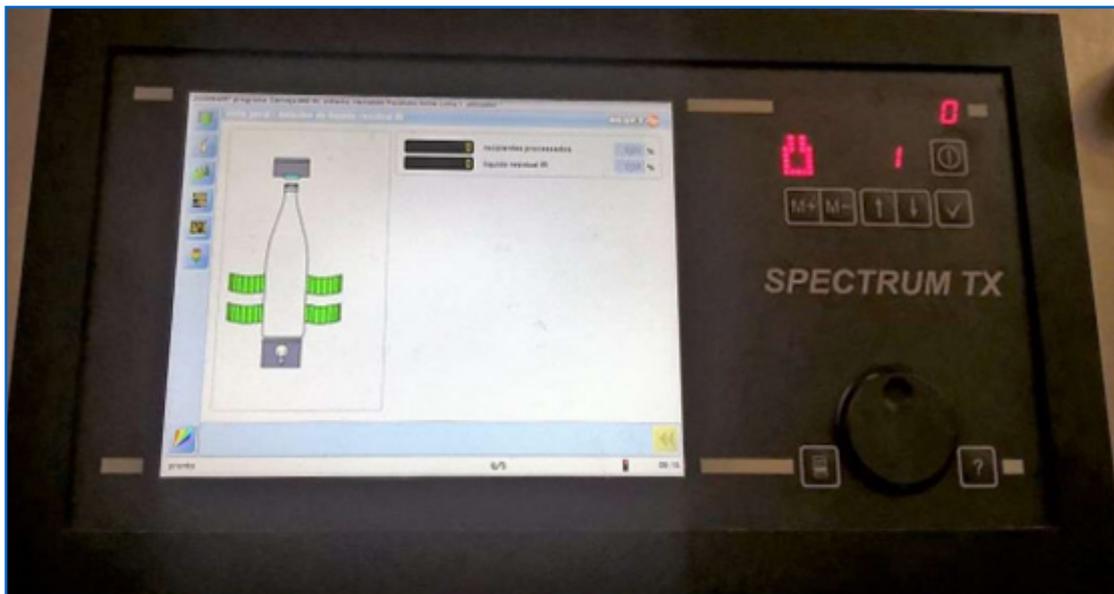


Figura 3. Tela no inspetor onde são apresentados os erros encontrados nas garrafas

Fonte: Adaptado Oliveira (2018)

Os sistemas de rejeição automatizados removem as garrafas defeituosas da linha de produção, garantindo que apenas produtos conformes continuem no processo de embalagem. A interface de controle e monitoramento do HEUFT InLine proporciona uma interface de usuário amigável para ajustar e monitorar os parâmetros do sistema em tempo real, permitindo um acompanhamento eficiente dos dados de inspeção e desempenho do sistema. Esses componentes trabalham em sinergia para assegurar uma inspeção completa e eficiente, mantendo altos padrões de qualidade e segurança nas fábricas de bebida (Bax, 2019).

Beserra (2018), o controle de entrada do sistema HEUFT InLine impede a inserção de recipientes que possam danificar o equipamento, como recipientes muito altos, deitados ou com diâmetro excessivo. Sempre que um recipiente nessas condições é detectado, ele é expulso pelo rejeitor de controle de entrada.

4.2 Implementação do Kaizen para Redução de Tombamento de Garrafas

Segundo Ozelim (2017), para identificar os pontos críticos onde ocorre o tombamento das garrafas e coletar dados sobre a frequência e as condições em que esses tombamentos ocorrem. Em seguida, a equipe deve realizar brainstorming para desenvolver possíveis soluções, priorizando aquelas com base na viabilidade e no impacto potencial.

Conforme Tessarinim (2018) as soluções desenvolvidas devem ser testadas em pequena escala para avaliar a eficácia antes de serem implementadas na linha de produção. Após a implementação, é essencial monitorar a linha de produção para garantir que as soluções estejam realmente reduzindo os tombamentos e coletar dados pós-implementação para comparar com a situação anterior, avaliando a melhoria alcançada.

Conforme Orives (2019), as soluções eficazes devem ser documentadas e incorporadas como melhores práticas na rotina de manutenção e operação. Realizar revisões periódicas é crucial para identificar novas oportunidades de melhoria e garantir a continuidade dos ganhos obtidos. Com essa abordagem estruturada, a implementação do Kaizen visa não apenas resolver o problema imediato do tombamento de garrafas, mas também estabelecer uma cultura de melhoria contínua na linha de produção.

Segundo Reditech (2016), é necessário que o tema seja específico, focando-se na eli-

minação de uma única falha. Para assegurar a participação das pessoas certas, é essencial que todos os que interagem com a máquina estejam representados. Assim, os integrantes escolhidos para a equipe incluem um mecânico, um eletrotécnico e o operador de cada turno desse trecho.



Figura 4. Divisórias das esteiras de saída do inspetor recolocadas

Fonte: Adaptado Oliveira (2018)

Das não conformidades apresentadas, a que mais influência no tombamento de garrafas é a esteira transportadora inadequada. A esteira de saída do trecho é do tipo utilizada nos transportes chamados de glidelineer, um tipo específico de transportador de alinhamento inclinado utilizado na entrada das rotuladoras (Silva, 2018).

Machado *et al.* (2023), a inclinação do transporte tem por objetivo tanto o alinhamento dos vasilhames quanto a remoção de garrafas tombadas. Na lateral desse tipo de transporte, são utilizados limitadores de plástico rígido a uma altura suficiente para permitir que garrafas tombadas deslizem para fora do trecho e caiam nas bandejas coletoras presentes na lateral do transporte.

Nagai, Batista e Dagnoni (2015), a análise revelou que o modelo de esteira transportadora não era adequado para o tipo de transporte necessário, o que contribuiu significativamente para o tombamento das garrafas. Para resolver esse problema, foi decidida a substituição da esteira por outra mais adequada ao tipo de transporte utilizado. Além disso, a inspeção identificou perfis desgastados que também foram substituídos para garantir um transporte mais estável e seguro das garrafas ao longo do processo.

De acordo com Bax (2019), outras ações foram necessárias para corrigir não conformidades adicionais que afetavam a estabilidade das garrafas. Rolamentos danificados por falta de lubrificação foram substituídos para assegurar o funcionamento suave da mesa DFI. Engrenagens folgadas também foram reapertadas para prevenir qualquer movimentação descontrolada que pudesse causar tombamento.

Segundo Oliveira (2018), essas ações integradas visam não apenas a redução imediata do tombamento de garrafas, mas também a melhoria contínua da linha de produção. A implementação de soluções como a substituição da esteira, a manutenção adequada de componentes e a adição de divisórias demonstra o compromisso com a qualidade e a eficiência. Monitoramentos contínuos e revisões periódicas garantirão a eficácia das medidas tomadas e identificarão novas oportunidades de melhoria, assegurando a sustenta-

bilidade dos ganhos obtidos com a aplicação do Kaizen.

4.3 Manutenção do Sistema de Membranas

A literatura muitas vezes carece de detalhamento técnico sobre diversos sistemas de filtração com membranas. Nesse contexto, para análise, considerou-se o sistema de membranas de fibra oca de poliéster-sulfona (PES), da Pall Food and Beverages, que é equipado com uma centrífuga da GEA Westfalia Separator. Este sistema é semelhante ao mostrado na Figura abaixo (Oliveira, 2018).



Figura 5. Membranas de fibra oca de poliéster-sulfona

Fonte: Adaptado Oliveira (2018)

Conforme destacado por Nagai, Batista e Dagnoni (2015), o sistema de membranas de fibra oca de PES é amplamente utilizado na indústria de alimentos e bebidas para filtração e clarificação de líquidos. Sua manutenção adequada é essencial para garantir o desempenho e a eficiência do processo de filtração. No entanto, a falta de detalhes técnicos na literatura ressalta a importância de entender profundamente o funcionamento e os cuidados necessários com esse tipo de sistema.

Segundo Oliveira (2018), a combinação deste sistema de membranas com a centrífuga da GEA Westfalia Separator sugere uma etapa de pré-tratamento antes da filtração propriamente dita. Isso pode implicar em requisitos específicos de manutenção para garantir o bom funcionamento de ambas as partes do sistema.

Machado *et al.* (2023), é crucial realizar uma manutenção regular, seguindo as reco-

mendações do fabricante, tanto para as membranas quanto para a centrífuga. Isso inclui procedimentos de limpeza, troca de peças desgastadas e monitoramento constante do desempenho do sistema para garantir a qualidade do produto final e a eficiência do processo.

5. MANUTENÇÃO NO CENÁRIO DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 introduz diversas ferramentas promissoras para otimizar a eficiência da produção. Contudo, seus benefícios estendem-se além do setor produtivo, impactando positivamente a manutenção industrial. De acordo com Mesquita e Moreira (2018), uma tecnologia notável que surgiu nesse contexto é a Realidade Aumentada (RA), capaz de sobrepor objetos virtuais ao ambiente físico, simulando elementos não palpáveis e oferecendo inúmeras possibilidades para os profissionais.

Atualmente, a Realidade Aumentada permite que profissionais executem montagens e manutenções em equipamentos complexos, seguindo instruções apresentadas no ambiente aumentado. Isso amplia as capacidades dos operadores, evidenciando a importância dessa tecnologia na manutenção industrial (Mesquita; Moreira, 2018).

Conforme Orives (2019), a integração de programas facilitada pela RA promove uma estreita interação homem-máquina, possibilitando a rápida solução de falhas e servindo como suporte técnico. Essa abordagem reduz o tempo necessário para resolver problemas, atuando como uma forma eficaz de suporte para aqueles com menos conhecimento técnico.

Estas tecnologias apresentam um potencial significativo de continuidade, conectando bilhões de pessoas à internet e aprimorando drasticamente a eficiência das empresas e organizações. Além disso, elas desempenham um papel crucial na regeneração do ambiente industrial, permitindo um melhor gerenciamento de ativos (Mesquita; Moreira, 2018).

A Quarta Revolução Industrial, marcada pela digitalização do setor manufatureiro, é impulsionada pelo aumento dos volumes de dados, pela energia em sistemas de computadores e pela conectividade. Diferentemente do passado, essa revolução é caracterizada pela convergência de tecnologias existentes, combinando-as de maneira robusta para gerar rupturas significativas (Almeida; Cagnin, 2019).

De acordo com Gonçalves (2020), a quarta revolução industrial marca uma era em que os sistemas ciber-físicos desempenham um papel fundamental no avanço da tecnologia. A Industrial Internet of Things (IIoT) surge como uma das principais inovações dessa era, permitindo a comunicação direta entre máquinas sem a necessidade de intervenção humana.

Conforme Lott (2022), assim como as revoluções industriais anteriores moldaram o cenário econômico e social, a IIoT está revolucionando a maneira como as indústrias operam. Ao conectar máquinas, dispositivos e sensores em uma rede inteligente e interativa, a IIoT possibilita uma gestão mais eficiente e automatizada dos processos industriais.

Segundo Lott (2022), essa interconexão de dispositivos permite que as empresas coletem e analisem grandes volumes de dados em tempo real, fornecendo insights valiosos para otimização da produção, manutenção preditiva e tomada de decisões estratégicas.

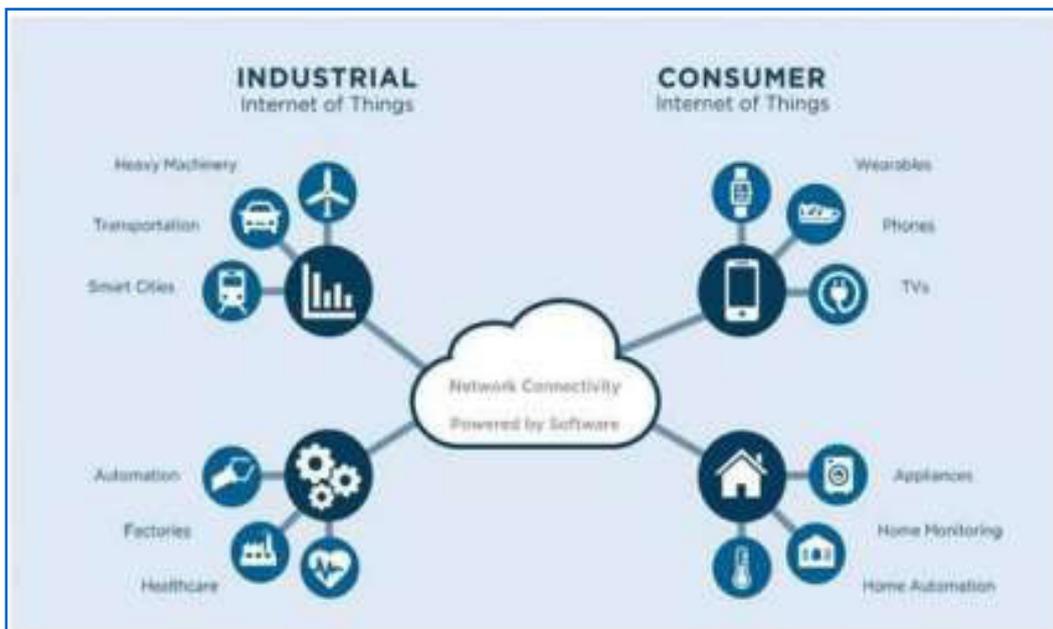


Figura 6. IIOT-Industrial Internet of Things

Fonte: (Lott, 2022).

Gonçalves (2020) destaca que, à medida que as empresas adotam cada vez mais essa tecnologia, surgem desafios relacionados à segurança cibernética, privacidade de dados e interoperabilidade entre sistemas. Portanto, é crucial investir em medidas de proteção e padrões de interoperabilidade para garantir que a LoT possa alcançar seu máximo potencial de maneira segura e confiável.

Correia (2016) aponta que a *Industrial Internet of Things* representa um marco na evolução da indústria, capacitando as organizações a alcançarem novos patamares de eficiência, produtividade e inovação. À medida que continuamos a explorar as possibilidades oferecidas por essa tecnologia, é evidente que estamos testemunhando uma transformação significativa no panorama industrial global.

Correia (2016) também afirma que a robótica e a impressão 3D são dois pilares essenciais na atual revolução industrial, proporcionando uma flexibilidade e inovação sem precedentes que se alinham perfeitamente com os princípios da Indústria 4.0. A impressão 3D é, de longe, um dos métodos de fabricação mais versáteis e ágeis disponíveis atualmente.

Domingues, Pedrosa e Bernardinho (2020) explicam que, na nova era industrial, podemos esperar uma crescente implementação de soluções robóticas que reduzam a dependência de mão-de-obra humana, embora muitos desses robôs sejam projetados para trabalhar lado a lado com os humanos, facilitando a interação e colaboração.

Domingues, Pedrosa e Bernardinho (2020) observam a discrepância nos investimentos e nos custos de produção entre a concepção de um produto utilizando tecnologias anteriores à Indústria 4.0 e sua fabricação em série. Com a chegada da Indústria 4.0, a produção em massa tradicional está sendo substituída por métodos mais flexíveis, como a impressão 3D.

Correia (2016) menciona que, no entanto, a impressão 3D ainda apresenta desafios, como os altos custos envolvidos na produção em massa, a limitação dos materiais disponíveis para impressão e restrições físicas, como o tamanho máximo dos produtos que podem ser fabricados. Essas limitações podem impactar a viabilidade da impressão 3D em certos contextos industriais, especialmente em comparação com métodos de produção em massa convencionais.

Conforme Silva (2018), na nova era industrial, o papel dos softwares altamente desenvolvidos é fundamental, impulsionando significativamente a digitalização e a fabricação. A integração entre design e produção é cada vez mais evidente, com a utilização de ferramentas como modelagem 3D e CAD (*Computer Aided Design*).



Figura 7. Pirâmide da automação Fonte: Reditech (2016)

A implementação do *Manufacturing Execution System* (MES) representa um marco crucial na evolução para a Indústria 4.0, indo além dos sistemas de planificação convencionais, como os ERPs. O MES atua como um coordenador central, abrangendo uma série de funcionalidades essenciais para a eficiência operacional (Gonçalves, 2020).

Segundo Reditech (2016), desde a produção de peças até a gestão do inventário e a coordenação das ordens de fabricação, o sistema MES proporciona uma integração completa de processos. No contexto específico do setor automóvel, o MES é especialmente adaptado, oferecendo vantagens significativas na planificação, redução de tempos de ciclo e eliminação de desperdícios, como o excesso de trabalho em progresso e o uso de papel.

As funcionalidades-chave do MES são abrangentes e incluem desde a importação de dados do ERP até a emissão automatizada de instruções para entrega de materiais nas linhas de montagem adequadas. Além disso, o sistema armazena informações cruciais sobre a produção, como tempos de operação e dados de qualidade, e facilita a integração entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão empresarial. Essa integração permite um controle estatístico detalhado do processo produtivo, monitorando parâmetros, ritmo produtivo e retrabalho, entre outros indicadores (Reditech, 2016).

Jacó (2017) destaca que as vantagens proporcionadas pelo MES são numerosas e abrangentes. Desde o suporte ao Lean Manufacturing até a melhoria contínua dos processos, este sistema contribui para a redução dos leads times, setup times e tempos de planejamento, além de promover melhorias na qualidade e na transparência dos dados.

Justus (2019) explica que a principal tarefa do MES é otimizar as ordens a partir de uma quantidade infinita delas, utilizando algoritmos. Estes algoritmos levam em consideração, inicialmente, as datas de entrega acordadas com o cliente e a qualidade dos produtos, e em segundo lugar, a redução de custos produtivos (incluindo custos de setup, recursos e inventário).

Gonçalves (2020) observa que o uso de Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual

(RV) tem possibilitado suporte remoto em tempo real para técnicos, reduzindo o tempo de resolução de falhas complexas. Além disso, a automação e a robótica têm permitido a realização de tarefas de manutenção por sistemas autônomos em ambientes perigosos ou inacessíveis. Com a assistência da Gestão de Ativos Assistida por Computador (CMMS), softwares especializados auxiliam na gestão eficiente de ativos, agendamento de manutenção e análise de desempenho.

Machado *et al.* (2023) afirmam que os fabricantes de equipamentos e componentes irão buscar aumentar suas margens de lucro nos serviços oferecidos. A introdução de conectividade nos produtos abre novas perspectivas de modelos de negócios que podem ser adaptados continuamente às mudanças nas necessidades dos clientes e expectativas dos usuários. Um exemplo é a monitorização do estado de degradação de um equipamento, acompanhado por um contrato de serviço correspondente.

Gonçalves (2020) enfatiza que o acesso contínuo aos equipamentos é fundamental para garantir que as tarefas de manutenção sejam planejadas e otimizadas para atender às necessidades produtivas das empresas. Além disso, é crucial que os clientes desses serviços tenham acesso a informações detalhadas sobre falhas, o estado dos equipamentos monitorados e toda a documentação relacionada às medidas tomadas

Referências

- ALMEIDA, PAULO SAMUEL. **Manutenção Mecânica Industrial–Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. Saraiva Educação SA, 2018.
- BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. **Scientia cuma indústria**, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.
- BAX, Marcello Peixoto. Anotação de dados para geração de indicadores de desempenho em organizações. In: **Workshop de informação, dados e tecnologia**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- BESERRA, Iane Camile de Castro. **Aplicação do Trabalho Padronizado na Manutenção Mecânica de uma Indústria Têxtil do Rio Grande do Norte**. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CAPPI, Gilvan Antonio. **Aplicação do plano e controle de manutenção no processo de engarrafamento de uma linha produtiva e seu impacto no desempenho de uma empresa do setor de bebidas do Ceará: um estudo de caso**. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2022.
- GEDELA, Ravi Kumar; MOHAN, K. Krishna; PRASAD, V. Kamakshi. Application of BOCR models in service oriented architecture (SOA): study on model validation through quantification for QoS considerations. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 9, p. 1346-1354, 2018.
- GONÇALVES, Hélder Ricardo Domingues. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. Tese de Doutorado.
- FREITAS, Jefferson Cardoso de; SKORA, Rangel; MACHADO, Samuel Dias.
- Implementação de um plano de manutenção na empresa**, Matrik Sandeski. 2021.
- JACÓ, Felipe H. **Proposta de implantação das funções de planejamento e controle da manutenção (PCM) em uma linha de produção**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES. Lajeado - RS, 2017.
- JÚNIOR, Lúcio Rogério et al. Aplicação da manutenção preventiva em dornas de fermentação para a indústria do setor sucroalcooleiro. **Concilium**, v. 22, n. 6, p. 70-80, 2022.
- JUSTA, Marcelo. **Gestão da mudança & lean manufacturing**. Appris Editora e Livraria Eireli-ME, 2016.
- LOTT, Thiago Holanda. **Propostas de contribuições da engenharia de confiabilidade para a manutenção de um forno secador de uma empresa do setor de mineração**. 2022. 79 f.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

MACHADO, Cristofer Oliveira et al. Manutenção Prescritiva: A Evolução da Manutenção na Indústria 4.0. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 9, p. 4444-4458, 2023.

NAGAI, Fábio Hideki; BATISTA, Gustavo Barbosa; DAGNONI, Vagner. **Estudo de caso da aplicação do planejamento e controle da manutenção em uma planta de envase Arla**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

OLIVEIRA, Isabela Alves de. **Metodologia kaizen na melhoria de processo**: estudo de Caso em uma linha de produção de cerveja. 2018. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

OZELIM, Renan de Pádua. **Sistema de informação aplicado à gestão de manutenção**: um estudo de caso sobre a implantação do planejamento da manutenção. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PINTO, Cátia et al. Development of Guidelines for an Occupational Health and Safety Management Systems Towards Industry 4.0. In: **Occupational and Environmental Safety and Health IV**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 17-29.

TESSARINI, Geraldo; SALTORATO, Patrícia. Impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 743- 769, 2018.

VOLANTE, Carlos Rodrigo et al. **Aplicação da Manutenção Preditiva e Preventiva em uma Fundição**. 2019



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

5

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA NO CONTROLE DE MOTORES

POWER ELECTRONICS IN MOTOR CONTROL

João Guilherme Andrade Barros¹
Lilian Barros Santiago²

¹ Engenharia Elétrica, Faculdade Anhanguera, São Luís-Maranhão

² Docente, Faculdade Anhanguera, São Luís, Maranhão



[10.29327/5407566.1-5](https://doi.org/10.29327/5407566.1-5)

Resumo

Este estudo busca compreender os sistemas elétricos de potência mais eficientes para a inicialização de motores elétricos. O objetivo geral é analisar diferentes métodos de partida, como partida direta, partida estrela-triângulo e soft-starters, em termos de suas características e aplicações. Dentro desse escopo, os objetivos específicos incluem uma análise detalhada dos acionamentos de partida, com foco especial nos diagramas de força associados a esses processos. A eletrônica de potência desempenha um papel crucial na eficiência energética e no controle de motores elétricos em diversas aplicações industriais. A metodologia adotada neste estudo é uma abordagem qualitativa descritiva, realizada por meio de revisão de literatura, incluindo artigos, livros e monografias dos últimos 10 anos, além de consultas a renomados autores da área. Os motores elétricos são componentes vitais em várias indústrias, sendo classificados em motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). A soft-starter, em particular, regula a potência do motor durante a inicialização e frenagem, reduzindo correntes de partida e protegendo o sistema elétrico. A escolha da técnica de partida depende de fatores como a natureza das operações, a potência do motor e a confiabilidade do sistema. Conclui-se que a gestão energética adequada, aliada à seleção adequada da técnica de partida, é essencial para otimizar a eficiência e confiabilidade dos sistemas elétricos industriais.

Palavras-chave: Motor de Indução, Partida direta, Inversor de frequência.

Abstract

This study seeks to understand the most efficient electrical power systems for starting electric motors. The general objective is to analyze different starting methods, such as direct starting, star-delta starting and soft-starters, in terms of their characteristics and applications. Within this scope, specific objectives include a detailed analysis of starter drives, with a special focus on the force diagrams associated with these processes. Power electronics plays a crucial role in energy efficiency and control of electric motors in various industrial applications. The methodology adopted in this study is a descriptive qualitative approach, carried out through a literature review, including articles, books and monographs from the last 10 years, in addition to consultations with renowned authors in the area. Electric motors are vital components in various industries, being classified into direct current (DC) and alternating current (AC) motors. The soft-starter, in particular, regulates engine power during startup and braking, reducing starting currents and protecting the electrical system. The choice of starting technique depends on factors such as the nature of operations, engine power and system reliability. It is concluded that adequate energy management, combined with the appropriate selection of the starting technique, is essential to optimize the efficiency and reliability of industrial electrical systems.

Keywords: Induction Motor, Direct start, Frequency inverter.



1. INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência desempenha um papel fundamental na automação industrial e na eficiência energética, sendo um elemento vital no controle de motores elétricos. O uso de motores elétricos é ubíquo em uma variedade de aplicações, desde pequenos motores usados em eletrodomésticos até motores de grande porte empregados em maquinaria industrial e sistemas de transporte. A capacidade de controlar com precisão a velocidade, a direção e o torque desses motores são essenciais para uma ampla gama de processos industriais e comerciais.

Desde a invenção dos motores elétricos, as máquinas industriais têm passado por uma notável evolução, tornando-se cada vez mais versáteis e acessíveis para uma ampla gama de aplicações. No entanto, esse avanço também resultou em um aumento significativo no consumo de energia elétrica, principalmente devido à alimentação desses motores.

Com o uso generalizado de motores nas indústrias, surgiu a necessidade premente de desenvolver sistemas mais eficientes para acioná-los, a fim de evitar problemas nas redes elétricas, como quedas de tensão e correntes elevadas que podem prejudicar ou encurtar a vida útil dos componentes de controle e proteção. Nesse contexto, o avanço da eletrônica de potência se revelou fundamental, possibilitando a criação de sistemas de acionamento eletrônico capazes de controlar a corrente de partida dos motores.

A eletrônica de potência desempenha um papel fundamental no controle de motores elétricos em uma ampla variedade de aplicações industriais, comerciais e até mesmo residenciais. Neste contexto, importância deste tema, uma vez que a eficiência energética e o controle preciso dos motores são aspectos cruciais para o funcionamento adequado de máquinas, sistemas de transporte, dispositivos eletrônicos e até mesmo sistemas de energia renovável.

O emprego de sistemas de comando elétrico se destaca como uma resposta crucial para operar máquinas elétricas de maneira precisa, segura e eficiente, enquanto as inovações tecnológicas continuam a moldar esse cenário de forma dinâmica. Diante desse contexto nasce uma problemática a ser analisada: Qual é o impacto das contribuições da eletrônica de potência nos acionamentos de motores?

O objetivo geral desta pesquisa é compreender os sistemas elétricos de potência mais utilizados no controle de motores elétricos. Dentro desse escopo, os objetivos específicos incluem estudar os acionamentos de partida, com foco especial nos diagramas de força associados a esses processos, bem como nos inversores de frequência.

2. MOTORES ELÉTRICOS: CC VS. CA E SUAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Os motores elétricos representam dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, a qual é utilizada para acionar diversas cargas por meio do movimento de seu eixo. Estes motores são essenciais em várias vertentes industriais, independentemente do tamanho da indústria. Dependendo da natureza da alimentação elétrica, seja corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), os motores elétricos são categorizados em motores CC e motores CA (Marques, 2016).

A distinção principal entre os motores CA e CC reside no controle de sua velocidade. Nos motores CC, a relação entre tensão e corrente é linear, sendo que a velocidade é ajustada alterando a tensão - por exemplo, reduzindo-a de 100V para 50V. A grande vantagem destes motores é a habilidade de variar a velocidade enquanto mantém um torque constante. Entretanto, suas desvantagens incluem custos elevados e a necessidade de uma fonte de alimentação especial, como uma fonte de corrente contínua ou retificadores (Marques, 2016).



Figura 1. Motor CC e CA

Fonte: Marques (2016)

Por outro lado, nos motores CA, a velocidade é determinada pela frequência da corrente alternada, a qual normalmente é fixa. Isso os torna ideais para aplicações industriais, aproveitando vantagens como rotações mais elevadas, manutenção simplificada e baixo ruído. Enquanto os motores CC são considerados ultrapassados e destinados a usos específicos, os motores CA são amplamente empregados na indústria (Marques, 2016).

Os tipos de motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) possuem distintas características. No contexto dos motores CA, uma das características proeminentes diz respeito ao comportamento do rotor em relação ao campo magnético gerado no estator. Notavelmente, no caso dos motores CA, o rotor não alcança a mesma velocidade do campo magnético rotativo gerado no estator (Franchi, 2019).

Quando as bobinas do estator geram corrente trifásica, isso resulta na criação de um campo magnético. Esse campo magnético, por sua vez, induz diretamente uma corrente no rotor. Essa corrente é gerada no mesmo campo magnético e é essa interação que dá origem ao torque que impulsiona a rotação do eixo. Entre os tipos de motores elétricos, o motor de indução com rotor de gaiola é amplamente utilizado. Isso se deve ao seu custo de manutenção mais baixo e ao menor custo inicial em comparação com motores de rotor bobinado. A estrutura desse motor é composta por um núcleo magnético, barras condutoras e anéis em curto-circuito que interligam as barras (Franchi, 2019).

Conforme discutido por Mamede Filho (2016), existem três categorias principais de motores elétricos: em série, em derivação e compostos. Os motores em série usam a mesma corrente para alimentar a carga e excitar o campo. No entanto, esses motores não podem operar sem carga, pois sua velocidade tende a aumentar a níveis que podem causar danos.

Em contrapartida, os motores em derivação estão diretamente ligados à fonte de alimentação e operam em paralelo, mantendo uma velocidade constante. Os motores compostos são uma combinação dos dois tipos anteriores, consistindo em duas bobinas: uma em série e outra em paralelo. Esses motores possuem um alto torque de partida e veloci-

dade (Mamede Filho, 2016).

O correto funcionamento e a eficácia no uso da energia elétrica dependem crucialmente das partidas empregadas em motores elétricos. Estas desempenham um papel fundamental ao minimizar perdas, assegurar uma vida útil prolongada e proporcionar confiabilidade essencial para a execução bem-sucedida das atividades cotidianas (Mamede Filho, 2016).

A incorporação de motores elétricos juntamente com sistemas de acionamento automático encontra aplicação em diversas áreas, como sistemas de tração, esteiras transportadoras, bombas hidráulicas, transporte de fluidos, manuseio de cargas e automação industrial. Dentre as opções disponíveis, destacam-se as partidas mais comuns: partida direta, partida direta com reversão, partida estrela-triângulo, partida estrela-triângulo com reversão, partida com autotransformador (também conhecida como “Chave Compensadora”) e sua variante com reversão (Mamede Filho, 2016).

A partida direta recebe a alimentação elétrica de maneira direta, proveniente da fonte geradora. Essa abordagem requer a implementação de componentes como contatores, disjuntores e um relé térmico, desempenhando a função de salvaguardar o circuito. A instalação desse tipo de partida demanda a consideração de três fatores essenciais para a ativação bem-sucedida desse comando. São eles: a relação entre a corrente de partida do motor e a corrente nominal da rede elétrica, a análise se o motor de baixa potência resultará em uma corrente de partida de valor reduzido e, por fim, a avaliação do motor em condições de ausência de carga (Corrêa *et al.*, 2013).

Conforme explicado por Mamede Filho (2016), dois obstáculos podem impossibilitar a adoção dessa partida direta. O primeiro reside na potência do motor, caso ela exceda os limites estipulados pela concessionária para uma conexão direta à rede de alimentação. O segundo entrave refere-se a cargas que demandem um acionamento gradual e progressivo, o que torna inviável a aplicação da partida direta.

Na partida direta com reversão, ocorre uma defasagem de 120 graus no campo magnético girante entre as fases. Para atingir esse efeito, torna-se essencial inverter a polaridade de duas das três fases que alimentam o motor em questão (Sala Da Elétrica, 2014).

A técnica de partida indireta, conhecida como partida “Estrela Triângulo”, tem como principal objetivo a redução da corrente de partida, permitindo que o motor alcance gradualmente seu estado de inércia. Posteriormente, ocorre a alteração das conexões das bobinas através dos comandos, permitindo que a corrente seja progressivamente aumentada até atingir a rotação nominal. Esse procedimento visa evitar picos de corrente elétrica, especialmente úteis em situações de sobrecarga, a fim de prevenir danos durante o processo de partida do motor (Mamede Filho, 2016). Parte superior do formulário

2.1 Princípio Funcionamento Das Chaves Soft-Starter

De acordo com Ribeiro (2017), a Soft-Starter representa um dispositivo eletrônico que exerce gerência sobre a potência do motor, tanto ao iniciá-lo quanto ao aplicar frenagem, tendo como fundamento central a regulação do ângulo de disparo (condução) dos tiristores.

Segundo Ribeiro (2017), esta regulação de disparo viabiliza a diminuição da voltagem durante o arranque do motor, com a finalidade de concretizar uma partida mais suave. Tal abordagem resulta em correntes de partida reduzidas, prevenindo não apenas a degrada-

ção da voltagem na rede elétrica, mas também impedindo a manifestação de demandas mecânicas indesejadas sobre o motor, reduzindo os níveis de torque.

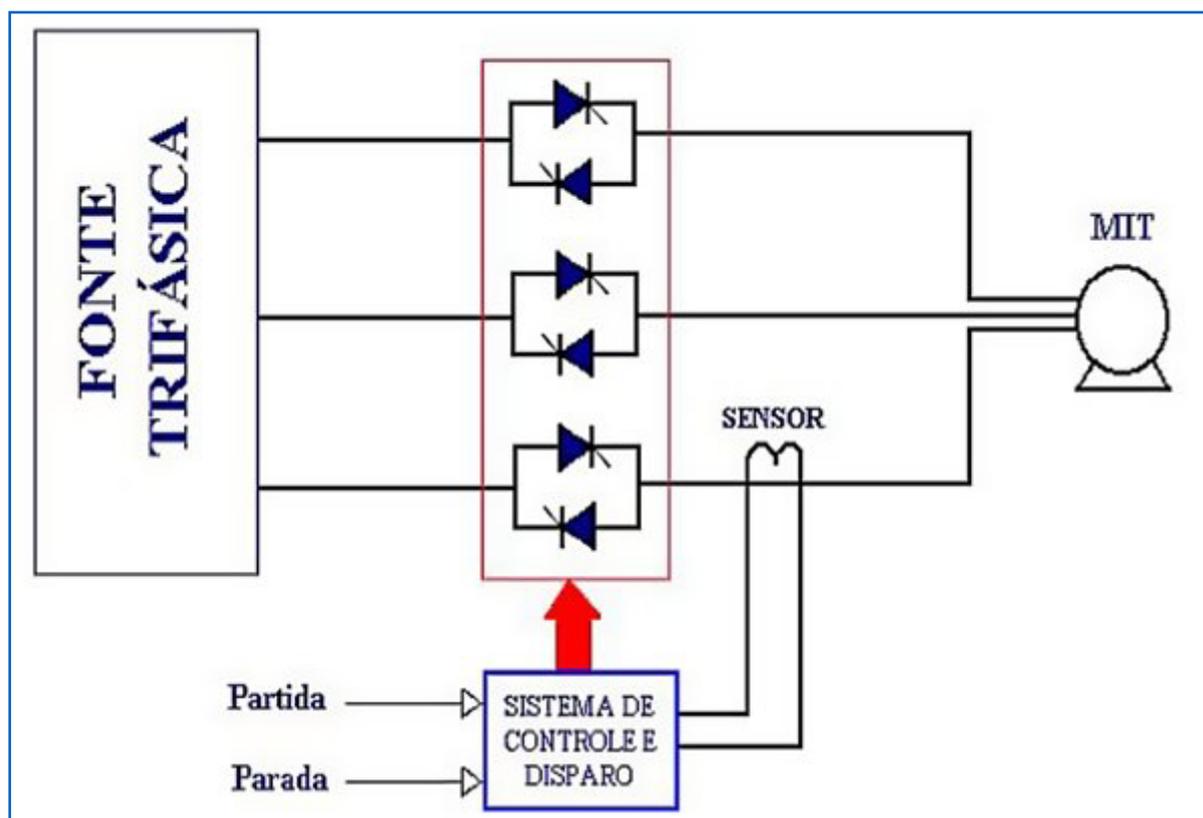


Figura 2. Esquema de uma soft-starter

Fonte: Amaral (2015)

Conforme ilustrado na Figura 2, por meio de um sistema de controle analógico ou digital, é viável realizar a ativação coordenada dos tiristores (também conhecidos como SCR's) em sincronia com o cruzamento zero da tensão proveniente da rede elétrica. Por conseguinte, ajustando o ângulo de disparo desses componentes, é possível regular a voltagem eficaz que é transmitida à carga, bem como a corrente e a potência resultantes desse processo (Amaral, 2015).

Conforme explicado por Amaral (2015), esse método de controle de disparo apresenta a capacidade de reduzir a tensão durante o arranque do motor, com o propósito de efetuar um processo de partida mais suave. Isso conduz a correntes de partida mais reduzidas e previne quedas de tensão na infraestrutura elétrica, ao mesmo tempo que minimiza cargas mecânicas indesejadas sobre o motor, resultando em níveis inferiores de torque.

De acordo com Rabello (2016), o gerenciamento da potência do motor deve ser executado sem ocasionar modificações na sua frequência intrínseca, isto é, na velocidade de rotação do motor. Esse gerenciamento é realizado através do controle dos disparos dos tiristores, os quais são acionados no exato momento em que tanto a tensão como a corrente atingem valores nulos em suas formas de onda.

De acordo com as observações de Costa *et al.* (2014), a Soft-Starter abarca funcionalidades fundamentais que incluem: gestão das taxas de aceleração e desaceleração; ajuste de corrente limitada; fornecimento de torque de partida; aplicação de frenagem por injeção de corrente contínua; salvaguarda do sistema contra sobrecargas; proteção do motor contra superaquecimento proveniente de sobrecargas ou partidas excessivamente frequentes; detecção de disparidades ou ausência de fases, assim como falhas nos tiristores.

Entre as vantagens citadas estão a corrente de partida próxima à nominal; ausência de restrições quanto ao número de manobras por hora; vida útil estendida, visto que não incorpora componentes eletromecânicos móveis; torque de partida aproximado ao torque nominal; além da capacidade de ser empregado para efetuar a desaceleração do motor (Costa *et al.*, 2014).

Conforme apontado por Frannchi (2019), o entendimento das propriedades do torque de carga que um motor precisará superar destaca-se como um fator crucial na definição do tipo de partida a ser utilizado em conjunto com a Soft-Starter. O autor destaca que cada carga exibe um comportamento singular em relação à rotação, o que viabiliza a caracterização e representação de distintos perfis de torque de carga em relação à rotação.

Dentre os exemplos de cargas, podem ser mencionadas as calandras, laminadoras de tecidos e papel, assim como as roscas de injeção (quando sem material) cujo torque resistente segue um padrão linear, ou seja, aumenta proporcionalmente ao aumento da rotação (Lins, 2019).

Segundo Monjo *et al.* (2014), uma calandra é composta por dois cilindros dispostos em sentido contrário e posicionados um sobre o outro, desempenhando a função de alisar e compactar tecidos e papéis. A alta inércia desses cilindros resulta em correntes de partida próximas à nominal, mesmo quando empregada a partida direta.

Em consonância, Fei *et al.* (2019) preconizam que o torque do motor deve exceder em 15% o torque resistente da carga, garantindo assim um acréscimo de 15% no torque de aceleração. Portanto, é vital escolher a estratégia de partida mais apropriada com base nas características da carga e nas exigências de operação para otimizar a eficiência e segurança do sistema.

Conforme mencionado por Amaral (2015), uma abordagem analógica e direta para controlar os disparos é empregar o dispositivo TCA 785. Por outro lado, Soft-Starters mais avançados adotam microcontroladores capazes de executar diversas funções, incluindo o controle dos disparos.

2.2 Funcionamento dos Motores com Inversores de Frequência

Os inversores de frequência desempenham um papel crucial no controle de motores elétricos, permitindo ajustar não apenas a velocidade, mas também outros parâmetros importantes, como o torque. Eles são amplamente utilizados em diversas aplicações, como elevadores, máquinas-ferramenta, sistemas de bombeamento e tração mecânica (Volpiano, 2018).

Ao variar a frequência da corrente elétrica fornecida ao motor, os inversores influenciam diretamente o desempenho do motor, possibilitando um controle preciso da velocidade e do torque. Essa tecnologia substitui com eficiência os métodos mecânicos tradicionais de variação de velocidade, oferecendo uma alternativa mais econômica, de manutenção simplificada e com maior disponibilidade no mercado (Volpiano, 2018).

Os inversores de frequência desempenham um papel fundamental no controle não apenas da velocidade, mas também de outros parâmetros importantes em motores elétricos trifásicos de corrente alternada. Além do controle de velocidade, esses dispositivos também podem gerenciar o torque do motor, proporcionando uma ampla gama de aplicações em setores como elevadores, máquinas-ferramenta, sistemas de bombeamento e tração mecânica, entre outros (Camargo, 2017).

Uma característica essencial dos inversores é sua capacidade de ajustar a frequência da corrente elétrica fornecida ao motor, o que influencia diretamente o torque gerado. Em motores de indução, por exemplo, o torque produzido é influenciado pela tensão aplicada no estator e pela frequência dessa tensão. Para manter o torque constante, é crucial manter a relação entre tensão e frequência (V/F) constante (Corrêa *et al.*, 2017).

O inversor de frequência com controle escalar é empregado para regular a velocidade dos motores de indução. Ele opera com base em curvas predefinidas da relação tensão/frequência, o que o torna adequado para a maioria das aplicações de controle de velocidade. No entanto, é importante notar que, em situações que demandam alto grau de precisão e torque, o controle escalar pode não manter uma relação precisa, especialmente em rotações próximas de zero (Camargo, 2017). Parte superior do formulário

Nos sistemas de acionamento modernos, os inversores de frequência representam uma solução versátil e eficiente para substituir os tradicionais métodos mecânicos de variação de velocidade, como polias e variadores hidráulicos, além dos custosos motores de corrente contínua (Rabelo, 2017).

A combinação de motores assíncronos e inversores oferece uma alternativa mais econômica, de manutenção simplificada e com disponibilidade mais ampla no mercado. Essa tecnologia não só possibilita o controle preciso da velocidade e do torque, mas também aumenta a eficiência energética e proporciona maior flexibilidade operacional em uma variedade de aplicações industriais e comerciais (Ribeiro, 2017).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os motores elétricos desempenham um papel significativo no consumo total de energia dentro do setor industrial. Portanto, é crucial que a indústria dedique a devida atenção à gestão energética, visando evitar desperdícios de energia. Isso pode ser alcançado através da otimização dos tempos de operação das máquinas e do aumento de suas eficiências.

A seleção da técnica de partida para os motores elétricos é um processo que leva em consideração diversos fatores. Estes incluem a natureza das operações que o motor irá executar, as condições das instalações, a potência nominal do motor e as técnicas que podem aumentar a confiabilidade do sistema elétrico como um todo. A partida direta é uma abordagem onde o motor é ligado diretamente à rede elétrica.

Uma alternativa é a partida estrela-triângulo. Nesse método, o motor é inicialmente conectado em uma configuração de baixa tensão (partida em estrela), o que permite uma partida mais suave em comparação com a partida direta. Após atingir a velocidade nominal, ocorre uma comutação para a configuração em triângulo, permitindo que o motor alcance sua capacidade máxima.

Referências

AMARAL, Cassandra Naiff do. **Análise de eficiência energética de um sistema de abastecimento de água de uma indústria cimenteira**. 2015.

CAMARGO, C.B. **Acionamentos De Motores De Indução Através das Técnicas de Controle Escalar e Vetorial**. Sorocaba: Faculdade de Engenharia de Sorocaba, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia



Elétrica; 2017.

CORRÊA, MB de R. *et al.* Sistema de Acionamento para Motores de Indução Monofásicos–Uma Avaliação. **Eletrônica de Potência-SOBRAEP**, v. 8, n. 2, p. 79-88, 2017.

COSTA, Mateus Henrique *et al.* **Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo**: inversores de frequência x chaves de partida estática (Soft-Starter). 2014. 84f. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência**: teorias e aplicações. São Paulo: Érica, 2019, 2ª Edição, 212p.

LINS, Vitor Fernando Machado. **Aplicação de inversores de frequência como uma alternativa para sistemas de elevação de carga do tipo pontes rolantes**. 2019. 75f. Monografia (Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2019.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. Livros Técnicos e Científicos, 2016.

MARQUES, Cíntia Gonçalves M. S. **Comandos Elétricos**. 2016

MONJO, Luiz; CORCOLES, Felipe; PEDRA, Joaquim. **Saturation effects on torque and current-slip curves of squirrel-cage induction motors**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 28, n. 1, p. 243-254, 2014.

RABELLO, Renato Gomes. **Proposta de prática com Soft-Starter para o laboratório de eletricidade da FGA**. 2016. 75f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

RIBEIRO, Lais Lima. **Estudo e análise do uso do equipamento Soft-Starter em práticas de laboratório de eletricidade**. 2017. 92 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SALA DA ELÉTRICA. **10 Partidas de motores que você precisa conhecer**. 2014. Disponível em: <https://www.saladaeletrica.com.br/comandos-eletricos/>.pdf. Acesso em: 10. fev. 2024.

VOLPIANO, Sérgio Luiz. **Eletrônica de potência**. SESI SENAI Editora, 2018.



ENGENHARIA 4.0

ERA DA PRODUÇÃO INTELIGENTE

6

A IMPORTÂNCIA DO PLANO DE MANUTENÇÃO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

*THE IMPORTANCE OF THE MAINTENANCE DRAWING OF
CONCRETE STRUCTURES*

Felipe Zamorano Silva Carvalho¹

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, São Luís, Maranhão



[10.29327/5407566.1-6](https://doi.org/10.29327/5407566.1-6)

Resumo

No mundo contemporâneo o concreto se estabeleceu como um dos materiais construtivos mais versáteis e amplamente utilizados, seja na construção residencial, industrial ou de obras arquitetônicas. Mas embora suas características de durabilidade e resistência sejam determinantes para seu uso, a manutenção se faz necessária por fatores internos e externos a construção. Assim, o objetivo desse artigo foi discutir a importância da manutenção das estruturas de concreto com vistas à prevenção de sua degradação e promoção da segurança e maior vida útil desse tipo de estrutura. Usando uma revisão de literatura, foram apresentadas as principais Características e usos do concreto e suas possíveis patologias, bem como a importância das Inspeções de estruturas de concreto e planejamento de intervenções de manutenção nas construções e Possíveis intervenções em patologias do concreto. Dessa forma, conclui-se que a implementação de um plano de manutenção das estruturas de concreto é de crucial importância para assegurar que durante a vida útil da construção tenha um uma performance sustentável e economicamente viável. Um planejamento de manutenção apropriado exige conhecimento dos impactos esperados na estrutura, no desempenho dos materiais construtivos e no potencial de eficácia dos procedimentos de manutenção, que deve ser sempre realizada por profissionais qualificados.

Palavras-chave: Concreto. Manutenção. Construção Civil.

Abstract

In the contemporary world, concrete has established itself as one of the most versatile and widely used construction materials, whether in residential, industrial or architectural construction. But although its durability and resistance characteristics are decisive for its use, maintenance is necessary due to factors internal and external to the construction. Thus, the objective of this article was to discuss the importance of maintaining concrete structures with a view to preventing their degradation and promoting safety and a longer useful life of this type of structure. Using a literature review, the main characteristics and uses of concrete and their possible pathologies were presented, as well as the importance of inspections of concrete structures and planning maintenance interventions in constructions and possible interventions in concrete pathologies. Therefore, it is concluded that the implementation of a maintenance plan for concrete structures is of crucial importance to ensure that during the useful life of the construction it has a sustainable and economically viable performance. Appropriate maintenance planning requires knowledge of the expected impacts on the structure, the performance of construction materials and the potential effectiveness of maintenance procedures, which must always be carried out by qualified professionals.

Keywords: Concrete. Maintenance. Construction.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do concreto vem sendo amplamente desenvolvida desde o início do século XX em obras de Engenharia Civil, como pontes, túneis, estruturas de contenção etc. tanto em terra como em meio líquido, como em rios, lagos e no próprio oceano. Considerado no início da sua utilização como um material inerte e resistente à deterioração, o concreto tem demonstrado ao longo do tempo ser potencialmente afetado por fenômenos de degradação mais ou menos complexos, dependendo das condições de exposição das estruturas aos ambientes e/ou de acordo com a composição intrínseca do concreto e as suas condições de implementação (BOLINA *et al.*, 2019).

Para compreender a degradação dos concretos, é necessário conhecer sua composição e sua utilização. Os concretos são obtidos pela mistura de materiais inertes como areia ou cascalho, um aglutinante como cimento ou argila e água. Essa mistura pode ser pré-moldada ou despejada diretamente no local. Ao adicionar reforços de aço ao núcleo do concreto, obtém-se um material muito mais resistente, o concreto armado (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

Ao longo da sua existência, o concreto está sujeito a múltiplos fenômenos (climáticos, físico-químicos, mecânicos, etc.) que podem conduzir a potenciais perturbações e degradações com impacto direto na saúde dos edifícios, infraestruturas e estruturas. Existem vários tipos de patologias, decorrentes de alterações químicas, mecânicas e físicas. Assim, a análise de um profissional é fundamental para determinar a origem do problema (PILZ *et al.*, 2019).

Ao mesmo tempo, na perspectiva da prevenção, o monitoramento e o planejamento das atividades de manutenção nas estruturas de concreto podem promover maior segurança, melhor desempenho, maior durabilidade e extensão da vida útil, sendo importante a intervenção da engenharia civil em todos os estágios, desde o projeto, manutenção e desativação dessas estruturas (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

O concreto armado combina as resistências à compressão do concreto com o desempenho à tração do aço. O concreto protendido é adequado para estruturas sujeitas a altas tensões; o concreto é submetido durante sua fabricação a tensões de compressão, o que o torna mais resistente às tensões de tração aplicadas à estrutura. A sua energia incorporada é, por outro lado, importante e a possibilidade de desmantelamento pode se tornar quase nula, se as atividades de manutenção da estrutura forem planejadas e implementadas, demonstrando a importância desse tema para a construção civil (HENRIQUES; TAVARES; TERCEIRO NETO, 2023).

As vantagens da construção em concreto, sobretudo econômicas, são motivos para sua ampla aplicação em diversos tipos de construções modernas e contemporâneas. Os elementos estruturais de concreto vêm em várias formas, desde colunas a vigas, paredes ou lajes moldadas no local a lajes pré-moldadas. As vantagens destes elementos são inúmeras: longa vida útil, potencial de reciclagem, desempenho acústico, grande alcance possível, custo etc (BOLINA *et al.*, 2019). Por isso, pesquisar sobre os processos de manutenção dessas estruturas se faz importante para conhecer as intervenções da engenharia civil para manutenção da segurança dessas estruturas.

Assim, esta pesquisa pretende colaborar para construção de um agregado teórico que possa nortear profissionais e acadêmicos da área de engenharia civil sobre a neces-

cidade de realizar atividades de manutenção preventivas e corretivas em estruturas de concreto, enfatizando os benefícios que podem ser alcançados pela correta aplicação das intervenções para reduzir ou minimizar a degradação do concreto.

Após alguns anos da execução de projeto, é possível que se observe sinais de deterioração do concreto, que podem ir desde fissuras até carbonatação, por exemplo. Os problemas podem advir de um defeito da estrutura, de ataques vindos do meio ambiente ou de reações químicas (CASSAVARA RODRIGUES FILHO; COSTA, 2023). Diante disso, pergunta-se: qual a importância do planejamento de manutenção nas estruturas de concreto?

Dessa forma, visando responder tal questionamento, foi definido como objetivo geral dessa pesquisa, discutir a importância da manutenção das estruturas de concreto com vistas à prevenção de sua degradação e promoção da segurança e maior vida útil desse tipo de estrutura. Ao mesmo tempo, foram definidos como objetivos específicos: identificar, a partir da literatura especializada, os tipos de degradações a que estão sujeitas as estruturas de concreto e apresentar as técnicas de manutenção utilizadas para preservar estruturas de concreto.

A estruturação desse artigo foi articulada em três tópicos principais, sendo o primeiro essa introdução que apresenta a temática, contextualizando o objeto de pesquisa, apresentando a problemática, assim como os objetivos da pesquisa. em seguida, o referencial teórico descreve a metodologia utilizada e o percurso metodológico utilizado. Traz também, nos resultados e discussão uma abordagem sobre as principais características do concreto, a importância de atividades inspeção, de manutenção e de reparo para manter a usabilidade e segurança das estruturas e possíveis intervenções de reparo, conforme o tipo de patologias apresentadas.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi proposto o método de revisão de literatura, com abordagem narrativa de literatura, utilizando para embasamento teórico produções acadêmicas e artigos científicos/especializados publicados em revistas da área de construção civil e afins, inclusive online.

Para coleta de dados foram acessas as bases de dados eletrônicas Google Acadêmico e Scientific Electronic Library Online (SciELO). A pesquisa por artigos foi realizada buscando os termos: a) “construção civil”; b) “manutenção de estruturas”; c) “concreto”.

Como critérios de inclusão, foram selecionadas as publicações produzidas em português, disponibilizadas de forma gratuita nas bases de dados citadas e publicadas entre 2019 e 2024. Como critérios de exclusão, foram dispensados os estudos que desmobilizavam apenas os resumos e que não contribuíam para atender os objetivos dessa pesquisa, além daqueles produzidos antes de 2019.

3. CARACTERÍSTICAS E USOS DO CONCRETO

O concreto é um material cuja estética, em alguns casos, tem sido considerada como parte de sua utilização. É amplamente aplicável em diversos tipos de projetos, tem alta capacidade de carga e, se mantido adequadamente, é durável e resistente. É por isso que

a manutenção de estruturas de concreto é necessária, mais cedo ou mais tarde (PILZ *et al.*, 2019).

Segundo Gomide (2021), o próprio concreto também pode ter valor como material de acabamento e, portanto, deve ser preservado. Os aspectos estéticos do material também nem sempre são suficientemente reconhecidos. Especialmente em estruturas mais jovens, a aparência visual do material pode ser muito importante.

No chamado concreto limpo, a textura, a cor e o relevo do concreto têm função estética explícita. Por exemplo, pintar uma superfície de concreto pode ser eficaz na prevenção da penetração de umidade, mas nem sempre é necessário ou desejável (JARDIM *et al.*, 2019).

Reparar concreto é uma parte importante de um plano de manutenção predial. A manutenção e reparação do concreto nem sempre são realizadas de forma satisfatória, pois esse material ainda é frequentemente visto como um material puramente funcional, de modo que uma mudança na composição ou aparência do material nem sempre são consideradas importantes (CARVALHO, 2019).

O concreto é um material sustentável. No entanto, requer manutenção periódica e reparos podem ser necessários ao longo do tempo. Por exemplo, um projeto no qual a autenticidade estética do concreto é importante requer intervenções diferentes de um monumento no qual a qualidade estrutural está principalmente em causa. Antes de agir, é necessário, portanto, determinar a condição do concreto e o seu valor, inclusive estético, dentro de cada projeto (NEVES; VAZQUEZ, 2021).

Conforme Serafini e Rambo (2020), a manutenção periódica deve ser realizada em todas as estruturas. As medidas de reparação e manutenção necessárias ou desejáveis são determinadas, por um lado, pelos sintomas dos danos que ocorrem e, por outro lado, pelo valor estético do concreto.

Não só os danos podem ser motivo para intervir, mas também uma mudança de uso e outros requisitos do projeto e uso dos espaços. Por exemplo, pode ser necessário reforçar uma estrutura com uma carga mais elevada ou isolá-la termicamente para reduzir o consumo de energia ou para evitar fissuras devido à expansão térmica (BAMBIRRA, 2019).

Carreira (2019) destaca que além de melhorar a aparência, um objetivo importante da manutenção é proteger a estrutura contra a deterioração. Na prática, a ocorrência de danos costuma ser motivo para realizar manutenções e reparos. Contudo, é melhor que antes de ocorrerem danos, sejam investigados quais os mecanismos de danos que constituem ameaças.

Com base nos resultados da investigação preliminar, pode-se determinar quais intervenções são tecnicamente necessárias. Esses resultados também podem ser usados para estimar melhor se as intervenções desejadas por razões estéticas podem causar danos a longo prazo. Por exemplo, um sistema de pintura que permite a passagem de muito pouco vapor de água pode levar ao acúmulo de umidade, resultando em deterioração acelerada (PILZ *et al.*, 2019).

4. PATOLOGIAS DO CONCRETO

Muitos mecanismos de danos só podem ocorrer se o teor de umidade no concreto for demasiado elevado. A penetração da umidade pode ser evitada através da aplicação

de um sistema de pintura, de uma camada de cobertura ou da impregnação do concreto. Uma camada de cobertura pode consistir em concreto, argamassa de reparo, material betuminoso ou outros materiais, como chumbo (SOARES *et al.*, 2022). A Figura 1 traz um demonstrativo da classificação das causas físicas da deterioração do concreto.



Figura 1. Causas físicas da deterioração do concreto

Fonte: Verly (2022).

No entanto, Medeiros *et al.* (2020) afirmam que os danos em pisos, lajes e vigas devem ser sempre reparados o mais rapidamente possível para evitar danos maiores e possivelmente até problemas estruturais. Se um plano de manutenção predial não for implementado, a segurança estrutural de um edifício ou parte de um edifício pode ser comprometida.

Na maioria dos casos, os danos ao concreto são causados pela ferrugem da armadura. Este é um processo irreversível e por isso deve ser levado muito a sério. O reforço enferrujado se expande e causa rachaduras e lascas soltas no concreto que enfraquecem a estrutura e o efeito protetor da camada de concreto é transferido para a armadura (CUNHA *et al.*, 2019).

Conforme Paula (2022), no concreto saudável, a armadura é protegida contra a corrosão pelo fato de que, como resultado do ambiente alcalino do concreto, uma fina camada de ferrugem cinzenta se forma na armadura. Esta camada é estável e evita mais corrosão. A proteção pode ser anulada como resultado da penetração de ácidos ou cloretos. Os ácidos neutralizam o ambiente alcalino, enquanto os cloretos desestabilizam a camada protetora da ferrugem.

Além dos ambientes químicos reais, o dióxido de carbono no ar é a causa do ataque ácido mais comum ao concreto. O processo pelo qual o dióxido de carbono penetra lentamente no concreto a partir da superfície e, junto com a água, forma um ácido que neutraliza o ambiente alcalino enquanto forma carbonato de cálcio, ocorrendo o processo denominado de carbonatação (GAMA, 2021).

Segundo Tokarski, Matoski e Mazer (2023), a carbonatação do concreto é um processo que afeta a parte externa de uma estrutura de concreto. Ocorre gradativamente sob a influência do dióxido de carbono, que tem impacto negativo na estrutura do concreto. Como resultado da exposição ao dióxido de carbono (CO₂), forma-se o carbonato de cálcio

(CaCO₃). A Figura 2 mostra o fluxograma do mecanismo de carbonatação.

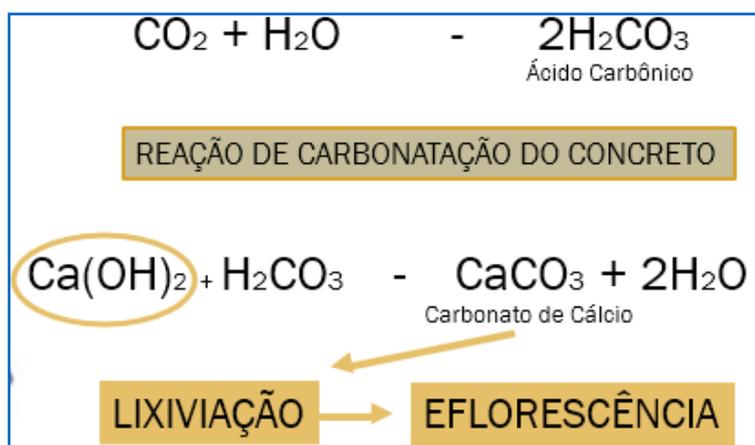


Figura 2. Mecanismo da Carbonatação

Fonte: Frazão (2021).

O carbonato de cálcio não degrada a estrutura do concreto, embora altere seu pH. Sob a influência do CaCO₃, o pH cai abaixo de 9, o que inicia um lento processo de destruição da superfície do aço de armadura. Com isso, começa a ficar coberto de ferrugem, o que com o tempo leva a danos ao concreto. Isto, por sua vez, pode fazer com que a cobertura de concreto se solte, expondo a armadura (HENRIQUES; TAVARES; TERCEIRO NETO, 2023).

Costa *et al.* (2021) enfatizam que os dois tipos de corrosão das armaduras manifestam-se de forma diferente e apresentam perigos diferentes. A corrosão causada pela carbonatação geralmente produz sintomas na forma de deslocamento da camada de cobertura acima do local onde o reforço enferruja. Isso ocorre porque os produtos de corrosão formados absorvem várias vezes mais que o ferro, o que cria uma pressão que consegue deslocar a camada de cobertura. Esse tipo de ferrugem geralmente é vermelho como a ferrugem do ferro ao ar livre.

A carbonatação do cimento é um processo que ocorre como resultado do dióxido de carbono e do hidróxido de cálcio. Como resultado da reação química entre eles, formam-se moléculas de água e carbonato de cálcio. Este último, como no caso do concreto, diminui o nível de pH do cimento, o que representa uma séria ameaça para camadas externas. Combinada com a chuva ácida, o resultado desse processo é a corrosão do aço da armadura, que aumenta de volume e leva a tensões, causando fissuras e deslocamento do concreto (HENRIQUES; TAVARES; TERCEIRO NETO, 2023).

Conforme Tokarski, Matoski e Mazer (2023), a corrosão causada por cloretos nem sempre apresenta sinais visíveis na superfície do concreto. Esse processo ocorre durante a formação de produtos de corrosão que não ocupam tanto espaço quanto a ferrugem vermelha citada e que, portanto, nem sempre provocam trincas e deslocamento. Existe, portanto, o risco de enfraquecimento da armadura no interior do concreto com o risco de redução da capacidade de carga, sem que haja sinais visíveis disso na superfície.

A carbonatação também pode tornar o concreto mais suscetível a danos causados por outros fatores, como ciclos de congelamento e descongelamento e produtos químicos. Este é um fator importante a considerar ao projetar e manter estruturas de concreto. A proteção contra a corrosão da armadura consiste principalmente em fixar a armadura com uma camada de cobertura adequada de concreto sólido e não fissurado com baixo teor de água (SOARES *et al.*, 2022).

As rachaduras e lascas soltas facilitam ainda mais o acesso do oxigênio e da umidade

ao reforço, acelerando o processo de deterioração. Portanto, é necessário manter vigilância sobre a estrutura de concreto e manter atenção aos sinais como rachaduras, lascas e manchas de ferrugem (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

5. INSPEÇÕES DE ESTRUTURAS DE CONCRETO E PLANEJAMENTO DE INTERVENÇÕES DE MANUTENÇÃO NAS CONSTRUÇÕES

Para se ter conhecimento da manutenção a ser realizada, é necessário realizar inspeções. As inspeções de engenharia civil examinam o estado dos componentes das estruturas, como estruturas de suporte de concreto ou aço, corrimãos, transições de juntas, sistemas de drenagem e revestimentos de taludes (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

Uma inspeção funcional é uma verificação sensorial do funcionamento de componentes primários de engenharia e de componentes que requerem monitoramento intensivo. São realizadas inspeções específicas para detectar imperfeições ou danos que possam afetar diretamente ou a curto prazo negativamente o funcionamento adequado e, portanto, seguro do objeto (SOARES *et al.*, 2022).

Conforme Cunha *et al.* (2019), uma inspeção técnica é uma inspeção de instalações/obras de arte através da inspeção sensorial e da realização de medições e/ou testes no que diz respeito a normas, segurança e estado de manutenção. É também uma verificação do cumprimento dos requisitos de concepção e utilização, visando a recolha de dados que permitam uma avaliação inequívoca do estado de qualidade do objeto. A inspeção técnica inclui a criação de uma visão completa das condições técnicas de manutenção da estrutura. Muitas vezes, isso diz respeito a parte da área total das obras de arte.

Um processo de danos não precisa ser imediatamente visível, por exemplo, a deterioração do concreto ou a corrosão das armaduras podem estar mais presentes abaixo da superfície do que inicialmente se cogitava ou era vista a olho nu. Este é um ponto de atenção muito importante, principalmente com lajes ou estrutura de suporte de um edifício. A inspeção de uma estrutura de concreto proporciona clareza e visão da realidade da deterioração de uma estrutura e pode garantir que danos e desgastes possam ser percebidos e resolvidos em um estágio inicial (NEVES; VAZQUEZ, 2021).

A partir das inspeções preliminares é feito um inventário de quais intervenções são possíveis e necessárias para reparar danos e prevenir seu agravamento. A avaliação do valor mostra quais aspectos do concreto devem ser mantidos. Deve então ser avaliado para cada intervenção como a intervenção afeta o valor monumental (CUNHA *et al.*, 2019).

O princípio básico é que as intervenções devem contribuir para a preservação ou valorização do projeto. Também não devem pôr em perigo a estrutura a longo prazo. Além disso, as intervenções devem ser sustentáveis, para que os recursos financeiros sejam empregados de forma eficiente (SERAFINI; RAMBO, 2020).

Embora o concreto seja um material resistente e tenha longa vida útil, a manutenção é um fator importante para, entre outras coisas, continuar a resistir às influências climáticas. A utilização de sais, a penetração de água através da formação de fissuras, por vezes mínimas, são fatores que podem afetar negativamente a construção a longo prazo (PILZ *et al.*, 2019).

Detectar e resolver qualquer dano ou desgaste em uma fase inicial garante que a estrutura permaneça segura e em boas condições, atitude que também reduz os custos

a longo prazo; o desgaste incipiente é geralmente muito mais fácil e de menor custo para resolver do que se a estrutura estiver mais danificada (JARDIM *et al.*, 2019).

Uma boa manutenção do concreto é uma parte importante da prevenção de danos em um edifício, estrutura ou infraestrutura, que ocorrem, por exemplo, na forma de rachaduras ou deslocamento do concreto. A manutenção preferencialmente não deve ser corretiva, mas sim preventiva. É por isso que deve ser definido um plano de manutenção detalhado como diretriz para a inspeção e manutenção de objetos e estruturas de concreto (CARREIRA, 2019).

O planejamento racional de custos e atividades concentra-se principalmente em encontrar o equilíbrio entre o risco de falha (padrão), a relação entre probabilidade de falha e os custos devido aos danos consequentes e os custos de manutenção. Se os custos devidos aos danos consequentes forem baixos, a manutenção corretiva pode ser considerada (CARVALHO, 2019).

Bolina *et al.* (2019) afirmam que se os custos devidos a danos consequentes forem elevados, será escolhida a manutenção preventiva. No caso da manutenção corretiva, o investimento é integralmente aproveitado, mas tolera-se certo grau de transtorno. No caso da manutenção preventiva, aceita-se um certo grau de desinvestimento para evitar que surjam situações com consequências drásticas (BOLINA *et al.*, 2019).

Independentemente do projeto, é necessário primeiro pesquisar para chegar a um plano de reparo correto, adaptado à vida útil desejada da estrutura de concreto e ao orçamento disponível. Estão à disposição vários métodos de reparação: reparações manuais de concreto, projeção de concreto, bombagem de argamassas com bombas de pó grosso, injeção de fissuras com resina epóxi ou pur (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

A tecnologia e os materiais utilizados dependem dos requisitos, do tipo de dano e da construção. Antes do trabalho de reparo, é necessário remover as partes soltas cortando, quebrando, esmerilhando e/ou removendo a camada superficial com areia ou jatos de água. Se necessário, o reforço será retirado ou removido. Assim, conforme cada caso, o plano de manutenção deve ser executado segundo as características de cada projeto, danos presentes e escolha dos melhores materiais que atendam as premissas de segurança e sustentabilidade, além dos custos aceitáveis (NEVES; VAZQUEZ, 2021).

6. POSSÍVEIS INTERVENÇÕES EM PATOLOGIAS DO CONCRETO

A reparação de danos no concreto exige que a causa e a extensão dos danos tenham sido determinadas. É particularmente importante garantir que não haja riscos para a segurança da construção a curto ou longo prazo. Podem ser feitas medições da condição do concreto e da armadura perfurando corpos de prova e examinando-os em busca de sinais de degradação (HENRIQUES; TAVARES; TERCEIRO NETO, 2023).

Para Gomide (2021), além de elucidar o estado da construção, um levantamento do estado também poderá elucidar a vida útil restante e a durabilidade, bem como as possíveis causas dos danos. O conhecimento das causas dos danos, e não menos importante, do risco de desenvolvimento futuro de danos, é um fator importante na determinação de um método de reparação que não só repare os danos existentes, mas também garanta que a degradação futura da estrutura seja interrompida.

Se a segurança não for afetada, muitas é vantajoso realizar reparos. Por outro lado, uma substituição total pode ser a única opção quando a segurança não é suficiente. Entre

estes extremos, podem ser escolhidas diferentes medidas preventivas ou corretivas. Reparos locais na forma de remoção de concreto ruim, limpeza de armaduras e estabelecimento de uma nova camada de cobertura são métodos tradicionalmente usados contra danos locais causados por camadas de cobertura muito finas e carbonatação (SCHMOELLER; LIMA, 2021).

As opções e a escolha de um sistema de reparo das estruturas de concreto são determinadas por um grande número de fatores: o acabamento original, os mecanismos de dano que desempenham um papel relevante, os requisitos estéticos, a intensidade da manutenção futura e a filosofia de restauração (BOLINA *et al.*, 2019).

Destacam Cassavara, Rodrigues Filho e Costa (2023), ao iniciar a reparação do concreto, deve-se levar em consideração o tipo e a função do elemento e da superfície danificados. A massa de reparo deve ter propriedades físicas (absorção, estanqueidade, resistência) correspondentes aos requisitos da estrutura de um determinado local.

Existem muitos agentes e sistemas prontos para reparo de concreto disponíveis no mercado, destinados ao uso em aplicações específicas. Os sistemas de reparo prontos são projetados para necessidades específicas e podem ser usados, por exemplo, para: proteção anticorrosiva de reforço, substituir ou restaurar o perfil e função do concreto danificado, nivelamento e enchimento, proteção de concreto dentre outros (SOARES *et al.*, 2022).

São misturas desenvolvidas com proporções de ingredientes selecionadas de acordo com o uso a que se destinam, que bastam ser misturadas com água para estarem prontas para uso. Contêm sílica, cimento e aditivos, como inibidor de corrosão do aço e copolímero de resina acrílica, que melhoram a qualidade da ligação. Podem conter sílica ativa que sela a massa, fibras poliméricas que evitam microfissuras e um copolímero acrílico selante (GAMA, 2021).

Conforme Schmoeller e Lima (2021), os inibidores de corrosão, como os fosfatos, também podem aumentar a resistência do concreto à carbonatação, dificultando as reações químicas que levam à carbonatação. Os inibidores de corrosão são produtos químicos adicionados ao concreto para aumentar sua resistência à corrosão. Os inibidores de corrosão atuam interrompendo as reações químicas que levam à oxidação dos componentes metálicos do concreto, como o aço de reforço.

Os inibidores de corrosão estão disponíveis em diversas formas, como pós, soluções ou emulsões, e podem ser adicionados ao concreto durante sua produção ou como revestimento em uma estrutura já construída. Então, a maneira mais eficaz é isolar a superfície do concreto do ar e da umidade usando a impermeabilização que impedirá efetivamente a penetração de dióxido de carbono e manterá o concreto seco (GAMA, 2021).

Vidal *et al.* (2022) expressam que, no caso de corrosão das armaduras causada por cloretos, o método deve ser utilizado com cautela, pois muitas vezes a corrosão continuará imediatamente após os reparos realizados. Camadas protetoras de tinta geralmente só podem ser usadas se o concreto estiver quase intacto ou completamente novo e, em todos os casos, exigir tratamentos de acabamento regulares. Métodos elétricos como a proteção catódica podem parar a corrosão do reforço através da aplicação de um campo elétrico ao reforço, pelo que a corrosão, que é ela própria de natureza elétrica, é evitada ou retardada.

A qualidade da execução dos trabalhos de reparação também muitas vezes deixa muito a desejar. Muitas vezes acontece que o concreto precisa ser retrabalhado alguns anos após um primeiro reparo. Escolhas ideais de materiais, boa execução e controle sobre a implementação são essenciais para um resultado sustentável (LOPES; OLIVEIRA; CASCUDO, 2022).

7. CONCLUSÃO

As construções em concreto geralmente apresentam uma durabilidade alta, mesmo que o material seja utilizado com diferentes finalidades, fiquem expostos à diferentes condições ambientais e sejam aplicados a distintos tipos de construção. A pesquisa e desenvolvimento de novos agregados e aditivos também tem beneficiados o uso desse material construtivo, garantindo melhor qualidade.

No entanto, vários fatores podem levar a uma vida útil mais curta do que o esperado, como resultado de concepção inadequada, baixa qualidade do material, falhas de execução, alterações nas condições de exposição, o estresse mecânico, as influências climáticas, ataques químicos ou danos súbitos como resultado de, por exemplo, um incêndio.

É, portanto, importante avaliar continuamente o estado das estruturas de concreto, a fim de manter a sua função de uso segura e esteticamente agradável aos usuários com custos mínimos de operação e manutenção. Aparição de trincas, rachaduras e outras patologias devem ser analisadas e intervenções realizadas nos primeiros sinais de que sejam necessárias intervenções de manutenção.

Para evitar maiores danos, isto deve ser feito de acordo com um plano de manutenção predial que atenda aos requisitos técnicos, com materiais adequados e técnicas que atendam as demandas de cada patologia. O pré-requisito para o planejamento e execução adequados dos trabalhos de reparação parte da contratação de um profissional especializado, já que é necessário avaliar a profundidade e seriedade de cada patologia, bem como a forma como os danos podem se agravar.

Dessa forma, conclui-se que a implementação de um plano de manutenção das estruturas de concreto é de crucial importância para assegurar que durante a vida útil da construção tenha um uma performance sustentável e economicamente viável. Um planejamento de manutenção apropriado exige conhecimento dos impactos esperados na estrutura, no desempenho dos materiais construtivos e no potencial de eficácia dos procedimentos de manutenção, que deve ser sempre realizada por profissionais qualificados.

Referências

BAMBIRRA, Filipe Starling. **Análise de normas técnicas e a elaboração de programa de manutenção predial**. Monografia (Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30881/1/TCC%20-%20Filipe%20Starling%20Bambirra.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

BOLINA, Fabricio Longhi et al. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CARREIRA, Maria Lidia Brito da Silva. Ferramentas do Gerenciamento de Facilidades aplicadas à Gestão da Manutenção Predial. **Gestão e Gerenciamento**, [S.l.], v. 9, n. 9, p. 22-31, set. 2019. Disponível em: <https://nppg.org.br/revistas/gestaoegerenciamento/article/view/329>. Acesso em: 24 out. 2023.

CARVALHO, Juliana de. **Contribuição à conservação do patrimônio cultural da arquitetura moderna: proposta de metodologia de análise de risco das estruturas de concreto armado**. 2019. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/T.16.2019.tde-02102019-120445. Acesso em: 24 out. 2023.

CASSAVARA, Fernanda Torres Gonçalves; RODRIGUES FILHO, José Marcos; COSTA, Rafaela Dos Santos. Carbonatação em Estruturas de Concreto Armado. Congresso Brasileiro de Ciências e Saberes Multidisciplinares, 2., **Anais [...]**, 2023. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://conferencias.unifoa.edu.br/tc/article/view/1064>. Acesso em: 29 mar. 2024.



COSTA, Vitória Silveira da; TEIXEIRA, Fernando Ritiéle; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. Carbonatação natural em concreto com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em substituição ao aglomerante. *In: Encontro Nacional De Aproveitamento de Resíduos na Construção*, 7., 2021. **Anais [...]**. [S. l.], 2021. p. 81–87. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3307>. Acesso em: 28 mar. 2024.

CUNHA, F. S. et al. Estudo de caso: influência dos níveis de desempenho da ABNT NBR 15575 no consumo de materiais utilizados em estruturas de concreto armado. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 4, p. 956–971, jul. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/V3xqyxfv9BW6ydNWPn3Szs-M/?lang=pt#>. Acesso em: 24 out. 2023.

GAMA, Matheus Ferreira. Carbonatação do concreto: causas, consequências e tratamento. *In: Congresso Online de Engenharia de Materiais*, 3. 2021. **Anais [...]**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://eventos.congresso.me/engmatcon/resumos/11181.pdf?version=original#:~:text=Consequ%C3%AAsncias%20da%20Carbonata%C3%A7%C3%A3o%20do%20Concreto,sua%20ader%C3%AAncia%20com%20o%20concreto..> Acesso em: 10 mar. 2024.

GOMIDE, Tito Lívio Ferreira et al. **Manual de engenharia diagnóstica: desempenho, manifestações patológicas e perícias na construção civil**. 2. ed. São Paulo: Leud, 2021.

HENRIQUES, Glauco Fonsêca; TAVARES, Jennef Carlos; TERCEIRO NETO, Antônio Dias de Lima. Carbonatação natural e modelos de previsão para concretos de cimento Portland: uma revisão. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 60, n. 1, p. 102-119, mar. 2023. ISSN 2447-9187. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6023>. Acesso em: 18 mar. 2024.

ISAIA, Gustavo de Aguiar. RIZZATTI, Eduardo. Carbonatação em concretos de alta resistência com elevados teores de Filer Calcário. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 07, a. 6, e. 4, p. 74-106. Abril/2021. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/elevados-teores>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/elevados-teores. Acesso em: 15 mar. 2024.

JARDIM, Maria Tereza M. et al. Manifestações patológicas na construção civil e recuperação de empreendimento de alvenaria pré-moldada: um estudo de caso de um empreendimento localizado no Município De Esmeraldas, Minas Gerais. **Paramétrica**, [S. l.], v. 11, n. 12, p. 690–702, 2019.

LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. de; CASCUDO, O. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – Parte 2. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 27, n. 2, p. e202244823, 2022.

MEDEIROS, A. G. de et al. Aplicação de metodologias de inspeção em ponte de concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 687–702, jul. 2020.

NEVES, Moises Balenga Jose; VAZQUEZ, Elaine Garrido. Patologias das estruturas. **Boletim do Gerenciamento**, [S.l.], v. 22, n. 22, p. 11-19, jan. 2021. ISSN 2595-6531.

PAULA, Andréia de. Carbonatação nas Estruturas de Concreto Armado: Uma Revisão da Literatura. *In: Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções – CINPAR*, 18., 2022. **Anais [...]**. [S. l.], 2022.

PILZ, Silvio E. et al. Avaliação dos métodos de inspeção para atendimento às normas do sistema de gestão predial. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 5, n. 7, p. 10257–10270, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/2500>. Acesso em: 24 out. 2023.

SCHMOELLER, Francieli; LIMA, Maryangela Geimba de. Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão. **Concreto & Construções**, ed. 103, p. 34 – 38, jul./Set, 2021.

SERAFINI, Ramoel; RAMBO, Dimas Alan Strauss; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Controle contínuo da resistência de estruturas de concreto pelo método da maturidade. **Concreto & Construções**, n. 98, p. 85 -90. Abr./Jun, 2020.

SOARES, R. G. P. et al. Análise de manifestações patológicas em sistema estrutural de concreto pré-moldado em um imóvel na cidade de Bom Conselho-PE. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 8, pág. e54211830912, 2022.

TOKARSKI, Rosângela Basso; MATOSKI, Adalberto; MAZER, Wellington. Reação da carbonatação no concreto melhorando parte do cimento do traço por rejeito passivo de carvão mineral. **Contribuciones A Las Ciencias Sociales**, [S. l.], v. 7, p. 7926–7947, 2023.

VIDAL, Julia Spiller, PACHECO, Fernanda; SIMONETTI, Camila; EHRENBRING, Hinoel Zamis; CHRIST, Roberto; OLIVEIRA, Maria Fernanda de. Análise da durabilidade do concreto frente à carbonatação e ataque de clore-

tos: estudo de caso em edifícios do litoral norte do Rio Grande do Sul. *In*: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2022. **Anais [...]**. [S. l.], p. 452- 465, 2022.



Nesta obra os Organizadores ressaltam a importância da série científica “Engenharia 4.0: a era da produção inteligente” no contexto empresarial, científico e seus utilitários, por se tratar de tema da maior relevância para a indústria e centros de pesquisa que buscam identificar propostas com o potencial de desenvolvimento tecnológico e inovação. Pautada com trabalhos focalizados em discussões da Engenharia a respeito da produção inteligente e sua nova fronteira, oportuniza aos acadêmicos, professores e profissionais atuantes excelente material para novas reflexões.

