ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADOR

OSVALDO SENA GUIMARÃES



VOLUME 8

Editora Poisson

Osvaldo Sena Guimarães
(Organizador)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 8

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2023

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57
Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 8/
Organizador: Osvaldo **S**ena Guimarães –
Belo Horizonte - MG: Editora Poisson,
2023

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-275-4
DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Gestão 3. Inovação
I. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

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

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Método de análise e solução de problemas complexos 07

João Carlos Mosquim, Juliana Farah

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.01

Capítulo 2: O guia PMBOOK adaptado a um projeto implantado numa indústria gráfica: Estudo de caso 25

Aurelia Altemira Acuna Idrogo, Jose Salvino da Silva, Gioconda Suncion Acuna

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.02

Capítulo 3: Ferrovias brasileiras: Histórico e processo de estagnação 42

Luis Antonio Gomes da Costa Moura da Silva, Maria Clara Muniz Araújo, Mayssa Alves da Silva Sousa

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.03

Capítulo 4: Características hidrodinâmicas de navios em águas restritas 52

Roseane Costa Diniz, Julio Cesar Barcellos Guimarães, Witson Andrade da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.04

Capítulo 5: Uso da Areia Descartada de Fundição (ADF) aplicada à pavimentação como alternativa com foco na sustentabilidade: Uma revisão de literatura 63

Maria Gabriela de Sousa Silva, Sâmyo Rodrigues Costa, Thyago Vinícius Santos da Silva, Mayssa Alves da Silva Sousa

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.05

Capítulo 6: Estudo do potencial impacto da condição do pavimento na perda de soja durante seu transporte 74

Renan Gustavo Scherer, Lucas Dotto Bueno, Deividi da Silva Pereira, Luciano Pivoto Specht

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.06

Capítulo 7: Valorização de cinzas de biomassa vegetal para aplicações geotécnicas 87

Leonardo Marchiori, André Studart, Maria Vitoria Morais, António Albuquerque, Luis Andrade Pais, Maria Eugênia Gimenez Boscov, Victor Cavaleiro

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Projeto e fabricação de uma haste femoral em material compósito polimérico 102

Fellipe Roberto Biagi de Almeida, Romeu Rony Cavalcante da Costa, Sandra Mara Domiciano, Amanda Albertin Xavier da Silva, Ritiery Moreira Sezefredo

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.08

Capítulo 9: O impacto da automação na máquina de engate rápido em uma indústria de duchas e chuveiros..... 109

Vinicius Oliveira dos Santos, Vitória Caroline Santos de Araújo, João Domingos Covello Carregosa

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.09

Capítulo 10: Desenvolvimento de protótipos para medição de corrente elétrica: Análise de um transformador de corrente e uma bobina de *Rogowski* com capacidades distintas 124

Vinícius da Fonsêca Santos, Filipe Carvalho de Andrade, Mikelly Bonfim Anjos, Rafael de Paula Lacerda Pio, Leonardo Souza Caires, Diego Habib Santos Nolasco

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.10

Capítulo 11: Comparativo entre as soldagens aluminotérmica e de topo com centelhamento em trilhos ferroviários 146

Artur Angelo Carvalho Martins, Carlos Eduardo Xavier Teixeira, Tarcísio Vieira Lisboa Araújo, Mayssa Alves da Silva Sousa

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.11

Capítulo 12: Concentration in the electricity market: A return to the old paradigm?156

Sandra de Souza Xavier, Mariana Padilha Campos Lopes, Monique Pinheiro Coimbra

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.12

Capítulo 13: Poluição por partículas totais em suspensão nos silos públicos e na zona residencial na cidade portuária de Paranaguá-PR 176

Letícia dos Santos, Virnei Silva Moreira, Juliana Almansa Malagoli

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.13

SUMÁRIO

Capítulo 14: Otimização da técnica de eletrocoagulação/ floculação por meio de redução de DQO utilizando eletrodos de aço carbono avaliando redução de concentrações da matéria orgânica..... 187

Liana Geisa Conrado Maia, Luiz Thiago Vasconcelos da Silva, André Gadelha de Oliveira, Jefferson Pereira Ribeiro, Eliezer Fares Abdala Neto, Tais Coutinho Parente, Ronaldo Stefanutti, Jéssica Elen Costa Alexandre, Francisco Belmino Romero, Ronaldo Ferreira do Nascimento

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.14

Capítulo 15: Projeto industrial para produção de etanol de segunda geração a partir do endocarpo do fruto do buriti (*Mauritia flexuosa* l.)..... 196

Plínio Ribeiro Rodrigues, João Vinícios Wirbitzki da Silveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.15

Capítulo 16: Otimização de receita de fertirrigação do tomate de mesa na fase de floração..... 220

Ana Vitória Galvão Vieira, Eduardo Fernandes Nunes

DOI: 10.36229/978-65-5866-275-4.CAP.16

Autores..... 243

Capítulo 1

Método de análise e solução de problemas complexos

João Carlos Mosquim
Juliana Farah

Resumo: O objetivo deste artigo é discutir a combinação de métodos conhecidos para a solução de problemas, com aplicação de maneira moderna, aprimorada, em que são trabalhadas as áreas técnicas e socioemocionais, contudo, sem desprezar todo conhecimento adquirido ao longo do tempo. A evolução desse conhecimento leva para um estudo inicial de estratificação do tipo de problema a ser estudo e em uma segunda etapa, na aplicação de metodologias mais robustas e de avaliação mais profunda e mais detalhada como o MASP-A e Análise PM, quando for necessário. A solução de problemas complexos, está relacionado com a aplicação de um processo holístico, sistêmico, de estudo detalhado e engajamento da equipe, como descrito neste artigo.

Palavras-chave: Problemas Crônicos, Problemas Complexos, MASP-A, Análise PM, Ferramentas, Solução de Problemas.

1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Problema é todo e qualquer evento indesejado, desde que impacte em um resultado esperado. Uma falha é um problema, desde que se trata de algo que não se previa ocorrer. Essas falhas podem ser parciais e totais, do ponto de vista operacional de um sistema ou equipamento.

Existem problemas de naturezas distintas, deste modo uma avaliação para solucioná-los pode ser aplicada para áreas de gestão, técnicas, financeiras e outras quaisquer possam apresentar eventos indesejados.

O método de análise e solução de problemas, utilizando ferramentas e técnicas direcionadas podem tratar desde problemas simples como aqueles que não possuem repetibilidade, ou seja, recorrências com o mesmo efeito e impacto ou problemas crônicos, que exigem métodos de avaliação mais aprofundados.

Os Problemas Crônicos são aqueles que estão sempre presentes ou que se repetem no tempo, de difícil resolução, muito embora grandes esforços tenham sido entregues para encontrar soluções de bloqueio.

Como são de difícil solução, é comum que a avaliação não encontre a causa raiz e fique apenas no tratamento das causas aparentes. Isso ocorre muitas das vezes porque causas físicas são o foco, deixando de ser tratadas as causas humanas e latentes.

E se o problema se tornou crônico é porque os métodos, metodologias ou ferramentas utilizadas não foram suficientemente robustas para auxiliarem na busca da causa raiz, ou não houve o devido envolvimento das pessoas nas etapas as quais são fundamentais a contribuição humana.

Desta maneira, é preciso uma avaliação detalhada, profunda, metódica que envolva os fatores humanos comportamentais, técnicos associados aos fenômenos físicos e de gestão da governança.

2. INTRODUÇÃO

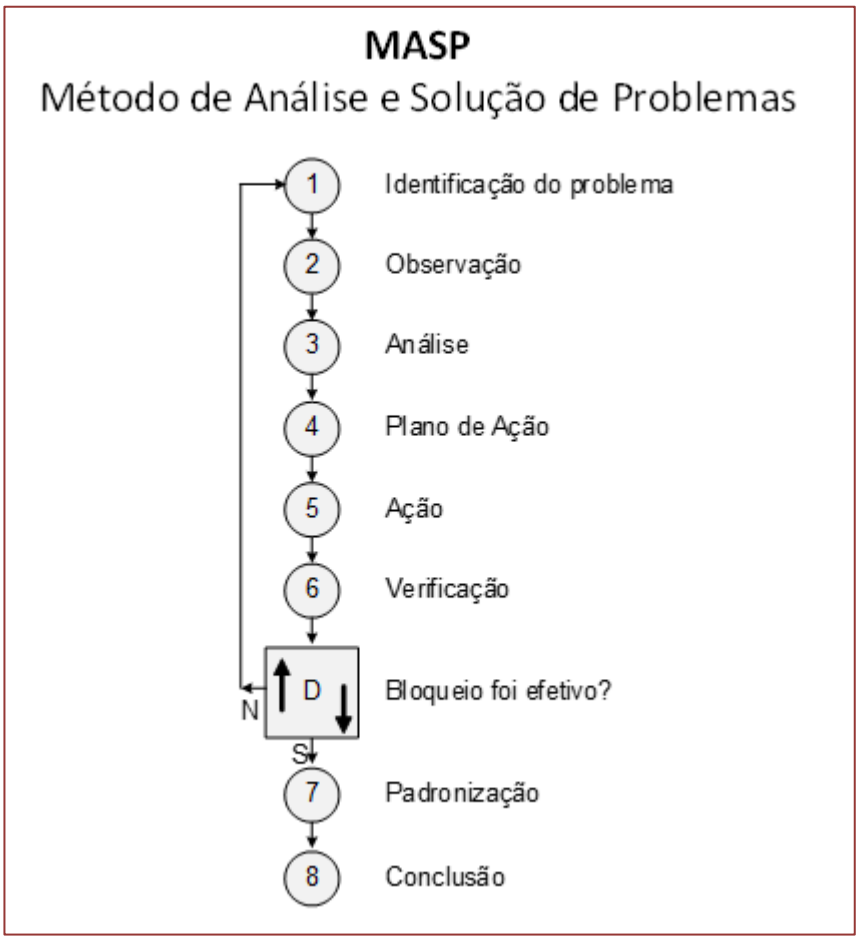
Os problemas crônicos ou “Bad Actor” são comuns no dia a dia de qualquer empresa e independem de tamanho, área de atuação ou departamentos e pode-se dizer que estão distribuídos democraticamente. Tratá-los de maneira superficial, para entrega de resultados imediatos é um grande erro, e costuma muito ocorrer, tornando-se assim cada vez mais evidentes e presentes no dia a dia.

Ocorre que tratar problemas sem uma estratificação, pode trazer alguns dissabores, como transformá-lo em problemas crônicos ou empenhar muito mais energia do que seria necessária para a sua solução.

Quando o assunto é resolução de problemas, a base de toda discussão é Ciclo PDCA, descrito no corpo deste artigo e o MASP – Método de Análise e Solução de Problemas, estudada e trazida pelo Prof. Falconi, nos anos 80, do Japão.

A figura 1, mostra um esquema desse MASP.

Figura 1 – MASP – Método de Análise e Solução de Problemas



Fonte: Prof. Falconi.

É importante salientar que este método é uma aplicação do PDCA, ou seja, existe a fase de identificação do problema, do planejamento, da análise e execução, da busca da causa raiz e bloqueio, da verificação e da ação de melhoria.

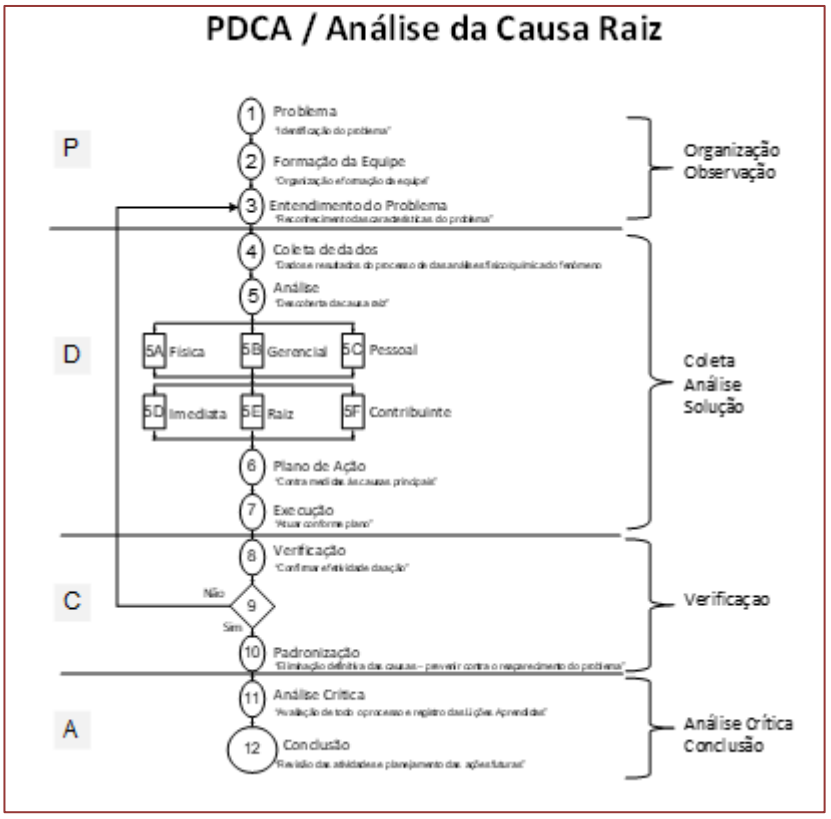
Mais recentemente, surgiu o conceito de gestão integrada, chamada de gestão do ativo, que procura trabalhar desde a fase de concepção do projeto, operação, manutenção, cadeia de suprimento afim de garantir que o ativo e/ou ativos físicos atendam aos objetivos do planejamento estratégico e agreguem valor à organização. Ocorre que, se durante o seu ciclo de vida ocorrer algum problema e este se tornar crônico, a busca de uma operação otimizada pode estar comprometida.

Os ativos existem para agregarem valor à organização e demais partes interessadas. Se um problema crônico faz com que diminua o desempenho do processo ou do equipamento, precisa ser tratado.

Segundo o GFAMAM (Fórum Global para a Manutenção e Gestão de Ativos, no seu documento "Cenários para a Gestão de Ativos, segunda edição indica no item "Entregas no Ciclo de Vida", que as falhas, aqui incluídos os problemas crônicos e os incidentes precisam ser trabalhados, para minimizar seus efeitos negativos, no desempenho do equipamento, do processo e da organização em si.

A figura 2, de uma modo geral, traz os conceitos do PDCA e MASP.

Figura 2 - Diagrama genérico dos processos de uma análise de problema



De uma maneira geral, todas as ferramentas e técnicas de análise de riscos tem como base o PDCA decomposto nos seguintes processos, como ilustrado na figura 1 do MASP do Prof. Falconi.

Ou seja, uma fase de definição clara do problema a ser analisado, uma fase de coleta de dados, uma fase de estudos e de busca de uma melhor solução para resolver o problema, testes, implementação e padronização.

A fase formação da equipe é de suma importância, como será explorado melhor nos itens 4.1 e 5, pois a interação das pessoas é fator decisivo de sucesso.

É preciso conhecer as diferentes ferramentas e técnicas existentes e avaliar a que pode ser a mais eficaz, pois, para um determinado tipo de problema, uma ferramenta simples pode trazer os resultados esperados e para outros problemas complexos, o uso de uma ferramenta simples, pode mascarar a ação e transformar o determinado evento indesejado em problema crônico.

Assim, não existe uma melhor ferramenta ou melhor técnica para avaliação e resolução de problemas, mas para determinado caso, que ferramentas ou técnicas são mais adequadas.

As falhas podem ter origem nos seguintes fatores:

- **Projeto de engenharia:** na especificação do equipamento, componentes, sistema - é nesta fase que se cria e agrega valor ao projeto. O projeto não atende as especificações ou atende parcialmente.

- **Fabricação**: Critérios técnicos de fabricação que não atendam aos requisitos especificados.
- **Construção e Montagem:** Critérios construtivos, qualidade da mão de obra, na montagem, no comissionamento pode fazer com que o valor agregado no projeto seja em parte perdido.
- **Operação** - operar os equipamentos/sistemas diferente do que foi projetado, pode levar as falhas.
- **Manutenção** - o processo de manutenção deve ser criterioso para não degradar a confiabilidade projetada.
- **Deterioração/desgaste** - durante o ciclo de vida do ativo é comum ocorrer a deterioração e desgastes dos componentes dos equipamentos/sistemas.

Modos de Falhas: é a maneira que a falha se apresenta, são os sintomas, como o problema se apresenta. Se for feita uma analogia a medicina, o sintoma que antecede uma gripe, pode ser a febre, neste caso ela é o modo de falha.

Causas: para cada problema apresentado, é importante a identificação das causas para que estas sejam tratadas e desta a maneira, a recorrência seja bloqueada. Ocorre que, na prática a causa física é identificada em 99% das análises, e isso torna a equipe satisfeita com a investigação e a análise é dada por encerrada, mas nem sempre isso é verdade, pois muitas vezes é necessário o aprofundamento em 3 tipos de causas, a física, humana e latente, para que a análise possa ser concluída.

- **Causa Física:** É a causa ligada ao dano físico, que gerou a falha do equipamento. Do ponto de vista técnico seria suficiente para conhecer o que "deu errado".
- **Causa Humana:** As causas físicas são em geral precedidas por causas humanas. São balizadas pelos conceitos de confiabilidade humana sobretudo para desvios não intencionais (engano, lapso ou deslize). É necessário investir tempo na identificação dessa falha para evitar as recorrências. O foco não é o ser humano ou identificar dolo, mas a governança, a gestão. Para identificação da Causa Humana, será utilizado a combinação do Fator Causal com os Ativadores Comportamentais.
- **Causa Latente:** São as causas que estão relacionadas à organização, causas organizacionais

Mecanismo comum das falhas

Outro fator que precisa ser levado em consideração está relacionado a classificação dos problemas complexos quanto a gestão, técnica usada e situação atual. Ocorre que existem muitos problemas crônicos, devidamente estudados, com ações corretivas sabidas, mas não executadas por falta de recursos financeiros. Este estudo não considera este tipo de problema crônico como problema complexo, pois já se sabe a solução.

Mecanismos

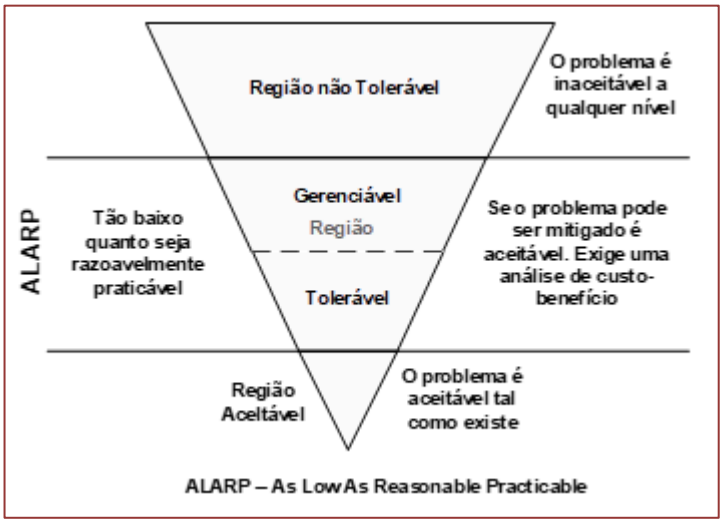
- Desgaste progressivo.
- Falha intempestiva.
- Desgaste por fadiga.
- Mortalidade infantil.

Tomada de Decisão e Tolerâncias as Falhas

A tomada de decisão e tolerâncias as falhas estão associadas ao custo-benefício. Para este tipo de decisão, a ferramenta ALARP (As Low as Reasonable Practicable), tem sido muito utilizada na avaliação e decisão sobre riscos e podem também usar esses conceitos para problemas crônicos.

Os problemas podem ser classificados, no diagrama ALARP conforme figura 3.

Figura 3 – ALARP de problemas



É possível ou não a convivência com o problema ou quanto é possível investir para a solução definitiva ou parcial.

A ênfase deste artigo não está no processo de decisão, mas no estudo das causas básicas, imediatas e contribuintes e sim no estudo dos problemas complexos, que pelas técnicas conhecidas, ainda não se conseguiu chegar na causa básica.

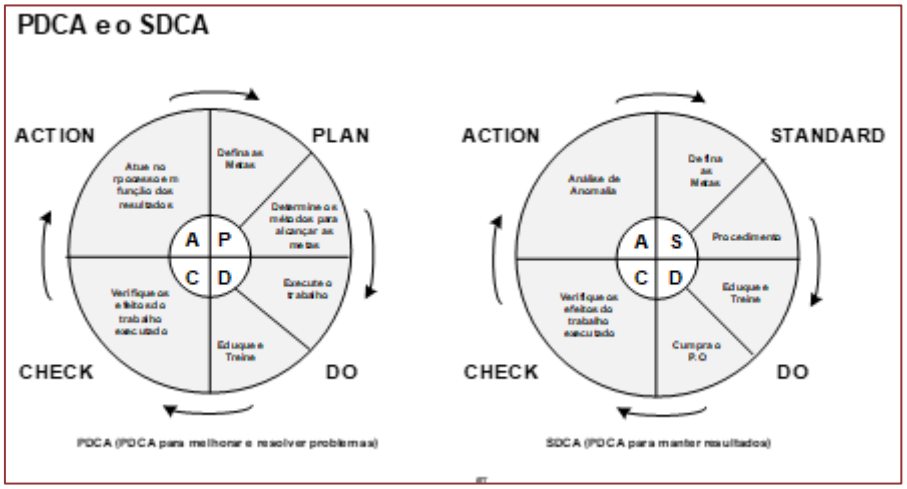
3. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE PROBLEMAS MAIS UTILIZADAS

Por definição método é o caminho para se chegar a uma meta, e todo método é composto por ferramentas que devam ser aplicadas para este objetivo. Uma vez sabido isto, pode-se elencar ferramentas já conhecidas e aplicadas rotineiramente, mas que possuem limitações quando não combinadas e usadas de maneira estratégica para solucionar problemas.

Pode-se citar dentre elas: Brainstorming, Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa, Estratificação, 5W2H, Porquês, Diagrama de Correlação, Projeto de Experimento, Fluxograma, Coleta de dados, Diagrama de árvore, Matriz GUT, Matriz REI, Matriz de probabilidade e impacto, FTA - Árvore de Falhas e Análise PM.

Como mostra a figura 4, as ferramentas para avaliação e resolução de problemas tem como base o PDCA e para a padronização do processo uma vez medido sua eficácia, o SCDA.

Figura 4 – Diagrama PDCA e SDCA



3.1. FERRAMENTAS MAIS UTILIZADAS PARA AVALIAÇÃO DE PROBLEMAS SIMPLES

Dentre as ferramentas qualitativas disponíveis, mais utilizadas pode-se citar as seguintes:

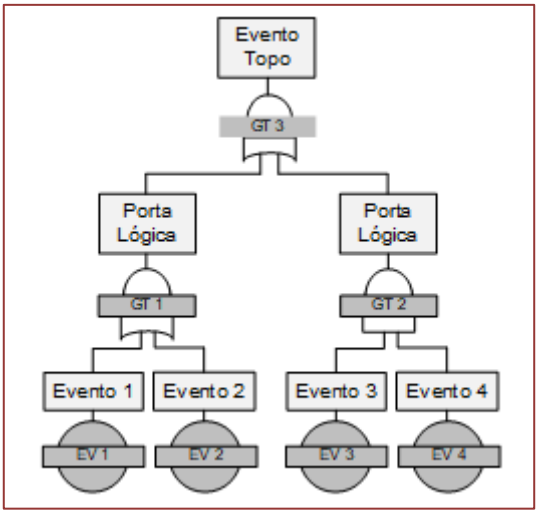
- **RAC ou ACR - Análise da Causa Raiz** - procura de maneira sistematizada, descobrir a causa do problema e assim, identificar e implementar ações adequadas de bloqueio.
- **MASP** - Método de Análise e Solução de Problemas - É um método estruturado e sistematizado para se identificar, estudar e propor soluções para o problema.
- **Método $_5$W$_2$H** (Quem, O que, Como, Quando, Onde, Porque, Quanto) - Série sistemática de perguntas que leva a compreender o problema que está sendo analisado e as suas causas.
- **Diagrama de Ishikawa ou Diagrama de Espinha de** Peixe - é um gráfico em que são trabalhados os 6Ms (Método, Máquina, Material, Mão de Obra, Medida, Meio Ambiente) e tem como finalidade organizar o raciocínio na busca da identificação das causas do problema.
- **Método dos Porquês** - Após a definição do problema, é feita a pergunta do porquê de determinado efeito, quantas vezes forem necessárias, até que se identifique a causa raiz.
- **Diagrama de Dispersão ou Correlação** - É usado para demonstrar a relação entre causa e efeito. Em um gráfico são representados simultaneamente os valores das variáveis estudas e como o comportamento de uma afeta a outra.
- **Brainstorming** - Técnica de geração de ideias, obter o máximo número de ideias no menor intervalo de tempo possível (princípio da quantidade gerando qualidade).
- **Matriz GUT** - Forma de orientação em decisões mais complexas, isto é, decisões que envolvem muitas questões, estabelecer prioridades na eliminação de problemas, especialmente se forem vários e inter-relacionados.

- **Matriz REI** - Planilha com um determinado problema com suas respectivas ações, obter referencial numérico para a priorização de ações para um problema a ser resolvido.
- **Pareto** - Diagrama de barras que ordena as ocorrências da maior para a menor, para hierarquizar o ataque aos problemas.
- **Estratificação** - Diversas maneiras de se agrupar os mesmos dados, para possibilitar uma melhor avaliação da situação, identificando o principal problema.

Para uma avaliação quantitativa que contribui muito para o entendimento dos componentes do sistema, suas interações e impacto no evento indesejado, está disponível a técnica FTA - Análise da Árvore de Falhas, como exemplificado na figura 5.

O método FTA parte do evento topo, indesejado e de cima para baixo, de maneira lógica, procura aprofundar a busca das possíveis causas. A busca da causa raiz é feita pela decomposição causa e efeito em cada ramo, em cada componente do sistema. Possibilita também, pela aplicação da lógica booleana, identificar as interações entre os elementos que compõem o sistema analisado, pela avaliação qualitativa ou quantitativa.

Figura 5 - Diagrama genérico de um FTA - Análise da árvore de Falhas



4. PROPOSTA DE MODELO PARA AVALIAÇÃO DE PROBLEMAS COMPLEXOS

O modelo proposto para avaliação de problemas complexos, tem como base a conexão de dois métodos, o MASP-A - Método de Análise e Solução de Problema Aprimorado e a Análise PM.

Na sequência será feita uma explicação resumida desses métodos.

4.1. MASP-A - MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS APRIMORADO

É importante enfatizar que a criatividade não necessariamente significa criar alguma coisa do zero, muitas vezes significa inovar, ou seja, melhorar alguma coisa já existente. Combinação é isso.

É necessário conhecer para combinar e saber o que se tem na sua caixa de ferramentas.

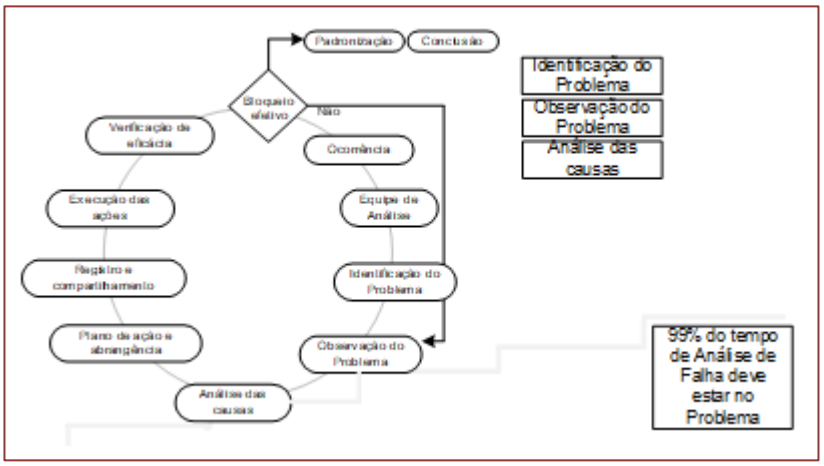
Desta maneira, é explorado o conceito de Combinatividade, que trabalha a interação entre todo conhecimento existente ou adquirido pela equipe de estudo e/ou mais da assessoria externa e a utilização ou combinação de diversas ferramentas como listado no item 3.1.

Combinatividade = Combinação + Criatividade

Com o MASP-A, houve o aprimoramento do método tradicional combinando ferramentas e incluindo a confiabilidade humana na identificação das causas humanas que são ativadas por comportamentos.

A figura 6 enfatiza a necessidade de dedicação ao problema, uma vez que 99% do tempo deve estar nas fases de identificação e observação do problema, partindo do pressuposto que um problema bem definido facilita a sua resolução tornando assertiva e eficaz.

Figura 6 – Ciclo do MAPS-A



A figura 6 enfatiza a necessidade de dedicação ao problema, uma vez que 99% do tempo deve estar nas fases de identificação e observação do problema, partindo do pressuposto que um problema bem definido facilita a sua resolução

Cada etapa do MASP-A possui ferramentas que foram aprimoradas e utilizadas junto a diversos tipos de pessoas, culturas e segmentos industriais, podendo assim ser afirmado sua eficácia no modo de aplicação.

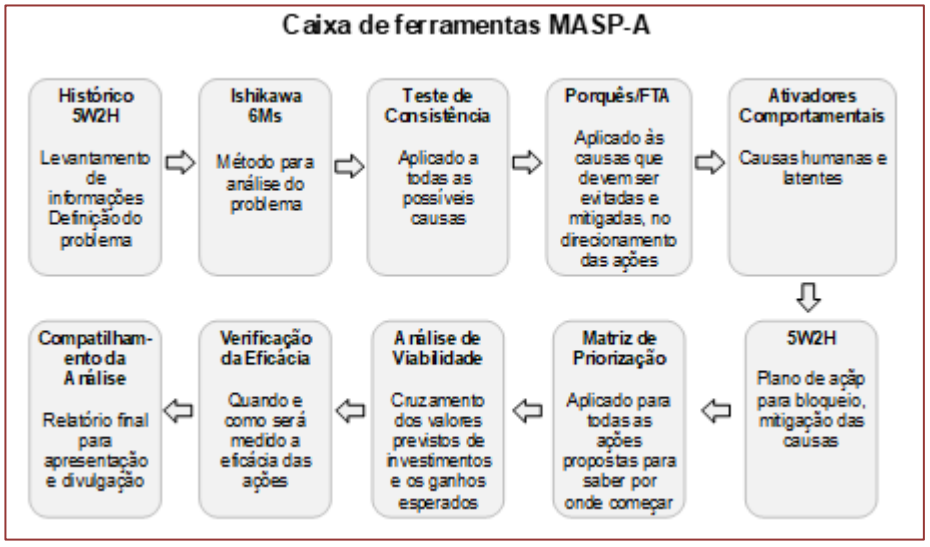
Por que aprimorar um método que já funciona?

O aprimoramento se torna necessário para tudo aquilo que usa ou se faz de maneira constante, porque a melhoria contínua permite que se faça a mesma coisa de maneira mais produtiva, simples e objetiva. No final o que queremos é que o método seja entendido por qualquer pessoa. E este foi o foco do aprimoramento do MASP, levar as pessoas ferramentas ainda mais simples e com uma linguagem de fácil entendimento, criando assim a caixa de ferramentas do MASP-A.

A caixa de ferramentas, resumida na figura 7, contém 10 ferramentas, que são necessárias para uma condução adequada ao bloqueio do problema de maneira eficaz. Para facilitar que isso ocorra, é primordial o envolvimento de pessoas de áreas distintas que estejam ou já estiveram em contato com o problema em questão. Assim, o sucesso de uma análise de problema, só é possível com o engajamento de pessoas e a competência de influência

do condutor da análise, que deve conhecer em detalhes cada etapa do método e das ferramentas, se tornando assim o guardião do MASP-A

Figura 7 – Caixas de ferramentas associadas ao MASP -A



4.2. ANÁLISE PM - ANÁLISE DOS FENÔMENOS FÍSICOS E DOS MECANISMOS DOS DESVIOS

A análise PM (Mecanismos Físicos) é uma técnica estuda os fenômenos como falhas ou defeitos de processo com base nos seus princípios físicos e os mecanismos que regem estes fenômenos em relação aos efeitos indesejados observados.

A Técnica de Análise PM foi desenvolvida no Japão, mas suas iniciais P e M vem da palavra em inglês, como segue:

P Phenomenon (Fenômeno Físico)

- Diz respeito ao perfeito entendimento do problema.
- O que faz o fenômeno acontecer.
- Desvio de um estado normal para um estado anormal.
- Análise dos fenômenos físicos para se buscar o entendimento dos princípios. que geram a anormalidade.

Mechanism (Mecanismo)

- Como esse fenômeno é produzido.
- Conhecimento do mecanismo que gera o fenômeno anormal.
- Entendimento de cada mecanismo associado ao equipamento.

E pode ser decomposto nos 4 Ms:

- Máquina, equipamento (Machine).
- Homem, pessoas (Man)

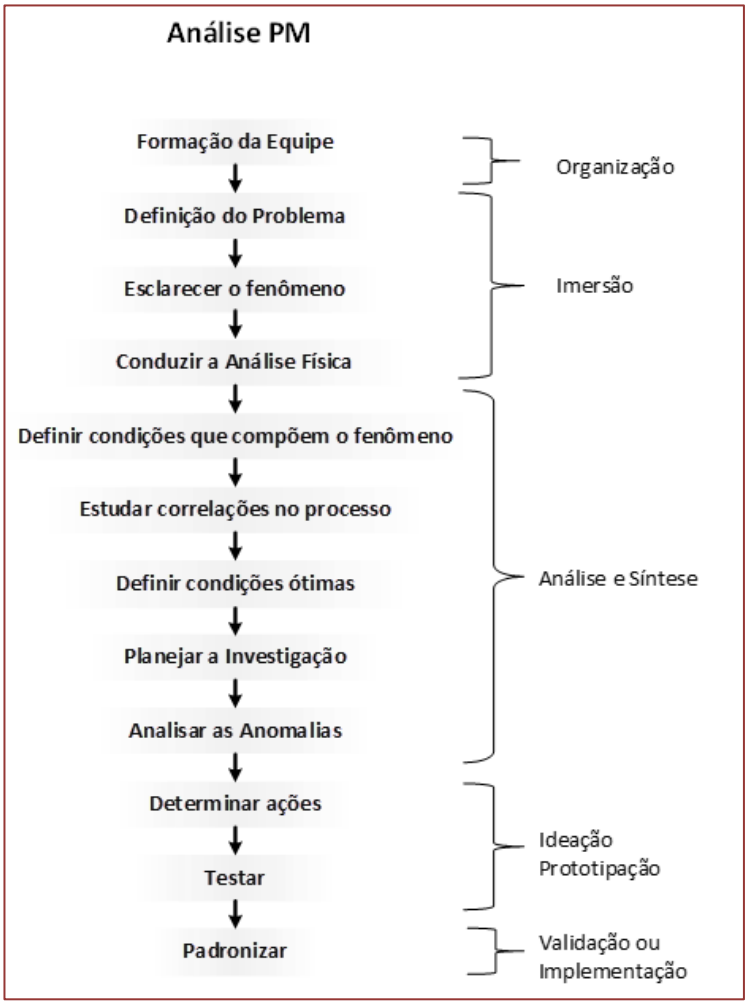
- Material (Materiais)
- Método (Method)

A Análise PM tem como base os seguintes princípios:

- Dar ênfase ao estudo dos fenômenos físicos com base nos princípios da física.
- Desencorajar o achismo e a confiança na intuição.
- Fazer uma avaliação quantitativa do fenômeno, se possível.
- Evitar trabalhar com a causas de aparente maior influência.
- Evitar o desprezo de elementos que se acredita que tenham pouca influência no fenômeno, sem antes realizar um estudo aprofundado.
- Evitar conduzir uma avaliação subjetiva, superficial.
- Fazer uso do raciocínio teórico lógico e sistemático na análise do fenômeno.
- Fazer uso das lições aprendidas, mas sem ideias pré-concebidas.

O processo da Análise PM está dividido nos seguintes subprocessos, como ilustra a figura 8.

Figura 8 - Diagrama dos processos da Análise PM



Como já foi mencionado acima, devido a profundidade e complexidade da Análise PM, está técnica não deve ser utilizada para problemas simples e sim, para problemas recorrentes, complexos e crônicos.

Todo esse processo é iterativo e incremental, constituído de diversos loops, de tentativas e voltas, até que consiga eliminar o problema complexo. Isso ocorre também dentro de cada processo.

Descrição dos processos

- **Formação da equipe**
  - Facilitador - é sempre importante alguém que conheça bem a técnica de Análise PM.
  - Coordenador do estudo.
  - Especialista da área de operação/produção.
  - Especialista da área específica da manutenção.
  - Especialista da área específica da engenharia.
  - Especialista da área de Confiabilidade.
- **Definição do problema -** O problema é algo macro que se identifica com alguma facilidade, o efeito real, visível, a ocorrência indesejada.
- **Esclarecer o fenômeno -** O fenômeno é a causa do problema, a fonte que gera a ocorrência indesejada
- **Conduzir a análise física -** Neste processo é descrito a análise física de como o fenômeno ocorre pela identificação das áreas críticas, dos padrões operacionais e elementos de interação dos componentes que compõe as áreas associadas ao fenômeno. É uma fase que gera grande conhecimento do processo em si, pois identifica as grandezas físicas associadas ao evento indesejado.
- **Definir condições que compõem o fenômeno -** No processo anterior foram identificadas as grandezas físicas que podem levar para o fenômeno e neste processo, serão identificados os componentes que caso sofram algum desvio, impactam nessas grandezas.
- **Estudar correlações no processo -** São identificadas todas as correlações entre as condições que compõem o fenômeno com as entradas do processo operacional, no nível do componente.
- **Definir condições nominais e ideal -** De posse da lista de grandezas físicas que podem levar para o fenômeno, determinar as suas condições nominais e ideais e em que condição uma oscilação dessas grandezas físicas pode levar para o fenômeno.
- **Planejar a investigação -** Definir claramente como será o processo de investigação/medição das grandezas físicas associadas ao fenômeno.
- **Analisar as anomalias -** Esta é a etapa de análise dos dados coletados conforme mencionado nos itens anteriores em relação a sua condição nominal e ideal, no referido processo. É uma análise profunda, sistemática e detalhada, para se buscar as reais causas do problema.

- **Determinar ações -** A partir da análise criteriosa, são identificadas a ação ou ações de melhorias a serem implantadas no sistema. Diferentemente da busca da causa raiz, imediata e contribuinte, nessa técnica procura-se avaliar todos os desvios nas grandezas físicas dos elementos e gera ações para trazê-las para sua condição de normalidade. Como a Análise PM investiga e analisa cada desvio, as ações de melhorias tornam-se mais abrangente.
- **Testar -** Esta é a fase em que ocorre o monitoramento do resultado da implantação das ações de prevenção ao fenômeno indesejado. Caso o problema não tenha sido resolvido, volta-se ao estudo das ações corretivas/melhorias, ao estudo das grandezas físicas e seus desvios ou ao estudo inicial, na identificação dos elementos contribuintes e das grandezas físicas. Em resumo, é um estudo iterativo e incremental.
- **Padronizar -** Após a aplicação das melhorias e bloqueio, é importante que ocorra a padronização das ações de melhorias em outros equipamentos similares.

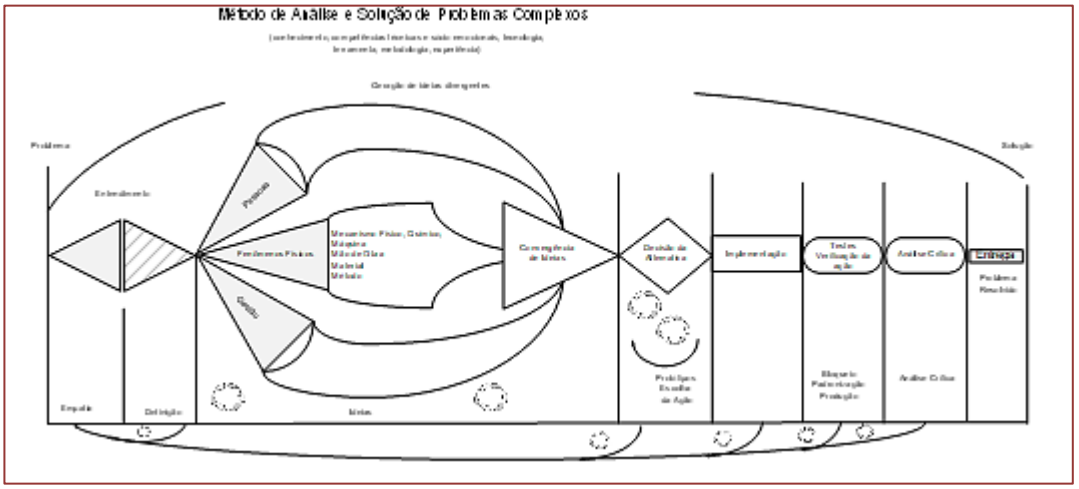
5. RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS COMPLEXOS PELA UTILIZAÇÃO DO MASP-A E ANÁLISE PM

Com base em todo conhecimento ao longo do tempo para a resolução de problemas, ainda existe uma certa dificuldade de ser tratar os problemas crônicos.

Dessa maneira, a evolução desse conhecimento leva para a aplicação de metodologias mais robustas e de avaliação mais profunda e mais detalhada como o MASP-A e Análise PM, em processo holístico e sistêmico como ilustrado na figura 9. E esses processos robustos são aliados a empatia, ao engajamento e o envolvimento pleno dos membros da equipe.

A grande diferença reside no enfoque diferencial dado a cada processo, visto que se for olhado de uma maneira apenas macro, os processos são similares.

Figura 9 - Diagrama geral do processo de Análise de Problema Complexo

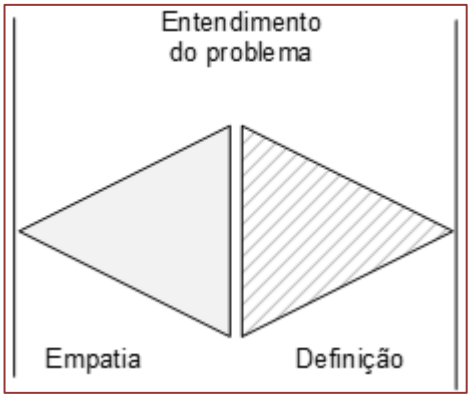


Outro fator de relevância a ser observado é que esta sequência de processos não representa uma cascata, mas sim, um processo adaptativo, em que podem ocorrer diversos loops ou retroalimentação, como ilustrado na figura 9.

Etapa 1 – Diamante da Empatia

Esta fase inicial caracterizada por um ou duplo diamante em que se busca a busca do perfeito entendimento do problema.

Figura 10 – Diamante da empatia e definição do problema



Como mencionado no MASP-A esta é a fase necessária para que o problema seja entendido e definido, onde são investidos tempo e pessoas.

O diamante da empatia considera o envolvimento das pessoas, e a recomendação para isso ocorrer é:

- Desenvolva a interação entre as pessoas da equipe, com boas práticas de quebra de barreiras, de aquecimento do contato pessoal.
- Crie um ambiente colaborativo entre os membros da equipe.
- Defina claramente o problema e os objetivos do estudo e o que se espera de cada pessoa da equipe.
- Incentiva a prática da escuta ativa nos membros da equipe.
- De oportunidade a todos da equipe se manifestarem e que percebam que estão sendo ouvidos.
- Incentive a geração de ideias divergentes, sem censura.
- Treine e trabalhe as técnicas de Negociação e Gestão de Conflitos, na busca sempre do ganha-ganha.
- Tenha um facilitador do método: uma pessoa responsável pela condução, que possui conhecimento de cada etapa e das ferramentas. Esse guardião precisa ser influenciador e exercer a persuasão, bem como gerenciar conflitos.
- Convoque pessoas envolvidas diretamente no problema: são as pessoas que tem pleno conhecimento da ocorrência como da manutenção, operação, processo, e tantas outras que poderão contribuir para o relato inicial do que aconteceu.

- Convoque pessoas envolvidas indiretamente no problema: são pessoas que já vivenciaram o mesmo problema ou outro semelhante em outros lugares ou situações
- Convoque também pessoas que não possuem nenhum tipo de envolvimento com o problema: são o tipo de pessoas que poderão contribuir com o pensamento sistêmico, mesmo sem conhecer o problema, o equipamento ou a situação em questão, afinal perguntas são necessárias, e muitas das vezes quem estão dentro do problema não consegue enxergar ou formular as perguntas que poderão se fazer chegar ao pleno entendimento do problema.

É recomendável deixar os objetivos do estudo bem claro, o porquê as pessoas estão sendo convocadas, o que se espera delas e o quanto eles são importantes para o processo. Nunca convoque uma reunião sem deixar claro o PORQUÊ da reunião e principalmente o PORQUÊ da participação de cada pessoa. Este é o ponto onde o facilitador terá que exercer sua influência e fazer as pessoas se sentirem importantes ao processo, primeiro porque são e segundo porque precisam ser.

Para que a primeira reunião de entendimento do problema seja produtiva, todas as pessoas convocadas precisam estar presentes, caso isso não ocorra, cancele e avise a todos o motivo. O comprometimento de todas as partes interessadas é fundamental, pois o tratamento de um problema complexo é de interesse da empresa para que sua disponibilidade operacional não seja comprometida.

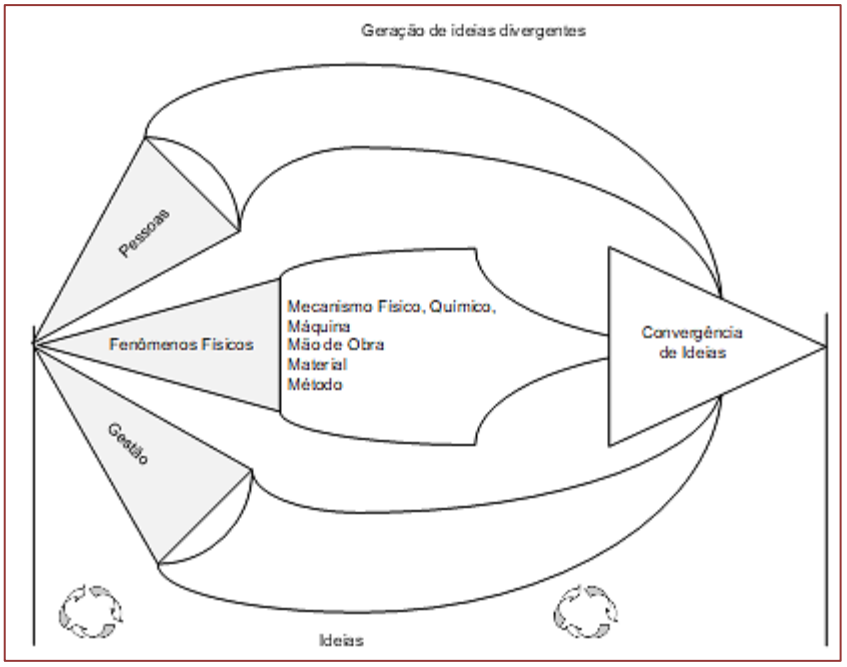
Para esta primeira reunião é importante que as evidências do problema estejam devidamente catalogadas, ou seja, identificadas e preservadas com tudo o que foi encontrado, para que nada seja perdido, o diamante da definição seja devidamente clarificado com dados e informações de qualidade para que se torne conhecimento ao processo da análise.

A guarda das evidências deve ser feita em local identificado e que garanta que tudo seja preservado até a conclusão da análise em questão.

Etapa 2 - Geração de ideias divergentes

Nesta etapa, com o perfeito entendimento do problema pela equipe a ser estudado na busca da causa raiz e causas contribuintes, o processo de avaliação passa pela estratificação, como ilustra a figura 11.

Figura 11 - Estratificação do estudo do problema



Incentiva a participação das pessoas, com liberdade de pensamento, para a geração das ideias divergentes.

Assim, a avaliação do problema ocorre nas áreas de gestão, fenômenos físicos e pessoas, ou seja, quais são as causas físicas, humanas e latentes que levaram o problema a acontecer.

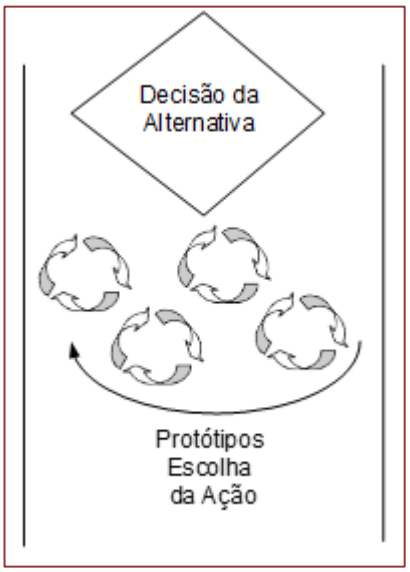
A parte de fenômenos físicos é tratada com a devida profundidade discutida na metodologia Análise PM, item 4.2 deste artigo.

Nesta fase corre o processo de geração de ideias divergentes, o tratamento dessas ideias e no final, a sua convergência. É um processo iterativo e incrementa, em que a iteração das ideias acaba gerando outras e assim por diante. A cada iteração na geração das ideias ocorre os incrementais no conhecimento do problema ou do fenômeno.

Etapa 3 - Avaliação e escolha da ação

O processo de avaliação das alternativas e tomada de decisão está de uma maneira geral associada ao custo-benefício da ação. Como descrito no item Tolerâncias as Falhas, a figura 3 - ALARP (As Low as Reasonable Practicable), sugere alguns critérios quanto a tomada de decisão.

Figura 12 – Processo interativo-incremental no processo de decisão



E neste processo, devido às incertezas, ao custo-benefício e as diversas alternativas existentes, ocorrem os loops de decisão. O teste de consistência da ação e a viabilidade da ação.

Esse teste de consistência consiste em classificar todas as POSSÍVEIS CAUSAS, consideradas no Brainstorming, uma vez que tudo é possível até que se prove o contrário.

É importante que nesta fase tudo possa ser comprovado, em caso que não haja possibilidade, será necessário a ANÁLISE DE HIPÓTESES, neste caso as ações recomendadas devem ser mais abrangentes, mesmo considerando todas as hipóteses, ainda assim o bloqueio pode não ser efetivo.

A partir dessa etapa, o tratamento do problema crônico segue as etapas de Implementação/execução, Verificação, Padronização, Análise Crítica do processo e Conclusão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em primeiro lugar é necessário a estratificação dos problemas, pois é muito comum a transformação de um problema que já são conhecidas as ações corretivas, mas por falta de recursos, não são executadas e passam a ser considerados como crônicos.

O método MASP-A surgiu para aprimorar o método tradicional com o Estudo da Confiabilidade Humana como uma consequência da mensuração da Confiabilidade dos equipamentos. O Ser Humano é FALÍVEL, mas essas falhas podem ser classificadas e quantificadas. Confiabilidade Humana é definida como a probabilidade de que não haja falha na execução de uma tarefa requerida em um determinado período, sob condições apropriadas e com recursos disponíveis. O esperado, em relação às pessoas, é que em contraposição aos equipamentos que se deterioram com o passar do tempo, a aptidão, o treinamento, a experiência e a idoneidade das pessoas façam com que as falhas humanas diminuam ao longo do tempo.

A frase “Errar é humano, repetir o mesmo erro é burrice” é uma premissa de que: As falhas podem ser previstas e quantificadas. A exata qualificação para o exercício das funções é o quesito fundamental para o bom desempenho operacional na organização.

À primeira vista o método Análise PM pode parecer complicado e de difícil aplicação. Na realidade é um método que exige um grande conhecimento dos conceitos de ciências como química, física, biologia etc. e um grande conhecimento do processo e do equipamento a ser analisado.

Antes da execução de uma Análise PM é importante que se faça uma correta estratificação dos problemas, inicie por um método mais simples e apenas utilizar a análise PM quando observado um problema complexo.

REFERÊNCIAS

[1] BOSSIDY, LARRY; CHARAN, RAM. EXECUÇÃO A disciplina para atingir resultados. Elsevier, 2005.

[2] CARNEGIE, DALE. Como fazer amigos & influenciar pessoas. Companhia Editora Nacional, 2012, 52ª edição.

[3] SINEK, SIMON. Comece pelo PORQUÊ. Sextante, 2018.

[4] FALCONI, VICENTE. TQC Controle da qualidade total. Falconi, 2014, 9ª edição.

[5] FALCONI, VICENTE. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia. Falconi, 2013, 9ª edição.

[6] FALCONI, VICENTE. O valor dos recursos humanos na era do conhecimento. Falconi, 2014, 8ª edição.

[7] GFMAM – Asset Management Landscape, Global Forum, 2a Edition, 2014, 57p.

[8] GFMAM – The Maintenance Framework, Global Forum, 1a Edition, 2016, 24p.

Capítulo 2

O guia PMBOOK adaptado a um projeto implantado numa indústria gráfica: Estudo de caso

Aurelia Altemira Acuna Idrogo
Jose Salvino da Silva
Gioconda Suncion Acuna

Resumo: O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de caso sobre Gerenciamento de Projetos realizado em uma indústria do setor gráfico, seguindo os lineamentos recomendadas pelo PMBOK, desenvolvido pelo PMI, Project Management Institute. No caso se apresenta os fundamentos teóricos, notadamente, conceitos do que são projetos, gerenciamentos de projetos, ciclo de vida dos projetos, fatores de sucesso em projetos, além de focar em algumas práticas. Nos aspectos metodológicos foram utilizados os conceitos propostos por Yin (2001), em planejamento e métodos que pode sintetizar-se num trabalho descritivo e explicativo, de caráter qualitativo, embasado por pesquisa documental proveniente da empresa em estudo. É apresentado o desenvolvimento de um projeto em uma indústria do setor gráfico, com sua contextualização e todas as etapas do seu planejamento e execução. Como resultados do trabalho, foi feita uma comparação das práticas recomendadas na literatura e utilizadas na formulação de um projeto de logística interna de recebimento de conteúdos destinados a produção de livros didáticos, para escolas públicas de primeiro e segundo grau, e mediante parceria com os correios, estes realizaram a distribuição aos 5.500 municípios do Brasil, esta é a política do Ministério de Educação. Um outro resultado foi a elaboração de um processo para conduzir a gestão de projetos futuros na empresa que sediou o estudo, inclusive adequados as boas práticas e aos conhecimentos cultural e ambiental, aliada a sua expertise na condução de projetos.

Palavras-chave: Projetos; Gerenciamento de Projetos, Indústria gráfica.

1. INTRODUÇÃO

Pode-se conceituar projeto como o conjunto de esforços de caráter temporário, empreendido com um objetivo definido e claro, seja para criar, melhorar ou ampliar um produto, um serviçoou um processo, tem duração pré-determinada (início, meio e fim) e recursos limitados, em umasequência de atividades convergentes.

Por sua vez, a execução de projetos ocorre deste os primórdios da civilização, os quais eram gerenciados sem ferramentas, técnicas ou metodologias específicas, porém eram criados prazos,controlados os custos e avaliados os riscos.

No contexto mais recente da história, os projetos têm sido planejados e executados pelas organizações para também criar produtos/serviços e introduzir mudanças e inovações em seus processos. No entanto, para que um projeto seja realizado de forma eficaz, é necessária a organização do trabalho demandado (MARTINS, 2003). Desta maneira, desenvolver umprocesso de gerenciamento dentro de uma organização é fundamental para o controle dos custose riscos nos projetos a serem realizados.

Diante disso, este estudo teve como objetivo implantar uma linha de produção, a partir dos padrões apresentados no guia PMBOK® de gerenciamento de projetos, em uma indústria gráfica de grande porte no estado da Paraíba.

A experiência foi enriquecedora na condução do estudo de caso toda vez que se conseguiu com sucesso os resultados esperados, isto é agregou valor aos serviços de distribuição de livros e melhorou a parceria com as empresas transportadoras possibilitou maior engrenagem nas operações e atendeu com excelência as necessidades e expectativas dos clientes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O gerenciamento de projetos vem evoluindo de forma substantiva mediante a incorporação deferramentas as tradicionais como o PM book e PMI , entretanto é o gestor que deverá consideraros pontos essenciais que traduzam a escolha daquelas que mais se adaptem à realidade da organização, inclusive suas partes interessadas e o ambientes no qual está inserida.

Também é importante salientar que a liderança da organização deverá atentar para a competência de seu corpo técnico quando se trate de incorporar novos projetos, incluir novas ferramentas ou mesmo a ampliação de seu portfólio de projetos.

2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Para o PMI, Project Management Institute (2013), projeto é um empreendimento que cria umproduto, serviço ou resultado único e apresenta uma natureza temporária com um início e umtérmino previamente definido. Em geral, o fim de um projeto acontece pelos seguintes motivos: quando os seus objetivos são alcançados, quando a necessidade de existência do empreendimento não mais se faz necessário, ou pelo fato dos patrocinadores decidirem nãomais dar sequência com aquele empreendimento.

Segundo Heldman (2005), projetos caracterizam-se por não apresentarem uma natureza cotidiana, mais sim um trabalho contínuo existindo começo e fim, existindo objetivos definidoscom as entregas realizáveis em prazos determinados.

Gido & Clements (2017), discorrem que projetos se caracterizam por apresentar um objetivo, epara alcançá-lo é aplicado um esforço, através de uma série de tarefas inter-relacionadas visando uma utilização eficaz de recursos. Os autores apresentam atributos que ajudam a definirum projeto, são estes: um objetivo bem definido; seja conduzido por meio de uma série de tarefas independentes; utiliza um série de recursos para realizar as tarefas; apresenta uma vida temporária; trata-se de um esforço único; tem um cliente e apresenta um grau de incerteza.

Carvalho & Rabechini Junior (2011), afirma que apesar da temporalidade e unicidade serem sempre conceitos explicitados nas definições de projetos, sendo este caracterizado por ter um início e um fim bem definido e aquele pelo fato do serviço ou produto gerado pelo projeto ser,de algum modo, diferente de todos feitos anteriormente, projetos podem apresentar as mais diversas durações de tempo (semanas a anos), e seus resultados podem perdurar por um longoperíodo. Cita como exemplo a usina de Itaipu, que foi criada na década de 1980 e até hoje continua gerando eletricidade.

2.1.1. GERENCIAMENTO DE PROJETOS

Para PMI, Project Management Institute (2013), o gerenciamento de projetos trata da aplicação de técnicas, habilidades e ferramentas como aspectos fundamentais para atender com sucesso as necessidades e expectativas dos Stakeholders. Por sua vez compreende cinco grupos de processos: Iniciação, Planejamento, Execução, Monitoramento e controle, e Encerramento.

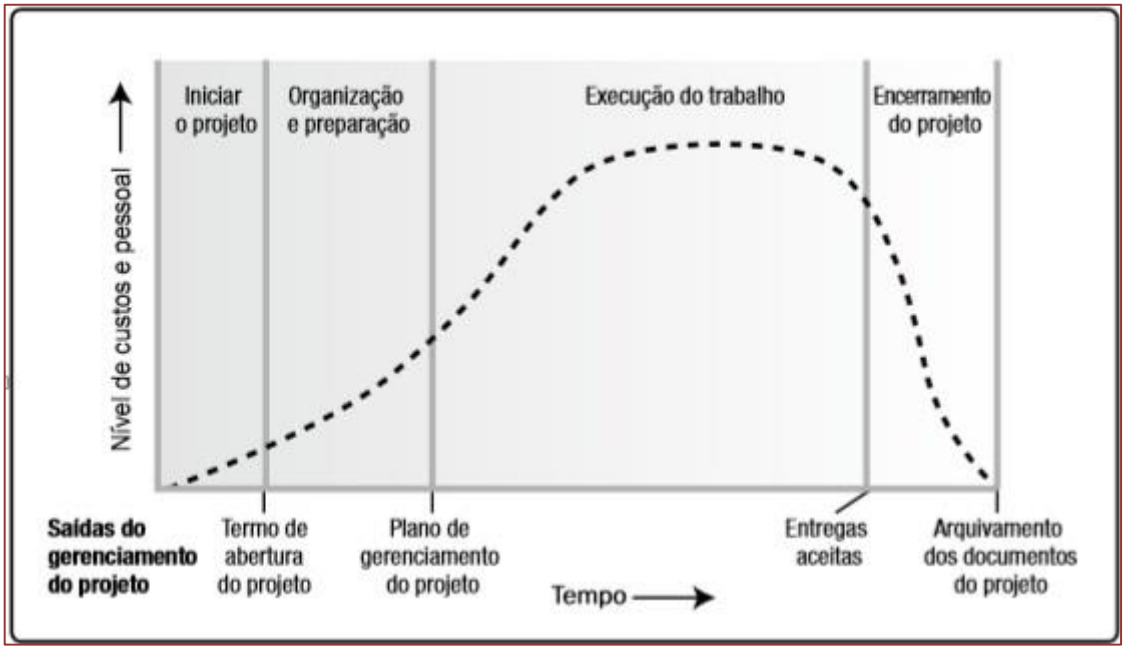
O gerenciamento de projetos também é postulado como uma série de atividades integradas quejuntas visam atender os objetivos do projeto com êxito. Estas atividades englobam o planejamento, a programação e o controle. O autor, ainda acrescenta que o profissional que gerencia projetos tem se tornado muito mais integrador do que um especialista técnico, isso devido à natureza cada vez mais multidisciplinar que existe em um projeto. (KERZNER, 2001).

2.1.2. CICLO DE VIDA DO PROJETO

O PMI (2013, p. 38), define que: “Ciclo de vida do projeto é a série de fases pelas quaisum projeto passa, do início ao término.” (Fig. 1), e complementa que essas fases são etapas sequenciadas do projeto, que podem resultar em um produto parcial ou trabalho independente.Essas partes apresentam entregas intermediárias, que quando agrupados, comporá o projeto final, além de também apresentarem definições prévias de disponibilidade financeira. Contudo,o ciclo de vida em projetos apresenta uma estrutura mínima para auxílio no gerenciamento dosprojetos independentemente do conhecimento específico que será utilizado em cada projeto.

Essa mesma fonte apresenta uma estrutura genérica para o ciclo de vida de projetos, onde todosos projetos englobam fases de início, organização e preparação do projeto, execução do trabalhodo projeto e o encerramento do projeto.

Figura 1 - Níveis típicos de custo e pessoal em toda a estrutura genérica do ciclo de vida de um projeto



FONTE: PMI, Project Management Institute (2013).

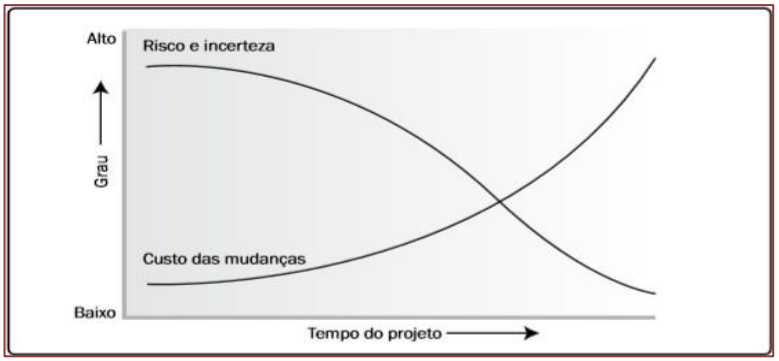
Gido & Clements (2007), também apresenta a mesma configuração para o ciclo de vida do projeto, obedecendo a mesma curva de tempo, porém nomeia as quatro fases do ciclo de vida do projeto de forma diferente, mas com a mesma funcionalidade, são elas: identificar uma necessidade, desenvolver e propor uma solução, executar o projeto e concluir o projeto. As definições dessas fases são:

- *Primeira fase*: O cliente identifica uma necessidade, um problema ou uma oportunidade, então são apresentados os possíveis fornecedores, equipe de projetos interna ou equipes externas a organização, e os possíveis meios para atender ou resolver o requisitado. O cliente deve escrever a necessidade e os requisitos em um documento chamado CP(Chamado de Proposta) para nortear a equipe de projetos.
- *Segunda fase*: Nessa fase os esforços do fornecedor são dominantes. Consiste no desenvolvimento de uma proposta (tipos e quantidades de recursos que seriam necessários,possíveis datas de entrega e implantação) de solução para a necessidade ou problema, visando atender os requisitos apresentados no CP. As Equipes internas de projetos também apresentam suas propostas e em organizações com essas estruturas, estes que conduzem osprojetos requisitados pela gestão.
- *Terceira fase*: Esta trata da implantação da solução proposta em resposta ao CP enviado pelo cliente. O processo inicia assim que o cliente assina um acordo com o fornecedor. Posteriormente, as partes cliente/fornecedor, fixarem um acordo, inicia-se o planejamento detalhado do projeto e posteriormente a implantação dos planos traçados para atingir o objetivo do projeto. Esta fase estará finalizada com êxito quando o fornecedor cumpre o objetivo estipulado, com a conclusão do escopo inicial, dentro do prazo e sem extrapolar oorçamento.
- Fase final: Após a entrega do projeto é necessário fazer algumas atividades de

encerramento, como a confirmação de aprovação de todas as entregas ao cliente, avaliar o desempenho da equipe de projetos, registar melhorias para projetos futuros e obter feedbacktanto do cliente como da própria equipe de trabalho.

Os ciclos de vida dos projetos variam de acordo com a complexidade do projeto, a duração, a tecnologia empregada dentre outras especificações. O modelo apresentado serve como um método ou guia e pode auxiliar os mais diversos projetos. (Gido & Clements, 2007). (Figura 2).

Figura 2 - Impacto da variável com base no tempo decorrido do projeto



FONTE: PMI, Project Management Institute (2013).

2.1.3. SUCESSO EM PROJETOS

Na fig. 3 se pode observar as quatro dimensões que expressam o sucesso em projetos.

Figura 3 - As quatro dimensões do sucesso do projeto



FONTE: Rabechini JR [et all] (2002).

Para Rabechini Jr et al.(2002), a primeira dimensão, eficiência do projeto, se refere a verificaçãodos requisitos especificados no início do projeto e pautado no planejamento foram atendidos (prazos e orçamento), podendo ser constatado logo após a entrega do empreendimento. Na terceira dimensão diz respeito aos impactos do projeto nos négócios

da empresa, sobre uma óptica de estratégia, reflete o quanto o projeto alavanca os redimentos da organização, o quanto significa para promover os negócios. A quarta dimensão pode ser analisada após as três unidades de tempo (anos ou meses) decorridos do pós projeto, este analisa os resultado que projeto deixou em termos preparação para projetos futuros.

Portanto, o sucesso em projetos estará atrelado a impactos que apenas poderão ser vistos no longo do tempo, como o aumento nas vendas, a aceitação de clientes, receitas posteriores, ciclode vida do projeto e entre outros.

3. MÉTODO DE PESQUISA

SAMPIERI (2013, p22 e p20), assinala que a pesquisa científica é entendida como um conjuntode processos sistemáticos e empíricos utilizados para o estudo de fenómenos; é dinâmica, mutável e evolutiva. Pode apresentar-se de três formas: quantitativa, qualitativa e mista. Esta última implica combinar as duas primeiras. Cada uma é importante e valiosa devendo ser respeitada da mesma maneira. Dessa forma os métodos de pesquisa proporcionaram subsídios importantes ao conhecimento gerado nas diferentes ciências e disciplinas.

Este trabalho foi realizado sob o enfoque de estudo de caso, que é um método de pesquisa estruturado, que pode ser aplicado em distintas situações para contribuir com o conhecimento dos fenômenos individuais ou grupais. Este método possui características próprias e pode ser conceituado com base nas posições de dois dos mais reconhecidos especialistas: Robert K.Yine Robert R.E. Stake.

Caso da implantação de uma linha de mixagem de livros em uma empresa gráfica

A estrutura do caso compreende: a organização onde foi realizado o estudo, o processo produtivo e o desenvolvimento do projeto seguindo as orientações do PM Book.

3.1. A ORGANIZAÇÃO

A empresa onde foi realizado o trabalho tem significativa atuação no setor gráfico, foi fundada em 1965 na cidade de João Pessoa, Paraíba. Atualmente apresenta um dos maiores e mais modernos parques gráficos do Brasil, a matriz ocupa 26.000 m^2 e possui a maior rede de atendimento do setor, com escritórios de vendas em todos os estados da federação.

Em 2016, a empresa expandiu suas operações mediante a aquisição de uma filial no estado de São Paulo, favorecida pelos conhecimentos nos processos de produção, a qualidade e a credibilidade acumulados em meio século de operações, atendendo o objetivo de levar atendercom maior rapidez uma grande parcela de clientes localizados nas regiões Sul e Sudeste do país.

Em 2018 a empresa apresentava um quadro de aproximadamente 650 funcionários fixos, e quando ocorria demandas sazonais, chegava a gerar 900 empregos, supridos por meio de contratações de serviços terceirizados.

3.2. PROCESSO PRODUTIVO

São quatro grandes áreas que compreende o processo industrial gráfico da empresa onde foi realizado o estudo d caso, a saber:

- Pré-impressão: nesta são realizados todos os tratamentos dos arquivos de impressão enviados pelas editoras/clientes, então são desenvolvidos em chapas que servem de inputs para o maquinário de impressão;
- Impressão Rotativa: responsável pela produção e impressões em massa. Com grande capacidade de produção, este setor trabalha a velocidades superiores a 50.000 mil impressospor hora. Seus principais serviços são livros didáticos, tabloides e revistas com grandes tiragens.
- Impressão Plana: setor responsável pela produção de impressões com altas definições, comequipamentos que superam os 18.000 mil impressos por hora. Os principais serviços são capas de livros, revistas de artes, materiais especiais, etc.
- Acabamento: nesta área todos os materiais impressos são processados conforme sua finalidade, diversos livros, revistas, embalagens, tabloides, encartes, materiais de divulgação, calendários, rótulos etc. Seus principais equipamentos são as máquinas de dobras, de corte e vinco para embalagens, máquinas de alceamento que sincronizam as sequencias de paginações, máquinas de lombadas, etc.

As indústrias gráficas são prestadoras de serviços, direcionados a editoras e escritórios, que possuem como atividade fim a fabricação de impressos tais como a livros, revistas, tabloides, caixas de embalagens, dentre outros. As editoras-clientes são responsáveis pelo desenvolvimento dos conteúdos editoriais e uma vez contidos em arquivos, estes são entreguesà gráfica que realiza a impressão em grandes volumes.

3.3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

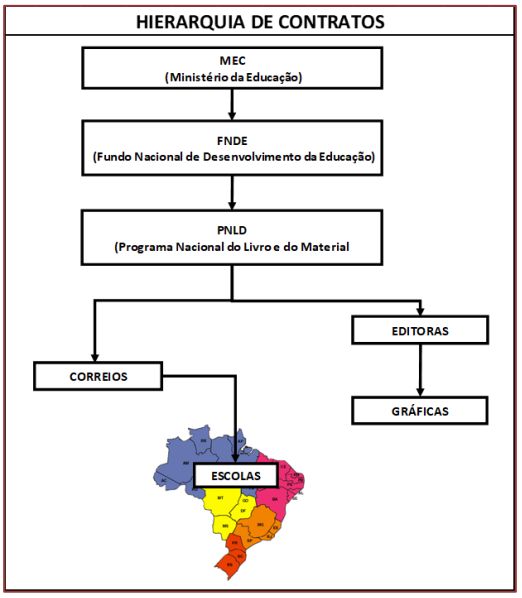
Na empresa onde foi desenvolvido o estudo de caso caracteriza-se pela grande capacidade de produção de suas impressoras rotativas, nas quais são fabricados os livros didáticos para alunosde primeiro e segundo grau e que são distribuídos para as escolas públicas em todo o Brasil.

3.3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO

O Ministério da Educação administra o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) que compreendem dois programas: o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) eo Programa Nacional Biblioteca da Escola (PNBE), por meio dos quais o governo federal provêas escolas de educação básica pública com obras didáticas, pedagógicas e literárias, bem como com outros materiais de apoio à prática educativa, de forma sistemática, regular e gratuita. Disponível em https://www.fnde.gov.br/programas/programas-do-livro.Acesso em 12/05/2019.

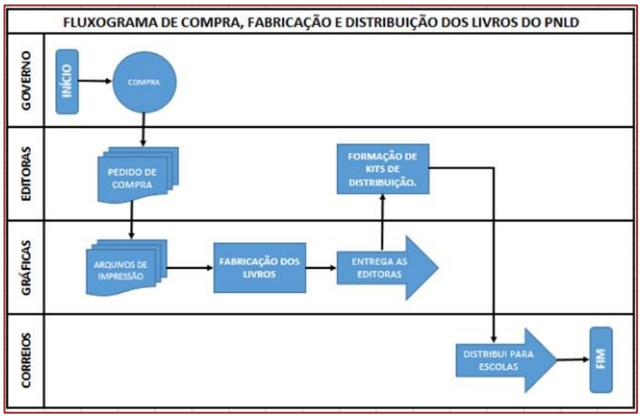
Para 2019 está previsto o atendimento aos professores da educação infantil e a todos os estudantes e professores na forma de reposição dos livros consumíveis e livros adicionais consumíveis e reutilizáveis visando cobrir os acréscimos de matrículas. Neste ano as escolas beneficiadas serão 147.857 que ofertam ensino a 35.177.899 alunos com um total de 126.099.033 exemplares de livros, cujo monetário alcançará R$ 1.102.025.652,17 (1,1 bilhão)de reais.

Figura 4. : Hierarquia dos contratos entre o Ministério da Educação e as gráficas



Para que os livros didáticos cheguem até as mãos dos alunos das escolas públicas, uma grandeoperação de produção e logística é realizada envolvendo o MEC, através do FNDE, órgão responsável pelo PNLD, que compra as editoras previamente avaliadas os livros devidamente aprovados. As editoras iniciam os processos de produção junto as gráficas, e após produzidos os livros, os Correios, sobre contrato com o FNDE, faz a retirada dos livros das gráficas e realizam a distribuição para as escolas de todos os municípios brasileiros, conforme se apresentana Fig. 21.

Figura 21: Processo de compra, fabricação e distribuição de livros do PNLD

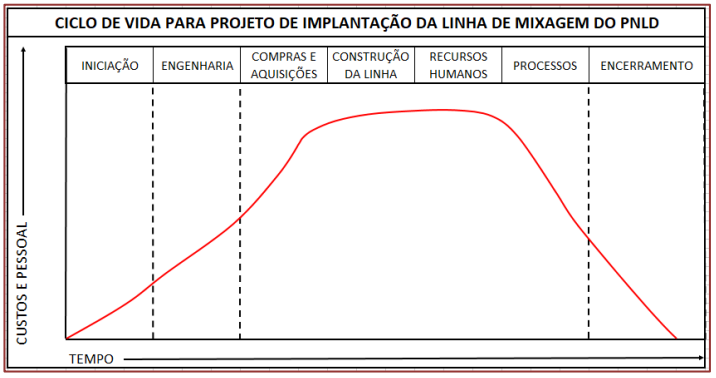


3.3.2. O PROJETO

O projeto que se apresenta teve origem na necessidade de reduzir 20% nos custos de manuseio e transporte dos livros didáticos, financiados pela PNLD, haja visto que a produção desses livroseram realizados por diversas gráficas e transportados a um centro de distribuição e, posteriormente eram conduzidos para seu destino final, fato que

ocasionada em muitos casos fazer os mesmos percursos. As próprias gráficas poderiam manusear os livros e os correios retirariam nessas empresas todo o material demandado. Assim, foi gerada uma oportunidade de negócio para a organização em estudo. (Fig. 22).

Figura 22 : Ciclo de vida do projeto desenhado e desenvolvido na empresa sede do caso



3.3.3. OBJETIVOS, ALINHAMENTO ESTRATÉGICO E REQUISITOS PARA O PROJETO

O principal objetivo do projeto desenvolvido foi a implantação de uma linha de produção que realizasse a formação de kits de livros para serem entregues nas escolas que compreendem o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD). Estes livros têm suas produções iniciadas em meados de setembro e varia seu término entre dezembro e janeiro do ano seguinte,sendo que as empresas que possuem as maiores capacidades captam os maiores quantitativos. O projeto foi denominado Linha de Mixagem do PNLD, a expectativa era que trouxesse a geração de mais valor agregado ao produto fim da empresa, a disponibilidade de produção em períodos de menor demanda, devido as necessidades de reposições dos livros do programa emépocas de baixas demandas.

Na implantação da linha de mixagem foi necessário entender toda a cadeia produtiva, pois existe um grande volume de informações que norteia a correta distribuição. Essas informaçõessão geradas pelos correios, que naturalmente dispõem de rotas e endereços de coleta e entrega, e em conjunto com o FNDE desenvolve os bancos de dados das quantidades a serem entreguespara cada escola que integra o programa.

As editoras e gráficas recebem dos correios, de forma compartilhada, os bancos de dados, que servem de inputs em softwares que geram etiquetas de SKU que são colocadas em cada kit e em cada pallet, para sua correta distribuição.

Em termos de requisitos do projeto, o FNDE desenvolve e fornece especificações de trabalho e insumos para as editoras e gráficas que produzem os livros didáticos do programa. Esse material contém todos as instruções e especificações de insumos, teste de qualidade, operações de expedição dentre outras.

3.3.4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A primeira etapa foi definir, minimamente, a equipe de projeto, uma metodologia de gerenciamento do projeto e a criação das áreas norteadas dada a natureza de trabalho. Essas áreas foram postas em uma linha de tempo e separadas conforme aestrutura do

ciclo de vida apresentada no PMBOK. As áreas definidas foram: iniciação, engenharia, compras e aquisições, construção da linha, recursos humanos, processos de produção e encerramento. Entretanto, o projeto de implantação, Linha de mixagem dos livros do PNLD, foi reduzido a 4 fases após validação pela Diretoria. A seguir são apresentados os processos que compuseram cada uma dessas fases, através dos processos de gerenciamentos doprojeto.

Processo de iniciação - Inicialmente, muito antes do real início das atividades do projeto, alguns colaboradores da empresa foram destinados a visitar parceiros que desenvolvessem o mesmo processo, um benchmarking. O gerente industrial, por maior *expertise* na área de projetos, assumiu o papel do gerente de projetos, e junto com os analistas de processos industriais, foi desenvolvido o termo de abertura (Fig. 23) para apresentação a diretoria.

Figura 23: Termo de abertura do projeto de implantação da linha de mixagem do PNLD

TERMO DE ABERTURA DO PROJETO		
TÍTULO DO PROJETO		
Projeto de Implantação da Linha de Mixagem dos Livros do PNLD.		
CLIENTES	**GERENTE**	**PATROCINADORES**
Grupo SOMOS Educação Grupo Santillana (MODERNA) Grupo Edições SM	Gerente Industrial	Superintendente da empresa Diretor Industrial Diretora Financeiro/Administrativo
DIRETRIZES DO PROJETO (Objetivos e Visão Geral)		
O objetivo deste projeto é a implantação de uma linha de operações que realiza o manuseio dos livros que integram o PNLD, fazendo a colocação em alta escala dos SKU's de distribuição logística disponibilizados pelo FNDE junto com os Correios, seguindo as especificações solicitadas pelo FNDE.		
RESULTADOS ESPERADOS (Produtos finais, documentos, benefícios)		
- Formação completa da linha de produção - Instalação de todo o processo de trabalho a ser realizado na linha de mixagem. - Garantia de correto manuseio dos SKU's de distribuição.		
DEFINIÇÕES BÁSICAS (Escopo, prazos e recursos)		
- Construção da Linha de Mixagem - Instalação do processo de manuseio do material - Entrega do produto acabado, devidamente endereçado e sobre especificações do FNDE.		
ORGANIZAÇÃO (Organograma e papéis)		
Este projeto está subordinado ao Gerente Industrial.		
ESTRATÉGIA (Desafios, riscos, plano de Contingência)		
Desafios e Riscos: Manuseio errado dos SKU's, causando o envio errados dos produtos. Super lotação do espaço físico da fábrica Plano de Contingência: Desenvolvimento e/ou aquisição de um software de gerenciamento de pallets Estudo de um layout de alocação para os produtos acabados e mixados.		
MÉTRICAS (Indicadores, Qualidade, marcos de realização)		
Será avaliado o tempo de entrega das tarefas destinadas aos participantes.		

Figura 23: Termo de abertura do projeto de implantação da linha de mixagem do PNLD (continuação)

TERMO DE ABERTURA DO PROJETO				
PLANO DE COMUNICAÇÃO				
Principais Stakeholders: Clientes Supervisores e coordenadores dos setores da empresa				
CRONOGRAMA DE MARCOS				
Iniciação	Data Início	14/07/2017	Data Término	27/07/2017
Planejamento	Data Início	28/07/2017	Data Término	24/08/2017
Execução	Data Início	11/08/2017	Data Término	19/10/2017
Encerramento	Data Início	14/10/2017	Data Término	20/10/2017
APROVAÇÃO			**DATA**	
			14/07/2017	

Quanto aos *stakeholders*, estes foram definidos previamente em uma reunião que contava como gerente do projeto e os analistas de processos industriais, (Fig. 24), que foram destinados *full time* ao projeto, e em um formato de b*rainstorming*, criou-se uma lista com os seguintes integrantes:

Figura 24 - Classificação dos stakeholders do projeto de implantação da linha de mixagem do PNLD

CLASSIFICAÇÃO	CARGO	SETOR	NÍVEL DE IMPORTANCIA
Patrocinadores	Diretoria Comercial	Comercial Interno	8
	Diretoria Industrial	Industrial Interno	5
Participantes	Gerente do Projeto	Industrial Interno	9
	Analista de Processos Industriais	Industrial Interno	6
	Coordenadora de RH	RH	5
	Supervisor de Manutenção Mecânica	Manutenção Interna	3
	Supervisor de Manutenção Elétrica	Manutenção Interna	3
	Supervisor Predial	Manutenção Interna	2
	Compradores	Compras Interno	4
	Coordenação de T.I.	T.I. Interno/Externo	5
Parceiros	Grupo SOMOS	Cliente	8
	Grupo Santilana	Cliente	4
	Grupo SM Edições	Cliente	4
Externos	FNDE	Órgão de Fiscal do Governo	9
BAIXA: 1 até 4		MÉDIA: 5 até 7	ALTA: 8 até 10

FONTE: Empresa do estudo de caso (2018).

Na Fig. 24 se monstra o objetivo, a dimensão e o envolvimento que cada área da empresa tevenesse novo projeto.

Processo de planejamento - O processo de planejamento compreendeu um espaço de tempo de 13 dias, nesse prazo foi determinado, primeiro, porque o projeto que já era de

conhecimentoentre os analistas de processos e o gerente, e segundo pelo fato de um dos analistas ter destinação *full time* para o processo de implementação. Significativa parte do planejamento já estava preparado antes mesmo do termo de abertura ter sido desenvolvido. Nesse grupo foi elaborada a matriz de requisitos, definido o escopo do trabalho, criado a Estrutura Analítica deProjeto - EAP e elaboradas as estratégias que atendiam a parte de planejamento que nesse estudo foi chamado de Engenharia, onde continha o desenvolvimento dos fluxos, dimensionamento da capacidade da linha, a modelagem da linha, o dimensionamento dos insumos, o quadro de pessoal e a estratégia de estoque e por fim foi feito uma lista de tarefas que foi submetido ao grupo de execução com datas/prazos, sendo essa lista/cronograma a ferramenta de controle e monitoramento do projeto.

Figura 25 : Matriz de requisitos do projeto de implantação da linha de mixagem do PNL

MATRIZ DE REQUISITOS				
ENVOLVIDOS	DESCRIÇÃO DOS REQUISITOS	PROZO DE ENTREGA	STATUS	DATA CONCLUSÃO
Engenharia	Definir uma capacidade de produção de acordo com os equipamentos para passar aos clientes.			
Engenharia / Almoxarifado	Garantir uma área de trabalho que suporte 20.000 kg por raia para carregamento segundo instruções passadas pela equipe dos correios.			
Engenharia	Definir um fluxo do processo para a realidade da empresa segundo processo observado na viagem aos parceiros.			
Engenharia / Qualidade	Pallets seguindo minunciosamente especificações passadas pelo FNDE.			
Engenharia / Qualidade	Filme termoencolhível polielifínico com no mínimo 30 micras ou polietileno com no mínimo 40 micras para envelopar os pacotes.			
Engenharia / RH	Investimento de mão de obra para este projeto.			
Engenharia	Custo unitário de embalagem para cada livro.			
Engenharia / RH	Não trabalhar domingos e feriados			
Engenharia / Expedição	Desenvolver um plano de dimensionamento de caminhões para contratação de empresas de transporte por fretes.			
Engenharia / Qualidade	Garantir testes de resistencia definidas pelo FNDE especificados no Manual de Instruções Operacionais.			
Engenharia / T.I.	Realizar um teste antes do início das operações.			
Engenharia / T.I.	Desenvolver um sistema de gerenciamento que suporte nas respostas aos clientes.			
Engenharia	Apresentar um plano de investimento total do projeto.			
Engenharia / Qualidade	Garantir pesagem seguindo especificação de cada pallet			
Engenharia / Almoxarifado	Disponibilizar equipamento de empilhamento para movimentação e manuseio dos pallets prontos.			
Engenharia / Manutenção.	Desenvolver uma estrutura que garanta o máximo de alinhamento dos pallets produzidos.			

Escopo do Projeto

O escopo do projeto é o detalhamento do trabalho necessário que permita entregar o produto dentro das expectativas do cliente. Assim, após o desenvolvimento da matriz de requisitos foiapresentada uma simulação do escopo do trabalho, que se tratava da linha

de produção, o processo e o produto fim. Então foi agendado a segunda reunião de projeto com os setores participantes e a diretoria, sendo que esta definia os cursos de trabalho e se reportava posteriormente e exclusivamente ao gerente do projeto. O escopo do projeto foi divido em três grupos, o primeiro volta-se para a estrutura, um segundo grupo para o processo que seriadesempenhado nessa estrutura, o modelo de trabalho, e o terceiro grupo voltava-se para o produto fim.

Estrutura: A estrutura inicial do projeto contava com quatro máquinas seladoras pneumáticassemiautomáticas, um forno de encolhimento, duas esteiras de transporte com 11 metros cada,conforme Figura 26.

Figura 26: Estrutura do projeto de implantação da linha de produção de mixagem do PNLD

MÁQUINA	NOME E DESCRIÇÃO
	Seladora Pneumática Semiautomática: Máquina que realiza a solda do pacote com os livros.
	Forno de Encolhimento. Após os pacotes com livros serem formados nas seladores, estes passam pelo forno de encolhimento para deixar o plástico no formato do conjunto de livros.
	Esteiras de Transporte. Realiza o transpor dos pacotes de livros em dois momentos, primeiramente das seladoras até o forno, e posteriormente do forno até a saída onde são montados os pallets.

FONTE: Autoria própria (2018).

- *Processo*: O processo de transformação consistia no manuseio dos livros fabricados para adaptação a distribuição requerida pelo FNDE conforme necessidade de cada escola. Para tanto, inicialmente são impressos SKU's com as informações de quantidade contida em cada pacote de livros, esses SKU's são enviados para a operação para serem colocados entre os livros e o filme envolvedor, após feita a selagem nos pacotes, estes passam pelo forno e sofrem o encolhimento, são transportados através das esteiras e são montados em pallets conforme SKU de cada pallets, onde estas contêm especificações de quais pacotes compões cada pallets. Sequencialmente, os pallets são pesados e devem se manter dentro de um ranger de

variação de +/- 2% do peso especificado no SKU dos pallets, após aprovado são armazenados conforme as diretrizes dos correios e aguardam uma soma de 20.000 Kg por centralizadora para poderem ser carregados em caminhões para o destino final.

- *Produto*: O produto fim são pallets, devidamente montados seguindo minunciosamente a formação contida nos SKU's enviados pelo FND, cada pallets tem um número de pacotes com quantidades de livros predefinidos. Os pallets, (Fig.27), seguem especificações de insumos enviados pelo FNDE e não podem ultrapassar um range de pesagem estabelecidopara cada pallet.

Figura 27 : Formação de pallet de livros mixagem para o PNLD

PARTE/ PRODUTO	ETAPA E DESCRIÇÃO
	ETAPA 1: Formação das Pacotes. Consiste na formação de um conjunto de livros envolvidos por um plástico, onde é colocado um SKU com informações de endereçamento, permitindo que determinada quantidade de livros chegue a escola que necessita.
	ETAPA 2: Formação dos Pallets. Consiste na acomodação de determinada quantidade de pacotes, conforme especificação do SKU do pallet, que seguirão para a mesma centralizado dos Correios.
	ETAPA 3: Colocação e montagem. Consiste na alocação dos insumos de embalagem especificados pelo FNDE.
	ETAPA 4: Produto Acabado. Consiste na paletização, pesagem e colocação do SKU de endereçamento.

FONTE: Autoria própria (2018).

Figura 28: Estrutura analítica do projeto (EAP) para a implantação da linha de mixagem do PNLD

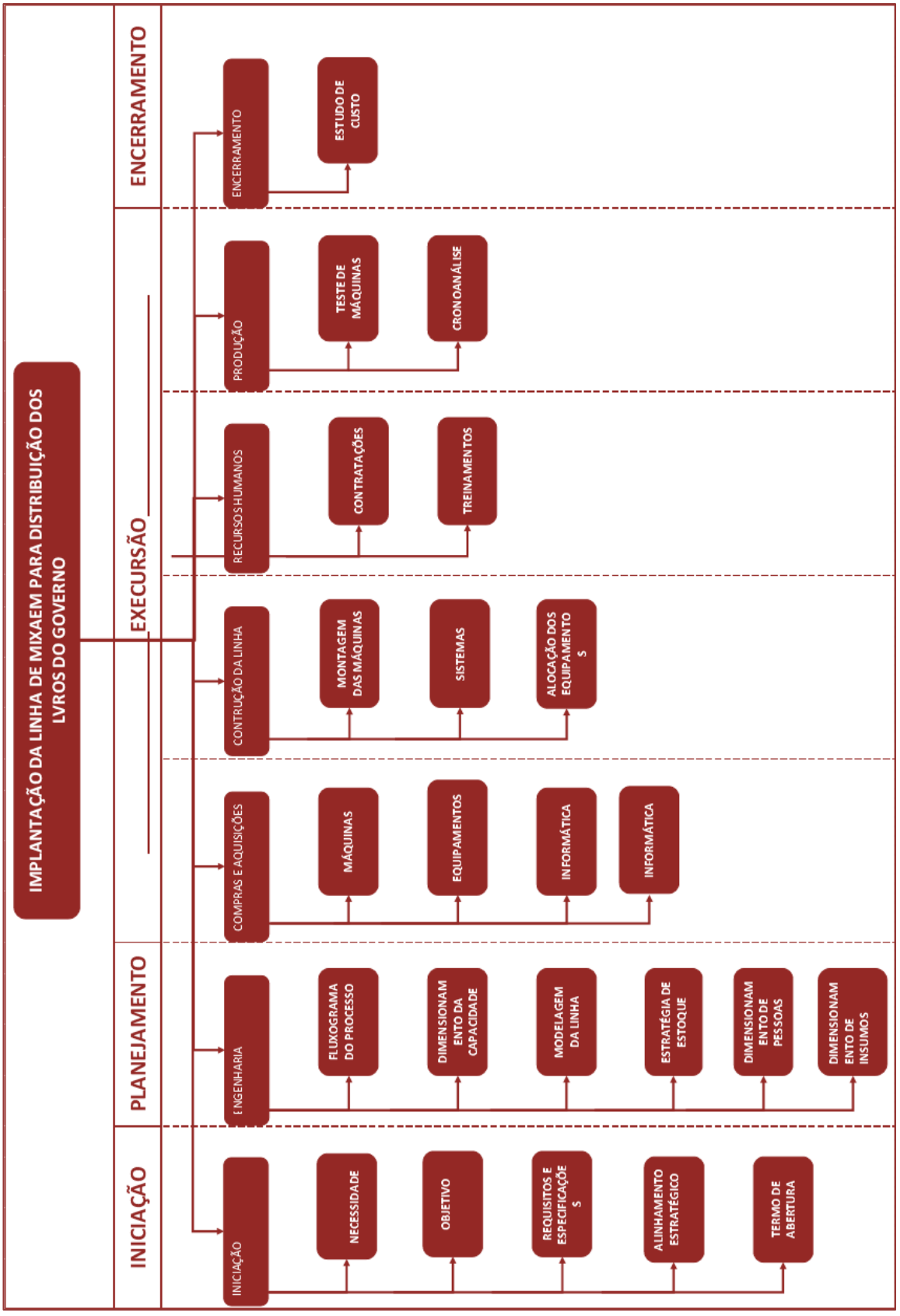


Figura 44: Entrada do ambiente de produção – empacotamento de livros



4. CONCLUSÕES

O guia PMBOK, norteador deste trabalho, apresenta 8 processos referentes a execução dos projetos, tais como: os processos de execução, atividades referentes a orientação do trabalho, garantia da qualidade, o gerenciamento da equipe, comunicações e interessados, além da condução das aquisições. No exercício prático da condução do projeto de implantação da linha de Mixagem, todo a execução do trabalho esteve voltada as atividades postuladas na EAP do projeto, que compreendia as compras e aquisições, construção da linha, recursos humanos e atividades voltados a garantir a operacionalidade da produção.

Na prática vivenciada expressa neste estudo de caso, a criação da matriz de requisitos, a definição do escopo de trabalho, bem como o cronograma de marcos e seu detalhamento contido no planejamento da EAP, resultou em uma lista de tarefas datadas e indicadas nominalmente para as partes interessadas, fato que facilitou os controles e monitoramento.

Este trabalho também desenvolveu um processo mínimo de gerenciamento para projetos futuros na organização em estudo com base na revisão bibliográfica deste trabalho, embasamento da vivência prática do projeto descrito no estudo de caso e conhecedor da cultura e ambiente da empresa em questão, foi desenvolvido um processo estruturado para gestão de projetos futurospara organização.

REFERÊNCIAS

[1] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK(R) Guide. 5 edition ed. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2013.

[2] HELDMAN, Kim. Gerência de projetos-fundamentos: Um guia prático para quem quer certificação em gerência de projetos. Elsevier Brasil, 2005.

[3] GIDO, Jack; CLEMENTS, James P. Gestão de Projetos. 3ª edição. Editora Cengage Learning, 2007.

[4] CARVALHO, M. R. Gestão de Projetos, da Academia à Sociedade. 2011.

[5] CARVALHO, MM de; RABECHINI JR, Roque. Fundamentos em gestão de projetos: construindo

competências para gerenciar projetos. São Paulo: Atlas, 2011.

[6] HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodologia de pesquisa. 5.ed. – Porto Alegre: Penso, 2013.

[7] SILVA, José Salvino Da. Gerenciamento de projetos: aplicação de ferramentas e conceitos na condução de um projeto de implantação de uma linha de produção. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Produção Mecânica, UFPB. 2018.

[8] SELMA Regina de Andrade [et all)]. O estudo de caso como método de pesquisa em enfermagem: uma revisão integrativa.

[9] https://www.fnde.gov.br/index.php/programas/programas-do-livro/pnld/dados-estatisticos

[10] Yin, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos / Robert K. Yin; trad. Daniel Grassi - 2.ed. – Porto Alegre : Bookman, 2001.

Capítulo 3

Ferrovias brasileiras: Histórico e processo de estagnação

Luis Antonio Gomes da Costa Moura da Silva
Maria Clara Muniz Araújo
Mayssa Alves da Silva Sousa

Resumo: A história das ferrovias no Brasil é complexa, iniciando-se com investimentos privados e rápida expansão, seguidos por um período de gestão centralizada pelo poder público até a implantação do modelo de concessões há 30 anos. Atualmente, a extensão da malha ferroviária do país é inferior à de outros países desenvolvidos e em desenvolvimento, estagnada quando comparada a seus próprios valores do século XX. Assim como houve várias formas de administração das vias férreas, as causas para este processo de declínio também são diversas. Por meio de uma revisão de literatura, buscou-se apresentar o histórico da construção e do desenvolvimento das ferrovias no Brasil, para discutir tais causas. Contextos políticos adversos, o surgimento de uma cultura anti-ferroviária e as dificuldades em estabelecer um modelo eficiente de concessão para o setor se mostraram os grandes entraves para o crescimento das ferrovias do país.

Palavras-chave: Ferrovias; Histórico; Estagnação; Declínio.

1. INTRODUÇÃO

Assim como em outros setores da sociedade, o processo da evolução do setor de transportes brasileiro está diretamente relacionado à história do país. Dentre os modais existentes, destaca-se o ferroviário, cujo desenvolvimento, desde seu surgimento até chegar à atual conjuntura, pode ser considerado singular e complexo, mas que é elucidado à medida em que se faz uma análise histórica da situação e observa-se o contexto de cada mudança durante esse período.

Partindo desse pressuposto, o presente artigo propõe-se a responder o questionamento: "de que maneira a história das ferrovias caminhou de modo a levar ao atual cenário de defasagem da malha ferroviária brasileira se comparada à de outros países?". Busca-se o entendimento sobre o que levou o Brasil a desviar da curva na qual se encontram outros países, desenvolvidos e em desenvolvimento, no que se refere aos modais de transporte predominantes, enfatizando o ferroviário. Essa questão é muito pertinente, principalmente quando se leva em consideração suas dimensões continentais e sua tendência de crescimento e grande importância durante seu apogeu.

Nos anos de sua maior desenvoltura, esse modal não só auxiliou como permitiu um desenvolvimento econômico muito importante para o Brasil, pois tinha função de escoar a produção agropecuária produzida na época até os portos do litoral do país, com destino final na Europa e nos Estados Unidos, como elucidado por MOURA JUNIOR et al (2018, apud BARAT, 2007), afirmando que essa sequência não seria possível sem a estrutura ferroviária vigente na época, que funcionava como ligação entre os locais de produção e o porto, onde as embarcações seriam abastecidas.

Nesse sentido, existe uma sequência lógica de acontecimentos econômicos, políticos e sociais no Brasil que explicam tanto o surgimento com altos investimentos e rápida expansão das estradas de ferro quanto o seu processo de estagnação quanto ao crescimento. Além, explicam também a predominância do modal rodoviário e a baixa representatividade nacional do transporte de passageiros pelas ferrovias.

O objetivo geral deste trabalho é, portanto, discorrer sobre o histórico das ferrovias no Brasil, relacionando o momento no qual se encontrava o país às respectivas fases do desenvolvimento da malha ferroviária, pontuando aquelas mais significativas. Mais especificamente, objetiva-se: apresentar o início da história das ferrovias, analisando seu surgimento e rápida expansão; compreender as influências situacionais sobre o modal durante a década de 1950 e no período da ditadura militar; analisar os porquês da erradicação dos ramais e dos empecilhos econômicos utilizados como justificativa; e entender o processo de desestatização e a política de concessões, observando a atual conjuntura e ponderar sobre as respectivas perspectivas de investimento.

Ademais, partindo do fato de que os meios de transporte são essenciais e muito presentes na vida das pessoas, pode-se separar uma análise quanto à necessidade de observar e procurar melhorar os meios de locomoção dos cidadãos, e outra no que se refere ao próprio questionamento dos usuários sobre a disponibilidade dos modais no país. Entendendo a história das ferrovias, é possível tanto esclarecer por que o transporte ferroviário não é tão usado no Brasil como poderia, quanto identificar as causas para uma defasagem e, assim como o próprio conceito de história preconiza, aprender como o passado para que o futuro possa ser melhor direcionado, ou seja, melhorar as condições das ferrovias do país e quiçá implementar uma malha correspondente ao seu respectivo potencial.

Por fim, para que os objetivos, geral e específicos, do presente artigo fossem obtidos, realizou-se uma revisão de literatura. Buscaram-se outros artigos científicos cujo tema estava associado ao que pretendia-se expor, leram-se e selecionaram-se os trechos mais relevantes para, então, compor o texto final de revisão de literatura.

2. SURGIMENTO E EXPANSÃO DAS FERROVIAS NO BRASIL

Desde o seu descobrimento pelos colonizadores europeus, o Brasil sempre foi um país fonte de matérias primas e muitos produtos naturais, principalmente agrícolas, mas, também, eventualmente minerais e pecuários. Esses produtos sempre estiveram atrelados à exportação para o mercado externo, fosse para simplesmente abastecer a metrópole em época de colônia de exploração, fosse para satisfazer as necessidades comerciais de países europeus, como a Inglaterra, durante o império.

Para que esses produtos chegassem a sua destinação final, era necessária a implementação de um transporte que os levassem do local de produção até os portos para abastecimento das embarcações. Como citado por BARAT (2007, apud MOURA JUNIOR et al, 2018), foi dessa demanda estabelecida pelo mercado Europeu, principalmente britânico, que consumiam cada vez mais os produtos primários do Brasil, que foi desencadeado o impulso inicial para a criação de uma estrutura ferroviária nacional.

À medida em que o consumo e a produção foram aumentando, viu-se a necessidade de aprimorar a forma de deslocamento desses produtos que, a priori, "(...) era precariamente realizado, enfrentando estradas de chão, do local da produção até os portos" (PAULA, 2001), com muita dificuldade, demora e perda de material. Assim, com as exportações de açúcar, algodão, café, couro e peles e, principalmente, devido ao aumento do consumo internacional do café, houve o surgimento e a expansão de uma rede ferroviária, que "respondeu economicamente" a essa situação, bem como um programa de melhoria dos portos como o de Manaus, Belém do Pará e o do Rio de Janeiro (PAULA, 2001).

Os primeiros passos para a construção de ferrovias foram dados, então, durante o período regencial da história do Brasil, com o Decreto nº 101, de 31 de outubro de 1835, promulgado pelo regente Diogo Antônio Feijó e aprovado pela Assembleia Nacional. Esse decreto autorizava o Governo a fazer concessões e favores a companhias que se propusessem a construir e operar estradas de ferro construídas entre a capital, na época Rio de Janeiro, e a Bahia, Minas Gerais e Rio Grande do Sul. O objetivo era a integralização do território nacional.

Esse tipo de incentivo governamental continuou e, alguns anos mais tarde, em 1852, foi promulgada a Lei nº 641, Lei Cochrane, que, estimulando, também, a construção de estradas de ferro para ligar províncias, concedia benefícios às companhias, como isenções de taxas, garantia de juros, privilégio de exclusividade na linha e direito de desapropriação. Sob o ponto de vista de Borges Neto (2012), citado por MOURA JUNIOR et al (2018), "a política adotada pelo governo imperial para fomentar a construção de ferrovias teve efeito imediato, desencadeando, em praticamente todas regiões do país, uma saudável onda de empreendimentos".

Foi nesse contexto que Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, firmou um contrato com o Governo para a construção de uma estrada de ferro que, dois anos depois, em 1854, foi inaugurada. A Estrada de Ferro Mauá, como ficou conhecida, ia do porto de Mauá, até a raiz da Serra da Estrela, ambos no Rio de Janeiro. A primeira ferrovia do Brasil,

inaugurada pelo imperador D. Pedro II, tinha extensão de 14,5 km, bitola de 1,676 e velocidade média de 38 km/h.

Assim, a partir desse passo inicial do Barão de Mauá, o Governo passa a investir mais nesse setor, a fim de fomentar o crescimento econômico, a exportação de produtos e o investimento de capital externo, principalmente da Inglaterra. Apenas quatro anos depois da inauguração desse primeiro trecho ferroviário, foi inaugurada a Estrada de Ferro D. Pedro II, também no Rio de Janeiro, ganhando ao longo dos anos muita importância no cenário nacional. Concomitantemente, a iniciativa privada, ou melhor, os oligarcas do "ouro verde", o café, viam a serventia e a eficácia dos caminhos de ferro ligando as fazendas até os portos e passaram a investir cada vez mais na ampliação da malha ferroviária. Segundo Emerson Ribeiro (2012), "O funcionamento da estrada de ferro fascinou muitos cafeicultores, que passaram a reservar parte de seus lucros para investir na construção dessas vias".

E assim sucedeu-se o ciclo de grandes investimentos nas ferrovias, que, por sua vez, davam retorno a esses investimentos ao facilitar o comércio dos maiores produtos da época, ganhando mais investimento e promovendo ainda mais esse desenvolvimento econômico. Segundo dados coletados por MOURA JUNIOR et al, entre 1900 e 1929 o PIB per capita brasileiro teve um aumento vertiginoso, devido à produção agrícola e à demanda do mercado externo.

Pelo próprio contexto, fica evidente que a grande incumbência das ferrovias era o transporte de mercadorias. Entretanto, havia também o transporte de passageiros que, mesmo em menor escala, também foi se desenvolvendo ao longo desses anos.

Após esse período, acontecimentos de caráter internacional afetaram negativamente a economia brasileira e, consequentemente, os investimentos no modal ferroviário, sendo eles a Primeira Guerra Mundial e a crise de 1929. Com o mercado consumidor europeu mais preocupado com os conflitos relativos à Primeira Grande Guerra, houve uma diminuição nos investimentos e consumo e uma dificuldade de importação de equipamentos para construção e manutenção das ferrovias brasileiras, estagnando seu crescimento. Quanto à quebra da bolsa de valores de Nova York e posterior crise de 1929 e Grande Depressão, a economia mundial foi altamente afetada, não ficando o Brasil por trás, tendo uma grande desvalorização do seu principal produto. "É inquestionável que a mudança de eixo de uma economia voltada para exportação de produtos primários para outra baseada em substituição de importações, trouxe consigo também a queda do principal meio de transporte que garantia o modelo anterior (ferrovia)" (PAULA,2001).

Além dos fatores internacionais, o contexto nacional, político, econômico e social, também influenciou no setor dos transportes, como o processo de industrialização, o governo de Juscelino Kubitschek e administração no período da ditadura militar.

3. O CRESCIMENTO DO MODAL RODOVIÁRIO E A DIMINUIÇÃO DE INVESTIMENTOS NAS FERROVIAS NA SEGUNDA METADE DO SÉCULO XX

Após a Revolução de 1930, com o início do governo de Getúlio Vargas, houve um aumento significativo no processo industrial brasileiro, uma época conhecida como a terceira fase da industrialização no país. Ao longo desses anos, houve uma substituição da importação e incentivo à produção nacional e ao mercado interno.

Foi nesse contexto de tentativa de fortalecimento do mercado interno que houve uma necessidade de maior integralização das regiões do país. Como dito por Almeida (1933 apud RIBEIRO, 2012), essa integração passou a ser fundamental, e o Governo Federal projetava isso através dos meios de transporte, como uma espécie de acordo, no qual os transportes de grandes distâncias ficavam a cargo das ferrovias enquanto os de curta distância, por onde não chegavam as ferrovias, eram das rodovias. Essa situação foi facilitada ainda mais pelo fato de que, quando construídas, as ferrovias não tinham o objetivo de formar redes, mas sim escoar a produção de certa localidade, conectando-a a um porto. Além, não havia uma uniformidade de bitolas, necessitando ainda mais das rodovias (CAMARGO, 1999, apud RIBEIRO, 2012).

Essa dinâmica entre os modais, entretanto, perdeu o equilíbrio a partir do momento em que o investimento na infraestrutura e na manutenção das rodovias ficou sob responsabilidade exclusiva do Estado, sendo a despesa dos empresários de transporte rodoviário restrita à compra e manutenção do material rodante, enquanto que os empresários do transporte ferroviário tinham que arcar com os custos de implantação, operação e manutenção de todo o sistema (BAPTISTA & PENTEADO, 1931, apud RIBEIRO, 2012). Em 1951, foi instituído o Plano Nacional de Viação, que definiu que o modal ferroviário não continuaria a ser o foco de investimentos em âmbito nacional, abrindo espaço para maior investimento e desenvolvimento do setor rodoviário (GALVÃO, 2009, apud MOURA JUNIOR et al, 2018).

Seguindo esse caminho, as rodovias passaram a ganhar cada vez mais destaque, atingindo o ápice do seu investimento no governo de Juscelino Kubitschek, JK. Período correspondente à quarta fase da industrialização brasileira, foi caracterizado pela abertura ao capital estrangeiro no país, internacionalização da economia e, com o projeto de desenvolvimento econômico, fomentação ao investimento na indústria automobilística, com instalação de fábricas e montadoras em território nacional. “A ferrovia foi associada ao passado, enquanto a rodovia e os automóveis apareciam como o caminho do presente e do futuro” (PAULA, 2014).

É interessante ressaltar, também, como funcionou a administração do setor de transportes durante a ditadura militar, entre 1964 e 1885. Segundo Dilma Andrade de Paula (2014), “Durante a ditadura civil-militar, um dos setores mais importantes do investimento estrangeiro foi o da indústria automobilística, que liderou o crescimento industrial com taxas anuais acima de 30%”. Segundo essa mesma autora, há uma relação direta entre esse crescimento e a desarticulação tanto do transporte ferroviário quanto da categoria dos ferroviários como classe trabalhadora.

É indiscutível a relação entre um governo ditatorial e a repressão aos movimentos populares, como a luta dos ferroviários através de paralisações e greves. Citado por PAULA (2014), Ignácio Rangel diz que “ninguém pode pôr em dúvida que os ferroviários têm tido mais êxito em suas lutas pelo salário do que o comum dos trabalhadores brasileiro” (1992, p. 110). Assim, pode-se interpretar a falta de investimentos no setor como uma tentativa de enfraquecer o próprio movimento sindical e a classe dos ferroviários.

> “(...) Ainda que consideremos o avanço da indústria automobilística e da construção de obras públicas, não seria possível explicar a decadência das ferrovias no Brasil somente por esses aspectos. É um conjunto de fatores que se inter-relacionam e formam um todo explicativo na questão da desativação: crescimento rodoviário, a

> "cultura do automóvel", asfixia das ferrovias e extinção de ramais e o sufocamento sindical." (PAULA, 2014, p. 7).

Para OKUMURA (2021), "Embora a política de transporte tenha favorecido a expansão rodoviária, as ferrovias não foram totalmente esquecidas, reforçando a sua especialização no transporte de cargas para exportação", ou seja, ainda havia uma certa divisão de tarefas entre os modais ferroviário e rodoviário. O que fomentou a falta de investimentos na área foi a alegação de ineficiência associada aos déficits operacionais, havendo posteriormente redução de linhas, de pessoal e de serviços. Assim, deu-se ênfase somente ao transporte de cargas para as ferrovias, especializando a logística desse tipo, como transporte de minérios, diminuindo a função social relacionada ao transporte de passageiros em centros urbanos do modal ferroviário. Enquanto isso, continuou-se com os altos investimentos nas rodovias e expansão pelas regiões do país, como, também, estratégia geopolítica de integração nacional por parte dos governos militares, como forma de manter um monitoramento político-militar na América do Sul (NATAL, 2003, apud OKUMURA, 2021).

4. A ERRADICAÇÃO DE RAMAIS ANTIECONÔMICOS

Justamente a partir da segunda metade do século XX, surge no país uma efetiva política anti-ferroviária. Muito além do crescimento industrial ligado ao setor automobilístico, observou-se um processo ativo de abandono dos investimentos e manutenção do modal por parte do poder público. Este processo ficou caracterizado pelos esforços pela erradicação de ramais ferroviários que se estendeu até o processo de desestatização.

Em 1957, houve a unificação da gestão das linhas ferroviárias pertentes à união, dando origem à Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA. Da mesma forma, a maior parte das linhas do país eram operadas por estatais como a FEPASA e Companhia Vale do Rio Doce, evidenciando o papel importante do Estado na construção e administração das ferrovias à época.

Antes mesmo disso, já em 1956 criou-se a primeira comissão para análise e desativação de ramais ferroviários considerados "antieconômicos" com membros do Departamento Nacional de Estradas de Ferro - DNEF e do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. Com base nos projetos apresentados pela Comissão Mista Brasil-Estados Unidos, as ferrovias passaram a ser avaliadas segundo índices de produtividade, a fim de limitar os investimos às ferrovias ditas "rentáveis e estratégicas" (PAULA, 2014).

No tratamento destas análises, adotou-se como prática padrão a extinção dos ramais que se mostrassem deficitários, sem estudo das causas de ineficiências ou dos benefícios não mensuráveis que estas traziam. Este processo de "racionalização", atingiu principalmente as linhas do interior e fortaleceu os ramais que funcionavam para o transporte de cargas para exportação.

> "Através da construção de rodovias substitutivas aos ramais extintos, considerava-se resolvido o problema da ligação entre as regiões. Ideologicamente, de acordo com as informações contidas nos relatórios dos órgãos públicos do setor de transportes, a desativação dos trens tinha um caráter puramente técnico e inexorável: a marcha do progresso arrastaria consigo os trilhos e

> colocaria no seu lugar as modernas estradas de rodagem." (PAULA, 2001, p. 8).

A princípio, Paula (2014) reconhece que houveram oposições iniciais à erradicação de ramais. A sociedade civil e parte dos órgãos estatais responsáveis pela administração foram impactados diretamente por este processo. Entretanto, rapidamente esta frente perdeu força, já que com a falta de investimentos, a queda na qualidade do serviço fez com que até mesmo a população atendida pelas rodovias passasse a preferir outros modais.

Associado a tudo isto, o período de exceção política que foi a Ditadura Militar contribuiu mais ainda com a desarticulação das forças populares, reprimindo firmemente manifestações, e com os cortes arbitrários nos investimentos e operação de linhas ferroviárias, possibilitados pela ação dos técnicos do poder Executivo, de fato, como agentes legisladores.

Em 1965, houve a criação de uma comissão específica para a erradicação de ramais, a Comissão Regional para Assuntos Relativos à Erradicação de Trechos Ferroviários - CRAE, e, no ano seguinte, o Ministério da Viação e Obras Públicas cria o Grupo Executivo para Substituição de Ferrovias e Ramais Antieconômicos - GESFRA. Paula (2001) ressalva que, em seus relatórios, a GESFRA primeiro decretava a extinção dos ramais para posteriormente avaliar sua possibilidade de recuperação. Como resultado dessas políticas, ocorreu uma regressão de aproximadamente 12% na extensão da malha ferroviária nacional no período de 1965 a 1985.

5. O PROCESSO DE DESESTATIZAÇÃO E O ATUAL MODELO DE CONCESSÕES

Frente ao contexto apresentado, com diminuição da capacidade operacional e de investimento, a RFFSA contava com uma dívida crescente. Segundo De Souza (1997 apud MOURA JUNIOR et al, 2018), este déficit era advindo principalmente de processos trabalhistas "cuja comprovação era difícil de ser mensurada por auditorias". O processo de desestatização do setor ferroviário tem início com a lei Nº 8.031/1990, que criou o Plano Nacional de Desestatização, no qual a RFFSA foi incluída por meio do Decreto nº 473/1992.

A rede da RFFSA era composta por doze superintendências regionais, que foram levadas a leilão dividas em seis malhas. Através do Decreto nº 2.502/1998, a FEPASA foi incorporada à RFFSA e também foi concedida. Estes processos ocorreram com base na Lei de Concessões, Lei nº 8.987/95. Em 1997, Companhia Vale do Rio Doce foi privatizada, passando a ser controlada por um grupo de empresas e fundos de pensão.

> "Todas essas malhas foram concedidas pelo período de 30 anos, incluindo-se a prestação do serviço de transporte ferroviário (por meio de contratos de concessão) e a respectiva gestão dos ativos de infraestrutura (por meio de contratos de arrendamento). Optou-se, portanto, por um modelo verticalmente integrado. Observa-se, ademais, que a modernização e ampliação da malha e do serviço não constavam como obrigações das concessionárias, mas sim como um direito dependente de prévia anuência do Poder Concedente." (SAMPAIO, 2014).

Inicialmente, a regulação do setor ferroviário era feita diretamente pelo Ministério dos Transportes, com base Decreto nº 1.832/1996 e nos próprios contratos de concessão. A partir de 2001, passou a ser feito pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT.

Outras estatais de atuação importante na infraestrutura ferroviária eram a VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A e a Empresa de Planejamento e Logística S.A. - EPL, que passaram por um processo de fusão em 2022, passando a se chamar Infra S.A. Ambas atuavam principalmente na área de projetos, estudos e construções de ferrovias.

Apesar do setor de ferrovias constituir um monopólio natural, SAMPAIO (2014) destaca alguns elementos do atual modelo que promovem a competitividade entre as concessionárias: o compartilhamento de infraestrutura por meio de modelos de tráfego mútuo e direito de passagem e a desverticalização.

Tratando da desverticalização, em 2013, o governo tentou, por meio do Programa de Investimento em Logísticas, descrito no Decreto Nº 8.129/2013, adotar um modelo de livre acesso no setor ferroviário, em que a responsabilidade pela infraestrutura é concedida a uma empresa, enquanto a VALEC atuaria na prestação dos serviços advindos dessa infraestrutura.

A intenção principal desta mudança era fomentar o desenvolvimento do sistema ferroviário, garantindo ao poder concedente a capacidade de demandar o aumento na capacidade das ferrovias já concedidas. Entretanto, frente uma série de incertezas jurídicas e questões técnicas quanto ao novo modelo, este foi revogado pelo Decreto Nº 8.875/2016.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Feita, portanto, uma análise do desenvolvimento do modal ferroviário de transportes, relacionando-a à história do Brasil, percebeu-se como as diferentes épocas e suas respectivas conjunturas sociais, econômicas e políticas explicaram a trajetória das ferrovias no país, que pode ser considerada complexa e singular.

Com o objetivo de trazer esclarecimento a respeito dos caminhos tomados pelo transporte ferroviário brasileiro, tópico muito questionado pelas pessoas, que comparam o sistema de transporte do seu país com o de outros, principalmente se levar em consideração o baixo desempenho do Brasil em face de seu grande potencial, foi elaborada a hipótese de que existe uma sequência lógica de acontecimentos que explicam a curva de desenvolvimento desse modal, marcada por um rápido e elevado crescimento seguido de estagnação e, ainda, uma queda.

Nesse sentido, buscou-se apresentar a história das ferrovias no Brasil, explicando o contexto do seu surgimento e rápida expansão, as influências internas e externas sobre o modal na década de 1950 e durante a ditadura militar, analisando os motivos para erradicação de ramais e o processo de desestatização e a política de concessões. Para isso, foi realizada uma revisão de literatura com vários artigos sobre o tema, para, por fim, ser possível compreender melhor essa parcela do transporte nacional e, até, a partir desse entendimento, trabalhar para desenvolver a malha ferroviária de um país com tanto potencial como o Brasil.

Quanto à primeira fase do desenvolvimento das ferrovias, foi visto como seu surgimento e início do processo de expansão estavam diretamente relacionados à economia, devido à necessidade de exportação do café, ressaltando como houve influência por parte do

governo para que investimentos privados fossem feitos, ou seja, que a história das ferrovias começa antes da atuação direta do Barão de Mauá. Também foi possível compreender as influências internas, do início do processo de industrialização brasileiro e desenvolvimento do modal rodoviário, e externas, da primeira guerra mundial e crise de 1929, contribuíram para a estagnação e posterior queda na curva de crescimento das ferrovias.

Além destes fatores, percebeu-se que, a partir da segunda metade do séc. XX, surge no país uma política anti-ferroviária, consequência, sobretudo, do incentivo para investimentos no modal rodoviário, a repressão ao movimento sindicalista ferroviário e o estado de exceção instaurado durante a Ditadura Militar. Esta política efetivou-se por meio de um processo de erradicação de ramais ferroviários, que resultou na regressão da malha nacional até o início da década de 1990, quando ocorreu a desestatização do setor, que apesar de representar uma melhoria, não obteve sucesso em incentivar o aproveitamento deste modal até seu máximo potencial.

Devido ao desgaste e sucateamento da infraestrutura ferroviária, a venda de estatais como a RFFSA e a FEPASA teve como principal objetivo o pagamento de dívidas e aliviar os cofres públicos das despesas operacionais. Poucas medidas promoviam o investimento na ampliação e aprimoramento dos serviços por parte das concessionárias, o que exige uma reestruturação da legislação vigente. Como observado pelo PIL apresentado em 2013, uma proposta este tipo enfrentará resistência e deve apresentar solidez jurídica para ser aceitar e trazer benefícios à sociedade e às concessionárias.

Compreendendo que grande parte dos obstáculos e atrasos do setor ferroviário brasileiro são resultados de contextos políticos adversos, pode-se imaginar que, a partir de uma análise técnica abrangente do sistema de transportes do país, muitas mudanças podem ser feitas para aumentar a importância e integração do modal ferroviário no Brasil. Para tanto, é crucial que se desenvolva a consciência na sociedade e nos governantes quanto ao potencial do setor, pois a realidade atual de estagnação é produto do desconhecimento e de preconceitos do passado.

REFERÊNCIAS

[1] MOURA JUNIOR, A. O.; ABREU, G. R. de; ALCÂNTARA JÚNIOR, Z.; PINTO JUNIOR, D. M.; SHITSUKA, D. M. Malha Ferroviária de 1890 a 2016: uma estrutura desfragmentada na história brasileira. Research, Society and Development, [S. l.], v. 7, n. 9, p. e1379442, 2018. DOI: 10.17648/rsd-v7i9.442. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/442. Acesso em: 02 nov. 2022.

[2] OKUMURA, S. H. Política de transportes terrestres no Brasil no período 1964-1974: para além da concorrência entre modais. In: 49° Encontro Nacional de Economia, 2021, Brasília. 49° Encontro Nacional de Economia, 2021. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2021/submissao/files_I/i3-ff7b1b2a317e738b282e2a6c26a5f90a.pdf. Acesso em: 02 nov. 2022.

[3] PAULA, D. A. As ferrovias no Brasil: Análise do processo de erradicação de ramais. In: II Congresso de História Ferroviária, 2001, Aranjuez. II Congresso de Historia Ferroviária, 2001. Disponível em: http://www.docutren.com/historiaferroviaria/Aranjuez2001/pdf/22.pdf. Acesso em: 02 nov. 2022.

[4] PAULA, D. A. Passado-presente: a extinção de ramais ferroviários durante a ditadura civil-militar. Revista HISTEDBR On-line, v. 56, p. 186-201, 2014. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/histedbr/article/view/8640443/8002. Acesso em: 02 nov. 2022.

[5] RIBEIRO. E. Os caminhos de ferro no estado de São Paulo: Ascensão e queda – 1860-1990. Revista Percurso - NEMO, v. 4 n. 2, Maringá, 2012. ISSN: 2177- 33002. Disponível em: https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/Percurso/article/view/49544. Acesso em: 02 nov. 2022.

[6] SAMPAIO, P. R. P. Regulação e concorrência no transporte ferroviário brasileiro: o novo modelo proposto para o setor. In: 8ª Jornada de Estudos de Regulação, 2014, Rio de Janeiro. 8ª Jornada de Estudos de Regulação, 2014. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/17620/Regula%c3%a7%c3%a3o_e_Concorr%c3%aancia_no_Transporte_Ferrovi%c3%a1rio_Brasileiro_O_Novo_Modelo_Proposto_para_o_Setor.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 02 dez. 2022.

Capítulo 4

Características hidrodinâmicas de navios em águas restritas

Roseane Costa Diniz
Julio Cesar Barcellos Guimarães
Witson Andrade da Silva

Resumo: Este trabalho visa apresentar os principais conceitos teóricos e práticos sobre a hidrodinâmica de navios em águas restritas, incorporando para isso análises de dados reais obtidos da Universidade de TUDelf (https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono). A metodologia de captação dos dados segue: O transporte marítimo é a força vital da economia global, e as decisões de manobra de navios são influenciadas por vários fatores. Com base em dados experimentais de marítimos experientes (capitães/chefes/oficiais) e usando uma plataforma de simulação sob o cenário do cais de Shanghai Waigaoqiao (o navio estava a jusante da atracação no porto), coletamos os dados de 33 principais fatores de influência (contém as categorias de ambiente natural, movimento do navio, parâmetros de força, calado e posição) para decisões de manobra. Usamos o navio OS1 como nosso navio experimental (deslocamento: 33.089,0 toneladas; comprimento: 182,9 metros; largura: 22,6 metros). Confrontando a literatura buscada (artigos observados no portal de periódicos da CAPES, Livros que são referências na área e a Experiência dos oficiais de manobra pode-se tentar descrever uma abordagem mais próxima do real). Com os dados obtidos a partir do datasets da Universidade de TUDelf (https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono) percebeu-se que há um hiato entre as formulações teóricas e a prática real dos oficiais de manobra, por isso é extremamente necessário avaliar dados dessa natureza para construir uma literatura mais robusta sobre o tema.

1. INTRODUÇÃO

A denominação de Águas Restritas define canais naturais ou balizados, estreitos ou hidrovias com proeminentes bancos de áreas ou perigos à navegação e áreas com piers ou quebra mares, as quais introduzem mudanças significativas nas características das manobras de navios, independente das particularidades de casco, tamanho, calado e tecnologias de propulsão e/ou controle de manobra. Em sua maioria, as águas restritas também são águas rasas e muitas incluem significativas correntes naturais e correntes de maré vazante/enchente. Quando um navio, estando ele carregado, em lastro ou vazio, entra em águas rasas ou restritas, (por exemplo canais de acessos a terminais ou portos), o seu comportamento hidrodinâmico muda consideravelmente devido a mudanças na magnitude das forças e momentos de forças que atuam sobre ele (forças dos ventos e marés, efeitos de ondas, força das correntes e outras em função da condição de calado, trimagem e velocidade). Podemos considerar que a resultante dessas forças que atuam sobre o NAVIO pode ser mensurável ao acompanharmos o comportamento em históricos de derrota digitais decorrente de registro com o uso de DGP.

A velocidade do NAVIO é normalmente reduzida em águas restritas, logo a habilidade da manobra consiste em equilibrar os efeitos hidrodinâmicos ocasionados pela mudança de ambiente com as forças externas, considerando a melhor resposta que o navio possa promover, decorrente de uma decisão de quem manobra o navio.

Como agentes ativos do NAVIO, podemos observar o LEME, o FERRO, CABOS, PROPULSOR, REBOCADORES, thrusters, além do formato do casco em diferentes condições de calado).

Este trabalho tem como objetivo traçar as principais características hidrodinâmicas oriundas deste ambiente confinado, bem como as ambientais mensuráveis e aproximar teorias à prática, criando uma resultante matemática que permita dar suporte decisório e contribuir para uma análise segura para comandantes e práticos em manobras de navios em águas restritas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada pesquisa de revisão de literatura entre 01 de maio de 2022 e 10 de maio de 2022 no portal de periódicos da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior, na qual foram rastreados 128 recursos online revisados por pares tratando do Título acima com o seguinte descritor “Hydrodynamics” desde 1999 até 2022. A bibliografia existente analisa características de planejamento para acesso à terminais e portos, no nível de dados discretos e fornecidos por sistemas de bordo que agregam muito ao decisor. Entretanto, nossa busca é de que seja resumida em um parâmetro consolidador esses dados importantes. Além disso, como forma de comprovar as premissas aqui debatidas, encontradas em livros consagrados e periódicos científicos, fizemos gráficos através do software/ambiente (MATLAB R2022a)® partindo de um banco de dados com 33 variáveis por 20.534 pontos de observação envolvidos no processo de navegação em águas restritas disponibilizado em planilha do Excel pela Universidade de TUDelft (https://data.4tu.nl/articles/dataset/Dataset_of_maritime_traffic_safety_influencing_factors_for_autonomous_ships_maneuvering_decisions/12712409); (https://doi.org/10.4121/uuid:a9b0458d-a6d8-4758-97a6-a09b0efbd085);

(https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono) .

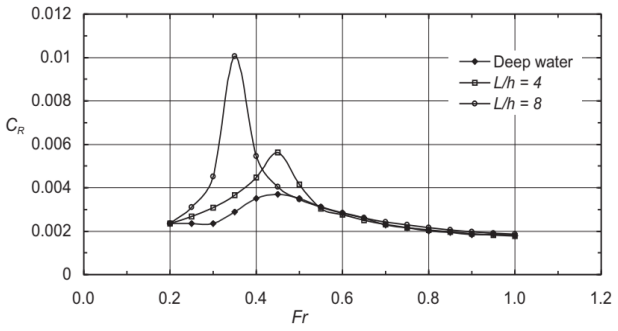
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A racionalidade nas ações/atos de um navegante tenderá a ser baseada na teoria e prática do navegador acumulada pelas gerações que o antecederam. Tal conhecimento teórico-prático associado com o uso do propulsor, do leme, do ferro, das espias, dos rebocadores e dos thrusters pode ser amplamente empregado para que se atinja o êxito na manobra/navegação em águas restritas haja vista a grande alteração que ocorre em termos hidrodinâmicos. Quando estamos em águas restritas a profundidade da água diminui consideravelmente, a resistência à formação de ondas, afundamento e TRIM podem atingir valores muito grandes também. À medida que a resistência aumenta, a perda de velocidade do navio é inevitável e, além disso, deve-se evitar o efeito SQUAT. O fluxo será comprimido ao passar pelos estreitos vãos entre o navio e a margem, entre o navio e o fundo, ou entre dois navios. O fluxo assimétrico a bombordo e a boreste do navio causa uma força lateral, ou um momento de guinada, que pode fazer com que o navio se desvie de seu curso original e, portanto, cause colisões. Temos ainda a seguinte situação: O efeito do leme numa curva de giro é indireto, pois movê-lo gera um momento de força que faz o navio mudar de aproamento inicialmente. Em seguida essa mudança de aproamento gera forças hidrodinâmicas ao redor do casco, onde após certo intervalo de tempo fazem com que haja alternância de seu braço de endireitamento.

O efeito de Águas Rasas/Restritas na Resistência ao Avanço está definido no domínio das ciências náuticas como uma força que se opõe ao movimento do navio e provém de um distúrbio de movimento desordenado do líquido ao redor do casco. Sabe-se que quando as águas rasas forem também restritas lateralmente, há um aumento desse distúrbio e, consequentemente, perda de velocidade ainda maior. A resistência ao avanço de um navio é bastante sensível aos efeitos de águas rasas. Inicialmente, há uma mudança apreciável no fluxo potencial ao redor do casco e, podemos observar que, em geral, a pressão é uma medida da força exercida por unidade de área nos limites de uma substância. A pressão hidrostática, agindo igualmente em todas as direções para uma certa profundidade, é transformada em pressão dinâmica através do fluxo de água. O termo pressão dinâmico (às vezes chamado de pressão de velocidade) está associado ao fluxo de fluido. O princípio de Bernoulli para o fluxo de água e seus efeitos de pressão ao contornar um obstáculo são plausíveis para esta análise. A distribuição da pressão do fluxo de água ao longo do casco, segundo teorema de Bernoulli, causa a redução da pressão exercida pelo fluido (pressão estática) em regiões onde a velocidade do fluxo é aumentada. Se a velocidade das partículas é aumentada naquela região é evidente observar que as mesmas partículas não exercerão efeito de pressão sob a quilha ou carena. Essa redução da pressão em uma área de constrição em um caminho de fluxo pode parecer contraintuitivo, mas se apresenta em menos valor quando se considera a pressão como densidade de energia. No fluxo de alta velocidade através da constrição (Área menor, Pressão maior), a energia cinética (pressão dinâmica) deve aumentar à custa da energia da (pressão estática). O campo de pressão originado pelo banco, pelo canal lateral, pelo fundo do mar ou por outro navio interfere no campo de pressão de um navio navegando, pois este último deve reduzir bastante sua velocidade.

Agora vamos considerar outra relação que complementa o teorema de Bernoulli dito anteriormente. A influência da profundidade de água sobre o coeficiente de resistência residual que está descrito no gráfico abaixo, onde para valores de número de Froude em torno de 0.2 e 0.7 demonstra que a resistência aumenta em mais de 100% se comparada com águas profundas (Deep water). Sabemos da fórmula, que o número de Froude é diretamente proporcional à velocidade do NAVIO, logo, por isso mesmo, em águas restritas onde não se opera com velocidades altas, haja vista que a resistência aumenta e haverá maior consumo de energia para romper esta resistência, sem falar do efeito SQUAT que é consequência do teorema de Bernoulli. Ver figura 1.

Figura 1 – Influência da profundidade da água na Resistência ao avanço



$$C_R = \frac{R_R}{0.5SV^2}.$$

$Re = \frac{VL}{v}$ is the Reynolds number, and
$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ is the Froude number.

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}.$$

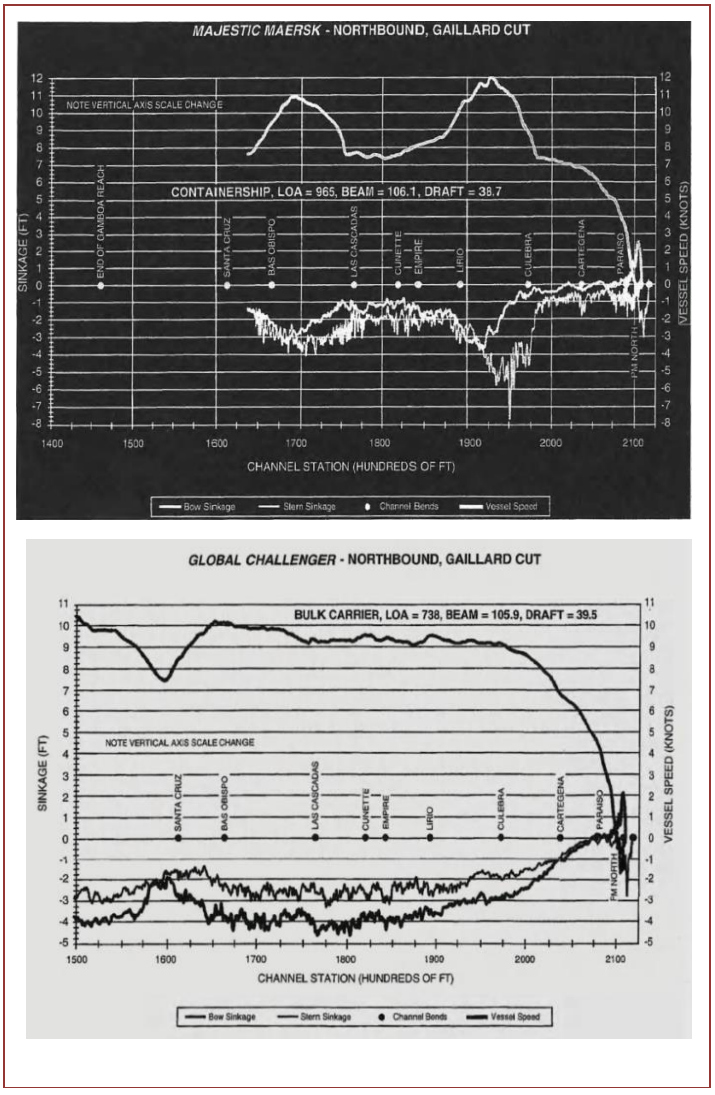
$$C_T = C_F + C_R$$

$$C_R = \frac{R_R}{0.5SV^2}.$$

Fonte: Onde V = velocidade do navio; L = comprimento do navio; g = aceleração da gravidade; CT = coeficiente de resistência total; CF = coeficiente de resistência friccional; CR = coeficiente de resistência residual. Molland, Anthony F. ET AL. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive Power. Cambridge University Press, página 105, 2017.

A figura 2 é um gráfico retirado do *Shiphandling for the Mariner* - SHFTM, 2018, onde se pode notar o efeito de Bernoulli, pois o SQUAT (linha abaixo) aumenta com a velocidade do navio (linha acima), porém este aumento não é instantâneo, há um retardo entre velocidade do navio e a ocorrência do efeito SQUAT. Este afundamento advém da equação de Bernoulli conforme foi explicado no parágrafo anterior. Ocorre uma diminuição da pressão de água sob a quilha devido aumento da velocidade do navio, logo em seguida ocorre o efeito SQUAT com certo retardo, este fenômeno é perfeitamente perceptível na figura abaixo e será confirmado mais adiante. Quando um navio começa a abrir caminho pelas águas restritas, ele sofre uma mudança em seu calado médio conhecido como SINKAGE. Essa mudança pode ocorrer igualmente para frente ou para ré e pode ser maior na proa ou na popa, resultando em uma mudança no TRIM, bem como uma mudança no calado médio. A combinação de SINKAGE e TRIM é chamado de EFEITO SQUAT.

Figura 2 – Teorema de Bernoulli

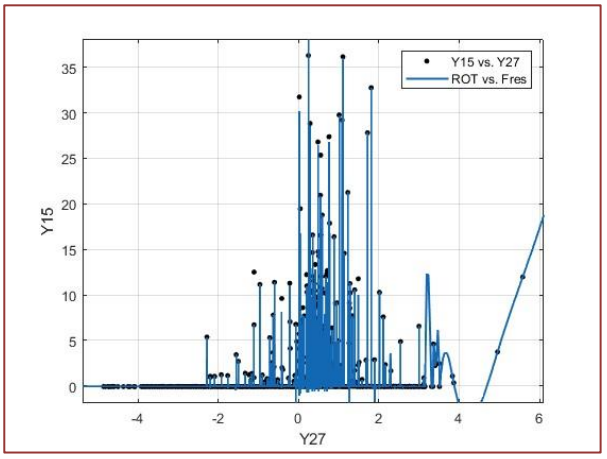


Descrição da Tabela: Bow Sinkage, Stern Sinkage, Channel Bends, Vessel Speed

Fonte: MacELREVEY, Daniel H.; MacELVERY, Daniel E. Shiphandling for the Mariner. 5 ed., Centreville: Cornell Maritime Press, página 92, 2018.

O Gráfico 1 nos diz que: Observe que a diferença entre afundamento na proa e popa diminui e a velocidade diminui na estação 1600. Observe também que agachamento aumentos em trechos mais estreitos do Canal do Panamá para a mesma velocidade, como entre as estações 1700 e 1800, onde o fator de bloqueio foi maior. Cortesia Waterway Simulation Technology, Inc./Autoridade do Canal do Panamá.

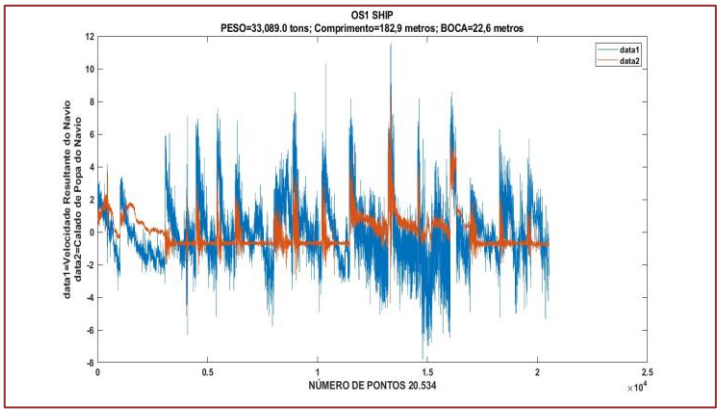
Gráfico 1 – Rate of Turn (ROT) em X versus Força Resultante sobre o Navio em Y



Fonte: https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono

Do gráfico 1 se depreende que a ROT assume valores positivos e negativos, conforme podemos observar no eixo X: para valores positivos a guinada é para direita (boreste) e para valores negativos a guinada é para esquerda (bombordo). No eixo Y podemos observar a força resultante que atua sobre o navio é sempre maior ou igual a 0. Nota-se que a proa tende a guinar para boreste, por ação do leme, da pressão lateral das pás e da corrente de descarga, porém a corrente de sucção tem o efeito contrário. As somas das forças atuando sobre o navio conduzem o mesmo para boreste. Com a diminuição da velocidade em águas restritas/rasas/portuárias, ocorre a diminuição da ação do leme, ao mesmo tempo em que aumenta o efeito da corrente de sucção. Portanto, a proa guina a princípio para boreste, mas a amplitude desta guinada vai diminuindo e o navio se mantém a meio caminho. Este fenômeno é bem observado no gráfico 1, onde um maior número de pontos está localizado a 1°/min à boreste.

Gráfico 2 – Navio OS1

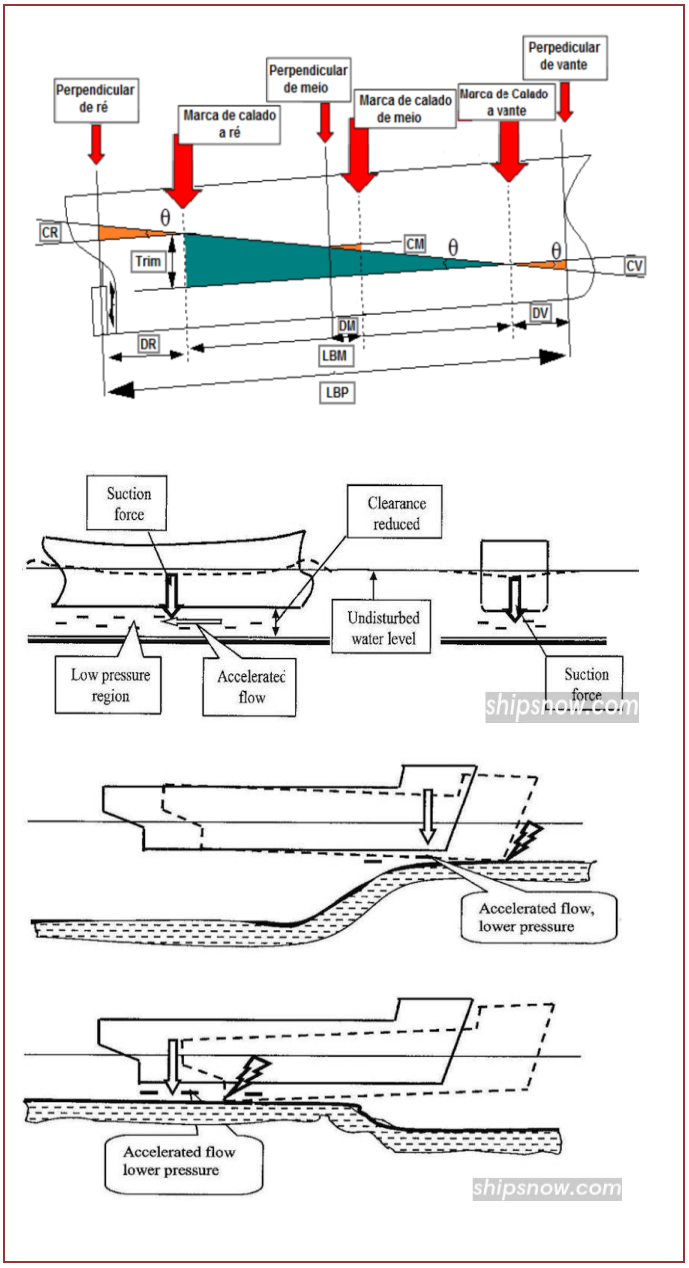


Fonte: https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono

Do gráfico 2 acima podemos observar que há uma relação diretamente proporcional entre velocidade resultante do NAVIO e calado de popa do NAVIO, o que nos parece convincente com a literatura. Em X identificamos o número de observações e em Y a sobreposição dos gráficos: data1 em Knots e data2 em Metros. À medida que o Navio aumenta sua velocidade o calado também aumenta em certa medida, ou seja, o navio sente os efeitos dos fenômenos de TRIM, SINKAGE E SQUAT. O navio desloca uma quantidade de água igual ao seu próprio peso que se move primeiramente ao longo e sob o casco e retorna a ré para ''preencher'' o vazio deixado pela água em virtude do avanço do navio, assim, quando maior for a velocidade do navio se movendo em relação a água, mais rápido será o fluxo sob e ao longo da carena, e menor será a pressão da massa de água sob/sobre o navio. Dependendo de onde ocorrer a maior redução na pressão ao longo do comprimento do casco, essa redução resultará em afundamento; (aumento do calado) na proa ou na popa, embora haja também aumento no calado médio do navio.

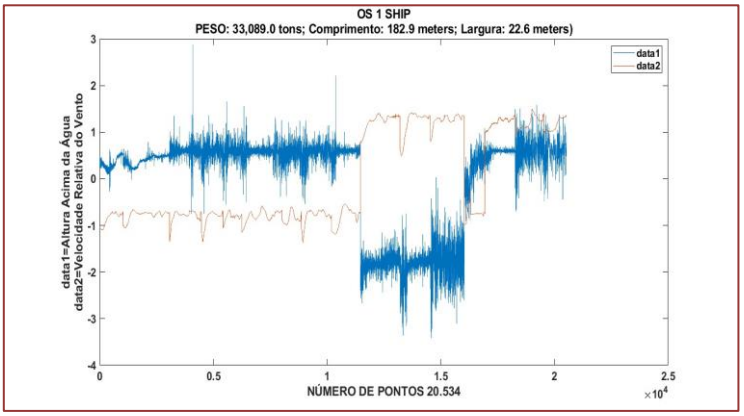
Sinkage é o deslocamento vertical para baixo do centro de gravidade do navio. Trim positivo é a translação do ângulo de proa para cima em relação ao centro de gravidade do navio. Trim negativo é a translação do ângulo de proa para baixo em relação ao centro de gravidade do navio O efeito Squat acontece quando há uma diminuição da quantidade de água abaixo da quilha associada com um aumento da velocidade de escoamento sob o fundo do NAVIO, isso produz uma redução da pressão da água sobre o fundo e a carena, assim gerando uma ''sucção'' para baixo fazendo então o calado e o trim aumentar.

Figura 3 – SQUAT em águas restritas



Fonte: Apostila do Curso de Arqueação de Navios do Instituto de Ciências Náuticas do Maranhão, 2018 (acima); https://shipsnow.com/wiki/interaction-effects/ (abaixo)

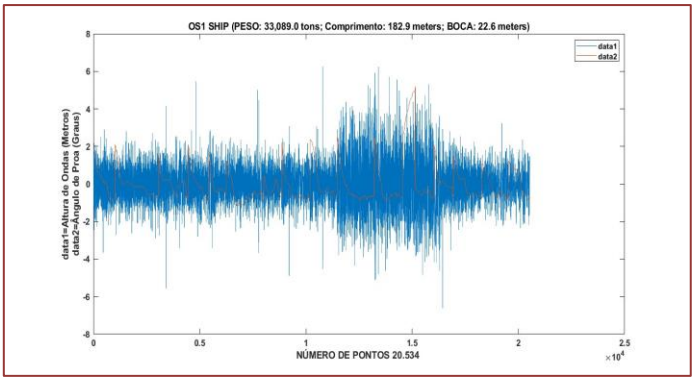
Gráfico 3 – Navio OS1



Fonte: https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono

Do gráfico 3 nota-se que há uma relação inversamente proporcional entre data1=altura acima da água em metros e data2=velocidade relativa do vento. Explicando melhor, em termos práticos, o vento forte promove ondas mais altas (vide gráfico 4), o que por sua vez influenciará nos movimentos rotativos e lineares do NAVIO (vide figura 4) e consequentemente poderá haver aumento no calado do mesmo e com isso diminuição da altura acima da água. Os fenômenos ambientais como corrente, ondas e ventos em geral afetam os movimentos rotacionais e translacionais do navio alterando o curso, rumo, calado e a força a ser desenvolvida pelo propulsor.

Gráfico 4 - Navio OS1

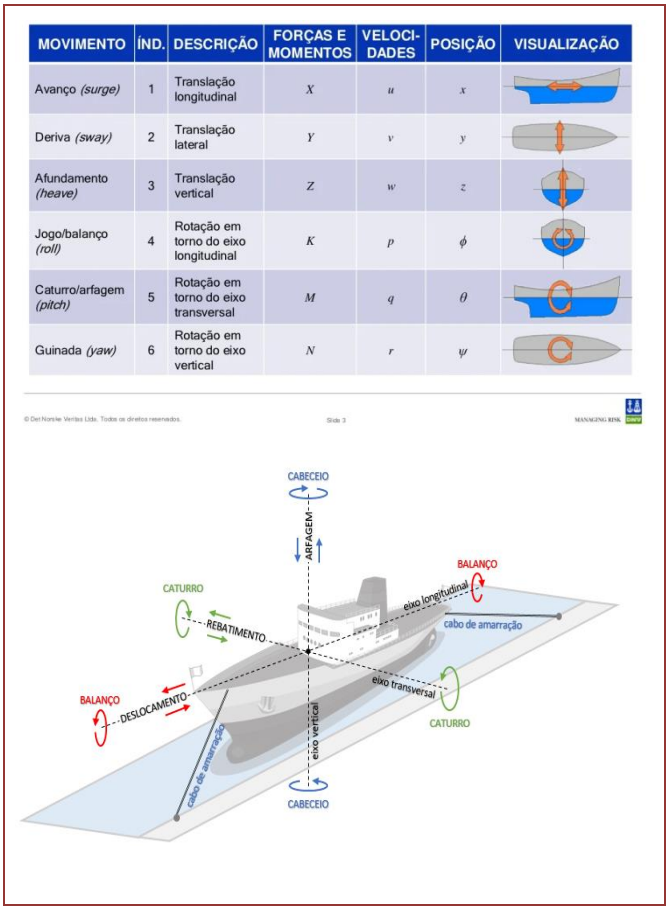


Fonte: https://research.tudelft.nl/en/datasets/dataset-of-maritime-traffic-safety-influencing-factors-for-autono

Do gráfico 4 conclui-se que há uma relação direta entre data1=Altura de Ondas em Metros e data2=Ângulo de Proa em Graus, indicando que quando há os fenômenos de ondas altas, o NAVIO desenvolve o caturro/arfagem (pitch) dentre outros movimentos rotativos e translacionais (vide figura 4). O pitch é a Rotação da embarcação sobre seu eixo transversal (eixo que vai de um bordo a outro). Nota-se ainda que do gráfico 2 ao gráfico 4, no intervalo de 1.2 a 1.7 em X ocorreram fenômenos significativos de mudança no perfil de base do NAVIO, ou seja, ventos fortes, ondas altas, calado e velocidade com tendência

de alta, e sendo assim, fez-se as correlações devidas para o comportamento hidrodinâmico do NAVIO.

Figura 4 - Graus de Liberdade de um Navio



Fonte: https://pt.slideshare.net/volpini/anlise-de-carregamento-hidrodinmico-parte-ii (acima); https://portogente.com.br/portopedia/106637-projeto-de-porto-5 (abaixo)

4. CONCLUSÃO

Pode-se depreender que ao se navegar em águas restritas, as decisões são tomadas com base em regras pré-determinadas como (RIPEAM) e outras regulamentações da IMO, comparações com práticas consagradas e a expertise do navegante. Mas, é notório que o controle do navio em águas confinadas/restrito-raso-portuárias, vem recebendo uma grande atenção devido ao aumento no tamanho dos navios e das consequências ambientais e financeiras de um possível acidente caso não haja a confluência de todos os fatores hidrodinâmicos necessários para a boa condução das embarcações/navios. Considerando o navio íntegro do ponto de vista do maquinário, conclui-se que há uma interdependência entre características hidrodinâmicas do navio em águas restritas, forças externas e forças internas ao navio e o gerenciamento deste tripé carece de suporte adequado ficando apenas a cargo dos oficiais de manobra sua devida aplicação.

REFERÊNCIAS

[1] CRENSHAW, Russel Sydnor. Naval Shiphandling. 4 ed., Annapolis: United States Naval Institute, 1975.

[2] HENSEN, Capt. Henk. Tug use in Port, a Pratical Guide. 2 ed., Rotterdam: The Nautical Institute, 2003.

[3] HOUSE, David J. Ship Handling, Theory and Practice. 1 ed.,Burlington: USA, 2007.

[4] LEWIS, EDWARD V. – Principles of Naval Architecture, SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers) Vol. I, II & III (3ª Edição: 1988/1989).

[5] MacELREVEY, Daniel H.; MacELVERY, Daniel E. Shiphandling for the Mariner. 5 ed., Centreville: Cornell Maritime Press, 2018.

[6] Portal de Periódicos da CAPES.

[7] Volker Bertram - Practical Ship Hydrodynamics-Butterworth-Heinemann (2012).

[8] Xue, Jie; van Gelder, P. (Pieter); Reniers, G.L.L. (Genserink); Papadimitriou, E. (Eleonora); Wu, C. (Chaozhong) (2019): Dataset of maritime traffic safety influencing factors for autonomous ships' maneuvering decisions. 4TU.ResearchData. Dataset. https://doi.org/10.4121/uuid:a9b0458d-a6d8-4758-97a6-a09b0efbd085

[9] Molland, Anthony F. ET AL. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive Power. 2 ed., Cambridge University Press, 2017.

[10] MATTOS, João Henrique Volpini. Análise de carregamento hidrodinâmico em estruturas flutuantes. São Paulo: Det Norske Veritas, 2012. https://pt.slideshare.net/volpini/anlise-de-carregamento-hidrodinmico-parte-ii

Capítulo 5

Uso da Areia Descartada de Fundição (ADF) aplicada à pavimentação como alternativa com foco na sustentabilidade: Uma revisão de literatura

Maria Gabriela de Sousa Silva
Sâmyo Rodrigues Costa
Thyago Vinícius Santos da Silva
Mayssa Alves da Silva Sousa

Resumo: O presente trabalho está voltado ao uso da areia descartada de fundição (ADF) aplicada à pavimentação, consistindo em uma alternativa com foco na sustentabilidade. Com isso, investigou-se como problema o uso da areia descartada de fundição aplicada à pavimentação constituindo uma alternativa viável tanto do ponto de vista técnico quanto sustentável. A partir desse problema, cogitou-se como hipótese que o emprego da areia descartada de fundição apresenta viabilidade quanto à sua aplicação na pavimentação, no que tange aos aspectos técnico e sustentável. O objetivo geral consiste em apresentar um estudo acerca da areia de fundição aplicada à pavimentação, a fim de analisar a sua viabilidade técnica e sustentável. Os objetivos específicos, por sua vez, fundamentam-se em investigar o processo de produção da areia de fundição, analisar os aspectos técnicos relacionados ao uso dessa areia e verificar os aspectos sustentáveis relacionados ao emprego da mesma. Assim, foram realizados alguns ensaios a fim de analisar a viabilidade da utilização de ADF em comparação ao agregado convencional, dentre os quais tem-se o ensaio de tração por compressão diametral, em que se obteve dados relevantes, os quais indicaram que os corpos de prova apresentaram valores de resistência à tração bem semelhantes ao resultado obtido da composição em que é empregado o agregado convencional, o qual é, de, aproximadamente, 2,0 MPa. Este trabalho apresenta grande relevância nos aspectos individual, científico e social, pois apresenta a ADF como um material alternativo, proporcionando inovações em diversas áreas, ao passo em que se constitui como uma opção sustentável.

Palavras-chave: Areia descartada de fundição. Processo de produção. Viabilidade técnica. Sustentabilidade. Pavimentação.

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações nos dias de hoje, no que tange à questão ambiental, diz respeito à destinação correta de resíduos sólidos, especialmente daqueles que são descartados em grandes quantidades, como é o caso da areia resultante de processos de fundição industrial, a qual é responsável por grandes índices de descarte em aterros sanitários, o que implica em elevados custos para o transporte desse material para sua disposição final. Nesse sentido, a reutilização desse resíduo constitui uma alternativa sustentável, já que a sua aplicação como matéria-prima em diversos segmentos da construção civil, principalmente na pavimentação, implicaria tanto na redução de volume descartado em aterros sanitários, quanto na mitigação da quantidade de areia extraída da natureza, assim como na redução dos custos do manejo desse resíduo aos locais aos quais seria destinado.

Nesse contexto, o uso da areia de fundição como material de construção apresenta-se como uma alternativa que visa à sustentabilidade, visto que reduz a extração de matérias-primas, promove a mitigação do total de areia residual descartada, assim como dos custos decorrentes de seu manejo, como afirma Schaefer et al. (2016, p. 1).

O presente trabalho propõe-se a responder ao seguinte problema: “O uso da areia descartada de fundição aplicada à pavimentação constitui uma alternativa viável tanto do ponto de vista técnico quanto sustentável?”. Em virtude de questionamentos como esse, muitas instituições no Brasil e no mundo têm dado importância ao desenvolvimento de estudos que visem à viabilidade da reutilização da areia de fundição na construção civil, conforme Klinsky e Fabbri (2009, p. 37).

Tendo em vista o problema apresentado, a hipótese levantada frente a esse problema foi a seguinte: “O emprego da areia descartada de fundição apresenta viabilidade quanto à sua aplicação na pavimentação, no que tange aos aspectos técnico e sustentável”. Em outras palavras, o uso de ADF proveniente de aterros sanitários ou mesmo de indústrias de fundição, segundo Dyer et al. (2021, p. 15), possui viabilidade técnica em obras de pavimentação que utilizam grande quantidade de agregados minerais, promovendo a sustentabilidade no setor da construção civil.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo acerca da areia de fundição aplicada à pavimentação, a fim de analisar a sua viabilidade técnica e sustentável. Assim, por meio desse estudo, será possível verificar se a aplicação desse material atenderá, de fato, às mesmas propriedades propiciadas pelo agregado extraído da natureza e, consequentemente, atendida essa condição, a exploração deste último poderá ser mitigada.

Acerca disso, é cabível ressaltar que, de acordo com Dyer et al. (2021, p. 5), o reuso do agregado residual de fundição possui grande potencial de aplicabilidade em relação à areia convencional, uma vez que a ADF pode apresentar custo inferior, se comparado ao agregado comumente empregado, especialmente no que diz respeito à sua aplicação na pavimentação, já que esse tipo de empreendimento demanda grandes quantidades desse tipo de agregado mineral, o que resultaria na diminuição da demanda por agregado extraído diretamente de fontes naturais, proporcionando, então, maior sustentabilidade à obra.

No que tange aos objetivos específicos do presente trabalho, estes são os seguintes: investigar o processo de produção da areia de fundição, analisar os aspectos técnicos

relacionados ao uso dessa areia e verificar os aspectos sustentáveis relacionados ao emprego da mesma.

O estudo acerca do uso desse tipo de material se caracteriza como a busca por inovações relacionadas à sustentabilidade e como isso pode gerar benefícios no que diz respeito à educação ambiental, pois incentiva o emprego de materiais de reuso, ao invés daqueles decorrentes da exploração da natureza, assim como o ganho no que diz respeito ao aspecto científico, como o incentivo ao estudo de materiais alternativos, proporcionando inovações em diversas áreas, sobretudo na construção civil.

Tal prática propicia uma opção de material utilizável de fácil acesso e menor custo em relação ao disponível no mercado, assim como o benefício proporcionado à sociedade como um todo, visto que (além da exploração da natureza, no que diz respeito à extração diretamente de fontes naturais), diminuiria a demanda por áreas para a deposição de lixo, principalmente no que tange à disposição desses materiais em aterros sanitários, uma vez que esse tipo de resíduo é responsável por ocupar grandes volumes nesses pontos de destinação, ou seja, com o uso desse material, a quantidade de lixo nesses locais seria reduzida consideravelmente.

Em virtude das considerações apresentadas até então, é de fundamental importância avaliar o processo de produção da areia de fundição, as questões técnicas e sustentáveis relacionadas ao uso desse material como alternativa viável à areia convencional.

2. METODOLOGIA

No que se refere à metodologia adotada para desenvolver o presente trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, por meio da qual foram coletados os artigos científicos relacionados ao tema em questão para a realização da revisão de literatura, consistindo em uma metodologia qualitativa, empregando-se, para tanto, como base de dados, as plataformas Google Acadêmico, SciELO, CAPES e Repositórios Institucionais de Universidades Federais. Com isso, os materiais analisados foram, no total, quinze artigos, dos quais foram selecionados seis para compor o referencial teórico deste trabalho. Vale ressaltar que a seleção dos artigos foi realizada por meio da leitura dos resumos dos mesmos, analisando-se quais possuíam maior coerência com o tema abordado, resultando, então, na quantidade supracitada, como pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 1 - Artigos selecionados para a revisão de literatura

Referências	Título do artigo
CARNIN, Raquel Luísa Pereira et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. Revista Pavimentação, 2010. 12 p.	Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado.
DYER, Paulo Paiva Oliveira Leite et al. O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. Revista Matéria, 2021. 18 p.	O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação.
KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FABBRI, Glauco Tulio Pessa. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Revista Transportes, 2009. 10 p.	Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis.
REIS, Joice Batista et al. Aplicação de resíduo de fundição em base e sub-base de pavimentação asfáltica. Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica, 2019. 4 p.	Aplicação de resíduo de fundição em base e sub-base de pavimentação asfáltica.
SCHAEFER, Cecília Ogliari et al. Estudo da lixiviação em peças de concreto para pavimentação (PCP) produzidas com areia de fundição. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016. 5 p.	Estudo da lixiviação em peças de concreto para pavimentação (PCP) produzidas com areia de fundição.
VIOLA, André Duarte; SABEDOT, Sydney; MALYSZ, Rodrigo. Estudo da viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação da areia de siderúrgica para mistura asfáltica. SEFIC, 2018. 7 p.	Estudo da viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação da areia de siderúrgica para mistura asfáltica.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. PRODUÇÃO DA AREIA DE FUNDIÇÃO

Conforme Carnin et al. (2010, p. 57-58), a areia de fundição é uma mistura de vários elementos que, combinados, geram uma característica de boa trabalhabilidade da mistura. A mesma é constituída por areia lavada, areia retorno, pó de carvão, bentonitas ativada e natural e água. Além disso, a areia base é um agregado fino, mineralogicamente puro, e é considerado o principal componente da areia utilizada em fundições, sendo constituída essencialmente de sílica. Já a bentonita é um silicato de alumina hidratado, enquanto o pó de carvão é formado por material volátil, carbono fixo, cinzas, água e enxofre. A água, por sua vez, é responsável pelo aumento da umidade, o que possibilita a propriedade coesiva dos elementos da mistura.

Dito isto, esses componentes são levados ao misturador, que é o instrumento principal para a preparação de areia de fundição. Na Figura 1, a seguir, é possível observar o aspecto físico das bentonitas e do pó de carvão.

Figura 1 - Matérias-primas da areia de fundição



Fonte: Carnin et al. (2010).

Em seguida, são confeccionados os moldes e machos, utilizando-se, para tanto, um tipo de ligante e alguns aditivos junto com a areia, para a produção de peças de pequeno porte, ou mesmo é utilizada uma resina, para peças de maior porte. Esse processo de fundição possui inúmeras vantagens, no que diz respeito à fabricação de formas complexas.

Ainda com relação ao processo de fundição industrial, de acordo com a Associação Brasileira de Fundição (2018), conforme citado por Dyer et al. (2021, p. 3), as etapas do mesmo são as seguintes: a areia é colocada junto a uma peça modelo (que, como mencionado anteriormente, pode ser de cera ou resina), em uma caixa quadrada de contenção; na sequência, ambos são vibro-compactados e o metal derretido a ser trabalhado é derramado sob a peça, fazendo com que esta se torne volátil; depois, ocorre o resfriamento, o metal enrijece e o molde é quebrado.

O principal resíduo gerado pelo processo de fundição é o material denominado areia de fundição, o qual é essencialmente constituído de quartzo e possui características diferentes da areia comum, devido ao fato de passar por tal processo. Após o mesmo, esse material é contaminado por metais pesados e resinas, podendo até ser classificado como um resíduo perigoso - Classe I, ou como não inerte - Classe II, como afirma Viola, Sabedot e Malysz (2018, p. 1). Dessa forma, a partir do processo de fundição, é gerada uma alta quantidade de resíduos, cuja destinação correta passa pela disposição em aterros industriais, o que torna mais elevados os custos de produção.

Bonet (2002), conforme citado por Dyer et al. (2021, p. 3), afirma que, após a areia ser utilizada, a mesma pode ser recuperada, desde que ela passe por um método de peneiramento e também de tratamento térmico, para remoção de partículas, resinas e óleos. Contudo, para cada tonelada de peça metálica produzida, ainda são gerados cerca de 600 kg de ADF, algo que, segundo a Associação Brasileira de Fundição (2018), representaria mais de 1 milhão de toneladas para a produção brasileira de 9 meses no ano de 2018, contribuindo para que os holofotes da sustentabilidade se voltem para essa problemática.

Alguns dos resíduos sólidos mais gerados no Brasil são as areias de fundição, com descarte em torno dos três milhões de toneladas por ano. Em razão da perda de volume e

descaracterização dos componentes, a areia de fundição tem de ser descartada. No entanto, o descarte inadequado desses resíduos na natureza causa severos impactos ambientais. Porém, é possível fazer com que essa areia seja reaproveitada posteriormente, por exemplo, como uma alternativa de agregado para pavimentação. Além disso, muitas instituições brasileiras e mundiais têm se preocupado com o desenvolvimento de projetos que possibilitem a reutilização deste resíduo.

3.2. ASPECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS AO USO DA AREIA DE FUNDIÇÃO

Esse material possui algumas particularidades no ramo do processo de fundição no meio industrial, seja por sua importância no âmbito de sua utilização, ou até mesmo quando esse material já não apresenta utilidade de aplicação, pois, no que diz respeito aos aspectos ligados ao seu caráter econômico, há uma certa preocupação quanto ao seu descarte, uma vez que o mesmo é um dos materiais mais presentes nos resíduos gerados nos processos industriais de fundição e, com isso, o custo que envolve a sua destinação é algo considerável, além do fato de que essa destinação não pode ser feita de qualquer forma, e sim em aterros propícios a essa finalidade (muito por conta de sua interação com metais pesados e, assim, isso explica a preocupação de evitar seu contato direto com o solo, a fim de que não sejam provocados efeitos negativos neste).

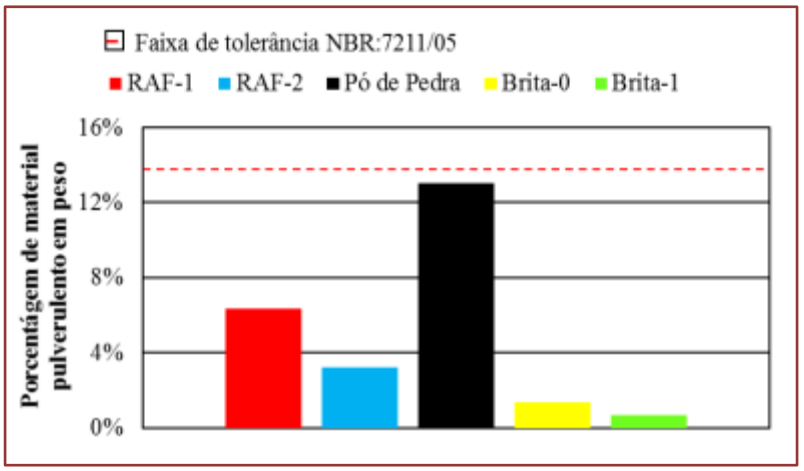
Assim, além da motivação de seu uso, a atenção voltada ao local no qual o mesmo deve ser descartado de forma segura é um fator preocupante, como é afirmado por Klinsky e Fabbri (2009, p. 36), quando ressaltam que a indústria gera em sua maioria a areia descartada de fundição e, nos últimos anos, essa geração de resíduos tem aumentado o seu ritmo, o que significa a necessidade de uma maior área para que ocorra a sua deposição, culminando, assim, em maiores custos em relação à destinação desse material. Em contrapartida, vale ressaltar que esse tipo de processo de fundição apresenta vantagens em relação ao seu aspecto econômico, uma vez que é um dos mais baratos no que diz respeito à sua aplicação, se comparado a outros métodos e dispensa sistemas complexos e caros para a execução de seu processo de fundição, como é afirmado por Viola, Sabedot e Malysz (2018, p. 3).

Dito isto, é importante mencionar que alternativas foram buscadas para que houvesse uma redução no descarte desse resíduo, a fim de que o mesmo pudesse ter uma aplicação após o encerramento do seu ciclo no processo de fundição, de forma que esse material não fosse destinado aos aterros, e sim empregado na pavimentação. Assim, foram desenvolvidas pesquisas voltadas para esse tipo de aplicação, ao passo que suas características foram comparadas aos agregados de extração diretamente da natureza para verificar a viabilidade de sua utilização, situação esta que foi observada e comprovada, pois estudos revelaram resultados que indicam que os resíduos de areia de fundição e os agregados convencionais apresentam grandes semelhanças físicas, além de atenderem às condições de uso segundo os critérios exigidos nas normas de agregados, como afirma Dyer et al. (2021, p. 9-10).

Dentre esses estudos, destacam-se os realizados pelo autor supracitado, com o intuito de analisar a viabilidade da utilização de RAF (Resíduo de Areia de Fundição ou ADF) em CBUQ (atualmente CAUQ) para pavimentação flexível, em que foram empregados os seguintes materiais: RAF de aterro sanitário industrial (RAF-1); RAF diretamente da indústria siderúrgica (RAF-2); pó de pedra; brita 0; brita 1; aditivo mineral ou filer; ligante asfáltico do tipo CAP 30/45; e água deionizada. Com isso, foi realizado um peneiramento do RAF-1, RAF-2, pó de pedra, brita 0 e brita 1 em uma peneira de abertura de 0,075 mm,

e foram obtidos os seguintes resultados com relação ao material passante, como mostra a imagem a seguir:

Figura 2: Resultados dos materiais passantes em massa

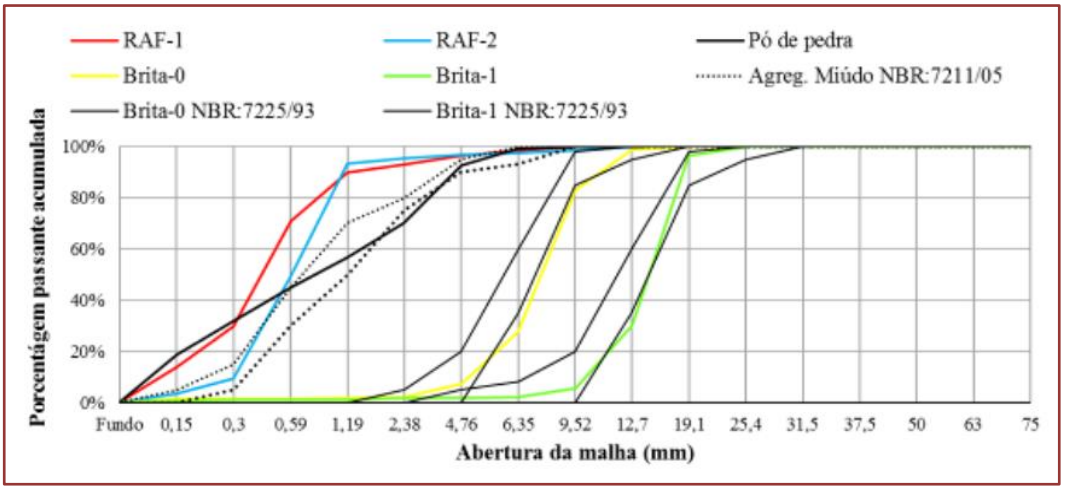


Fonte: Dyer et al. (2021).

Por meio dos resultados presentes no gráfico apresentado, observa-se que os resíduos de areia de fundição estão dentro do critério definido pela Norma Brasileira de agregados (NBR 7211: 2005), uma vez que tais resultados foram, de fato, menores do que o percentual máximo estabelecido na referida norma.

Tendo em vista esses dados, e levando-se em consideração os estudos de Dyer et al. (2021), observa-se que a composição granulométrica do resíduo de areia de fundição assemelha-se ao pó de pedra, pois ambos possuem um grau de finura conforme o que é estabelecido na NBR 7211:2005. De igual modo, os outros materiais utilizados nesse estudo, como a brita 0 e brita 1, estão dentro da faixa de tolerância definida pela NBR 7225: 1993. Com base no exposto, confirma-se a veracidade dessas informações por meio do gráfico a seguir.

Figura 3 - Composição granulométrica dos agregados e RAF

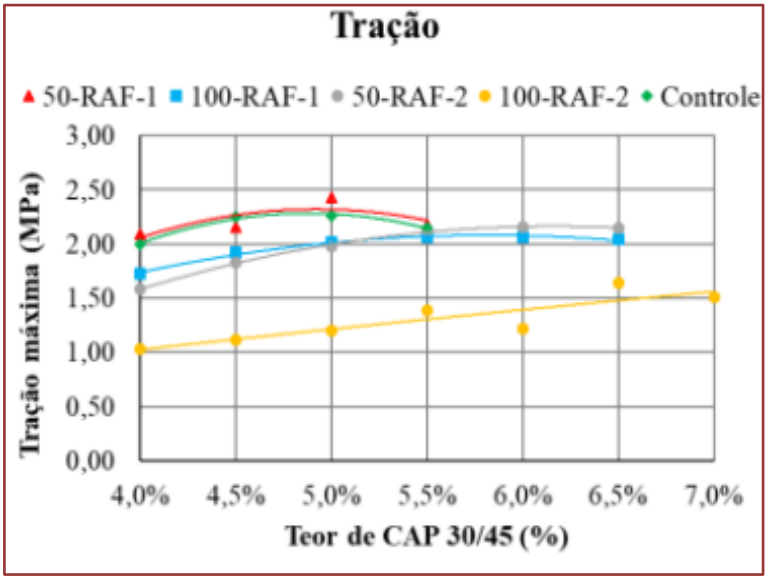


Fonte: Dyer et al. (2021).

Ainda, segundo Dyer et al. (2021), foram realizados diversos ensaios, como o ensaio da densidade Rice, densidade aparente da mistura de agregados, volume de vazios, vazios cheios de betume e o ensaio de tração por compressão diametral, em que este último revelou os resultados que constam no gráfico da Figura 4.

Logo, com base no gráfico, os resultados obtidos por meio do ensaio de tração por compressão diametral indicaram que os corpos de prova apresentaram perdas muito pequenas se comparadas aos critérios estabelecidos pela Especificação de Serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT-ES:031/2006). Desse modo, observa-se que, dos dois teores para cada tipo de RAF utilizado no ensaio, três destes apresentaram valores de resistência à tração bem semelhantes ao resultado obtido da composição em que é empregado agregado convencional, o qual é de, aproximadamente, 2,0 MPa.

Figura 4 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Dyer et al. (2021).

Assim sendo, é importante destacar outros ensaios que embasam esse tipo de concepção acerca desse material em relação aos agregados convencionais e seu uso, os quais podem ser os de massa específica, Abrasão Los Angeles e limites de Atterberg, além do comportamento mecânico frente a ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia, por exemplo, como evidencia Reis et al. (2019, p. 2-3). Com base nisso, é possível obter informações pertinentes a respeito das características de um agregado de descarte de fundição e determinar se sua aplicação é viável ou não em certos tipos de obra.

Em vista disso, segundo Carnin et al. (2010, p. 57), a areia descartada de fundição pode ser um excelente agregado em aplicações como cimento Portland, concreto asfáltico e demais produtos de concreto, porém, tudo dependerá da qualidade do resíduo escolhido, uma vez que esses tipos de resíduos podem ser afetados por diferentes graus de desgaste, pois depende dos tipos de metais aos quais foram submetidos nos processos de fundição, assim como do limite de uso ao qual foram empregados.

Desse modo, é possível perceber que o investimento na aplicação desse tipo de material em relação aos agregados convencionais tem benefícios interessantes tanto do ponto de vista prático quanto econômico, pois além de reduzir as áreas necessárias para destinação dos mesmos (os quais representam grande parte dos resíduos da indústria de fundição), ainda apresenta-se como alternativa viável frente aos agregados convencionais, como pode ser constatado nas considerações de Dyer et al. (2021, p.15), quando o mesmo afirma que:

> [...] fica determinado que a utilização de RAF, sendo de aterros sanitários ou diretamente de indústrias de fundição, apresenta viabilidade técnica em obras de pavimentação flexível, outrora grandes consumidoras de agregados minerais, suscitando a sustentabilidade neste setor da construção civil; visto que também, os descartes adequado ou inadequado do resíduo demandam enormes custos financeiros e socioambientais. Portanto o reuso de RAF como agregado gera benefícios como a redução do custo de construção de rodovias, redução da utilização de recursos minerais esgotáveis, redução dos gastos por parte de indústrias siderúrgicas para aterrar seus principais resíduos, redução de impactos socioambientais quando este resíduo é descartado de forma ilegal, aumento da geração de recursos financeiros por parte das empresas administradoras de aterros sanitários que podem requerer seus espaços para aterramento de resíduos "mais valiosos" como resíduos perigosos Classe I, aumento da vida útil dos aterros sanitários já operantes e a redução da demando por novos espaços licitados para atuarem como aterros sanitários industriais.

3.3. ASPECTOS SUSTENTÁVEIS RELACIONADOS AO EMPREGO DA AREIA DE FUNDIÇÃO

Segundo Viola, Sabedot e Malysz (2018, p.1), em razão do crescimento populacional nos últimos tempos, assim como do desenvolvimento socioeconômico aliado à revolução tecnológica, tem ocorrido alterações no que tange aos modos de produção e ao consumo da população. Devido a essas situações, dá-se o aumento na produção de resíduos sólidos, tanto em quantidade como em diversidade. Nesse sentido, a sustentabilidade surgiu no setor da construção civil com a finalidade de reduzir os desperdícios, contribuindo, então, com medidas que promovam uma melhor relação entre a execução de empreendimentos e o meio ambiente, sem que este último seja prejudicado. Assim, esse modelo de desenvolvimento sustentável apresenta-se como uma medida para minimizar a futura escassez de recursos, assim como desequilíbrios climáticos em decorrência do desenvolvimento desenfreado.

Em vista disso, conforme ressalta Reis et al. (2019, p. 1), a grande demanda por medidas socioambientais, no que concerne à disposição adequada de resíduos, configura uma grande preocupação no que diz respeito ao reaproveitamento dos mesmos e geração de valor comercial a esses materiais, a fim de preservar os recursos naturais e mitigar a degradação do meio ambiente, consistindo em um dos grandes desafios da atualidade.

Nesse contexto, enquadra-se a reutilização da areia descartada de fundição como matéria-prima a ser aplicada na pavimentação, constituindo uma alternativa que oferece grandes

benefícios, como a redução da exploração desnecessária de recursos naturais esgotáveis, em decorrência da disponibilidade de um material que possui características que suprem as propriedades exigidas para o agregado convencional, podendo ser empregado em diversas aplicações voltadas à pavimentação.

Ao mesmo tempo, em razão dessa utilização, a quantidade de areia descartada de fundição encaminhada aos aterros é minimizada (o que aumenta a vida útil desses aterros sanitários, assim como proporciona a diminuição da busca por novos espaços para funcionarem como aterros sanitários industriais), resultando na mitigação de impactos ambientais oriundos da disposição incorreta desse resíduo em aterros, o que implica, também, na redução de atividades onerosas referentes às operações de manejo.

Vale ressaltar que, segundo McIntyre et al. (1992, apud KLINSKY e FABBRI, 2009, p. 37), calcula-se que, para cada tonelada de metal fundido, obtenha-se, aproximadamente, uma tonelada de areia de fundição descartada. Desse modo, a questão ambiental no país é bastante alarmante, e, por este motivo, as indústrias de fundição têm firmado como um de seus compromissos minimizar ou destinar os resíduos da melhor forma possível, visto que estes tornam o processo de produção mais oneroso e o seu descarte reduz de forma rápida a capacidade de suporte dos aterros sanitários, em razão do elevado volume de resíduo produzido.

Tal ação favorece a difusão dos princípios do desenvolvimento sustentável, tendo em vista que tanto a extração da areia convencional da natureza para uso na construção civil quanto a concentração da areia descartada de fundição em aterros ocasionam grandes impactos ao meio ambiente, permitindo, então, que a areia descartada de fundição se apresente como um material de construção vantajoso a ser aplicado em pavimentação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o que foi apresentado neste trabalho, fica evidente que a areia descartada de fundição possui potencial viabilidade de aplicação como material alternativo ao agregado convencional, tanto no que diz respeito ao aspecto técnico quanto ao aspecto sustentável, uma vez que a sua utilização, de acordo com os dados obtidos por meio dos estudos realizados, consegue suprir de forma satisfatória as mesmas condições que são proporcionadas pelos agregados convencionais (contribuindo, assim, para a redução da exploração demasiada dos mesmos na natureza), ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de lixo industrial destinado aos aterros, assim como a demanda por outros espaços para a construção de novos aterros sanitários e os custos necessários para o transporte desse material.

Sendo assim, o objetivo geral do presente trabalho foi alcançado, uma vez que a ideia principal do mesmo consistiu na hipótese de que esse material alternativo pudesse proporcionar viabilidade técnica e sustentável no que diz respeito ao seu uso em relação ao agregado convencional, o que, de fato, foi confirmado por meio das informações coletadas. Além disso, foi possível determinar os aspectos técnicos e sustentáveis por meio da análise de estudos a respeito da areia de fundição, assim como entender o procedimento que dá origem a esse material, ou seja, seu processo de produção. Tais considerações constituíram, então, os objetivos específicos deste trabalho.

Em suma, a areia descartada de fundição, oriunda de aterros sanitários ou provenientes de indústrias de fundição, proporciona um incentivo à sustentabilidade quando aplicada na pavimentação e, consequentemente, na construção civil como um todo. Assim,

considerando-se a grande demanda por recursos naturais cada vez mais acentuada, faz-se necessária a continuação da exploração dessa temática por parte de outros pesquisadores, assim como o desenvolvimento de novas pesquisas acerca desse assunto, proporcionando, então, benefícios tanto para o campo científico quanto para a sociedade em geral.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7211: Agregados para concreto – especificações. Rio de Janeiro, 2005.

[2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7225: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

[3] CARNIN, Raquel Luísa Pereira et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. Revista Pavimentação, 2010. 12 p.

[4] DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. ES-031: Especificação de serviço. Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

[5] DYER, Paulo Paiva Oliveira Leite et al. O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. Revista Matéria, 2021. 18 p.

[6] KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FABBRI, Glauco Tulio Pessa. Reaproveitamento da areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Revista Transportes, 2009. 10 p.

[7] REIS, Joice Batista et al. Aplicação de resíduo de fundição em base e sub-base de pavimentação asfáltica. Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica, 2019. 4 p.

[8] SCHAEFER, Cecília Ogliari et al. Estudo da lixiviação em peças de concreto para pavimentação (PCP) produzidas com areia de fundição. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016. 5 p.

[9] VIOLA, André Duarte; SABEDOT, Sydney; MALYSZ, Rodrigo. Estudo da viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação da areia de siderúrgica para mistura asfáltica. SEFIC, 2018. 7 p.

Capítulo 6

Estudo do potencial impacto da condição do pavimento na perda de soja durante seu transporte

Renan Gustavo Scherer
Lucas Dotto Bueno
Deividi da Silva Pereira
Luciano Pivoto Specht

Resumo: O Brasil tem grande relevância na produção mundial de grãos, com alta demanda de transporte rodoviário para seu escoamento. Durante os deslocamentos, parte do produto é perdida devido a sua queda por locais não vedados das carrocerias. Esta perda é influenciada pela vibração sofrida pela carga, que pode ser relacionada à condição da superfície da via. Contudo, observam-se poucas pesquisas que quantifiquem a perda de grãos durante o transporte e, nas que o fazem, em geral não há a determinação da condição funcional da rodovia. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar preliminarmente a influência da irregularidade longitudinal do pavimento na perda de grãos transportados à granel. Para tal, foi mensurada a perda de carga e a irregularidade em duas rotas. Os resultados obtidos indicam que há influência da irregularidade do pavimento na taxa de perda de grãos e que esta é maior para valores mais elevados de IRI do pavimento.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais produtores de grãos no mundo, sendo a soja seu maior destaque. Essa produção é destinada tanto para consumo interno como para a exportação, tendo grande importância para a economia nacional. Seu plantio, contudo, ocorre em regiões afastadas dos portos e dos centros consumidores, o que gera uma grande demanda por transporte, suprida em sua maior parte por meio de rodovias. Nesse transporte, parte da produção acaba perdida devido à queda de grãos dos caminhões. Essa perda pode ser influenciada por fatores relacionados ao veículo e à via. Locais não plenamente vedados da carroceria propiciam a queda do produto. A taxa de queda para um determinado caminhão, por sua vez, pode ser relacionada com o nível de vibração dos grãos e este, com a condição da superfície da rodovia.

Entretanto, poucos são os estudos que buscam determinar o valor da taxa de perda de grãos durante seu transporte. Além disto, ainda que normalmente seja apontado que esta taxa é influenciada pela condição da superfície da via, não se observam pesquisas para sua determinação para cada condição de rolamento, nem a realização de medições de irregularidade ou outro parâmetro para a classificação da via em diferentes níveis de qualidade.

Devido a isto, este trabalho teve como objetivo determinar e avaliar preliminarmente a influência da irregularidade longitudinal do pavimento na perda de carga durante o transporte de grãos à granel. Em uma segunda etapa da pesquisa, atualmente em andamento, serão realizadas mais avaliações, permitindo o desenvolvimento de modelos de correlação e sua utilização para a análise do impacto econômico gerado pela perda de grãos no transporte em vias com distintas qualidades de rolamento.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

A soja (*Glycine max*) é uma leguminosa utilizada *in natura* ou processada na alimentação humana e animal, na produção de óleos de comestíveis e combustíveis e como componente de diversos produtos industrializados. Segundo dados da CONAB (2021a), a área plantada no Brasil em 2020 foi de aproximadamente 36,95 milhões de hectares, com uma produção total de 124,8 milhões de toneladas. Para a safra de 2021, as estimativas indicam uma produção acima de 135,9 milhões de toneladas. Isto faz com que a soja seja um dos principais produtos agrícolas do Brasil, tendo respondido em 2020, segundo o MAPA (2021), por 34,96% de todas as exportações agropecuárias brasileiras.

O escoamento das regiões produtoras até os portos ou centros consumidores é baseado, segundo o MTPA (2017a), em corredores logísticos, dos quais grande parte corresponde a rotas rodoviárias, responsáveis pelo escoamento de 45,6% da produção destinada à exportação e a integridade daquela destinada ao consumo interno (MTPA, 2017b; MINFRA, 2019). Além disto, o transporte rodoviário também é o responsável pelo escoamento da produção das lavouras até as unidades de armazenamento e destas até as rotas de escoamento. Isso faz com que toda a produção tenha ao menos parte de seu transporte realizado em rodovias e/ou estradas vicinais.

No Rio Grande do Sul, foco das avaliações realizadas neste estudo, a situação é semelhante ao cenário nacional. O estado normalmente é o terceiro maior produtor nacional, ocasionalmente alternando em segundo com o Paraná. A produção prevista para 2021 é de 20,7 milhões de toneladas (CONAB, 2021a). O transporte do produto também ocorre

na forma de corredores logísticos, com as regiões produtoras tradicionais situadas na metade norte do estado e o porto utilizado para exportação no sul.

As perdas de carga durante o transporte costumam ser estudadas dentro de um contexto de custos pós-colheita. Esses custos abrangem todas as despesas envolvidas no armazenamento e no transporte dos grãos. Desta forma, a análise da perda de carga acaba muitas vezes sendo tratada financeiramente como parte do custo de transporte e não como uma perda da produção. Ao considerar todas as atividades pós-colheita de soja no Brasil, desde o transporte da fazenda até os centros de destino, Péra (2017) estimou que em 2015 as perdas alcançaram o patamar de 1,076 milhões de toneladas, correspondente a 1,102% da produção. Os custos dessas perdas devido ao custo de oportunidade com vendas perdidas e custos logísticos pagos representaram R$ 1,317 bilhões à época.

O impacto gerado aos produtores devido a entraves no transporte de grãos, associados ou não a problemas de estocagem, em termos de custos ou de perda de produção também foi analisado em trabalhos como os de Silva Filho (2004), Pontes *et al.* (2009), Kussano e Batalha (2012), Bonfim *et al.* (2013), Deliberador *et al.* (2013), Medeiros *et al.* (2018) e Barbosa *et al.* (2020). De maneira geral, estes estudos indicam que os custos e perdas com o transporte e a logística como um todo são significativos e que é importante a realização de ações que os minimizem. Também é corrente o apontamento da qualidade das rodovias como um entrave logístico para o escoamento da produção. Os autores costumam destacar a observação de que vias em más condições configuram-se em um importante fator que implica em aumento de perdas de carga durante o transporte, sendo esta relacionada com a maior vibração provocada nos caminhões (que se transfere para os grãos transportados) e que, em conjunto com a vedação não-plena da carroceria, provoca queda do produto.

Em estudos como os realizados por Anes (2003), Kussano e Batalha (2012), Bonfim *et al.* (2013), Deliberador *et al.* (2013) e Caixeta Filho e Péra (2018), é observado o emprego de uma "taxa aceitável" de perda durante o transporte para as avaliações de custos. Conforme os autores, essa taxa, chamada "*quebra técnica no transporte*", é um limite acordado entre o contratante e a transportadora que delimita o máximo tolerado de perda com o transporte e que, se ultrapassado, deve ter a diferença ressarcida pela transportadora. Seu valor usual é de 0,25%, havendo indicações de 0,50% para percursos maiores que 1.000 km. Não costuma haver diferenciação em relação à condição da rodovia, porém esta condição pode influenciar no valor cobrado pelo transporte.

Como a taxa de perda aceitável costuma ter um valor percentual baixo, a busca pela redução das perdas pode acabar sendo negligenciada pelos embarcadores e transportadores. Péra e Caixeta Filho (2018), ressaltam, porém, que mesmo que perda relativa de uma atividade logística seja baixa, a perda acumulada ao longo de toda a cadeia assume um valor global bastante considerável. Isto tem ainda mais magnitude no setor de grãos, que apresenta um volume de produção acima de duzentos milhões de toneladas por ano.

A determinação da perda de grãos que realmente ocorre durante o transporte rodoviário foi foco de poucos estudos, seja no Brasil ou internacionalmente, resultando em escassas fontes sobre o tema e não se observando a realização sistemática de medições de irregularidade ou algum outro parâmetro para a classificação da via em diferentes níveis de qualidade. Dentre as avaliações disponíveis, atendo-se ao caso da soja, destacam-se os trabalhos de Medeiros e Nääs (2016), de Medeiros *et al.* (2016) e de Péra (2017).

No trabalho desenvolvido por Medeiros e Nääs (2016) foi comparada a perda de carga (através de pesagens) em dois percursos, um em uma rodovia deteriorada, apresentando perda de carga média de 0,22% a cada 100 km e outro em uma rodovia em melhor estado de conservação, apresentado perda média de 0,12% a cada 100 km. Já Medeiros *et al.* (2016) compararam as perdas com a utilização de vias não pavimentadas. O trajeto com menor percentual da extensão pavimentado apresentou perda média de 0,173% a cada 100km enquanto o trajeto com maior percentual pavimentado teve perda média de 0,041% a cada 100km. Destes resultados, percebe-se que as via em melhor qualidade de rolamento geraram perdas menores, permitindo constatar que esse fator tem influência na taxa de perda de grãos durante o transporte, ainda que esta qualidade não tenha sido quantificada ou qualificada de maneira mais objetiva nos dois estudos.

Péra (2017), por sua vez, utilizou os resultados da "Pesquisa CNT de Rodovias" de 2016 para considerar de maneira mais efetiva a condição da rodovia na determinação das perdas. As vias classificadas pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) quanto ao estado geral em "ótimas" e "boas" foram consideradas em situação "boas" e as demais em situação "não boa". A perda de carga foi obtida da diferença entre o peso de origem e destino. Para vias classificadas como "boas", o autor obteve uma perda média de 0,132%; para vias "não boas", 0,267%; e como média geral, 0,204%. Diante disto, constatou que há influência da qualidade da via na perda de grãos durante o transporte e que, considerando a classificação utilizada, o transporte realizado em rodovias consideradas como "boas" apresentou perdas 0,134% menores que nas vias "não boas".

Para uma melhor compreensão de quanto a perda se grãos pode ser economicamente significativa, pode-se efetuar uma estimativa simplificada com base nos dados e estudos já apresentados. Conforme mencionado, a produção de soja no Brasil estimada para a safra de 2021 é de 135,9 milhões de toneladas, das quais aproximadamente 45% do produto destinado a exportação (60% da produção) e 100% daquele destinado ao consumo interno são transportados em caminhões. Assim, obtém-se que aproximadamente 91,1 milhões de toneladas de soja devem ser transportadas por rodovias. Utilizando a perda média (geral) de 0,204% obtida por Péra (2017), que empregou dados mais abrangentes para sua determinação, calcula-se uma perda de 185,8 mil toneladas de grãos no transporte da safra de 2021. Para a cotação média ao produtor de R$ 158,43 na saca de 60 kg de soja nos seis primeiros meses de 2021 no Rio Grande do Sul, por exemplo, determinada pela CONAB (2021b), a perda de carga faz com que aproximadamente 495 milhões de reais em produto deixem de ser comercializados no país.

Ainda que para os embarcadores e transportadores a perda de grãos possa representar um custo de transporte, sua avaliação também pode ser realizada como um custo de utilização das rodovias por parte dos usuários. Os custos dos usuários das vias, conforme autores como Odoki e Keralli (2006) e Papagiannakis e Massad (2008), são aqueles envolvidos na sua utilização, englobando os custos operacionais dos veículos (como o consumo de combustível, de óleo, desgaste de pneus e manutenções), custos de tempo, de acidentes e outros. Eles estão relacionados, dentre outros fatores, com a condição de rolamento da rodovia. Dessa forma, ao correlacionar a perda de grãos com um índice de avaliação funcional da via, como a irregularidade longitudinal do pavimento, os custos decorrentes desta perda podem ser incorporados às análises, nos custos dos usuários, propiciando uma avaliação mais acurada, principalmente no caso de rotas de escoamento da produção.

A irregularidade longitudinal de pavimentos é um parâmetro atinente à avaliação funcional da via, referindo-se à qualidade operacional ofertada pela infraestrutura viária e servindo como indicador de conforto propiciado pela via aos seus usuários. Se relaciona com a vibração experimentada pelos usuários ou pelas cargas durante as viagens, juntamente com outros fatores como a velocidade operacional, a massa do veículo e o sistema de suspenção. Representa os desvios em relação a um plano de referência que atrapalham o rolamento rápido e suave dos veículos, gerando insegurança, onerando os usuários e acelerando a degradação do pavimento. Ela decorre de imperfeições no processo construtivo da via e de sua degradação, não devendo ser entendida somente como um defeito, mas sim como um parâmetro que representa os efeitos provocados por um conjunto de defeitos (Sayers *et al*.,1986; DNIT, 2006 e 2011; Barella, 2008; Medina e Motta, 2015).

A mensuração da irregularidade longitudinal dos pavimentos pode ser realizada por diversos equipamentos, dentre os quais os perfilômetros inerciais laser são bastante difundidos para avaliações em extensas malhas viárias, permitindo a determinação na velocidade operacional da via. Eles são sistemas que determinam a irregularidade longitudinal por meio da medição da distância vertical entre a superfície do pavimento e módulos com medidores *laser* instalados em um veículo. Também empregam acelerômetros para compensar o deslocamento vertical do veículo em movimento em relação à posição de referência e hodômetro para determinar a distância percorrida. Os dados são coletados simultaneamente e registrados para posterior processamento em computador e determinação da irregularidade longitudinal do pavimento através do índice internacional de irregularidade (Barella, 2008).

O índice internacional de irregularidade (IRI, do inglês "*International Roughness Index*") é a principal forma de quantificação da irregularidade longitudinal do pavimento. Esta escala tornou-se o padrão para determinação da irregularidade longitudinal do pavimento, medida com uso dos mais diversos equipamentos e em qualquer lugar (Sayers e Karamilhas, 1998; Medina e Motta, 2015). O resultado obtido é expresso pelo somatório dos deslocamentos verticais em relação à superfície de referência, para uma distância percorrida durante o levantamento, sendo usual à escala de metros por quilômetro (m/km).

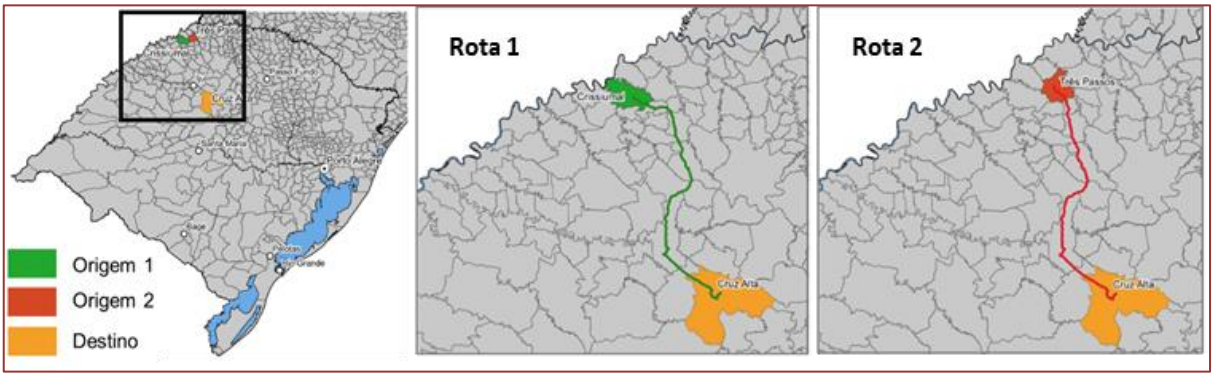
O parâmetro IRI é utilizado como referência para classificar a via conforme sua condição de superfície. No Brasil, uma das classificações empregadas é a utilizada no Manual de Restaurações de Pavimentos do DNIT (DNIT, 2006). Paralelamente, outras classificações são utilizadas internacionalmente, por diferentes instituições. Ele é também o principal parâmetro para avaliação da degradação da rodovia e, consequentemente, de suas necessidades de intervenções em análises de custo do ciclo de vida realizadas em ferramentas como o HDM-4, desenvolvido através do Banco Mundial e utilizado para gestão rodoviária. Além disto, se relaciona aos custos dos usuários das rodovias (operacionais, de tempo, acidentes, etc.), apresentado assim potencial para correlação com a taxa de perda de grãos e seus custos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para as verificações da influência da condição de rolamento da via sobre a perda de grãos transportados à granel desta pesquisa, foram empregadas duas rotas de transporte, estabelecidas tendo como início e como final locais providos de balança rodoviária. Esse critério é necessário para possibilitar a determinação da perda de carga através da

pesagem dos caminhões carregados. Os dois percursos estão localizados no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, indicados na Figura 1. A primeira rota (R1) possui 187,88 km, já a segunda (R2) possui 180,53 km. Como pode ser observado, a maior parte do percurso dos dois trajetos é coincidente, contudo, por não ter sido possível segmentar a mensuração da perda de carga, eles foram considerados como rotas independentes. Em ambos os casos, as vias são pavimentadas, com revestimento asfáltico, e são responsáveis pelo escoamento de grande parte da produção de soja dos municípios de origem, estimadas pelo IBGE (2021) em 31.350 t (origem 1) e 28.080 t (origem 2) no ano de 2019.

Figura 1: Rotas Avaliadas



Para a determinação da perda de grãos, foi utilizado um caminhão do tipo graneleiro, com carroceria de madeira em bom estado de conservação, sem falhas que poderiam prejudicar a estanqueidade e adequadamente enlonado (Figura 2). Todas as operações de transporte foram realizadas em transferências entre armazéns. Nos locais de origem, ocorre o recebimento dos grãos dos produtores, que são secados e limpos. Somente após isto ocorre seu transporte. Deste modo, considerou-se que o produto transportado já apresentava níveis de impureza e umidade adequados para a sua comercialização e que esses níveis permaneceram constantes durante o transporte. Assim, toda diferença de peso mensurada foi correspondente à perda de grãos.

Figura 2: Caminhão Utilizado



Nota: Foto obtida quando o caminhão não estava operando.

A mensuração da perda de carga foi realizada através de pesagens do caminhão. Essas pesagens ocorreram nos pontos de carga e de descarga, utilizando balanças pertencentes às empresas envolvidas nas operações, com precisão de 10 kg ou 20 kg. Foi considerado para as determinações o peso líquido, ou seja, o peso correspondente exclusivamente ao produto transportado, obtido pela diferença de peso do caminhão carregado e descarregado, sendo este valor já fornecido diretamente pelas balanças automatizadas durante as pesagens. Eventuais imprecisões na calibração das balanças podem afetar estas medidas, por isso, na continuidade da pesquisa, todas estão sendo verificadas com o uso de um carregamento padronizado. A perda de carga, por sua vez, foi obtida pela diferença entre o peso líquido na origem e no destino do carregamento.

A irregularidade longitudinal do pavimento foi avaliada pelo índice internacional de irregularidade longitudinal do pavimento (IRI). Para sua determinação, utilizou-se um perfilômetro inercial laser (Figura 3). Os levantamentos foram realizados em cada percurso, nos mesmos trajetos utilizados pelos caminhões para transportar a carga, aproximadamente um mês após os carregamentos. O processamento foi realizado em segmentos de 200 m, com a verificação e exclusão de eventuais ocorrências especiais no levantamento, sendo considerado para o IRI o valor médio das trilhas de roda. Após, determinou-se o IRI médio de cada percurso (Rotas 1 e 2), buscando com isto contemplar com um único valor de irregularidade longitudinal do pavimento toda a extensão percorrida pelo caminhão entre as duas pesagens (origem e destino). Isso foi realizado por não ser possível fragmentar o montante de grãos perdidos conforme mudanças de rodovia ou de segmentos homogêneos, por exemplo.

Para as avaliações apresentadas neste trabalho, as coletas dos dados de perda de carga e irregularidade foram realizadas durante a safra de soja de 2020. Após a determinação dos valores de perda de carga e de irregularidade longitudinal do pavimento, os dados foram analisados e comparados entre si. Com isso foram obtidos os resultados apresentados no item 4.

Figura 3: Perfilômetro Inercial Laser Utilizado



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As avaliações realizadas permitiram a determinação do nível de irregularidade longitudinal do pavimento e a perda de carga em cada percurso. No caso da irregularidade longitudinal, o IRI médio foi determinado para cada uma das rotas, sendo obtido o valor de 3,09 m/km para a Rota 1, com desvio-padrão de 1,88 m/km e máximo de 14,69 m/km; e de 2,91 m/km para a Rota 2, com desvio-padrão de 1,65 m/km e máximo de 10,42 m/km. Como pode-se observar, os valores de irregularidade longitudinal do pavimento das duas rotas foram similares, o que se deve a parte dos percursos serem coincidentes. Para a etapa seguinte da pesquisa serão utilizados mais trajetos, com condições de rolamento distintas, ampliando a faixa de valores IRI considerada.

A perda de carga de cada operação de transporte avaliada é apresentada na Tabela 1 para a Rota 1 e na Tabela 2 para a Rota 2. Também são informados as médias e os desvios-padrão de cada caso. Para a Rota 1, o caminhão empregado perdeu em média 61,67 kg por carga, de 32,5 toneladas embarcadas. Isso corresponde a mais de uma saca de soja (60 kg) deixada no trajeto durante cada viagem. Já na Rota 2, o mesmo caminhão perdeu em média 38,00 kg, de 31,8 toneladas embarcadas por viagem. Com a continuidade da pesquisa, mais caminhões serão utilizados, contemplando assim nos estudo as diferenças de perda decorrentes do uso de veículos distintos.

Tabela 1: Dados de Perda de Carga da Rota 1

Rota	Viagem	Carga (kg)	Descarga (kg)	Perda de Carga (kg)
R1	V1	32.500	32.420	80
R1	V2	32.530	32.460	70
R1	V3	32.540	32.460	80
R1	V4	32.550	32.460	90
R1	V5	32.510	32.500	10
R1	V6	32.520	32.480	40
Total		195.150	194.780	370
Média		32.525,00	32.463,33	61,67
Desvio-Padrão		18,71	26,58	30,61

Tabela 2: Dados de Perda de Carga da Rota 2

Rota	Viagem	Carga (kg)	Descarga (kg)	Perda de Carga (kg)
R2	V7	32.000	31.980	20
R2	V8	31.450	31.400	50
R2	V9	31.840	31.800	40
R2	V10	31.800	31.760	40
R2	V11	31.620	31.580	40
Total		190.710	190.380	330
Média		31.785,00	31.730,00	38,00
Desvio-Padrão		216,86	208,13	10,95

Ao somar as operações de transportes apresentadas, a perda de grãos nas duas rotas totalizou 560 kg. Conforme dados da CONAB (2021b), a cotação média por saca de soja de 60 kg nos cinco primeiros meses de 2021 no Rio Grande do Sul foi de R$ 159,95. Desta forma, nestes 11 carregamentos com dados disponíveis, um total de R$ 1.492,87 ficou pelo caminho, considerando somente o valor de mercado do produto desperdiçado.

Para uma melhor avaliação dos dados, a perda de carga pode ser tomada em relação ao total embarcado, na forma percentual. Essa forma corresponde àquela normalmente considerada nas negociações entre embarcadores e transportadores como o valor de perda de carga, sendo utilizada para estabelecer o máximo de perda aceitável no transporte, como já apresentado no item 2. Além disto, a perda também pode ser considerada em relação à distância percorrida, o que permite a determinação de uma taxa de perda de carga independente da distância entre os pontos de origem e destino e que corresponde ao percentual de grãos perdidos a cada 100 km. Estes valores são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Perdas de Carga da Rota 1

Rota e Viagem	Perda de Carga (kg)	Perda (%)	Distância (km)	Perda/Distância (kg/100km)	Perda/Distância (%/100km)	IRI Médio (m/km)
R1 V1	80	0,25	188	42,55	0,131	3,09
R1 V2	70	0,22		37,23	0,114	
R1 V3	80	0,25		42,55	0,131	
R1 V4	90	0,28		47,87	0,147	
R1 V5	10	0,03		5,32	0,016	
R1 V6	40	0,13		21,28	0,065	
Média	61,67	0,19	188	32,80	0,101	3,09
Desvio	30,61	0,09		16,28	0,050	1,88

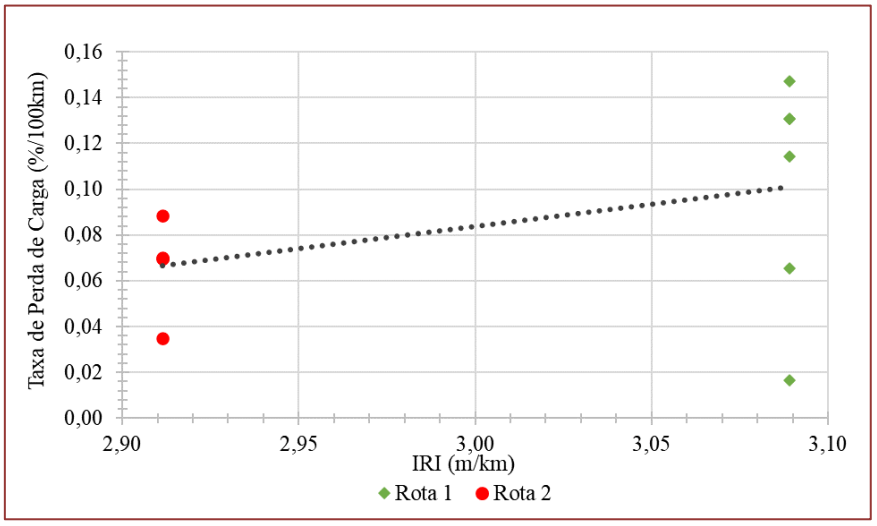
Tabela 4: Perdas de Carga da Rota 2

Rota e Viagem	Perda de Carga (kg)	Perda (%)	Distância (km)	Perda/Distância (kg/100km)	Perda/Distância (%/100km)	IRI Médio (m/km)
R2 V7	20	0,06	180	11,11	0,035	2,91
R2 V8	50	0,16		27,78	0,088	
R2 V9	40	0,13		22,22	0,070	
R2 V10	40	0,13		22,22	0,070	
R2 V11	40	0,13		22,22	0,070	
Média	38,00	0,12	180	21,11	0,067	2,91
Desvio	10,95	0,04		6,09	0,020	1,65

Ao se observar estes resultados, percebe-se que a perda de carga na Rota 1 foi de 0,19% e na Rota 2, 0,12%. Estes valores estão abaixo do limite contratual usual de perda aceitável de 0,25%, visto no item 2 e também empregado para as cargas apresentadas. Na comparação da taxa de perda de carga média de ambas as rotas, constata-se que estas são distintas. Para a Rota 1, a taxa de perda média foi de 0,101% a cada 100 km, enquanto em na Rota 2 foi de 0,067% a cada 100 km.

Isto ocorreu mesmo com a análise da perda de grãos na forma proporcional à carga inicial e à distância e empregando-se um único veículo em todas as operações. Desta forma, acredita-se que a diferença é decorrente da condição de rolamento média dos trajetos. Na Figura 4 é apresentada a perda de carga em função dos valores de IRI da rota correspondente. Como pode ser observado, na rota com maior irregularidade longitudinal do pavimento (R1), a perda de carga média aferida foi maior que na rota de menor irregularidade (R2).

Figura 4: Taxa de Perda de Carga em Relação à Irregularidade do Pavimento



Devido ao baixo espectro de dados disponíveis, ainda não é possível estabelecer um modelo de correlação entre a taxa de perda de carga média e a irregularidade. Para tal, serão necessários dados de vias com outros níveis de irregularidade, para a inclusão de mais elementos na regressão. Isto está sendo realizado durante a continuidade da pesquisa, que ainda está em desenvolvimento, mas já conta com mais de 10 segmentos pavimentados com níveis de irregularidade longitudinal variando entre 2,4 m/km e 4,2 m/km e o uso de 2 caminhões distintos.

Apesar disto, é possível verificar um potencial influência da irregularidade longitudinal do pavimento na taxa de perda de grãos, mesmo havendo pouca diferença na condição das rotas utilizadas. Também há indicativos de que essa taxa é maior quanto maior o valor de IRI do pavimento. Uma forma de demonstrar tal comportamento é com o uso do coeficiente de Pearson, que mede o grau de relacionamento entre duas variáveis. Conforme Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos, entre 0,30 e 0,49, médios e entre 0,50 e 1,00, grandes. Para os dados obtidos, este coeficiente apresentou o valor de 0,43, indicando, portanto, que há uma correlação média entre a irregularidade e a perda de grãos, mesmo com a quantidade reduzida de observações e com a elevada variabilidade da taxa de perda de grãos. Além disto, por ser um valor positivo, o coeficiente também indica o aumento da perda de carga para valores mais elevados de IRI.

Especificamente para os dados obtidos nas duas rotas apresentadas, com a utilização de um único caminhão e considerando somente a irregularidade como responsável pela diferença entre as taxas, o aumento de 6,1% no IRI (de 2,91 m/km para 3,09 m/km), levou a um aumento de 51,4% na taxa de perda de carga (de 0,067 %/100km para 0,101 %/100km). De maneira ilustrativa, caso a totalidade da produção de soja do Rio Grande do Sul em 2021 fosse transportada em rodovias como as avaliadas, por uma distância média de 500 km, a perda total de grãos para o IRI de 3,09 m/km chegaria em 104,9 mil toneladas. Já para o IRI de 2,91 m/km, sem alteração nas demais condições, a perda total seria de 69,6 mil toneladas. Isso gera uma diferença de 35,3 mil toneladas, correspondente a 93,3 milhões de reais em produto, para a cotação média de R$ 158,43 por saca (60 kg) de soja. Diante disto e ao considerar que muitas das vias empregadas para o escoamento da produção apresentam pavimentos com pior condição de rolamento

que as estudadas ou sequer são pavimentadas, percebe-se que as perdas durante o transporte podem atingir valores significativos diante do volume da produção nacional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A perda de grãos durante o transporte rodoviário se mostra como um fator que pode gerar significativos impactos econômicos, principalmente ao considerar o nível de produção brasileira. Contudo, existem poucos estudos que buscam sua determinação e a avaliação de como esta perda é impactada pela condição das rodovias. Ao considerar essa lacuna de informações, no presente trabalho buscou-se realizar uma avaliação inicial destes fatores.

Os resultados apresentados neste estudo indicam haver um potencial relação entre a irregularidade longitudinal do pavimento e a perda de grãos durante seu transporte rodoviário à granel. Também, para o pequeno espectro de dados analisados, interpreta-se que esta perda é maior quanto mais elevado for o valor do IRI da rota percorrida, passando de 0,067 %/100 km em IRI de 2,91 m/km para 0,101 %/100km em IRI de 3,09 m/km, nos casos avaliados. Com a continuidade da pesquisa em andamento, haverá o incremento do banco de dados, permitindo a determinação de correlações perfazendo um maior espectro de condições da via e de veículos empregados. Também será realizado um estudo aprofundado do impacto econômico gerado pela perda de grãos em diferentes cenários de irregularidade do pavimento e na análise do custo do ciclo de vida de rodovias.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de doutorado do primeiro autor e à REDE DE TECNOLOGIA EM ASFALTO ANP/PETROBRAS pelo apoio às pesquisas do GEPPASV/UFSM.

REFERÊNCIAS

[1] Anes, C. E. R (2003) Efeito Do Transporte E Da Qualidade Da Armazenagem No Custo Da Soja Na Região Das Missões Do Rio Grande Do Sul. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Agronegócio, UFRGS, Porto Alegre, 122p.

[2] Barbosa, E. J. A., Alessio, D. R. M.; Velho, J. P.; Costa Filho, J.; Costa, N. L. (2020) Pre-Harvesting, Harvesting, And Transport of Soybean to Brazilian Ports: Bioeconomic Losses. Research, Society and Development, 9(9), e744997878. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9. 7878

[3] Barella, R. M. (2008) Contribuição Para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais. 362 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo/SP.

[4] Bonfim, Y. P.; Ferreira, V. R. S.; Caetano, M. (2013) A Logística E O Agronegócio Em Goiás: O Caso Da Soja. REGE - Revista de Gestão, Volume 20, nº 4, p. 557-573. DOI: 10.5700/rege515

[5] Caixeta Filho, J. V.; Péra, T. G. (2018) Post-Harvest Losses During the Transportation of Grains from Farms to Aggregation Points. International Journal of Logistics Economics and Globalisation (IJLEG), Vol. 7, No. 3. DOI: https://doi.org/10.1504/IJLEG.2018.093755

[6] Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Hillsdale, NJ, Erlbaum.

[7] Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2021b) Preços Agrícolas, da Sociobio e da Pesca. Site. Disponível em < http://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/> Acessado em: agosto de 2021.

[8] Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2021a) Série Histórica das Safras - Soja. Planilha. Disponível em: < https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/item/7666-soja/>. Acessos em: agosto de 2021.

[9] Deliberador, L. R.; Dos Reis, J. G. M.; Machado, S. T.; Oliveira, R. V. (2013) Análise De Soluções Para

Eliminação Das Perdas No Transporte De Soja. Anais. IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Rio de Janeiro, RJ.

[10] Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (2006) Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Publicação IPR 720. Rio de Janeiro/RJ.

[11] Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT (2011) Manual de Gerência de Pavimentos. Publicação IPR 745. Rio de Janeiro/RJ, 2011.

[12] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2021) PAM - Produção Agrícola Municipal – Rio Grande do Sul. Planilha. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/geratabela?name=Tabela%203.21%20-%20Rio%20Grande%20do%20Sul.xlsx&format=xlsx&medidas=true&query=t/1612/g/89/v/allxp/p/2019/c81/all/l/p%2Bc81,v,t> Acesso em junho de 2021.

[13] Kussano, M. R.; Batalha, M. O. (2012) Custos Logísticos Agroindustriais: Avaliação Do Escoamento Da Soja Em Grão Do Mato Grosso Para O Mercado Externo. Gestão & Produção, São Carlos, v. 19, n. 3, p. 619-632. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000300013

[14] Medeiros, P. O.; Nääs, I. De A. (2016) Cadeia Produtiva Da Soja No Piauí: Uma Análise De Perdas De Grãos Em Função De Distâncias Percorridas. Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas 10(4):368. DOI: http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2016v10n4p368-374

[15] Medeiros, P. O.; Nääs, I. De A.; Vendrametto, O.; Soares, M. (2016) Post-Harvest Soybean Loss During Truck Transport: A Case Study of Piaui State, Brazil. IFIP International Federation for Information Processing. IFIP AICT 488, pp. 606–611. DOI: 10.1007/978-3-319-51133-7 72

[16] Medeiros, R. K., Mello, V. P. A., Jesus, D. P., & Ramos, H. S. (2018) Determinantes Dos Custos De Transporte Das Exportações Do Complexo Brasileiro De Soja. Revista De Economia E Agronegócio, 16(3), 387-401. DOI: https://doi.org/10.25070/rea.v16i3.7860

[17] Medina, J; Motta, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos (2015) 620p. 3ª Edição. Editora Interciência, Rio de Janeiro/RJ.

[18] Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (2021) Indicadores Gerais do Agrostat - Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Disponível em: <http://indicadores.agricultura.gov.br/ agrostat/index.htm> Acesso em: jun. 2021.

[19] Ministério da Infraestrutura - MINFRA (2019) Anuário Estatístico de Transportes 2010-2018. Brasília, 53 p.

[20] Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA (2017a) Corredores Logísticos Estratégicos: Vol. 1 – Complexo Soja e Milho. Brasília, 171 p.

[21] Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA (2017b) Anuário Estatístico de Transportes 2010-2016. Brasília, 53 p.

[22] Odoki, J. B.; Kerali, H. G. R. (2006) Analytical Framework and Model Descriptions. The Highway Development and Management Series, versão 2.0, v.4. The World Road Association (PIARC), Paris and The World Bank, Washington D.C., 1184p.

[23] Papagiannakis, A. T.; Masad, E. A. (2008) Pavement Design and Materials, 542p. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

[24] Péra, T. G. (2017) Modelagem Das Perdas Na Agrologística De Grãos No Brasil: Uma Aplicação De Programação Matemática. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo. 182 p.

[25] Péra, T.; Caixeta Filho, J. (2018) Perdas De Grãos Na Logística Brasileira. In.: Perdas E Desperdício De Alimentos - Estratégias Para Redução. Cap. 6. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara.

[26] Pontes, H. L. J., Do Carmo, B. B. T., Porto, A. J. V. (2009) Problemas Logísticos na Exportação Brasileira da Soja em Grão. Sistemas & Gestão, 4(2), 155-181. DOI: https://doi.org/10.7177/sg.2009.V4N2A5

[27] Sayers, M. W; Gillespie, T. D; Queiroz, C. A. V. (1986) The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. 468 p. World Bank Technical Paper Number 45. Washington (EUA)

[28] Sayers, M. W; Karamilhas, S. M. (1998) The Little Book of Profiling - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. 102 p. University of Michigan, Ann Arbour (EUA).

[29] Silva Filho, R. (2004) Custo do Transporte Rodoviário Como Fator de Competividade da Soja em Grão Brasileira no Mercado Internacional, Tese, Pós-Graduação em Economia Aplicada, UFV, Viçosa, 110p.

Capítulo 7

Valorização de cinzas de biomassa vegetal para aplicações geotécnicas

Leonardo Marchiori
André Studart
Maria Vitoria Morais
António Albuquerque
Luis Andrade Pais
Maria Eugênia Gimenez Boscov
Victor Cavaleiro

Resumo: As cinzas de biomassa vegetal (CBV) têm sido intensamente estudadas para incorporação em solos em obras de terra. Este trabalho tem como objetivo caracterizar química e geotecnicamente cinzas de pinheiros e oliveiras em comparação com um solo de Castelo Branco (Portugal), com a finalidade de aplicações geotécnica. Avaliações físicas, mineralógicas e químicas são necessárias para investigar a origem dos materiais, nomeadamente para determinar se as CBV têm contaminantes, como metais pesados, em sua composição e suas características físico-químicas. Considerando que há elevadas quantidades de CBV produzidas pelo mundo e um consequente excesso de deposição em aterros sanitários ou queima, a investigação por novas soluções para a sua reutilização é cada vez mais necessária tendo em atenção quesitos atuais de desenvolvimento sustentável, redução do impacto ambiental e economia circula. A engenharia civil, nomeadamente nas áreas da construção, vias, saneamento e geotecnia, oferece várias oportunidades para investigação da aplicação destes resíduos. Neste âmbito, o reforço de solos e a aplicação de liners se destacam, pois podem beneficiar das caraterísticas físico-químicas e mecânicas das CBV para melhorarem parâmetros como a resistência mecânica e permeabilidade. Foram realizados ensaios de caracterização para as CBV e para um solo fraco, nomeadamente distribuição granulometrica, densidade específica dos grãos, limites de Atterberg, composição química por fluorescência de raio-x e mineralogia por difração de raio-x. Este trabalho faz parte de uma investigação mais ampla para desenvolver um material alternativo que possa ser utilizado em obras de terra de revestimento e reforço de solos. Os resultados demonstram que a introdução das CBV em solos pode contribuir para reduzir o peso específico e a plasticidade e melhorar as propriedades mecânicas do material, consequência também do enriquecimento de minerais pozolânicos devido à sua composição química. Desta forma, as CBV deram boas indicações para serem introduzidas em solos em diferentes percentuais, para melhorar as suas propriedades ou para a produção de liners, sendo necessário realizar futuros testes acerca do desempenho mecânico e ensaios de compressibilidade edométrica e compressão triaxial, condutividade hidráulica e potencial de lixiviação de poluentes, de modo a avaliar a sua sustentabilidade e durabilidade e afastar eventuais impactos no ambiente e saúde pública.

Palavras-chave: Rejeitos industriais, cinzas de biomassa vegetal, obras de terra, reforço de solos, barreira hidráulica, geocompósito.

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia provém de variadas fontes ao redor do mundo, onde as indústrias termoelétricas assumem um papel importante. Estas geram energia através da queima de produtos com alto poder calorífico, geralmente associado a biomassa, devido a sua matéria orgânica e origem renovável, e o carvão, devido ao seu alto poder calorífico. Esta fonte de energia está em crescimento, e tem causado um impacto negativo na percepção da sociedade do uso da biomassa (SŁUPIŃSKA *et al*., 2022). Em 2004, por exemplo, a produção de energia por meio da biomassa já contabilizava por parte considerável da produção mundial de energia (TKACZEWSKA & MAŁOLEPSZY, 2009), tendo sido uma tendência devido à uma demanda por abordagem mais sustentável na produção de energia. Contudo, apesar de a biomassa possuir uma origem considerada renovável e sustentável, a sua queima produz resíduos que são conhecidos como cinzas de biomassa vegetal (CBV), além de libertar carbono para a atmosfera, que podem comprometer a abordagem de gestão sustentável destes resíduos.

As CBV são provenientes de diversos processos envolvidos em plantas termoelétricas, como combustão, pirólise e incineração, gerando diferentes tipos de cinzas, como as de fundo, as de filtro e os volantes, possuindo diferente composição química e granulometria entre elas. Dessa forma, apesar de todas estas cinzas estarem sob o escopo de CBV, as mesmas são consideravelmente diferentes entre si e ainda mais diferente quando comparada à biomassa original, sendo errôneo considerar este resíduo como sustentável, pois são misturadas com outros produtos e sofrem processos físicos e químicos, assim como o enriquecimento de metais pesados (VASSILEV *et al.,* 2013; LOO *et al.,* 2007). Portanto, como resíduo, sua má disposição, sem o devido controle ambiental, pode causar contaminação de solos e águas, devido à presença de contaminantes e metais pesados, e afetar a saúde pública.

Ultimamente, as CBV têm recebido atenção devido às suas possíveis propriedades pozolânica, de preenchimento e hidráulicas latentes, que podem beneficiar as propriedades de solos fracos (MARCHIORI *et al.*, 2022a; STUDART *et al.*, 2022). Estudos investigam a utilização deste resíduo como geomaterial através de diversas aplicações, como material cimentício após a redução do teor de álcalis (SALVO, 2015) ou substituindo o cascalho na construção de estradas, podendo substituir argilas de grão fino e solos na construção de revestimentos de aterros (OBERNBERGER e SUPANCIC, 2009), buscando agregar valor a um resíduo atualmente sem valor econômico considerável.

Apesar da principal fonte de biomassa ser provenientes das madeiras das árvores, outros resíduos podem estar incorporados, como a cinza de bagaço, de casca de arroz e cinza de óleo de palma (RUBINOS *et al.,* 2018), e lamas de fábrica de celulose e papel, que consiste principalmente de fibras e menores impurezas (KUOKKANNEN *et al.,* 2008), coexistindo com as já extensamente utilizadas cinzas de carvão e madeiras (EDIL *et al.*, 1998). Os estudos já realizados com estes resíduos indicam baixa condutividade hidráulica (k) quando devidamente compactadas, podendo as características geotécnicas das CBV ser muito diferentes das argilas típicas, mesmo que em geral se comportam de maneira semelhante.

(VASSILEV *et al.*, 2013) analisaram o potencial industrial das CBV e concluíram que as principais vantagens foram a concentração e recuperação de componentes valiosos como SiO_2, Al_2O_3, e CaO, inicando sua viabilidade para reforços de solo moles, além de aumentar a resistência ao cisalhamento por meio do ângulo de atrito interno, e reduzindo o número de vazios e possíveis recalques das estruturas. Entretanto, é necessária uma avaliação

individual de acordo com a tipologia da biomassa tratada que resulta nas CBV, por conta de uma alta variabilidade entre culturas e vegetações.

Apesar de apresentarem caraterísticas altamente variáveis, as CBV são caracterizadas por possuírem uma fina granulometria associada à baixa densidade e plasticidade, como apresentado em (AGRELA *et al*., 2019). Tais características podem ser desejáveis para o reforço de solos fracos, tendo em vista que esses solos sofrem com características geotécnicas geralmente indesejáveis, como a alta plasticidade e variação volumétrica (GOMES, 1986). Para superar essas limitações são empregadas técnicas de melhoria do solo, como a utilização de geossintéticos ou reforço do solo por meio da execução de metodologias tradicionais. Contudo, estas soluções possuem inerentes custos elevados, fazendo que a indústria também busque pelo desenvolvimento de novas metodologias e novos materiais com melhor custo x benefício.

Além disso, é importante ressaltar que as demandas e busca por uma abordagem mais ecológica e sustentável de uma maneira geral nos diferentes setores impactou positivamente o desenvolvimento de metodologias mais verdes, surgindo programas como a Agenda 2030 (UNITED NATIONS, 2016), impactando a pesquisa e desenvolvimento nas diversas indústrias, como na engenharia civil. Com isso, a valorização de resíduos surge dentro do escopo de uma economia circular, onde o resíduo final produzido pode ser reutilizado para outros fins na indústria, agregando valor econômico. Assim, as CBV são vistas como uma possível alternativa sustentável e eficaz para melhorar as propriedades geotécnicas das argilas. Dependendo da aplicação geotécnica, o parâmetro a ser investigado pode mudar.

Considerando que os solos de uma maneira geral são abrangentes e podem constituir variadas granulometrias e mineralogia, os mesmos podem ser classificados de acordo com suas propriedades físico e químicos, sendo aplicados para diversas construções geotécnicas, como barragens, pontes, pavimentos, bermas e canais, devido à características como deformabilidade, compressibilidade, resistência e dentre outras. Contudo, os solos argilosos são muitas vezes indesejáveis ou representam dificuldades para a engenharia geotécnica, tendo em vista que estes são geralmente caracterizados por uma baixa resistência mecânica, elevada plasticidade e alta variação volumétrica, impactando diretamente nas estruturas que podem sofrer trincas ou fissuras, levando ao seu rompimento, devido ao conjunto de fatores associado ao comportamento das argilas.

Conforme exposto por (GOMES, 1986), as argilas podem pertencer a diferentes grupos, como caolinite, montmorrilonite e ilite, sendo caracterizadas pelos processos de formação geológico inerentes, que acarretam uma série de fatores e sofrem uma alteração físico-químico que lhe fornecem estas referidas propriedades, como a sua granulometria extremamente fina, conferindo uma capacidade de retenção de água muito elevada. Diversas metodologias foram desenvolvidas ao longo do tempo para sanar ou amenizar essas características indesejáveis para a engenharia geotécnica, buscando adaptar estes solos para seu emprego em larga escala em obras civis. No caso da aplicação em *liners* (para revestimento ou cobertura de solos, visando a sua impermeabilização e controlo de lixiviação de líquidos), por exemplo, é desejável uma menor permeabilidade para a criação de uma barreira impermeável, sendo desejável o valor igual ou menor que 1×10^{-7} cm/s (KHALID *et al.,* 2019*)*. No caso de reforço de solos, um material mais granular, de modo a permitir a drenagem mais rapidamente, associado à um valor de baixa coesão e elevado ângulo de atrito, são características desejáveis. Isso inclui também o estudo de sua iteração e reatividade com outros compostos do solo e dos resíduos que possa causar impactos sobre a estrutura geral do solo. Esses estudos são críticos para a compreensão

da estrutura do solo e para o desenvolvimento de práticas de engenharia geotécnica (MARCHIORI *et al.,* 2020; 2021; 2022b; 2022c).

Considerado as propriedades expostas, investigar a origem, mineralogia e características das CBV pode fornecer as ferramentas necessárias para uma investigação mais profunda sobre o material e suas propriedades, sendo necessário também associar às possíveis contaminações antropogênicas. Portanto, os históricos de solos e resíduos podem fornecer informações para melhor entender como integrá-los e melhorar propriedades específicas de solos. Dessa forma, é necessário avaliar o potencial de contaminação antrópica desses resíduos, a partir de testes de difração de raio-X (DRX) e fluorescência de raio-X (FRX), obtendo a composição mineralógica e química, respectivamente, assim como o entendimento das características físicas gerais.

Como as CBV são provenientes de diversos processos naturais e antrópicos que ocorrem nas unidades de combustão, elas são um resíduo altamente variável, principalmente quando se considera suas amplas e variadas possibilidades de origem. Além disso, vários tipos de CBV, como as de pinheiros e oliveiras, ainda não estão totalmente estudadas para aplicação em solos, exigindo mais investigações para entender suas propriedades e seu comportamento quando misturadas com solos. As CBV já foram estudadas para aplicação em solos moles (GALVÍN *et al.,* 2020; CABRERA *et al.,* 2018), tendo sido observadas diferentes características geotécnicas, algumas das quais das quais com boas indicações para o reforço daqueles solos.

Assim, este trabalho tem como objetivo investigar as características químicas, mineralógicas e geotécnicas de CBV provenientes de pinheiros e oliveiras buscando uma possível integração e estabilização destes resíduos dentro de um solo fraco para seu reforço, bem como para o eventual desenvolvimento de materiais para atuarem como barreiras hidráulicas (*liners*).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As CBV foram recolhidas no parque industrial da Valamb - Grupo Razão, localizado em Castelo Branco (Portugal), e o solo para reforço foi recolhido na zona industrial de Castelo Branco (Portugal). Os ensaios realizados e respectivas normas e equipamentos estão expostos na Tabela 1.

Para avaliar melhor a parte argilosa dos materiais devido a sua importância no comportamento de barreiras hidráulicas e em solos fracos, logo para a determinação da distribuição granulométrica por equipamento a laser, e composição química por FRX e mineralógica com DRX, as amostras foram crivadas em 0,075mm, porção representativa de siltes e argilas.

Tabela 1. Testes e normas utilizados para a caracterização das CBV e solos

Teste	Parâmetros	Norma ou Equipamento
Teor de umidade	w	ISO 17892-1
Densidade específica	G_S	ISO 17892-3
Distribuição granulométrica	Curva granulométrica	Coulter LS 200
Limites de Atterberg	W_L, W_P, IP	ISO 17892-12
Compactação Proctor	w_{opt}, $\rho_{d,max}$	BS 1377-4
Composição química	Percentuais de óxidos	Fluorescência de Raio-X (FRX) S-2700 Hitachi
Mineralogia	Minerais presentes	Difração de Raio-X (DRX) Phillips Analytical X-Ray B.V.

No DRX, cada espécie mineral é caracterizada por um arranjo sistemático atômico (ou íon) específico, com planos cristalinos característicos que podem difratar raios-X. A difração de raios X por átomos em um plano cristalino produz padrões característicos quando registrado (ângulos e intensidades). Esses padrões de difração são usados como uma impressão digital na identificação de espécies minerais, produzindo uma série de pontos ou linhas, chamados de bandas.

O FRX consiste na incidência de um feixe de raios X sobre uma amostra, fazendo com que elétrons sendo ejetados das camadas próximas ao núcleo, as lacunas criadas são preenchidas por elétrons das camadas mais externas, emitindo raios X (fluorescentes ou secundários), cujas energias correspondem à diferença entre as energias dos níveis e subníveis das transições. Cada tipo de átomo tem uma característica e espectro de raios-X único que é usado como uma comparação para identificação. A intensidade de o FRX de um determinado comprimento de onda está relacionada com a concentração do elemento que o emitiu. A análise é semiquantitativa e fornece a composição química expressa como os óxidos dos elementos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As curvas de distribuição granulométrica e compactação são apresentadas na Figura 1 e Figura 2, respectivamente, e os principais parâmetros geotécnicos obtidos são apresentados na Tabela 2.

Figura 1. Distribuição granulométrica das CBV e do solo

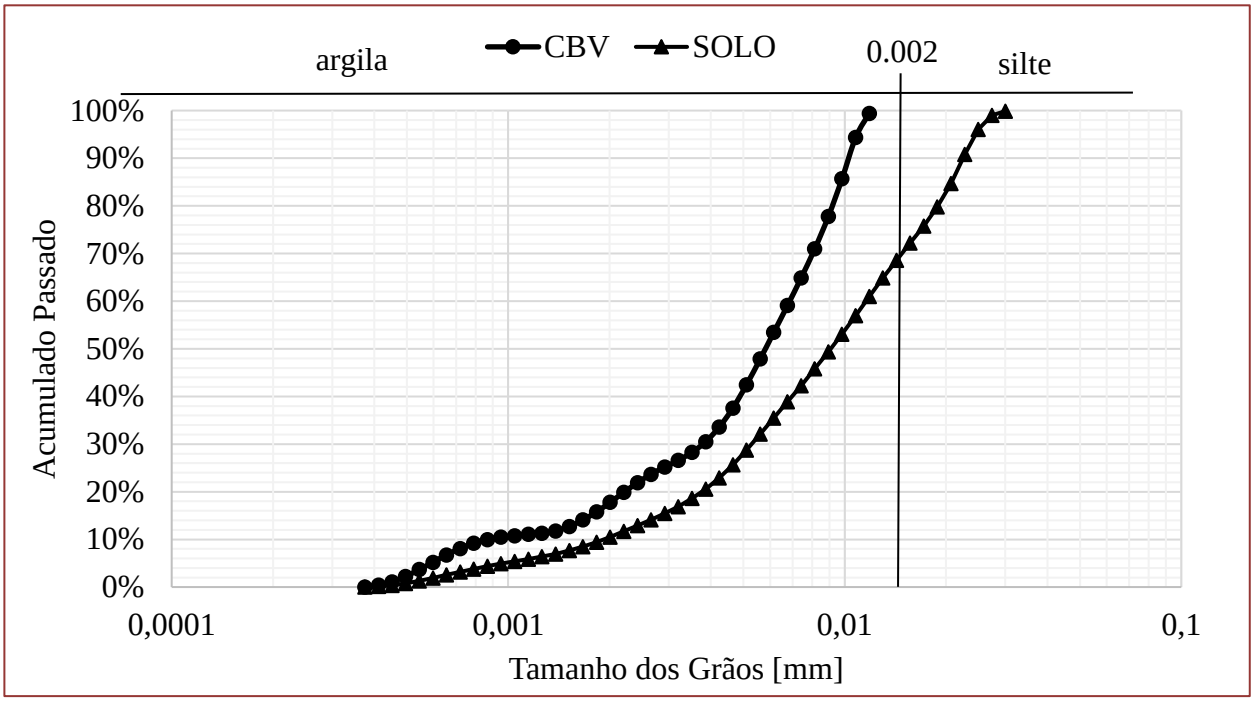
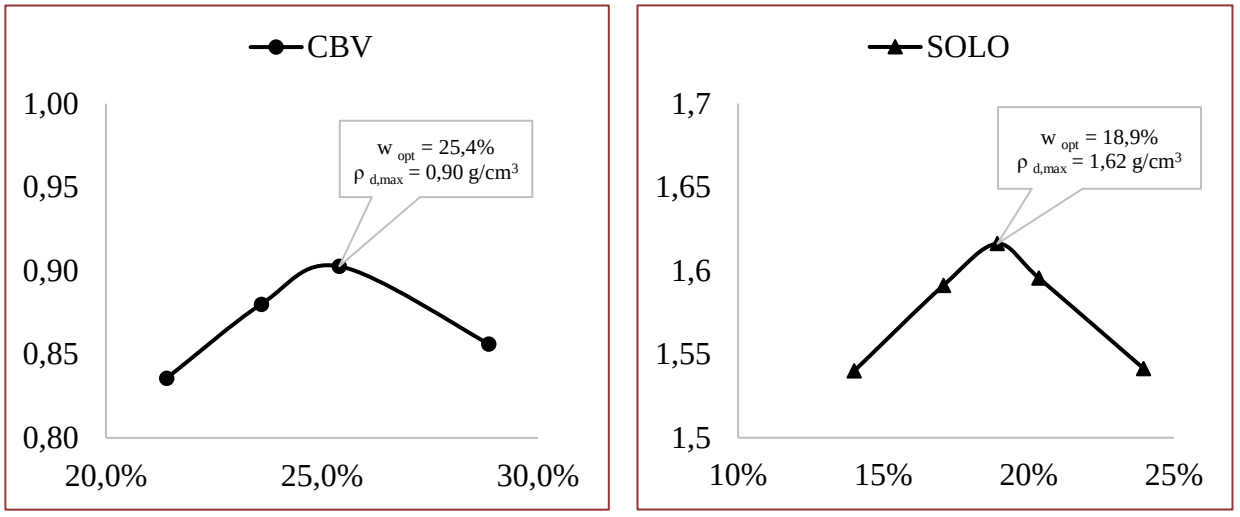


Figura 2. Curvas de compactação das CBV e do solo



O solo analisado caracteriza-se por possuir granulometria fina de 30% de silte e o restante pela parte argilosa, com características ótimas de compactação de 1,62 g/cm^3 de densidade seca máxima e um teor de umidade ótima de 18,9%. Em relação à CBV, sua maior porção é argilosa, com densidade seca máxima de 0,90 g/cm^3 e umidade ótima de 25,4%. Comparado ao solo, CBV é um material mais leve, podendo gerar um produto mais leve quando em misturas com o solo, sendo importante ressaltar que o fato de ser mais fino implica em uma maior superfície específica, sendo necessário, portanto, uma maior quantidade de água para sua hidratação e atingir a compactação satisfatória.

Tabela 2. Caracterização geotécnica das CBV e do solo

Material	Unidade	CBV	Solo
Argila	%	100%	70%
Silte	%	0%	30%
G_S	-	1.88	2.78
W_L	%	NL	38
W_P	%	NP	34
IP	%	NP	4
w_{opt}	%	25.4	18.9
$\rho_{d,max}$	g/cm^3	0.90	1.62

Os parâmetros geotécnicos expostos na Tabela 2 mostraram que CBV apresenta granulometria mais fina, comportamento não líquido (NL) e não plástico (NP). Tais resultados indicam que substituir a porção argilosa de solo pela porção argilosa de CBV possa levar ao rearranjo da sua estrutura e possivelmente à redução da sua plasticidade, tendo em vista que nenhuma plasticidade foi demonstrada durante a execução dos ensaios, podendo estabilizar a estrutura do solo e evitando recalques excessivos. Além disso, o menor G_S da CBV comparado ao solo indica uma possível redução de peso específico final de um compósito, sendo uma característica que pode vir a ser desejável devido ao manuseio facilitado do produto.

Outros parâmetros, como valores mecânicos e hidráulicos, ainda precisam ser investigados, embora vários estudos publicados, como (OSINUBI e EBEREMU, 2013) tenham exposto a introdução bem-sucedida de CBV em solo residual granítico compactado, resultando em menor plasticidade do solo e redução de peso, corroborando com as indicações encontradas neste estudo, além de aumentar o valor da permeabilidade quanto maior as taxas de CBV nas misturas. Tal característica pode ser indesejável para aplicação como um material em *liner*, contudo, caso seja empregado em escalas pequenas e manipuláveis, o valor final da permeabilidade pode possivelmente atender à faixa de permeabilidade ao ponto de valorizar o referido material para ser empregado em aplicações como um material que possa prover uma barreira hidráulica.

Assim, apesar da necessidade de uma investigação mais aprofundada para a confirmação dos parâmetros geomecânicos, como a condutividade hidráulica, ângulo de atrito interno e coesão efetiva quando comprimidos em ensaio triaxial, entre outros, os resultados encontrados neste estudo, quando comparados aos resultados já publicados, indicam a viabilidade da CBV para melhorar os referidos parâmetros geotécnicos.

Uma possibilidade de valorização da CBV que se apresenta é a sua incorporação ao solo, com base em percentuais em massa seca, e testar em laboratório aumentando as quantidades deste resíduo nas misturas, avaliando suas características e desempenho geomecânico e hidráulico. Tal procedimento pode indicar a mistura ótima, além de um melhor entendimento do efeito da introdução da CBV nos solos, buscando entender os impactos da sua introdução à medida que a porcentagem introduzida aumenta, sendo possível escalonar os resultados de acordo com as aplicações desejadas.

3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O conhecimento acerca do resíduo de biomassa analisado faz-se necessário para melhor entendimento e conhecimento dos processos que a alteram e de sua possível valorização em outros meios. A mesma pode ser definida por uma mistura complexa heterogênica de matéria orgânica e inorgânica, sendo suas origens são diversas, podendo serem provenientes de algas, herbáceas ou da agricultura. Além disso, interferência antropogênica causadas por diversas ações possíveis, conforme apresentado por (CARAPITO, 2016).

Biomassas provenientes de madeira podem ser divididas entre caules, galhos, folhagem, casca e lascas e terão suas propriedades vinculadas não somente à divisão acima, mas também às diferentes espécies de plantas, tendo em vista que cada qual possui diferentes propriedades e elementos necessários a seu desenvolvimento. Além disso, a crença de que a própria biomassa é sustentável, pois devolve à atmosfera o valor de CO_2 já utilizado durante sua incineração, não é totalmente correta devido a esses processos de contaminação e alteração que ocorrem nessas instalações, que pode levar a um produto final altamente contaminante, pois as CBV são produzidas em altas temperaturas e dependente dos processos e metodologias inerentes, como a utilização do leito pulverizado, fixo ou fluidizado, os quais irão acarretar em impactos na composição físico-químico do material, sendo passível de possuir valores consideráveis de metais pesados por (LOO *et al.,* 2007; SAMI *et al.,* 2001; VASSILEV *et al.,* 2013).

Os metais pesados estão presentes não somente devido às metodologias e processos já referidos, mas também devido a processos geológicos inerentes que ocorrem durante a formação dos minerais, que irão dar base para os solos e, consequentemente, onde as árvores se enraizarão, absorvendo e possuindo composição química similar à destes solos, além de possíveis contaminações antropogênicas que podem acarretar impacto nesta referida composição.

Dessa forma, as CBV terão a sua composição química baseada em três fases principais, sendo representadas por matéria orgânica, matéria inorgânica e fluidos, que são responsáveis por diferentes minerais e componentes da biomassa (VASSILEV *et al.,* 2013). A composição química e os minerais presentes nas CBV podem ser identificados através de ensaios de fluorescência de raio-X (FRX) e difração de raio-x (DRX), apesar que o último identifica a porção cristalina da amostra, sendo necessário outros ensaios e avaliações para a classificação da parte amorfa, ou gases e líquidos. Na Tabela 3 são apresentados a composição química do solo e das CBV. Os resultados mostram que as CBV possuem um alto teor de óxidos de alumínio, sílica e ferro, onde a soma dos três é próxima à 70%. Esta soma pode indicar capacidade pozolânica de um material, sendo necessário um valor igual ou maior que 70%, de acordo com (ASTM C 618, 2014), para que as propriedades pozolânicas estejam em um nível considerável.

Os resultados de FRX por meio de espectrômetro de energia dispensiva (EDS) são apresentados na Tabela 3, enquanto a Figura 3 e Figura 4 mostram os resultados de DRX para as CBV e solo, respectivamente.

Tabela 3. Composição química das CBV e do solo

Material	Unidade	CBV	Solo
Na_2O	%	1.20	0.60
MgO	%	4.20	2.30
Al_2O_3	%	17.8	27.4
SiO_2	%	44.9	56.1
CaO	%	14.8	-
K_2O	%	7.10	4.50
SO_3	%	1.90	-
Fe_2O_3	%	5.80	8.30
TiO_2	%	0.70	1.00
As	ppm	33.8	-
Cd	ppm	5.10	-
Cu	ppm	63.4	-

Figura 3. Mineralogia das CBV

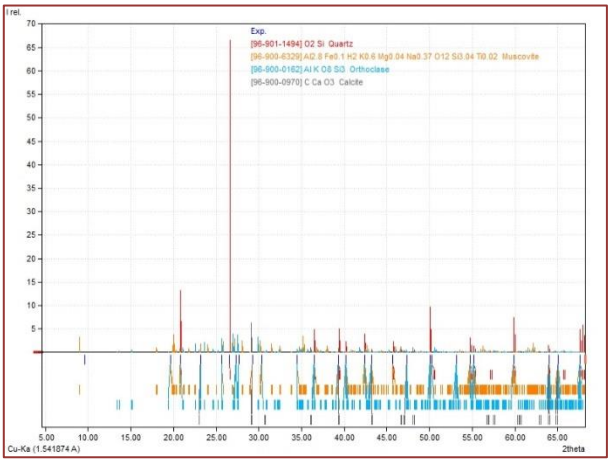
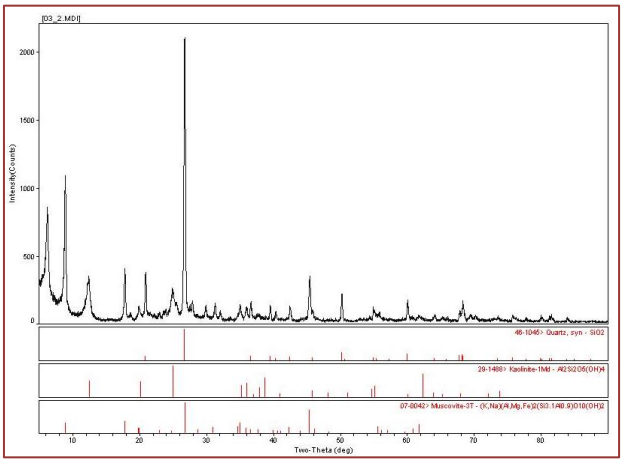


Figura 4. Mineralogia do solo



Os resultados mostraram a suscetibilidade das CBV para propriedades contaminantes, correspondendo com a literatura publicado, pois além de possuir metais pesados em sua composição, a concentração de Arsênico (As) está próxima dos limites regulatórios da Polônia e dos EUA em Nova Jersey (USEPA, 2020; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001) enquanto a concentração de Cádmio (Cd) está próxima dos limites regulatórios da UE (EU, 1986). No entanto, estes potenciais de contaminação estão associados à biomassa total e sua introdução em menores quantidades no solo pode implicar concentrações baixas e de acordo com limites regulatórios. É, pois, necessário avaliar sempre o potencial de lixiviação dos contaminantes presentes nas CBV, por meio de ensaios padrão e certificados, para garantir que podem ser reutilizados no solo sem risco de impacto ambiental e na saúde pública.

Considerando que ambos os materiais foram coletados na região de Castelo Branco, Portugal, é recomendável analisar o histórico dessa região de modo a possuir indicadores das intempéries físico-químicas e minerais característicos da região. Dessa forma, esta região é caracterizada por um episódio geológico erosivo que aplanou grande parte desta área, constituída por K-feldspatos, granitos e formações xistosas (CUNHA, 1987), onde as cristas de quartzitos não erodidos e minerais de granitos podem ser encontradas. O solo

possui como composição mineralógica principalmente quartzo, moscovita e caulinite, além de possuir uma matriz de argila caulinítica evidenciado também pela cor esbranquiçada da amostra. Portanto, o histórico do solo corrobora com o histórico da região e que fornece a base também para as CBV, tendo em vista que esta foi coletada na região.

As CBV apresentam uma composição heterogênea e altamente cristalina, sendo de difícil entendimento a sua porção cristalina, uma vez que há impactos variados de processos físicos e químicos que ocorrem durante sua combustão e alteram a sua estrutura devido às altas temperaturas - variando de 500ºC até mais de 1000ºC - que acabam removendo a maior parte da matéria orgânica (VASSILEV *et al.,* 2013). Essas alterações físico-químicas também convertem parte da estrutura cristalina para estrutura amorfa, além de prover formação de silicatos, devido à interação dos metais alcalinos da biomassa com o material granular do leito (PINTO, 2011).

Dessa forma, diversos minerais foram detectados, e muitos em porcentagens muito pequenas que não são facilmente explicáveis, tendo a análise focado nos minerais principais e mais reconhecidos. Quartzo, moscovita, ortoclase e calcita foram os minerais principais detectados durante os testes DRX. O quartzo é provavelmente devido à utilização de areia siliciosa como leito no processo de combustão da biomassa, sendo um processo tipicamente utilizado, conforme apontado em (PINTO, 2011), embora tais minerais também sejam tipicamente encontrados na região. Estes minerais possuem em sua composição elementos como alumínio, ferro, sílica, cálcio, magnésio, os quais estão presentes nos processos geológicos de formação dos solos e que possuem minerais acessórios fazendo parte desses referidos processos e que, associado ao magmatismo, liberam sulfuretos, podendo justificar a presença de arsênio (MELO, 2011). O cálcio, por exemplo, além de ser associado a estes processos, é um elemento que é de suma importância para as plantas, que possuem uma alta capacidade de o reter por meio da precipitação de oxalato de cálcio, sendo esse elemento coletado na sua forma dissolvida. A sua concentração acaba por ser acumulada na folhagem, galhos, troncos e caules da madeira das plantas, devido à necessidade desse elemento para o seu desenvolvimento e manutenção de suas características, além de que a decomposição dos animais e fragmentação dos ossos contribuem para a presença de cálcio nos solos e consequentemente nas plantas (FROMM, 2010; KRUTUL *et al*., 2017; VASSILEV *et al.,* 2013).

Além disso, durante a combustão, os minerais podem sofrer enriquecimento devido a conversões térmicas, ocorrendo principalmente em minerais carbonatados (VAMVUKA *et al.,* 2004; 2009) como a desintegração da Calcita (CCaO3) em CaO e CO_2, explicando algumas altas concentrações de minerais que não são facilmente explicadas pela composição química do solo local. Os pinheiros estão entre as espécies de árvores mais comuns nessa região, e as CBV resultam da queima de maioritariamente aquelas árvores. Assim, as CBV analisadas são compostas por aluminossilicatos associados à vegetação original da biomassa – pinheiros – e ao carvão utilizado durante a sua combustão. Os pinheiros tendem a conter altos valores de SiO_2, conforme apontado em (TORTOSA *et al.,* 2007), e quantidade considerável de cálcio e alumínio junto com elementos acessórios. Além disso, embora o tipo exato de carvão usado durante a combustão não seja conhecido, (VASSILEV *et al.,* 2007) mostrou que a composição variada do carvão afeta consideravelmente a composição das CBV, uma vez que este material é também considerado contaminante e pode conter diversos metais pesados, assim como o alto teor de carbono, que provém de sua origem.

Dessa forma, é importante reiterar que, apesar de a biomassa original ser um material renovável e sustentável, os resíduos produzidos a partir da sua queima, são na realidade um material completamente diferente se comparado ao de origem, possuindo potenciais contaminantes e de necessária investigação para sua valorização.

3.3. COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO

Para avaliar o comportamento hidromecânico das CBV e solo, é necessário determinar parâmetros como ângulo de atrito, coesão, índice de vazios, plasticidade e granulometria. As argilas, por exemplo, geralmente possuem um baixo ângulo de atrito, associado a uma elevada plasticidade e coesão e por isso demonstram dificuldades técnicas para serem utilizadas como um material geotécnico apto para receber grandes solicitações, principalmente devido a sua elevada variação volumétrica. (KUOKKANEN *et al.,* 2008; SLIM *et al.,* 2016) testaram a resistência ao corte e encontraram valores de coesão (c') entre 20 e 25 kPa e ângulo interno de atrito (φ') entre 30º e 45, possibilitando a estabilização de solos moles e o consequente reforço ao incorporar CBV. (TKACZEWSKA e MALOLEPSZY, 2009) identificou a capacidade de micro-filling das CBV ao passo que (CABRERA et al., 2018) obteve sucesso na redução de plasticidade, melhoramento das características mecânicas e maior estabilização em geral de um solo ao adicionar CBV da queima de oliveiras. (FASTELLI et al., 2022) refere que a utilização de CBV pode prover reações pozolânicas e melhoramento nas características da resistência de solos, apesar de não ser contínuo ou uniforme. Assim, torna-se imprescindível testar diferentes razões de solo:CBV para identificar a percentagem ótima de resíduo a introduzir no solo de modo a garantir a melhoria das suas propriedades, sem contaminar solos e águas.

Diversos estudos corroboram a possibilidade de as CBV melhorarem o comportamento geotécnico de solos fracos. Considerando que, de acordo com o sistema de classificação unificada de solos (USCS), as argilas orgânicas possuem valores de ângulo de atrito ao redor de 22º e (TERZAGHI *et al.,*1996) aponta que o ângulo de atrito entre parede de contenções e solos geralmente é correspondente a partir de 24º, o melhoramento das propriedades mecânica providas, como a redução de plasticidade, pelas CBV, podem viabilizar a sua valorização para aplicações variadas na engenharia civil. Entre as melhorias possíveis, identificam-se o aumento da capacidade de resistência e diminuição da ocorrência de trincas e fissuras, devido a maior estabilização da estrutura solo, levando a um aumento na eficiência das obras geotécnicas.

Apesar de ser escassa a informação técnica e cientifica publicada sobre incorporação de CBV em solos para melhoria de parâmetros hidráulicos, o estudo de (TAHA *et al*., 2021) indica a redução do coeficiente hidráulico e índice de vazios, ao passo que (MARCHIORI *et al.,* 2020) resumiu valores k entre 10^{-11} e 10^{-9} m/s de (OSINUBI e EBEREMU, 2013; DAUD *et al.,* 2017; BAJWA e FALL, 2011). Valores que estão dentro dos necessários para barreiras de base ou cobertura em obras de terra, que usualmente variam entre 10^{-10} e 10^{-9} m/s (DIÁRIO DA REPÚBLICA, 2009). Essa redução é devida em grande parte a granulometria das CBV, uma vez que o entrosamento dos grãos garante um menor índice de vazios e consequentemente menos espaços para o fluxo de líquido, levando o material a tornar-se mais impermeável. Essa característica pode ser benéfica em aplicações geotécnicas, como em aplicações como *liners*, de modo que o controle do fluxo de líquidos em aterros sanitários ou em aterros de resíduos perigosos seja efetuado, criando uma barreira impermeável e garantindo sua retenção.

4. CONCLUSÕES

A alta variabilidade da CBV é um desafio para sua valorização como geomaterial. No entanto, é um resíduo industrial em foco para certas utilizações como reforço de solos e produção de barreiras hidráulicas. Vários estudos indicam que as CBV podem ser utilizadas como um material de reforço para solos. A sua introdução em solos fracos indica melhoria na sua resistência e capacidade de suporte, tornando-o mais adequado para aplicações de reforço em infraestruturas de engenharia civil. Os resultados aqui apresentados indicam que as CBV analisadas corroboram com os resultados de outros estudos, apesar de ser necessária efetuar testes complementares para confirmação das expectativas.

Este estudo sobre as propriedades físico-químicas e geotécnicas permite concluir que a incorporação de CBV em solos fracos indica:

- Redução de peso devido a baixos valores de G_s e $\rho_{d,max}$;
- Diminuição da plasticidade de acordo com o comportamento não plástico;
- Propriedades de preenchimento causadas por granulometria mais fina;
- Eventual atividade pozolânica devido ao alto teor de Si, Al e Fe;
- Características e composição altamente variáveis e dependentes da espécie da planta, local de origem e coleta, enquanto os processos de combustão e produtos/materiais usados, como carvão, transformam a biomassa original em basicamente um novo material.

Este estudo indica ainda a necessidade de investigar melhor as caraterísticas de CBV em solos, nomeadamente o desempenho de compactação de misturas solo-CBV e as resistência e permeabilidade a longo prazo, além do seu potencial de contaminação com testes de lixiviação e solubilização de poluentes. Os resultados primários são otimistas e podem indicar um caminho sólido para a valorização deste resíduo nas referidas aplicações geotécnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos centros de investigação FibEnTech (UIDB/00195/2020) e GeoBioTec (UIDB/04035/2020), ambos financiados pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT) com fundos nacionais de Portugal. Também agradecem ao Grupo Razão, Lda. e ao Professor João das Neves pelo fornecimento dos resíduos de biomassa vegetal. Além de todo o apoio da equipe de docentes e técnicos da Universidade da Beira Interior, nomeadamente Prof. Isabel Falorca, Dr. Ana Paula Gomes, Prof. Abílio Silva, e da Universidade de Aveiro, Prof. Fernando Rocha, Prof. Eduardo Silva, Eng. Cristina Sequeria e Eng Denise Terroso.

REFERÊNCIAS

[1] AGRELA, F., CABRERA, M., MORALES, M.M., ZAMORANO, M., & ALSHAAER, M. Biomass fly ash and biomass bottom ash. New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete, p. 23–58. 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6.

[2] ASTM C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International. 2014.

[3] BAJWA T.M., FALL M. Mechanical characteristics and behavior of compost-based landfill cover. Proceedings of 2011 Pan-AM CGS Geotechnical Conference. 2011.

[4] BS 1377-4. Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 4: Compaction-related tests. UK: British Standards Institution. 1990.

[5] CABRERA M., ROSALES J., AYUSO J., ESTAIRE J., AGRELA F. Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths. Construction Building Materials, 181, p.266–275. 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.035

[6] CARAPITO, L.C. Avaliação da capacidade reativa de resíduo de queima de biomassa vegetal para a remoção de cobre e zinco de efluentes líquidos. Universidade da Beira Interior. 2016.

[7] CUNHA P.P. Evolução Tectono-Sedimentar Terciária da Região de Sarzedas (Portugal). Comunicações dos Serviços Geológicos Portugal, 73(1/2), p.67–84. 1987.

[8] DAUD N.N., MUHAMMED A.S., KUNDIRI A.M. Hydraulic conductivity of compacted granite residual soil mixed with palm oil fuel ash in landfill application. Geotechnical and Geological Engineering, 35(5), p.1967-1976. 2017. https://doi.org/10.1007/s10706-017-0220-1

[9] DIÁRIO DA REPÚBLICA, Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto (Diário da República n.º 153/2009, Série I de 2009-08-10, páginas 5170 – 5198). 2009.

[10] FASTELLI, M., CAMBI, C., ZUCCHINI, A., SASSI, P., PANDOLFI BALBI, E., PIOPPI, L., COMODI, P. Use of Biomass Ash in Reinforced Clayey Soil: A Multiscale Analysis of Solid-State Reactions. Recycling, 8(1), p.5. 2022. https://doi.org/10.3390/recycling8010005.

[11] FROMM J. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. Tree Physio, 30(9), p.1140-1147. 2010. https://academic.oup.com/treephys/article-lookup/doi/10.1093/treephys/tpq024.

[12] GALVÍN A.P., LÓPEZ-UCEDA A., CABRERA M., ROSALES J., AYUSO J. Stabilization of expansive soils with biomass bottom ashes for an eco-efficient construction. Environmental Science and Pollution Research, 28, p.24441-24454. 2020. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08768-3

[13] GOMES, C. Argilas: O que são e para que servem. 1986.

[14] ISO 17892-1. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content. 2014.

[15] ISO 17892-2. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 2: Determination of bulk density. 2014.

[16] ISO 17892-3. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density. 2015.

[17] ISO 17892-4. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution. 2016.

[18] ISO 17892-12. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of liquid and plastic limits. 2018.

[19] KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd edition, CRC Press, p.403. 2001.

[20] KHALID, N., MUKRI M., FADZIL ARSHAD M., SIDEK N., KAMARUDIN F. Effect on Salak Tinggi residual soil mixed Bentonite as compacted clay liner. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 513(1). 2019. https://doi: 10.1088/1757-899X/513/1/012024.

[21] KRUTUL D., ZIELENKIEWICZ T., RADOMSKI A., ZAWADZKI J., ANTCZAK A., DROZDZEK M., MAKOWSKI, T. Metals accumulation in Scots Pine (Pinus Sylvestris L.) wood and bark affected with environmental pollution. Wood Resistance, 62(3), p.353–64. 2017.

[22] KUOKKANEN T., NURMESNIEMI H., PÖYKIÖ R., KUJALA K., KAAKINE J., KUOKKANEN M. Chemical and leaching properties of paper mill sludge. Chemical Speciation Bioavailability, 20(2), p.111-122. 2008. https://doi.org/10.3184/095422908X324480

[23] LOO, S., KOPPERJAN, J., The handbook of biomass combustion and co-firing. Earthscan, Routledge. 2007.

[24] MARCHIORI L., ALBURQUERQUE A. Critical review of industrial solid wastes as barrier material for impermeabilization of storage waste facilities. Proceedings of 5th Symposium on Urban Mining and Circular Economy – SUM2020. 2020.

[25] MARCHIORI, L., STUDART, A., ALBUQUERQUE, , CAVALEIRO, V., SILVA, A. Geotechnical characterization of water treatment sludge for liner material production and soft soil reinforcement. Materials Science Forum, 1046, p.83-88. 2021.

[26] MARCHIORI, L., STUDART, MORAIS, M.V., A., ALBUQUERQUE, A., ANDRADE PAIS, L., BOSCOV, M.E.G., CAVALEIRO, V. Geotechnical characterization of biomass ashes for soil reinforcement and liner materials. KnE Materials Science, p.1-6. 2022a.

[27] MARCHIORI, L., STUDART, A., ALBUQUERQUE, A., ANDRADE PAIS, L., BOSCOV, M.E.G., CAVALEIRO, V. Mechanical and chemical behaviour of water treatment sludge and soft soil mixtures for liner production. The Open Civil Engineering International Journal, 16. 2022b.

[28] MARCHIORI, L., ALBUQUERQUE, A., CAVALEIRO, V. Industrial solid wastes acting as barrier material for storing solid wastes and wastewaters – A critical review. Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022c.

[29] MELO R.F. Impacte da actividade mineira na envolvente de S. Francisco de Assis. Universidade de Aveiro. 2011.

[30] OBERNBERGER, I., SUPANCIC, K. Possibilities of ash utilization from biomass combustion plants. Proceedings of the 17th European Biomass Conference, Hamburg - Germany. 2009.

[31] OSINUBI K.J., EBEREMU A.O. Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil treated with bagasse ash. International Journal of Environmental Waste Management,11(1), p.38–58. 2013. https://doi.org/10.1504/IJEWM.2013.050522

[32] PINTO, J.C.F. Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado. Universidade de Aveiro. 2011.

[33] RUBINOS, D.A., SPAGNOLI, G. Utilization of waste products as alternative landfill liner and cover materials – A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 48(4), p.376–438. 2018.

[34] SALVO, M., RIZZO, S., CALDIROLA, M., NOVAJRA, G., CANONICO, F., BIANCHI, M., FERRARIS, M. Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM). Advances in Applied Ceramics, 114(1), p.3-10. 2015.

[35] SAMI M., ANNAMALAI K., WOOLDRIDGE M. Co-firing of coal and biomass fuel blends. Prog. Energy Combustion Science, 27, p.171–214. 2001. https://doi:10.1016/S0360-1285(00)00020-4.

[36] SLIM G.I., MORALES M., ALRUMAIDHIN L., BRIDGMAN, P., GLOOR, J., HOFF, S.T., ODEM, W.I. Optimization of polymer-amended fly ash and paper pulp millings mixture for alternative landfill liner. Procedia Engineering - International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, 145, p.312-318. 2016. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.079

[37] SŁUPIŃSKA, K., WIERUSZEWSKI, M., SZCZYPA, P., KOŻUCH, A., & ADAMOWICZ, K. Public Perception of the Use of Woody Biomass for Energy Purposes in the Evaluation of Content and Information Management on the Internet. Energies, 15(19), p.6888. 2022. https://doi.org/10.3390/en15196888.

[38] STUDART, A., MARCHIORI, L., MORAIS, M.V., A., ALBUQUERQUE, A., ALMEIDA, P.G., CAVALEIRO, V. Chemical and mineralogical characterization of biomass ashes for soil reinforcement and liner materials. KnE Materials Science, p.1-7. 2022.

[39] TAHA, M.M.M., FENG, C.P., AHMED, S.H.S. Modification of Mechanical Properties of Expansive Soil from North China by Using Rice Husk Ash. Materials, 14(11), p.2789. 2021. https://doi.org/10.3390/ma14112789.

[40] TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, 534. 1996.

[41] TKACZEWSKA, E., MAŁOLEPSZY, J. Hydration of coal–biomass fly ash cement. Construction and Building Materials, 23(7), p.2694–2700. 2009. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.018

[42] TORTOSA MASIÁ A.A., BUHRE B.J.P., GUPTA R.P., WALL T.F. Characterising ash of biomass and waste. Fuel Process Technology, 88(11–12), p.1071–81. 2007. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382007001476

[43] UNITED NATIONS. Directive 86/278/EEC. 1986.

[44] UNITED NATIONS. The 2030 Agenda for Sustainable Development. 2016.

[45] USEPA – US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Protection, Hazardous Wastes. 1999.

[46] VAMVUKA, D., PITHAROULIS, M., ALEVIZOS, G., REPOUSKOU, E., PENTARI, D. Ash effects during combustion of lignite/biomass blends in fluidized bed. Renewable Energy, 34, P.2662–2671. 2009. https://doi:10.1016/j.renene.2009.05.005.

[47] VAMVUKA, D, ZOGRAFOS, D. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. Fuel, 83, p.2051–2057. 2004. https://doi:10.1016/j.fuel.2004.04.012.

[48] VASSILEV, S.V., BAXTER, D., ANDERSEN, L.K., VASSILEVA, C.G., An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. Fuel, 105, p.40-76. 2013. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041.

[49] VASSILEV, S.V., BAXTER, D., ANDERSEN, L.K., VASSILEVA, C.G., An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. Fuel, 105, p.19-39. 2013. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001.

[50] VASSILEV, S.V., VASSILEVA, C.G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. Fuel, 86, p.1490-1512. 2007. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.020.

Capítulo 8

Projeto e fabricação de uma haste femoral em material compósito polimérico

Fellipe Roberto Biagi de Almeida
Romeu Rony Cavalcante da Costa
Sandra Mara Domiciano
Amanda Albertin Xavier da Silva
Ritiery Moreira Sezefredo

Resumo: Os implantes de próteses de quadril são componentes estruturais que ainda apresentam alguns problemas desafiadores não solucionados, como das propriedades fisica e biológica entre a haste e o fêmur humano. O desenvolvimento de estudos acerca de materiais compósitos tem permitido a obtenção de estruturas com uma vasta gama de características favoráveis, inclusive no âmbito da medicina. A matriz polimérica considerada neste trabalho é a poliuretana (PU) derivada do óleo da mamona, sendo que materiais com características biopoliméricas tem permitido o avanço e a melhora de resultados na área de implantes ortopédicos. Então, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de prótese com matriz polimérica reforçada por fibra de vidro. Para a obtenção das próteses, as mesmas foram fabricadas em PU pura, PU com fibra de vidro e PU com fibra de vidro e carbonato de cálcio; todas as configurações sendo reforçadas por um elemento construído na fonna de um núcleo a ser introduzido em seu interior. Os modelos da haste femoral e do reforço foram produzidos através de técnicas de prototipagem rápida, e usados posteriormente na fabricação de moldes flexíveis em silicone. As hastes fabricadas apresentaram boa homogeneidade entre o polímero e o núcleo. Os resultados mostraram boas potencialidades mecânicas deste material para aplicações ortopédicas.

Palavras-chave: compósito, poliuretana, haste femoral, fibra de vidro e carbonato de cálcio.

1. INTRODUÇÃO

Desde as últimas décadas compósitos reforçados com fibras têm sido usados em diversas aplicações industriais, tais como no setor aeroespacial, automobilístico e militar, por consequência de algumas propriedades quando comparados a materiais metálicos (Liu, 2012; Harizi et al.,2014). Soma- se a isto a excelente razão entre resistência à fadiga e peso, bem como a tolerância ao desgaste por fadiga (Yuanjian et al., 2007).

Na esfera da medicina, próteses constituídas de materiais metálicos apresentam certas desvantagens quanto a questões como biocompatibilidade e discrepância de algumas propriedades mecânicas frente ao osso humano. Enquanto o osso mantém um módulo de elasticidade variando entre 12 e 20 GPa, algumas ligas especiais de titânio utilizadas na manufatura de componentes ortopédicos possuem um módulo de elasticidade entre 60 e 80 GPa (Bougherara et al.,2010).

Segundo Da Silva et. al. (2015) hastes femorais de implantes de quadril são componentes estruturais que ainda apresentam alguns problemas desafiadores não solucionados no campo da cirurgia ortopédica. Dentre as complicações a que este processo está sujeito, destaca-se à inadequada combinação entre a haste femoral e o osso cortical do fêmur humano.

Dentro deste âmbito verificou-se a possibilidade de aplicação e estudos de novos materiais, tais como os materiais compósitos biopoliméricos, visando a evolução de próteses ortopédicas. Sendo assim, otimização de próteses de fêmur envolve, essencialmente, a determinação da geometria e do módulo de elasticidade dos materiais que minimizam o efeito de *stress shielding* para níveis de tensões aceitáveis. *Stress shielding* é um processo que oco1Te devido ao fato de as forças exercidas sobre um membro que tem uma prótese serem diferentes das de um membro normal, o que leva à perda óssea numa dada zona, com reabsorção óssea (Vieira, 2004).

O biopolímero utilizado neste trabalho é uma PU derivada do óleo da mamona, que se apresenta na forma bicomponente, sendo constituído de poliol e pré-polímero. Desde 1996 a PU vem sendo usada principalmente como cimento ósseo para implantes de próteses e substância reparadora em perda óssea (Azevedo et al., 2009). Com a PU já foram realizados estudos de biocompatibilidade. Dontos (2005) avaliou a biocompatibilidade de um fio serrilhado em PU de óleo de mamona (Fio Lifting Biológico) aplicado no rejuvenescimento facial. Através de seu estudo, pôde revelar uma excelente biocompatibilidade do Fio Lifting Biológico quando implantado no tecido subdérnico de camundongos, com pequena presença de reação inflamatória e grande e rápida síntese de colágeno.

Diante deste cenário, o referente trabalho tem como objetivo apresentar o projeto e a metodologia fabricação de uma haste femoral construída em material composto de uma matriz polimérica reforçada com fibra de vidro e carbonato de cálcio, e também, obter o valor aproximado do módulo de elasticidade teórico do núcleo, calculado através da regra das misturas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O compósito resultante da fabricação da haste femoral é constituído de uma PU, obtido através da mistura de pré-polímero (sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato) e poliol (derivada do óleo de mamona), atuando como matriz, em conjunto com fibra de

vidro do tipo E (TEX 2400), em forma de *roving*, e carbonato de cálcio, os quais se caracterizam como reforço, com a finalidade de melhorar a resistência mecânica e rigidez da prótese.

Para a obtenção da haste femoral, o desenho foi desenvolvido no software SolidWorks, com base em referências (Filho Silvestre, 2006; Simões & Marques, 2005; Bougherara et al., 2007; Bae et al., 2011) e foram abordados parâmetros dimensionais e de forma, buscando um projeto que suprisse as necessidades mecânicas do osso remanescente.

Após a elaboração do desenho da prótese femoral, a qual consiste em uma haste com reforço central, denominado alma, e fabricado em fibra de vidro, foram impressos, em uma impressora 3D Stratasys Objet 24, o modelo e os gabaritos de centralização, os quais são peças necessárias para o processo de fabricação da prótese.

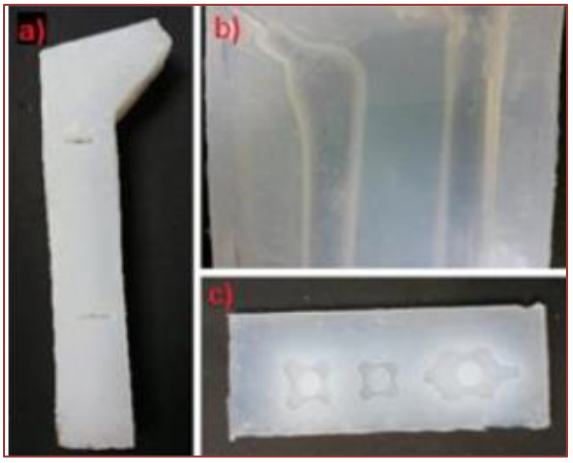
Posteriormente, estes foram utilizados para a possível fabricação dos moldes em silicone. Na Figura 1 observam-se os moldes fabricados em silicone para a realização do processo, sendo:

a) Molde fechado da haste com canais para respiro e injeção e com abertura nas laterais para retirada após a cura e também para possibilitar a introdução e centralização da alma antes da injeção de PU por pressão com a utilização de um êmbolo (cilindro);

b) Molde fechado da alma (reforço central em fibra de vidro) com duas (orificios) nas extremidades e abertura nas laterais para retirada após a cura;

c) Molde aberto dos gabaritos de centralização.

Figura 1: Moldes em silicone obtidos a partir dos protótipos impressos para fabricação: (a) da alma, (b) da haste femoral e (c) dos gabaritos para posicionamento da alma



O primeiro passo para a produção da prótese é a fabricação da alma em fibra de vidro embebecida com PU (Figura 2) para dar a fonna necessária e o alinhamento das fibras (Figura 3a). Para tal, foram utilizadas as quantidades de 8 e 16 porções de segmentos de *roving* ao longo do comprimento da alma, obtendo assim, para cada configuração, um valor de fração mássica de fibra, matriz e vazios. Tratando-se de fatores cruciais para os resultados de propriedades mecânicas e que puderam ser calculados através da

degradação completa da resina (PU) em forno a temperatura de 600ºC, uma vez que seu ponto de fusão é consideravelmente menor que o da fibra de vidro.

Figura 2: Processo de fabricação da alma



Segundo Costa (2007), o módulo de elasticidade para a poliuretana é de 1,43 GPa, constado em ensaios experimentais de tração. O módulo de elasticidade é um parâmetro essencial para o sucesso de projetos de hastes femorais para implante de quadril; o valor ótimo deste seria idêntico ou com leve variação superior ao do osso do fêmur humano, que apresenta um valor de 17,3 GPa (Filho Silvestre, 2006).

Em meio ao exposto é possível, através da regra da mistura, estabelecer uma aproximação do módulo de elasticidade teórico com a aplicação da Eq. (1):

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

E_c, E_f e E_m são os módulos de elasticidade do compósito, da fibra e da matriz, respectivamente; V_f e V_m são as frações volumétricas da fibra e da matriz, respectivamente. V_f e V_m podem ser calculados através das Eq. (2) e Eq. (3):

$$V_f = v_f v_c \quad (2)$$

$$V_m = v_m v_c \quad (3)$$

v_f, v_m, v_c e v_v são, respectivamente, os volumes da fibra, da matriz, do compósito e de vazios, os quais podem ser determinados pela Eq. (4):

$$v_c = v_m + v_f + v_v \quad (4)$$

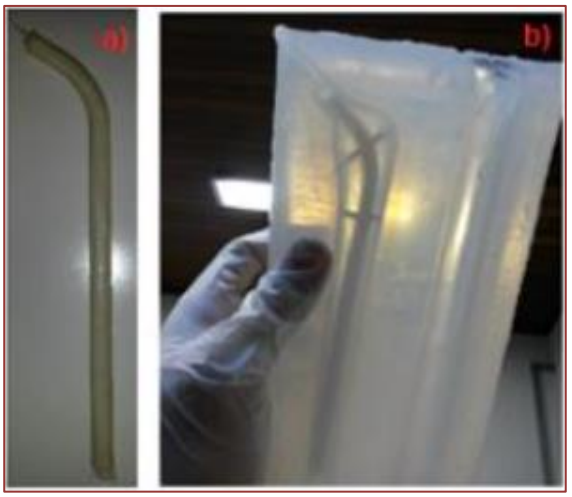
Após a fabricação da alma e dos gabaritos de centralização, o conjunto é disposto como mostra a Figura 3b, a fim do posicionamento adequado da alma no molde da haste.

Então, a mistura base para obtenção da matriz é colocada na câmara de vácuo para a retirada de bolhas reduzindo volumes vazios. Para os casos em que as hastes foram fabricadas com presença de carbonato de cálcio, o mesmo é misturado ao pré-polímero previamente à adição do poliol.

Assim, com a alma corretamente alinhada no molde, este é vedado com fita adesiva para evitar vazamentos no momento da injeção da mistura. Em seguida, a mescla é vertida no canal de injeção e, com a ajuda do êmbolo, comprimida até o preenchimento total do canal com o

perfil da haste femoral. Durante o processo de cura, o molde é mantido no interior de um vaso de pressão a 0,8 MPa durante 8 horas.

Figura 3: (a) Alma composta de fibra de vidro com matriz em PU e (b) alma posicionada no molde em silicone para manufatura da haste reforçada



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra: o reforço central em fibra de vidro (a), haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 8 porções de *roving* (b), haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 16 porções de *roving* e carbonato de cálcio (c), haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 16 porções de *roving* (d) e dimensões básicas do projeto da haste, em milímetros (e).

Figura 4: (a) Reforço central em fibra de vidro, (b) haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 8 porções de *roving*, (c) haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 16 porções de *roving* e carbonato de cálcio, (d) haste femoral em material compósito polimérico com reforço de fibra de vidro 16 porções de *roving* e (e) dimensões básicas do projeto da haste, em milímetros



Os valores médios encontrados para as frações volumétricas de fibra, matriz e vazios e os módulos de elasticidade da fibra de vidro do tipo E e da poliuretana derivada do óleo de mamona estão demonstrados na Tabela 1. Com estes valores foi possível, através da regra da mistura, o cálculo do módulo de elasticidade do compósito com diferentes frações volumétricas de fibra e matriz, sendo as quantidades de fibra de 8 e de 16 comprimentos desta para cada medida de comprimento da alma. O valor adequado do módulo de elasticidade apresentado pela prótese femoral deve ser igual ou razoavelmente maior que o módulo de elasticidade exibido pelo osso, especificamente do fêmur, tal qual, segundo a literatura, é de 17,3 GPa (Vieira, 2004). O valor de 24,03 GPa, obtido com aquantidade de 16 medidas de comprimento de fibra para uma medida de comprimento da alma, se adequa perfeitamente aos requisitos mecânicos necessários, apresentando um valor um pouco maior que o do osso humano. A validação com ensaios mecânicos deve ser feita para melhores conclusões.

Tabela 1: Frações Mássicas e Módulo de Elasticidade calculado pela regra da mistura

Número de Voltas	E_m $[GPa]$	E_f $[GPa]$	V_f [%]	V_m [%]	V_v [%]	E_c $[GPa]$
8	1,43	72	0,14	0,8	0,06	11,23
16	1,43	72	0,32	0,69	0,02	24,03

4. CONCLUSÃO

Os protótipos da haste femoral produzidos, com e sem carbonato de cálcio, apresentaram boa homogeneidade do polímero, não resultando em bolhas aparentes.

Com os valores das frações volumétricas da fibra e da matriz foi possível o cálculo aproximado do módulo de elasticidade teórico para as almas fabricadas. Tendo em

vista que a alma suporte os esforços exercidos, o conjunto da prótese de quadril (alma e haste) também suportará.

Sendo assim, o valor de 24,03 GPa (alma com 16 porções de *roving* de fibra devido), obtido utilizando a regra da mistura se apresenta maior do que o exibido pelo osso humano (fêmur). Retratando assim, um resultado muito promissor para a aplicação da prótese femoral projetada.

REFERÊNCIAS

[1] Azevedo, E.C.; Neto, S.C.; Chierice, G. O.; Lepienski, C. M. Aplicação de Indentação Instrumentada na Caracterização Mecânica de Poliuretana Derivada de Óleo de Mamona, Polímeros: Ciência e Tecnologia, 19, pp. 336-343, 2009.

[2] Bae, J. Y.; Farooque, U.; Lee, K.; Kim, G. H.; Jeon, I.; Yoon, T.R. Development of hip joint prostheses with modular stems, Computer-Aided Design, 43, pp. 1173-1180, 2011.

[3] Bougherara, H.; Bureau, M.; Campbell, M.; Vadean, A.; Yahia, L. Desing of a biomimetic polymer-composite hip prosthesis, Wiley InterScience, 82A, pp. 27-40, 2007.

[4] Bougherara, H.; Zdero, R.; Dubov, A.; Shah, S.; Khurshid, S.; Schemitsch, E. H. A preliminary biomechanical study of a novel carbon-fibre hip implant versus standard metallic hip implants. Medical Engineering & Physics, 2010.

[5] Costa, R. R. C. da. Applicability of constitutive models for analyzing the mechanical behavior of a biopolymer, Thesis, University of São Paulo, 2007.

[6] Dontos, C. A. Biological Lifting wire - Evaluation of their biocompatibility and efficacy in facial rejuvenation, Dissertation, University of São Paulo, 2005.

[7] Harizi, W.; Chaki, S.; Bourse, G.; Ourak, M. Mechanical damage assessment of glass fiber-reinforced polymer composites using passive infrared thennography, Composites Part B, 59, pp.74-79, 2014.

[8] Liu, Y.; Yang, J.P.; Xiao, H.M.; Qu, C.B.; Feng, Q.P.; Fu, S.Y.; Shindo, Y. Role of matrix modification on interlaminar shear strength of glass fiber/epoxy composites, Composites Part B, 43,pp. 95-98,2012.

[9] Silvestre Filho, G. D. Design and structural analysis of femoral stem hip implant in polymeric composite material, Thesis, School of Engineering of São Carlos, 2006.

[10] Simões, J. A.; Marques, A.T. Design of a composite hip femoral prosthesis, Material & Design, 26, pp. 391-401, 2005.

[11] Vieira, A. F. Design of a Femoral Component of a Hip Prosthesis Articulate in Composite Materials, Dissertation, University of Porto, 2004.

[12] Yuanjian, T.; Isaac, D.H. Combined impact and fatigue of glass fiber reinforced composites, Composites Part B, 39, pp. 505-512, 2007.

[13] Zhang, M.; Matinlinna, J. P. E-glass fiber reinforced composites in dental applications, Silicon, 4, pp.73-78, 2012.

Capítulo 9

O impacto da automação na máquina de engate rápido em uma indústria de duchas e chuveiros

Vinicius Oliveira dos Santos
Vitória Caroline Santos de Araújo
João Domingos Covello Carregosa

Resumo: Com a evolução da tecnologia e consequentemente do avanço do mercado de trabalho, as empresas se tornam cada vez mais concorrentes. Dessa forma, a automatização tem sido progressivamente implantada dentro das indústrias substituindo o trabalho humano por comandos operacionais e integrados. Ao redigir sobre automação industrial é imprescindível não relacionar com a indústria 4.0 que tem o objetivo de melhorar a eficiência, eficácia e o tempo nos processos produtivos com base em sistemas inteligentes. Neste contexto, este estudo tem como finalidade constatar que a automatização pode trazer grandes vantagens para indústria, em específico na produção de duchas e chuveiros. A linha de produção estudada foi a de engate rápido que serve para conectar sistemas hidráulicos auxiliando no deslocamento dos fluidos e evitando vazamentos. Através dos comparativos da produção, qualidade e segurança entre as máquinas manual e automatizada obtiveram-se resultados notáveis com o aumento da produção e melhoria na qualidade do produto, além de diminuir o custo operacional.

Palavras-chave: Automatização; automação industrial; engate rápido; indústria 4.0.

1. INTRODUÇÃO

A automação industrial deu seus primeiros passos nos processos industriais, através dos equipamentos de controle e de medição elétrica e pneumática. No entanto, a automação se tornou mais relevante em 1949/50 com o surgimento de máquinas de comando numérico. (ROSARIO, J. M., 2009).

Hoje, a criação e implementação de modernos sistemas mecatrônicos e robóticos para a indústria tem grande importância. (FILARETOV, *et al.* 2015). Em um ambiente cada vez mais competitivo, o cliente vem exigindo, gradativamente, produtos de alta qualidade e com um baixo custo (Xavier *et.al*., 2014).

Frequentemente o homem tem utilizado da tecnologia para superar suas limitações e otimizar seus resultados. Limitações como deficiência física, em que o operador pode ser excluído ou isolado de determinado meio, como o mercado de trabalho. (MENDES, G.; TORRES, B. 2017). Em função desses novos parâmetros na esfera empresarial, muitas organizações de vários setores têm se preocupado em repensar suas antigas formas de produção (SILVA, *et al*, 2013).

Uma das alternativas que as indústrias estão aplicando para se manterem vivas no mercado, cada vez mais exigente, é a implantação de sistemas de melhorias que, bem implantados, conduzem a resultados positivamente expressivos (OLIVEIRA, 2013). A Indústria 4.0 é o próximo passo para a indústria de transformação, visto que com a adição das tecnologias da internet a sistemas de automação otimizados, os processos de fabricação passam a ser mais integrados, contando com menos intervenção humana e permitindo que os sistemas executem a auto decisão (ZHONG, *et al*. 2017).

O processo de modernização no sistema empresarial, atrelado à qualidade, produtividade e novas tecnologias dos produtos e processos, está exigindo que empresas busquem sempre inovações em suas atividades no mercado alvo (SILVA, *et al*, 2013). Nos dias atuais, associa-se a automação industrial aos sistemas robóticos, mas trata- se mais de sistemas flexíveis de produção que resultam da incorporação de equipamentos robóticos e programáveis (ADÃO, T. 2022).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar duas máquinas que produzem engate fácil para duchas, dispositivo de plástico polipropileno que faz a conexão da tubulação de uma residência com o chuveiro, além disso serão demonstradas as vantagens de automatizar uma linha de produção em uma indústria de duchas e chuveiros.

A escolha do tema relaciona-se com a evolução da tecnologia nas máquinas industriais, e de que modo ela afeta o mercado de trabalho, em que exige que as indústrias aperfeiçoem cada vez mais seus processos produtivos, para obter um aumento da produtividade sem perder a qualidade. Com isso, nesse estudo foi realizado um comparativo entre duas máquinas, uma com processo manual e outra automatizada, mostrando suas diferenças em quesito produção, segurança do operador e a qualidade do produto final após o processo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONTEXTO HISTÓRICO

A revolução industrial pode ser compreendida pela mudança estrutural da sociedade com a transição da ferramenta pela máquina. Ela se caracteriza pelas inovações técnicas, novas máquinas e um modo de produção modernizado (COGGIOLA, 2016). Há cerca de 250 anos atrás, três revoluções modificaram e transformaram a sociedade. Onde as tecnologias, sistemas políticos e instituições sociais avançaram juntos em cada uma delas, transformando tanto as indústrias como o modo como as pessoas se viam em relação ao mundo natural (SCHWAB, K.; DAVIS, N. 2019).

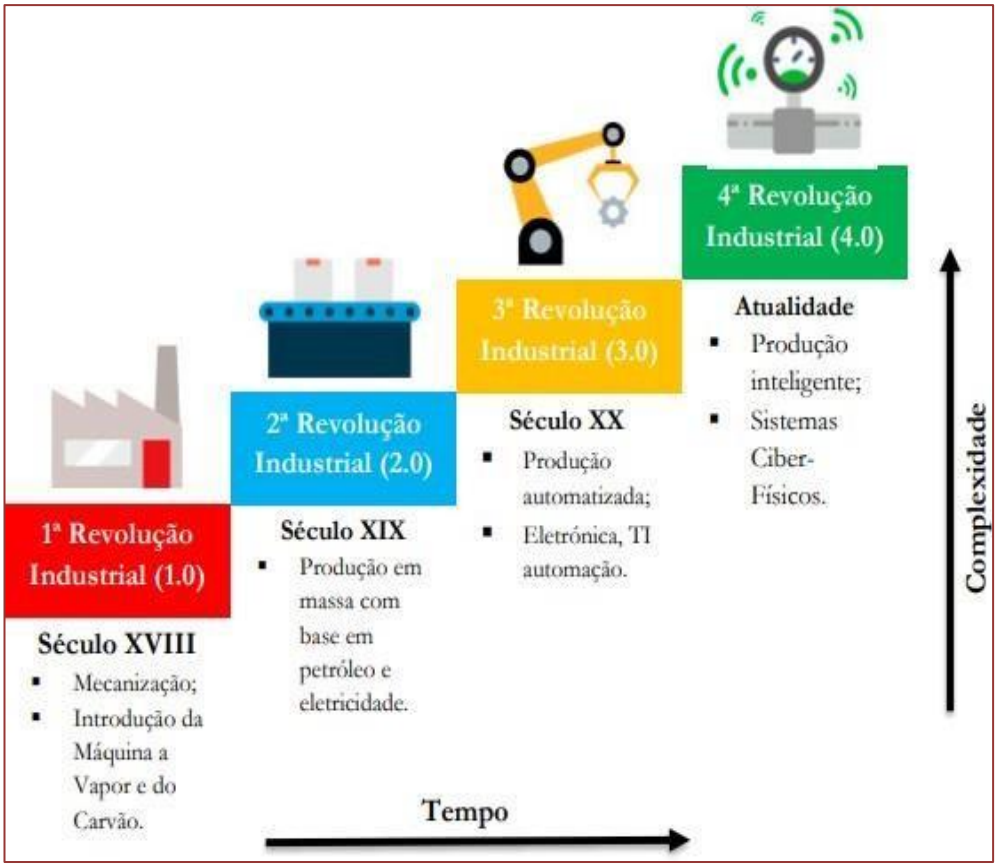
A primeira revolução industrial aconteceu entre 1780 e 1860. Considerada a revolução do carvão e ferro, ela deu início a produção mecânica através da substituição do trabalho manual por máquinas, da invenção da máquina a vapor nas fábricas, principalmente na têxtil e da aceleração dos transportes e das comunicações como o telégrafo elétrico e estradas de ferros (CHIAVENATTO, 2009).

A segunda revolução industrial, iniciou-se entre o século XIX e XX, pelo advento da especialização do trabalho e da ampliação da produção com as esteiras rolantes e as linhas de montagem criado por Henry Ford (SILVA, GASPARIN, 2006). Esse período foi marcado pela eletricidade, petróleo e química, além da massificação da manufatura e do desenvolvimento de novas tecnologias como os refrigeradores (COLNAGO, JUNIOR, COTRIM, 2010).

A terceira revolução industrial começou na década de 1960. Também conhecida como revolução digital, pois foi impulsionada pelo desenvolvimento dos semicondutores, da computação e da internet (SCHWAB, 2019). Ela teve um impacto na sociedade pela mudança significativa do aspecto de trabalho e vida. Foi marcada pela mudança de energia renovável, pelo uso da tecnologia da internet e transporte elétrico (RIFKIN. 2012).

A quarta revolução industrial é caracterizada pela introdução da tecnologia de informação e comunicação (TIC), que estão se tornando um fenômeno na automação industrial (ZEZULKA*, et al.* 2022). O conceito de indústria 4.0 surgiu na Alemanha no ano de 2011 com uma nova concepção na política econômica usando tecnologias poderosas como estratégia (ROBLEK, 2016). A Figura 1, representa um breve resumo das revoluções industriais.

Figura 1 - Evolução da Revolução Industrial



Fonte: ALVES, Manuel 2020.

2.2. INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 é considerada uma nova etapa industrial em que a integração vertical e horizontal dos processos de fabricação e a conectividade dos produtos podem ajudar as empresas a alcançarem maior desempenho industrial (DALENOGARE, *et al.* 2018). De acordo com Lydon (2015), um dos principais objetivos da indústria 4.0 é a melhoria dos processos de fabricação em uma cadeia de dimensões, introduzindo eficiência, a eficácia de resposta e capacidade de satisfazer as demandas individuais dos consumidores em tempo ágil.

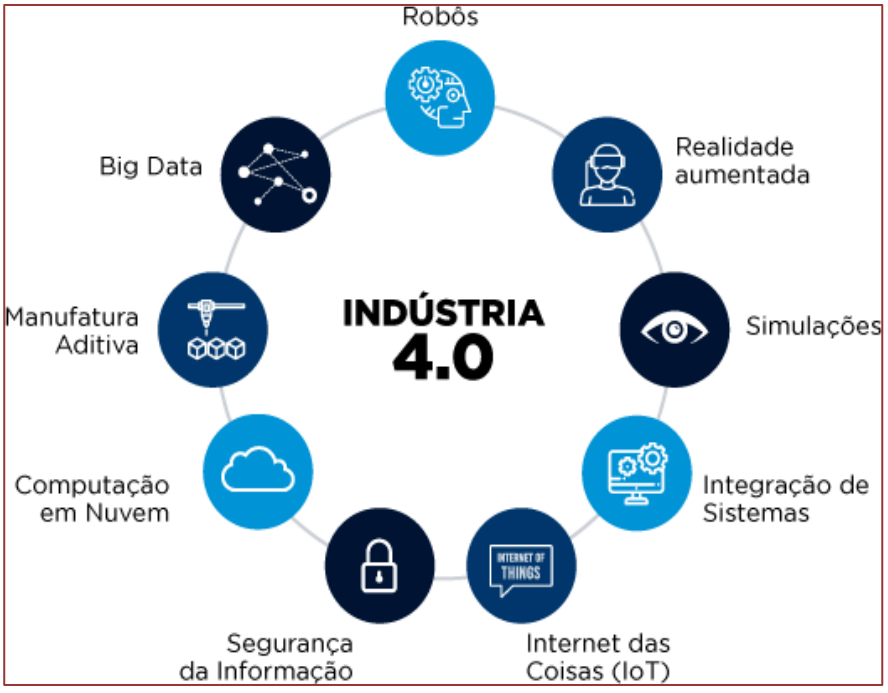
Com os avanços na comunicação sem fio, nos dispositivos de detecção e na computação, simultaneamente com a redução de custos dessas tecnologias, estimularam e aceleraram o desenvolvimento de Sistemas Ciber-Físicos que obtiveram o paradigma da Internet of Things (IoT) para fornecer diversos tipos de serviços. O progresso e adoção desses sistemas ainda enfrentam vários desafios que a comunidade de pesquisa e as indústrias estão ativamente tentando resolver (Ochoa, *et al*. 2017).

O crescimento exorbitante do número de dispositivos conectados à Internet das Coisas (IoT) e o aumento exponencial do consumo de dados apenas refletem como o crescimento do Big Data se alinha perfeitamente à IoT (PACCHINI, *et al*. 2020). Várias empresas e organizações de pesquisa ofereceram uma ampla gama de projeções sobre o impacto potencial da IoT na Internet e na economia durante os próximos cinco a dez anos. (ROSE, et al. 2015).

2.3. PILARES DA INDÚSTRIA 4.0

Com o intuito de unificar os recursos físicos e digitais, para conectar os sistemas com as máquinas em um objetivo em comum de melhorar a produtividade, a indústria 4.0 precisou seguir algumas ferramentas exigidas, utilizado para gerar o conceito da Revolução 4.0 (CORREIA, Caio. 2022). Na Figura 2 são apresentados os nove pilares desse conceito: Robôs, realidade aumentada, simulações, integração de sistemas, internet das coisas, segurança da informação, computação em nuvem, manufatura aditiva e Big Data. Serão detalhados os principais pilares relacionados ao tema proposto.

Figura 2 - Nove Pilares da Indústria 4.0



Fonte: Luiz Chesini, 2021.

2.3.1. SISTEMA FÍSICO-CIBERNÉTICO (CYBER-PHYSICAL SYSTEMS)

De acordo com Lee (2008), os Cyber-Physical Systems (CPS), representam a integração de processos físicos e computadores, que têm como objetivo monitorar e controlar as informações em tempo real. A utilização desse sistema, as indústrias asseguram um grande potencial econômico e na sua rede de produção. Os CPS fazem com que as indústrias otimizem por meio de monitoramento e controle, todos os processos de produção para atender melhor qualidade para os clientes (DE OLIVEIRA, F. T; SIMÕES, W. L. 2017).

2.3.2. BIG DATA

A big data é um sistema de conjunto de dados com estrutura estáveis para processar e armazenar grande quantidade de informações em mudança rápida. A tolerância de falhas é seu principal objetivo, visto que, mantém a confiabilidade, disponibilidade e o desempenho constante durante as falhas (SAADOON, M. et al. 2021). O processo de pesquisa de volume de dados para revelar padrões ocultos e correlações secretas são denominadas de análise de big data. (SAGIROGLU, S.; SINANC, D. 2013).

2.3.3. COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A computação em nuvem (Cloud Computing) já faz parte de diversas indústrias, pois ela tem um enorme volume de capacidade de armazenamento de dados devido à evolução das tecnologias de transmissão de dados (EUSÉBIO, 2019). O modelo de computação em nuvem proporciona o acesso em rede a uma central de recursos, com menor esforço de gestão de recursos de hardware e software e maiores capacidades de computação sem que seja necessário a intervenção humana (Gunes *et al.,* 2014).

2.3.4. ROBÔS

Nas indústrias atuais os robôs já estão presentes no convívio industrial, porém a grande diferença para os robôs da Indústria 4.0 é a possibilidade trabalhar sem a supervisão humana. Os robôs autônomos aumentam a produção e reduzem os custos de mão-de-obra, visando uma indústria mais competitivas no mercado (EUSÉBIO, 2019).

2.4. AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL NO BRASIL

A automação pode ser descrita como procedimentos que otimizam o processo de negócio, aumentando sua produtividade, valorizando a força do trabalho humano e garantindo uma operação ambientalmente segura (BRANQUINHO, *et al*. 2014).

O avanço Tecnológico no Setor Industrial no Brasil tem passado por diversas transformações em todas as áreas, isso se dá principalmente aos investimentos em tecnologias de ponta que estão colocando o país em um novo patamar de desenvolvimento digital (EVERTON, D.; FARIAS, E.; DE CASTRO, K., 2020).

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a indústria brasileira está mais digital que a cinco anos atrás. Em 2016 apenas 48% das empresas de uma lista de 10 opções faziam uso de alguma tecnologia digital. Já em 2021 teve um aumento significativo para 69% de uma lista de 18 opções que já utilizavam pelo menos uma tecnologia.

A automação digital com sensores para controle de processo está mais espalhada na indústria brasileira, se mantendo como principal tecnologia em uso com 46% de porcentagem. Sendo que 7 a cada 10 empresas (72%) apontaram o aumento da produtividade como um dos cinco principais benefícios obtidos pela empresa com uso dessas tecnologias, tornando esse benefício o mais acentuado, conforme a CNI. A tabela 1 representa o percentual de respostas sobre a utilização da automação digital nas indústrias.

Tabela 1 – Avanço da tecnologia 2016-2021

Foco	Tecnologia	2016	2021
Processos de produção	Automação digital com sensores para controle de processo	27	46
	Automação s/ sensores, uso controlador lógico programável (CLP)	-	39
	Coleta, processamento e análise de grande quantidade de dados (bigdate)	-	21
	Inspeção da qualidade automatizada ou avançada	-	18
	Manufatura aditiva, robôs colaborativos (cobots)	-	12
	Monitoramento e controle remoto da produção com sistema tipo MES e SCADA	7	17
Desenvolvimento de produto	Sistemas integrados de engenharia para desenvolvimento e manufatura de produtos	19	33
	Prototipagem rápida, impressão 3D e similares	-	16
	Simulações /análise de modelos virtuais para projeto e comissionamento	5	13
Produto/novos modelos negócios	Ferramenta digitais de relacionamento com o cliente (chatbots)	-	25
	Incorporação de serviços digitais nos produtos (IOT ou Produtc Service Sytems)	4	14
	Coleta, processamento e análise de grande quantidade de dados (bigdate)	-	13
	Design assistido por inteligência artificial	-	4

Fonte: Confederação nacional da indústria (CNI) *modificada*,2021

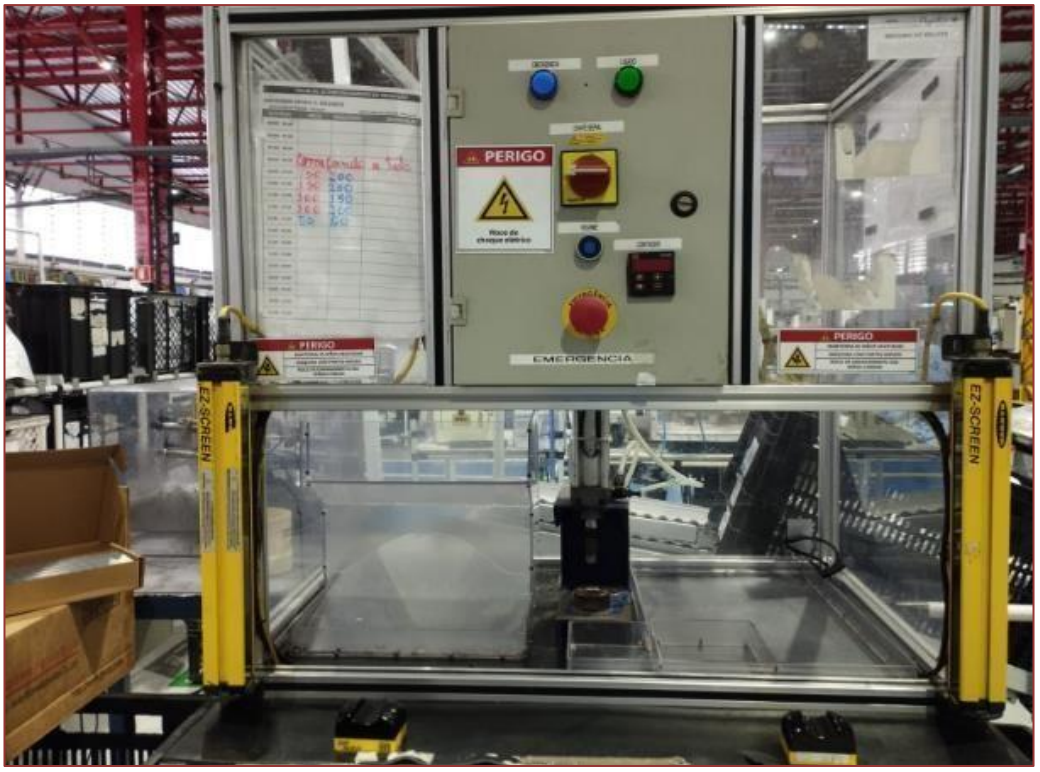
3. METODOLOGIA

O presente artigo foi desenvolvido a partir de um estudo de caso sobre o tema abordado e através da coleta de dados da máquina manual e da automatizada. Foi feita uma comparação entre elas em três partes: produção, qualidade e segurança. O primeiro passo para abordagem do tema foi analisar estudos científicos que aplicaram a automatização em empresas e indústrias visando uma melhoria no processo produtivo.

Após o estudo do tema, verificou-se o processo de operação em cada uma das máquinas na indústria de chuveiros em Aracaju. Onde a máquina manual necessita de dois

operadores no qual um operador insere o redutor com o anel de vedação no engate e o outro acopla o O´ring no engate para ser inserido na cartela.

Figura 3 - Máquina manual



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De acordo com o catálogo Planeta Água, os redutores de pressão são dispositivos utilizados para instalações em que recebe pressão de água, sendo que ele é um acessório que preserva a pressão ideal na chegada do destino. Como pode ser visto no catálogo da Quimilon, o anel de vedação que consiste em um pequeno anel de borracha, tem a finalidade de reduzir e vedar a passagem do fluido que transita para os terminais das mangueiras. Baseado no catálogo da Vedatec, o anel O´ring que é um elemento de formato anelar e com seção circular é empregado em vedação estática ou dinâmica e produzido em elastômeros.

Todavia, no procedimento automatizado utiliza-se métodos de sensores e atuadores eletropneumáticos para fazer todo o processo produtivo. A máquina possui uma mesa giratória por dentro que passa por 5 estações (A, B, C, D, E). Na estação A, a garra mecânica insere o engate na mesa giratória para ir para próxima estação B onde nessa etapa o anel de vedação é posto no redutor e outra garra mecânica acopla-o no engate, a mesa gira para estação C que tem a função de inverter o engate em 180° graus. Passa então para estação D onde a garra insere o O´ring e muda para última etapa E que pega o engate e insere na cartela chegando no produto final, necessitando apenas de um operador para acompanhar a produção por um painel de controle.

Figura 4 - Máquina automatizada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com isso, foram coletados os dados da produção em intervalo de tempo das máquinas e feito uma tabela para comparar o resultado obtido como mostrado na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Produção X Tempo

Intervalo de hora	Produção realizada (manual)	Produção realizada (automatizada)
10:00 - 11:00	-	-
11:00 - 12:00	-	-
12:00 - 13:30	-	-
13:30 - 14:00	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O próximo passo foi averiguar a qualidade do produto e verificar a segurança do operador e da máquina em relação a ergonomia no trabalho, de acordo com a Norma Regulamentadora NR17 (2021);

> "NR 17.4.3 - Devem ser implementadas medidas de prevenção, a partir da avaliação ergonômica preliminar ou da AET, que evitem que os trabalhadores, ao realizar suas atividades, sejam obrigados a efetuar de forma contínua e repetitiva"

De acordo com a Norma Regulamentadora de Segurança de Equipamentos e Máquinas NR12 (2019);

> "NR12.1.11 - As máquinas nacionais ou importadas fabricadas de acordo com a NBR ISO 13849, Partes 1 e 2, são consideradas em conformidade com os requisitos de segurança previstos nesta NR, com relação às partes de sistemas de comando relacionadas à segurança. "

Em vista disso, foi feito um levantamento de questões com os operadores da máquina para analisar os problemas ocorridos durante o processo.

Tabela 3 – Relação operador e máquina

Perguntas	Respostas
A empresa disponibiliza os EPI's adequados para o serviço?	-
Com o passar do dia, você sente a algum dor na articulação?	-
O que mais te incomoda durante o manuseio da máquina?	-
O senhor ª já precisou ficar afastado por algum tipo de acidente de trabalho?	-

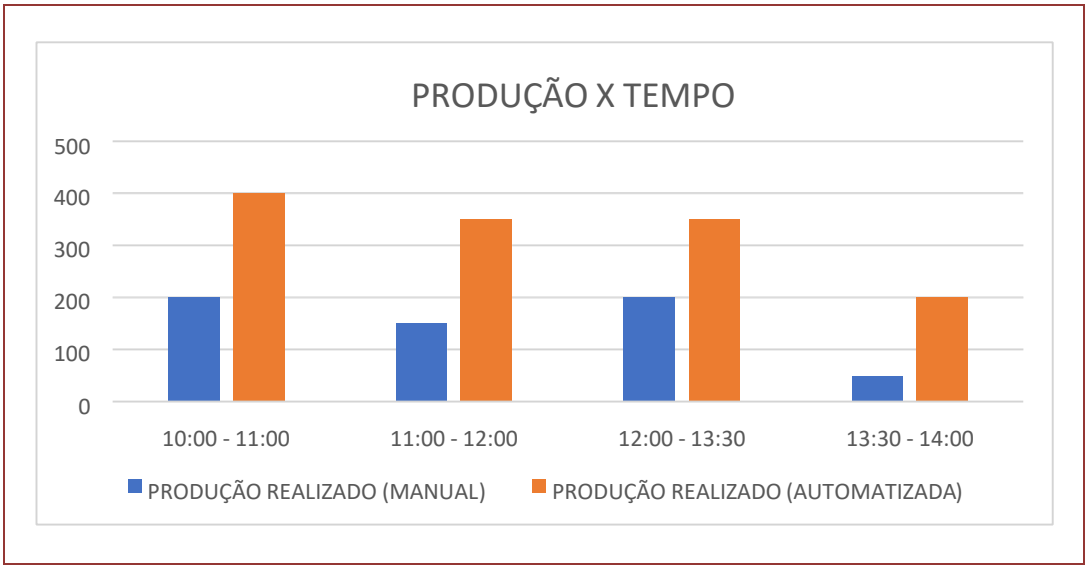
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No quesito qualidade, foi verificado o acabamento do engate rápido já inserido na cartela de ambas as máquinas, em que foi observado se as peças apresentavam algum tipo de falha de injeção ou se chegavam com rebarba. Através desse procedimento foi possível verificar se a empresa atingia um dos seus lemas que se relaciona com a confiabilidade do produto final para os consumidores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas informações que foram descritas, foi feito o preenchimento de dados da Tabela 2, e logo em seguida foi desenvolvido um gráfico para mostrar o aumento de produção em dado intervalo de tempo.

Gráfico 1 – Produção X Tempo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Foi possível observar o aumento de produção na máquina automatizada em comparação a manual, em especial no intervalo de tempo entre 13:30 às 14:00 horas, isso retrata que nesse intervalo é quando está em final de expediente, onde os operadores já estão desgastados durante o dia, ocasionando uma queda significativa na eficiência da produção, uma vez que, durante um intervalo de 1hora, os operadores produzem em torno de 200 peças de engate rápido.

Em contrapartida, na máquina automatizada em 1 hora produz até 400 peças de engate rápido e ao analisar seu processo produtivo por alguns dias, pode-se afirmar que uma das causas que podem diminuir sua produção é quando a matéria prima fornecida para a máquina estiver fora do padrão, ou seja, um material com rebarba ou com falha de injeção. Com base nisso, pode-se afirmar que a máquina produzirá um produto final com maior qualidade. Com a automatização da produção gerou-se um ponto de grande vantagem para a empresa, já que se a indústria fabrica mais, consequentemente aumentando seu lucro.

O segundo ponto de grande relevância para uma empresa é produzir um produto final com maior qualidade. Como foi visto anteriormente, a máquina automatizada precisa ter suas matérias primas em perfeito estado, pois ela foi fabricada para funcionar milimetricamente nesses parâmetros e produzir com maior precisão e quando isso não ocorre a máquina não funciona e os sensores não reconhece a matéria prima inserida.

Na máquina manual o próprio operador tem essa responsabilidade de inserir a matéria prima que esteja nas condições adequadas, visto que muitas das vezes o colaborador não tem a atenção devida na operação, podendo gerar um produto final com menor qualidade. Na Figura 5 e 6 será mostrado um exemplo da matéria prima com rebarba e falha de injeção.

Figura 5 – Engate com falha de injeção e rebarba



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 6 - Redutor com rebarba



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A empresa tem a responsabilidade de garantir a integridade física, a segurança e a saúde de qualquer colaborador que opere máquinas e equipamentos. Por isso antes de se automatizar qualquer processo produtivo é necessário analisar esse ponto. Na indústria em questão o colaborador que opera uma máquina manual estar mais propicio de prejudicar a integridade física do que aquele que estar monitorando o painel de controle de uma máquina automatizada.

Através do levantamento do questionário realizado com os colaboradores que operaram a máquina foi possível constatar algumas consequências. Participaram 5 funcionários, em que 80% deles alegaram dores na parte lombar da coluna e incomodo na região do punho. Com isso foi constatado que ao realizar movimentos repetitivos diariamente ocasiona problema musculares, tais como, LER (Lesão de esforço repetitivo). Em relação as dores lombares, foi diagnosticado que por ficar muito tempo em pé, o operador pode apresentar problema de lombalgia. Dessa forma com a automatização do processo produtivo, a

empresa conseguiu reduzir os problemas relacionados a integridade física do operador, além de evitar cada vez mais os acidentes de trabalho.

Através de estudos sobre o tema abordado, foi possível perceber a importância e a vantagem de automatizar um processo industrial. De acordo com Xavier Charles e Carvalho Suzana (2014) que fez um estudo de caso sobre a automatização em uma empresa de usinagem, afirmou que com o processo de automatizar houve uma redução média de 50% do tempo dobrando a capacidade produtiva devido a facilidade e rapidez da operação quando comparado ao processo de uma máquina manual. Além disso, concluiu-se que a qualidade estar atrelada ao procedimento automatizado, já que a partir dela houve uma redução de produtos defeituosos, condizendo assim com os resultados obtidos no presente trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da observação das máquinas de engate rápido foi constatado o quão vantajoso é a automatização de um processo industrial. Por meio da tabela e gráfico da produção diária da empresa, teve-se resultados positivamente expressivos ao otimizar a linha de produção comprovando o que foi visto nas revisões literárias.

Levando em consideração um ponto negativo se refere a diminuição da mão de obra, que mesmo sendo uma vantagem para a indústria é uma desvantagem para os operadores, pois com o avanço da tecnologia, o mercado necessita de operadores mais qualificados, no qual gera uma maior taxa de desemprego e consequentemente aumenta a desigualdade social. Observando o lado positivo da automatização, o aumento da produção e qualidade do produto juntamente com a segurança do operador, atendem a expectativa da empresa que é visar um maior lucro com um menor custo.

REFERÊNCIAS

[1] ALVES, M. G. P. Impacto das tecnologias digitais da Indústria 4.0 na Cultura Organizacional das Empresas. 2020. Dissertação (Mestrado em Economia e Administração de Empresas) – Faculdade de Economia Universidade Porto, Portugal.

[2] BRANQUINHO, Marcelo Ayres et al. Segurança de Automação Industrial e SCADA. Elsevier Brasil, 2014.

[3] CHEISINI, L. C. Conheça os nove pilares da Indústria 4.0 e sua relevância para a atividade industrial. Disponível em: < https://www.luizchesini.com.br/2021/09/11/conheca-os-nove- pilares-da-industria-4-0-e-sua-relevancia-para-a-atividade-industrial/ > Acesso em: 12. Set.2022.

[4] CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Sondagem Especial 83- Indústria 4.0 – Cinco anos depois Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/> . Acessado em: 19 de Set.de 2022.

[5] COGGIOLA, O. Da revolução industrial ao movimento operário. As origens do mundo contemporâneo. v. 9, n. 09, 2016. Disponível em:< https://www. researchgate.net/publication/287205625_Revolucion_Industrial_e_Movimento_Operario_As_origens_do_mundo_contemporaneo> Acesso em: 12 set. 2022.

[6] CORREIA, Caio. INDUSTRIA 4.0 E SEUS PRÓXIMOS DESAFIOS. Revista Eletrônica da Estácio Recife, v. 8, n. 1, ago. 2022. Disponível em: < https://reer.emnuvens.com.br/reer/article/view/663/321 > Acesso em: 12. Set. 2022.

[7] DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. International Journal of production economics, Brazil, v. 204, p. 383-394, 2018.

[8] DA SILVA, M. C. A.; GASPARIN, J. L. A segunda revolução industrial e suas influências sobre a educação escolar brasileira. Paraná, 2006.

[9] DE OLIVEIRA, F. T.; SIMÕES, W. L. A indústria 4.0 e a produção no contexto dos estudantes da engenharia. Simpósio de Engenharia de Produção, Brasil, 2017.

[10] EUSÉBIO, R. T. A simulação na Indústria 4.0: principais conceitos e abordagens. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de Aveiro.

[11] EVERTON, Danilia de Jesus Trindade; FARIAS, Erliandro Pimentel; DE CASTRO, Karen Cristina Batista. A evolução do processo industrial Brasileiro: A Industria 4.0. Engenharia de produção: Inovação na indústria 4.0, p. 8, 2020.

[12] FILARETOV, Vladimir .et al. The automatization method of processing of flexible parts without their rigid fixation. Procedia Engineering, Russia, v. 100, p. 4-13, 2015.

[13] GUNES, V, et al. A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems. KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), v. 8, n. 12, p. 4242-4268, 2014.

[14] KIRNER, C.; TORI, R.. Fundamentos de realidade aumentada. Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada, v. 1, p. 22-38, 2006

[15] LEE, E. A. Cyber physical systems: Design challenges. In: 2008 11th IEEE international symposium on object and component-oriented real-time distributed computing (ISORC).

[16] IEEE, 2008. p. 363-369. LYDON, B. Industry 4.0: Should you bet on it. Automation. com, EUA, p. 2015-1, 2015.

[17] MANJATE, T. A. Desenvolvimento de projetos de automação industrial. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica)- Instituto Superior de Engenharia De Coimbra, Portugal.

[18] MENDES, G. TORRES, B. Implementação de comando de voz para controle de sistema automatizado de armazenamento e recuperação. Conic SEMESP, São Paulo, 2017.

[19] MESQUITA, V. B.; MOREIRA, F. C. Indústria 4.0: Aplicação de Realidade Aumentada. Simpósio em Excelência em Gestão e Tecnologia (XVSEGeT), 2018..

[20] Norma Regulamentadora No.17(NR17). NR-17 – ERGONOMIA. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria- de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-17- nr-17> , Acesso em: 11 de Out. 2022

[21] Norma Regulamentadora No.12(NR12). NR-12 – SEGURANÇA NO TRABALHO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em: < https://www.gov.br/trabalho-e- previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca- e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-12-nr-12 >. Acesso em: 11 de Out. 2022

[22] OCHOA, S. F.; FORTINO, G.; DI FATTA, G. Cyber-physical systems, internet of things and big data. Future Generation Computer Systems, EUA, v. 75, p. 82-84, 2017.

[23] OLIVEIRA, J. M. Troca rápida de ferramenta com auxilio de simulação computacional aplicada em processo de extrusão de compostos. São Paulo: Taubaté, 2013.

[24] PACCHINI, A. P. T. et al. Indústria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. Exacta, Brazil, v. 18, n. 2, p. 278-292, 2020

[25] PETROVIC, V. et al. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. International Journal of Production Research, v. 49, n. 4, p. 1061- 1079, 2011.

[26] QUIMIFLON. Anel de Vedação. Disponível em < https://www.quimiflon.com.br/anel- vedacao-ptfe >Acesso em: 12 Set. 2022

[27] RIFKIN, J. A Terceira Revolução Industrial – Como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo. São Paulo: M. Books do Brasil, 2012.

[28] ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A complex view of industry 4.0. Sage open, Slovenia v. 6, n. 2, p. 2158244016653987, 2016.

[29] ROSARIO, J. M. Automação industrial. Editora Baraúna, 2009.

[30] ROSE, K.; ELDRIDGE, S.; CHAPIN, L. The internet of things: An overview. The internet society (ISOC), Switzerland, v. 80, p. 1-50, 2015

[31] SAADOON, Muntadher et al. Fault tolerance in big data storage and processing systems: A review on challenges and solutions. Ain Shams Engineering Journal, 2021.

[32] SAGIROGLU, S.; SINANC, D. Big data: A review. In: 2013 international conference on collaboration technologies and systems (CTS). IEEE, 2013. p. 42-47.

[33] SA, I. et al. IEEE Standard for an Architectural. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9781504458863

[34] SCHWAB, K.; DAVIS, N. Aplicando a quarta revolução industrial. Edipro, 2019. Disponível em: < https://books.google.com.br/books?hl=pt-

[35] BR&lr=&id=W5SWDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=Aplicando+a+quarta+revolu%C3%A7%C3%A3o+industrial&ots=d08Y1CGC91&sig=9J5y4FV6Ru9b5VOIa1-ax8gWwFw#v=onepage&q=Aplicando%20a%20quarta%20revolu%C3%A7%C3%A3o%20industrial&f=false > Acesso em: 12 set. 2022.

[36] SILVA, L. C. A.; KOVALESKI, João Luiz; GAIA, S. Gestão do conhecimento organizacional visando à transferência de tecnologia: os desafios enfrentados pelo NIT da universidade estadual de Santa Cruz. Revista Produção Online, Pernambuco, v. 13, n. 2, p. 677-702, 2013.

[37] VEDATEC. Anel 'o' Ring. Disponível em: < https://www.vedatec.com.br/staff-member/anel- o-ring/ > . Acesso em: 12 Set. 2022

[38] WU, Dazhong et al. Cybersecurity for digital manufacturing. Journal of manufacturing systems, USA, v. 48, p. 3-12, 2018.

[39] XAVIER, C. A. R.; CARVALHO, S. M.. A Melhoria do Setup de uma Empresa de Usinagem:

[40] Um Estudo de Caso em Porto Velho, Estado de Rondônia, Brasil. Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, v. 8, n. 2, p. 12-34, 2014.

[41] XIA, Feng et al. Internet of things. International journal of communication systems, v. 25, n. 9, p. 1101, 2012.

[42] ZEZULKA, F. et al. The Ideas of Industry 4.0: Seven Years After. IFAC-PapersOnLine, Czech Republic, v. 55, n. 4, p. 145-150, 2022.

[43] ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. Engineering, New Zealand, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017

Capítulo 10

Desenvolvimento de protótipos para medição de corrente elétrica: Análise de um transformador de corrente e uma bobina de Rogowski com capacidades distintas

Vinícius da Fonsêca Santos
Filipe Carvalho de Andrade
Mikelly Bonfim Anjos
Rafael de Paula Lacerda Pio
Leonardo Souza Caires
Diego Habib Santos Nolasco

Resumo:Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de dois métodos de medição de corrente elétrica não invasivos: O transformador de corrente e a bobina de Rogowski. Para isso, foram desenvolvidos protótipos de um transformador de corrente de até 10 A e de uma bobina de Rogowski para medições primárias de até 100 A. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento dos métodos é consistente com o encontrado na literatura e que as características construtivas têm um impacto significativo no desempenho dos mesmos. Este trabalho contribui com uma análise teórica e prática de dois métodos comumente utilizados para medição de corrente elétrica alternada.

Palavras-Chave: Transformador de corrente, bobina de Rogowski, corrente alternada, medição não invasiva.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica se faz presente diariamente em praticamente todas as atividades do homem, sendo a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Segunda Golveia (2013), tamanha é sua importância que a preocupação com as grandezas envolvidas no sistema elétrico é constante, fazendo-se necessário o monitoramento constante dos valores de corrente e tensão, que representam a base dos processos de tarifação, controle e proteção de usinas, subestações e linhas de transmissão.

Existem diversas tecnologias que podem ser utilizadas para medir essas grandezas. Para medir a corrente que circula por um condutor podemos utilizar *shunts* resistivos, transdutores de efeito *hall*, transformadores de corrente e bobina de Rogowski. Cada tecnologia possui suas próprias vantagens e desvantagens, por exemplo, o *shunt* resistivo não oferece isolamento. Ademais, a queda de tensão no circuito pode causar perdas e a sua precisão pode ser afetada pela mudança da temperatura ambiente. Portanto, é importante considerar todas as características do medidor antes de decidir utiliza-lo, uma vez que a precisão dos sensores de corrente pode ser alterada por fatores como a variação de temperatura e a centralização incorreta do condutor principal no sensor.

No caso do Transformador (TC), é necessário utiliza-lo para que os instrumentos de medição e proteção atuem de maneira adequada, sem que seja aplicada a corrente nominal do sistema sobre eles. O TC é amplamente utilizado em sistemas elétricos, pois informa as condições reais de corrente em regime nominal, picos e falta de energia, proporcionando um maior controle sobre o sistema. Também possui outra grande vantagem, que é a isolação elétrica entre o equipamento medidor e o circuito a ser medido.

Por outro lado, a bobina de Rogowski é um equipamento de medição que mede correntes de impulso alternadas e de alta velocidade, baseadas nas leis de Ampère e Faraday. Atualmente, a bobina é capaz de medir correntes de baixo nível, graças a dispositivos eletrônicos associados. Tal dispositivo possui uma característica linear devido ao fato de não possuir um núcleo ferromagnético. Essa característica linear, juntamente com dispositivos eletrônicos precisos, possibilita a medição de correntes no intervalo de miliamperes a mega amperes.

Este trabalho tem por objetivo o dimensionamento, construção e análise de dois protótipos de medição de corrente alternada não invasivos: Um transformador de corrente e uma bobina de Rogowski. Tais protótipos foram testados em laboratório considerando sua capacidade em um sistema real, concomitante analisou-se a aplicação de filtros passa-baixa nos mesmos a fim de melhorar a eficiência de medição eliminando os ruídos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

À priori, o modelo de medição pensado e abordado nesse trabalho, tanto para bobina de Rogowski quanto para o transformador de corrente de formato toroidal, baseia-se na medição não invasiva. Nesse sentido, o sistema adotado para a medição de corrente elétrica é apoiado nos princípios de acoplamento magnético, que são fundamentados pelas leis de Ampère, Faraday-Lenz e Biot-Savart. O acoplamento magnético ocorre quando há uma relação entre dois circuitos magnéticos, em que a corrente elétrica do primeiro circuito é medida a partir da influência magnética que ela exerce no segundo circuito. A lei de Ampère descreve a relação entre a corrente elétrica e o campo magnético produzido enquanto a lei de Faraday-Lenz descreve a indução eletromagnética gerada em

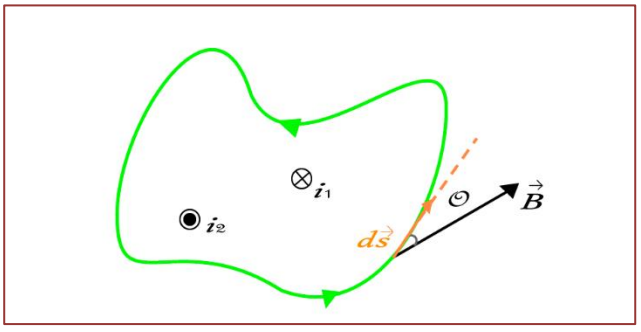
um circuito pela variação do campo magnético e a corrente elétrica do fio condutor. Esses princípios são resumidos pelas equações de Maxwell, que descrevem a relação entre a eletricidade e o magnetismo, e são fundamentais para compreensão do funcionamento do sistema de medição de corrente elétrica adotado.

2.1. MODELAGEM MATEMÁTICA

Mediante a ideia de que existe uma distribuição de correntes elétricas próximas e ao longo de um plano, sendo que a distribuição possui uma certa simetria, a partir da lei de Ampère, Biot-Savart e Gauss, pode-se obter o campo magnético total produzido por tais correntes. De certo, ao visualizar essas leis, o produto da soma das correntes envolvidas (i_{env}) por uma curva arbitrária ($C\ ou\ amperiana$) por uma constante (μ_0), equivale a um campo magnético total ($\vec{B}$) que circula a mesma curva arbitrária.

$$\oint_C \vec{B}\, d\vec{s} = \oint B\, cos\theta\, ds = \mu_0\, i_{env} \qquad (1)$$

Figura 1: Ilustração clássica da lei de Ampère



Fonte Autoria própria.

A equação de Maxwell estabelece um complemento para lei de Ampère, afirmando existir uma componente nessa equivalência denominada de corrente de deslocamento (i_d).

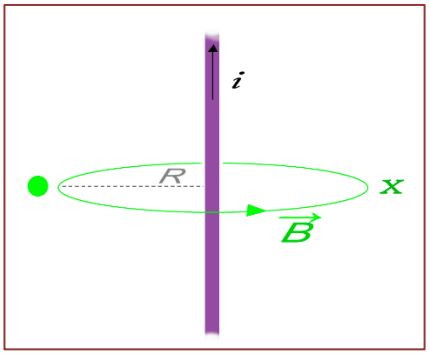
$$\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0\, i_{env} + \frac{\varepsilon_0 \mu_0 d\emptyset_\varepsilon}{dt} \qquad (2)$$

$$\oint \vec{B}\, d\vec{s} = \mu_0\, (i_{env} + i_d) \qquad (3)$$

De acordo com Halliday e Renisk (2006), a contribuição da lei de Biot-Savart que se baseia em observações experimentais, nos permite calcular o campo magnético total produzido em um ponto por fio de diferentes geometrias. No presente estudo, utilizou-se o módulo do campo magnético produzido pela corrente em um fio longo e retilíneo.

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\emptyset R} \qquad (4)$$

Figura 2: Direção e sentido do campo magnético produzida pela corrente conduzida por um fio retilíneo



Fonte Autoria própria.

Mediante o exposto, a lei de Faraday-Lenz ou comumente conhecida como lei de indução eletromagnética, estabelece que na presença de uma variação do fluxo magnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida no sentido contrário. Tal lei é descrita matematicamente pela Equação 5.

$$\varepsilon = -N\frac{d\emptyset}{dt} \tag{5}$$

A equação do fluxo magnético ($\emptyset$) pode ser simplificada quando existe distribuição uniforme na superfície estudada, como sendo o produto da densidade do campo magnético (B) pela área da superfície (A), logo:

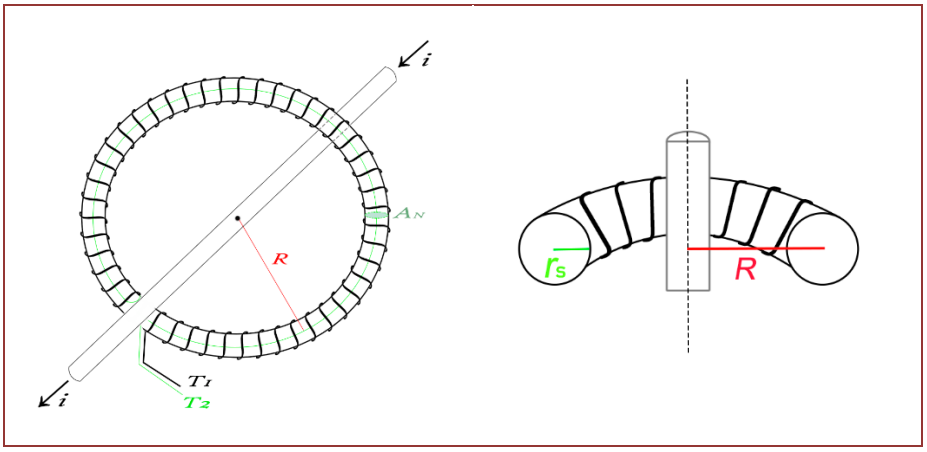
$$\emptyset = B \cdot A \tag{6}$$

Quando o toroide é posicionado de forma externa ao condutor, a tensão induzida nessa bobina depende do número de espiras (N) ou enrolamentos que esse toroide possui. O fluxo magnético resultante é o produto da densidade do campo magnético pela área desse núcleo, logo a Equação 5 passa a ser rescrita como:

$$\varepsilon = -N\frac{\mu_0 \pi {r_s}^2}{2R}\frac{di_1}{dt} \tag{7}$$

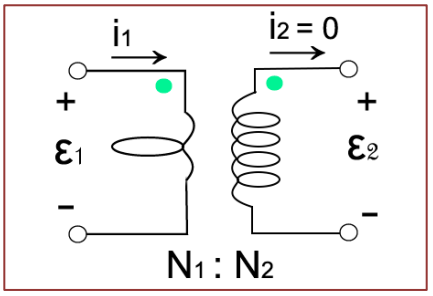
A Figura 3 mostra os parâmetros da Equação 7 em que "i" é a corrente elétrica, "A_N" equivale a área da seção reta transversal do núcleo da bobina, "R" trata-se do raio entre o centro da seção reta transversal do condutor e da bobina, e "T_1 e T_2" e são os terminais da bobina. Por fim, a área da bobina é dada pelo produto de π pelo seu raio (r_s), logo $A_N = \pi {r_s}^2$.

Figura 3: Modelo adotado para medição não invasiva



Fonte Autoria própria.

Figura 4: Comportamento de um transformador ideal para o condutor primário e a bobina como secundário em aberto



Fonte Autoria própria.

A Figura 3 mostra um circuito magneticamente acoplado e seu modelo ideal ilustrado na Figura 4. Pode-se então determinar que o primário se trata do condutor retilíneo enquanto o secundário trata-se da bobina. Aplicando o conceito de fluxo concatenado e força eletromotriz induzida, tem-se então:

$$\varepsilon = \frac{d\lambda}{dt} \tag{8}$$

As equações aqui modeladas são aplicáveis em sistemas elétricos de corrente alternada. Assim sendo, a passagem da corrente elétrica pelo condutor principal ocasiona no centro da bobina uma taxa de variação do fluxo magnético em relação ao tempo, induzindo uma tensão nos terminais T_1 e T_2. Perante os fatos descritos, analisando a Figura 4, nota-se que o fluxo concatenado da bobina terá uma parcela de contribuição da indutância própria da bobina (L_{22}) e da indutância mútua (L_{12}) entre a bobina e o condutor, logo:

$$\varepsilon = L_{22}\frac{di_1(t)}{dt} + L_{12}\frac{di_2(t)}{dt} \tag{9}$$

Pelo fato da bobina ficar à vazio, não ocorre a passagem de corrente em seus terminais logo a tensão induzida depende somente da corrente do condutor primário e consequentemente da sua indutância própria. Assim a tensão induzida nos terminais dos enrolamentos do secundário é descrita como:

$$\varepsilon = L_{22}\frac{di_1(t)}{dt} \tag{10}$$

Por fim, utilizando as equações denotadas anteriormente em concordância com Sousa (2022), tem-se a equação de dimensionamento da bobina e do transformador de corrente de formato toroidal, onde:

$$N = \frac{2R}{\mu_r \mu_0 A_N}\frac{\varepsilon_2}{f I_p}\frac{\sqrt{\frac{l^2}{2}+r^2}}{l} \tag{11}$$

- N – Número de espiras necessárias;
- R – Raio entre a seção reta transversal do condutor principal (primário) e a seção reta transversal dos enrolamentos secundários, (m);
- r – Raio do núcleo (m);
- μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo (H/m);
- μ_r – Permeabilidade relativa;
- ε_2 – Força eletromotriz induzida no secundário (V);
- I_p – Corrente de pico do primário (A);
- l – Comprimento do condutor primário (m);
- A_N – Área do núcleo (m^2).

2.2. TRANSFORMADOR DE CORRENTE

O transformador de corrente (TC) é um dispositivo cuja finalidade é medir corrente elétrica (alternada) de forma não invasiva. O protótipo construído de formato toroidal, funciona como a teoria fundamentada na seção anterior, sendo que o mesmo possui um núcleo ferromagnético com um condutor várias vezes ao seu redor. Sendo assim, o primário desse transformador trata-se do condutor central pelo qual se deseja realizar a medição e o seu secundário trata-se dos enrolamentos no núcleo toroidal propriamente dito. As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento ideal desse transformador. A corrente elétrica que flui através do condutor principal cria um campo magnético ao redor do núcleo do TC, esse campo magnético é então convertido em uma corrente elétrica no enrolamento secundário. Isolados eletricamente um do outro, porém, acoplados magneticamente, o seu secundário produz uma corrente proporcional à corrente que está sendo captada no primário, essa proporcionalidade é definida pela relação de transformação do TC. Desse modo, é possível realizar medições do valor de tensão e de corrente com o dispositivo, de maneira segura.

Normalmente considerado como redutor de corrente, os transformadores de corrente não invasivos possuem um enrolamento secundário com uma grande quantidade de espiras. Assim, é possível gerar uma diminuição drástica na corrente, de modo que se pode utilizar um multímetro para medir a corrente do sistema.

Os TC's são projetados e construídos para uma corrente nominal de 5 A, sendo a corrente primária nominal estabelecida de acordo com a ordem de grandeza da corrente do circuito em que o TC está magneticamente interligado. Portanto quando uma corrente nominal percorre o primário, o seu secundário terá uma corrente de 5 A. Mesmo que a

corrente nominal do sistema for muito maior, o secundário ainda terá uma corrente de 5 A, isso porque o transformador de corrente mantém a relação de transformação para realizar as medições de forma mais assegurada.

2.3. BOBINA DE ROGOWSKI

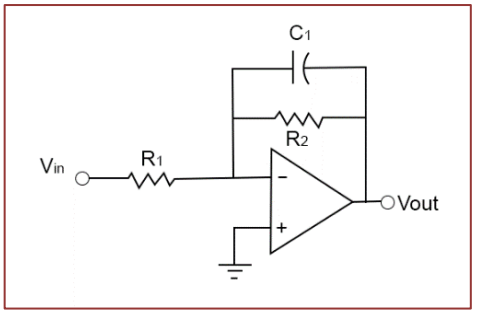
"A bobina de Rogowski, se trata de um transdutor de corrente com núcleo de ar, consistem em um enrolamento toroidal colocado em torno do condutor que está medido" (ABDI-JALEBI E MCMAHON, 2007). Nessa bobina, tem-se que o condutor por onde flui a corrente elétrica atua como enrolamento primário enquanto o secundário trata-se da bobina propriamente dita. Funciona de maneira similar a um TC, porém é mantido em aberto ou conectado a uma alta impedância.

A modelagem matemática das bobinas de Rogowski é baseada nas equações de Maxwell, especificamente a Lei de Ampère e na Lei de Faraday, conforme foi apresentada anteriormente. Essas equações são de suma importância para determinar as variáveis construtivas das bobinas para uma aplicação determinada.

2.4. CIRCUITO INTEGRADOR E FILTRO PASSA-BAIXA

O circuito integrador utilizado, tem a função de obter a corrente elétrica de forma indireta, visto que o amplificador operacional, como próprio nome sugere, realiza operações matemáticas. Com ele é possível obter a saída deste transdutor, uma vez que a tensão induzida é proporcional à derivada da corrente do primário como apresentado na Equação 7. Sendo assim, ao realizar a integração deste sinal, obtêm-se o sinal de corrente elétrica na bobina.

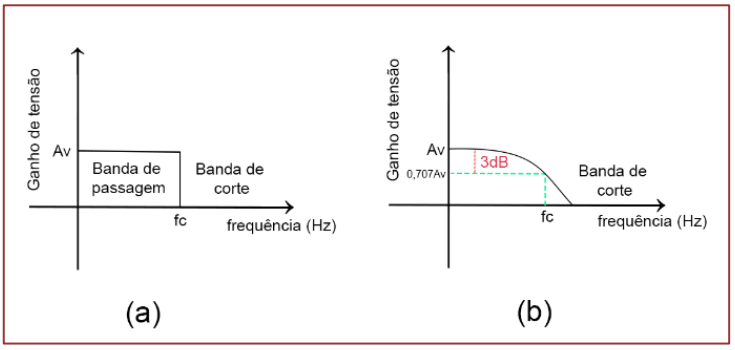
Figura 5: Circuito integrador utilizando um amplificador operacional



Fonte: Malvino e Bates (2007), modificado.

Em consciência do que já foi abordado, o circuito integrador também funciona como filtro passa-baixa, segundo Malvino e Bates (2007): "Um filtro passa-baixa permita a passagem de frequência desde zero a frequência de corte e bloqueia todas as frequências acima da frequência de corte". A Figura 6 mostra a resposta ideal de um filtro passa-baixa e sua aproximação Butterworth.

Figura 6: (a) Resposta ideal de um filtro passa-baixa; (b) Aproximação Butterworth com frequência de corte com 3 dB



Fonte: Malvino e Bates (2007), modificado.

Assim sendo, ainda segundo Malvino e Bates (2007, pág. 242) para o circuito inversor-integrador mostrado na Figura 5, a equação da frequência de corte (f_c) depende da resistência do resistor (R_2) e do capacitor (C_1) utilizados, logo:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \qquad (11)$$

Por fim, tal circuito promove ainda uma amplificação do sinal de entrada, nesse sentido a Equação 13 é usada para definir o ganho de tensão (A_V) do circuito utilizando como base a resistência dos resistores R_1 e R_2. Vale ressaltar que por ser um amplificador inversor o sinal de saída está defasado em 180º em relação ao sinal de entrada, por tal motivo existe o sinal negativo na equação do ganho para esse circuito.

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{V_{out}}{V_{in}} \qquad (12)$$

3. DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO PROTÓTIPO

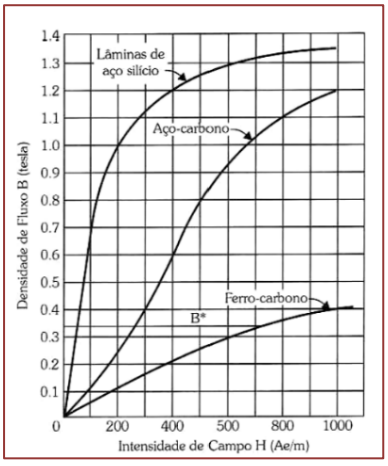
Inicialmente foi definido que, para fins comparativos, seria mais interessante o desenvolvimento de um transformador de corrente não invasivo, cujo princípio de funcionamento é similar a bobina de Rogowski. Logo, o transformador de corrente prototipado, teve o formato toroidal equivalente ao formato da bobina, para que dessa maneira eles pudessem ser analisados de forma direta.

Os protótipos foram idealizados de forma a suprir as suas condições de medição, tendo em vista que tinham capacidades diferentes, o laboratório disponível para a análise não tinha a infraestrutura necessária para fornecer de forma direta correntes alternadas RMS de 10 A ou 100 A. Por isso, desenvolveu-se um transdutor de corrente de maneira improvisada para conseguir as correntes almejadas. O transdutor improvisado foi composto somente por uma condutor no primário e vários enrolamentos do mesmo condutor no secundário, obtendo então uma relação de elevação de corrente. Tal condutor pensado tinha a capacidade de suportar elevadas correntes, garantindo então a medição das mesmas com os protótipos desenvolvidos.

3.1. PROTÓTIPO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

O transformador de corrente e constituído por um núcleo ferromagnético, que por possuir uma baixa permeabilidade magnética faz com que a relutância do material aumente e consequentemente o fluxo concatenado e a força magneto motriz induzida, atenuem. Para sua construção foi utilizado uma fita perfurada de aço carbono, que de acordo com Carvalho (2006) possui uma permeabilidade de $5.10^{-5}\,H/m$ sendo sua permeabilidade relativa de aproximadamente 400 vezes maior do que a do vácuo. A Figura 7 mostra a curva de magnetização de materiais ferromagnéticos tendo como base o aço, nesse sentido, esse gráfico informa a permeabilidade magnética do núcleo do transformador de corrente, uma vez que a permeabilidade magnética do material equivale a: $\mu = {}^{B}/_{H}$.

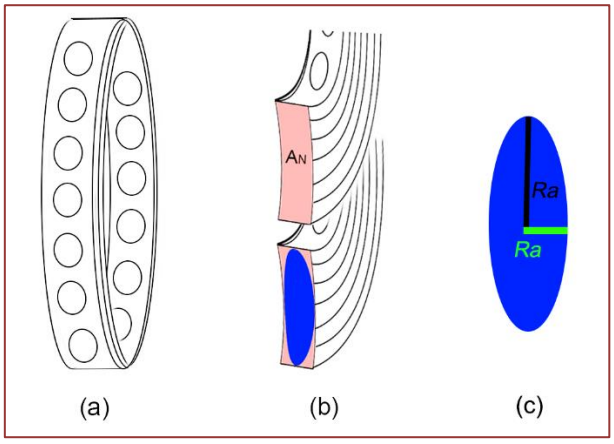
Figura 7: Curva de magnetização de materiais ferromagnéticos a base de aço



Fonte: Carvalho (2006).

O núcleo do transformador de corrente foi confeccionado a partir de uma fita galvanizada tipo perfurada, sendo que a mesma foi enrolada em várias camadas circulares, conforme ilustra a Figura 8. A área real da seção reta transversal do núcleo pode ser aproximada por uma área retangular, sendo ela: $A_N = largura \cdot comprimento = 4\,cm^2 \cdot 6{,}25\,cm^2 = 25\,cm^2$. Como a teoria apresentada foi baseada em um núcleo com área da seção reta transversal circular, considerou-se a área elíptica, uma vez que a passagem do fluxo se concentra no centro, tanto no formato real retangular quanto no formato elíptico designado, utilizando então a mesma equação base para dimensionamento da seção: Modelagem matemática. Nesse sentido, o dimensionamento do número de espiras do transformador de corrente pôde ser comparado de forma direta com o dimensionamento do número de espiras da bobina de Rogowski, validando então a teoria apresentada.

Figura 8: (a) Esboço do enrolamento da fita perfurada de aço carbono de forma a se tornar um núcleo ferromagnético circular. (b) ● Área real da seção reta transversal do núcleo. (b), (c) ● Área aproximada da seção reta transversal do núcleo



Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 8 a área aproximada do núcleo em formato elíptico é $A_N = r_a \cdot r_b \cdot \pi = 19{,}63\ cm^2$ o que equivale a 78,52 % da área real do núcleo. Nesse sentido, visualizando a Equação 11, sabendo que $r_s{}^2 = r_a \cdot r_b$, considerou-se um fator de correção de 22,48 % a mais da área aproximada do núcleo de forma a corresponder ao seu valor real.

É importante enfatizar que o efeito do fluxo disperso por conta dos furos da fita foi desprezado, além da pequena deformação da área do núcleo devido a sua inclinação circular. Nesse caso denotou-se um percentual de 5 % de tolerância no dimensionamento do número de espiras. Para fazer os enrolamentos utilizou-se fio de cobre esmaltado AWG 21, em concordância com escala normatizada americana, esse fio possui uma espessura pequena, com 0,724 mm^2de diâmetro e suporta correntes de até 1,2 A, sendo o suficiente para realizar as medições almejadas. As medidas adotadas, consultadas e calculadas a partir da Equação 11 foram indexadas na Tabela 1 para facilitar o entendimento e a análise da construção do protótipo.

Tabela 1: Parâmetros para o cálculo do número de espiras (TC)

ε_2	$30\ mV_p$
f	$60\ Hz$
l	$1\ m$
R	$0{,}05\ m$
$r_s{}^2 = r_a\, r_b$	$0{,}0015625\ m^2$
μ_0	$4\ \pi\ 10^{-7}\ H/m$
A_N	$0{,}0025\ m^2$

Com base na modelagem matemática apresentada foi possível estimar o número de espiras necessárias para confecção do transformador de corrente, sendo este um total de 15 espiras.

3.2. PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI

A bobina de Rogowski possui o núcleo a ar, logo para sua construção optou-se por uma mangueira flexível de silicone típica para uso em jardinagem. Visto que a mesma e feita de material não magnético, ela proporciona o núcleo a ar que permite a deformação para o formato toroidal desejado, não interferindo diretamente no circuito magnético aplicado. Para os enrolamentos da bobina, adotou-se o fio de cobre esmaltado AWG 28, que em concordância com escala normatizada americana, possui uma espessura pequena de 0.32 mm de diâmetro e suporta correntes de até 230 mA. Nesse aspecto, essas medidas contemplam as projeções indicadas. Após essa etapa, os protótipos foram idealizados de forma a suprir completamente (TC) ou parcialmente (bobina) as suas condições de medição, tendo em vista que tinham capacidades diferentes, o laboratório disponível para a análise não tinha a infraestrutura necessária para fornecer, de forma direta, correntes alternadas de 100 A.

Levando em consideração que o condutor primário foi um cabo de cobre de 10 mm^2, os enrolamentos do secundário ou os protótipos propriamente referidos deveriam ter um raio maior que esse cabo, para então, por meio de aproximações, conseguir medir a corrente que passa pelo primário.

Analisando a Figura 3, sabendo que a mangueira escolhida foi seccionada de forma a ter um comprimento (C) de 50 cm e um formato circular, o raio (R) desse círculo foi dado por $R = C/2\pi = 0,0796\ m$. Nesse aspecto, uma vez que o a mangueira possui uma área interna da seção reta transversal circular com raio ($r_s = 0,011m$), logo a área do núcleo foi dada por: $A_N = \pi {r_s}^2$, assim, utilizando a Equação 11 denotou-se a quantidade de voltas que a bobina de Rogowski necessitou para funcionar dentro dos parâmetros indicados. Posteriormente, as grandezas adotadas e calculadas foram indexadas na Tabela 2 para facilitar o entendimento e a análise da construção do protótipo.

Tabela 2: Parâmetros para o cálculo do número de espiras (bobina)

ε_2	$100\ mV_p$
f	$60\ Hz$
l	$1\ m$
r_s	$0{,}011\ m$
R	$0{,}0796m$
μ_0	$4\ \pi\ 10^{-7}\ H/m$
A_N	$0{,}00038\ m^2$

Aplicando os valores da Tabela 2 na Equação 11 foi possível determinar o número de espiras necessária para a confecção da bobina de Rogowski, sendo essa quantidade aproximada de 1989 espiras.

3.3. DIMENSIONAMENTO DO AMPLIFICADOR INTEGRADOR / FILTRO PASSA-BAIXA

Para o dimensionamento do amplificador integrador que também tem a funcionalidade de um filtro passa-baixa, considerou-se que o mesmo possuiria uma frequência de corte

de 60Hz, para tal, utilizando a Equação 12, escolheu-se um capacitor de 104 pF, com R_2 sendo a associação de dois resistores em paralelo de 47 kΩ com um resistor de 2,2 kΩ em série, fazendo com que o R_2 da Figura 5 apresente uma resistência equivalente de 25,7 kΩ. Para obter um ganho de tensão um pouco acima de 10 utilizou-se um resistor R_1 de 2,2 kΩ. Com os componentes escolhidos a frequência de corte ficou pouco acima de 60 Hz, o que favoreceu no processo de filtragem já que o filtro escolhido não apresenta uma resposta ideal, como descrito na Figura 6.

4. MATERIAIS UTILIZADOS E PROCESSO CONSTRUTIVO

Para a realização da montagem da bobina de Rogowski e do transformador de corrente foi necessário a utilização de materiais específicos e apropriados para que fosse possível o perfeito funcionamento dos equipamentos desenvolvidos.

4.1. TRANSFORMADOR DE CORRENTE

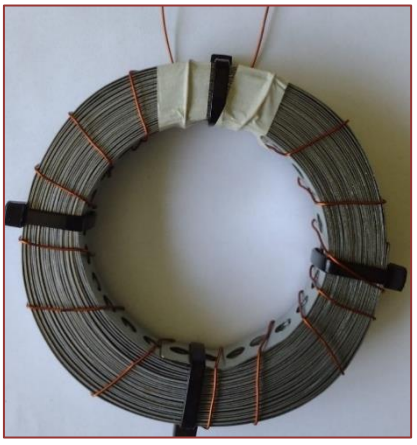
Os materiais utilizados para a construção do transformador de corrente foram indexados na Tabela 3, sendo a quantidade de cada material mensurada a partir de seu uso no protótipo.

Tabela 3: Materiais utilizados para a construção do TC

Material	Quantidade	Medida
Fita perfurada de aço	10	metros
Fio de cobre esmaltado AWG 28	50	centímetros
Abraçadeira de plástico	4	unidades

Após o dimensionamento realizado e definido a quantidade de voltas necessárias para a construção do transformador de corrente, realizou-se o enrolamento da fita perfurada. Constituindo então camadas sobrepostas e com formato circular. Após o término, fixou-se a fita perfurada por meio de abraçadeiras plásticas, de modo a fixa-la como o núcleo do transformador de corrente. Por fim, enlaçou-se o fio de cobre em volta do núcleo, de maneira a ter 15 espiras, obtendo então o resultado exposto na Figura 9.

Figura 9: Protótipo do transformador de corrente



Fonte: Autoria própria.

4.2. BOBINA DE ROGOWSKI

Os materiais utilizados para a construção do transformador de corrente foram dispostos na Tabela 4, sendo a quantidade de cada material mensurada a partir de seu uso no protótipo.

Tabela 4: Materiais utilizados para a construção do TC

Material	Quantidade	Medida
Mangueira Flex de silicone	60	centímetros
Rolo de fio de cobre esmaltado AWG 28	500	gramas
Fita isolante	10	centímetros

Após o dimensionamento realizado da quantidade de voltas necessárias para o pleno funcionamento da bobina, mediante os parâmetros desejados, efetivou-se a confecção do protótipo. À priori, fixou-se a ponta do fio de cobre esmaltado em uma das extremidades da mangueira, dando início ao enrolamento do fio de cobre em torno da mangueira, completando então a primeira camada de espiras com metade do número de voltas dimensionado. Após a primeira camada do enrolamento, realizou-se a fixação de ambas extremidades do fio com fita isolante, completando então a outra camada de espiras sobreposta a primeira com a quantidade restante. Dessa forma, recortou-se o excesso da mangueira e do fio de cobre esmaltado. A Figura 10 exibe o protótipo finalizado.

Figura 10: Protótipo da bobina de Rogowski



Fonte: Autoria própria.

5. PROCESSO DE MEDIÇÃO

5.1. EQUIPAMENTOS PARA AS MEDIÇÕES

Após a fabricação ao dos protótipos, montou-se um sistema para o qual estabelece-se as condições para efetivar as medições com o TC a bobina. A Figura 11 mostra os elementos do sistema interligados e em pleno funcionamento. Tal sistema contou com os seguintes equipamentos e componentes:

- VARIAC saída 240 V bifásico com corrente nominal de 5 A;
- Interruptor diferencial residual;
- Osciloscópio digital;
- 2 Alicates amperímetros;
- Fio de cobre 120 mm^2;
- 12 Lâmpadas de 60 W;
- Fonte de alimentação CC.

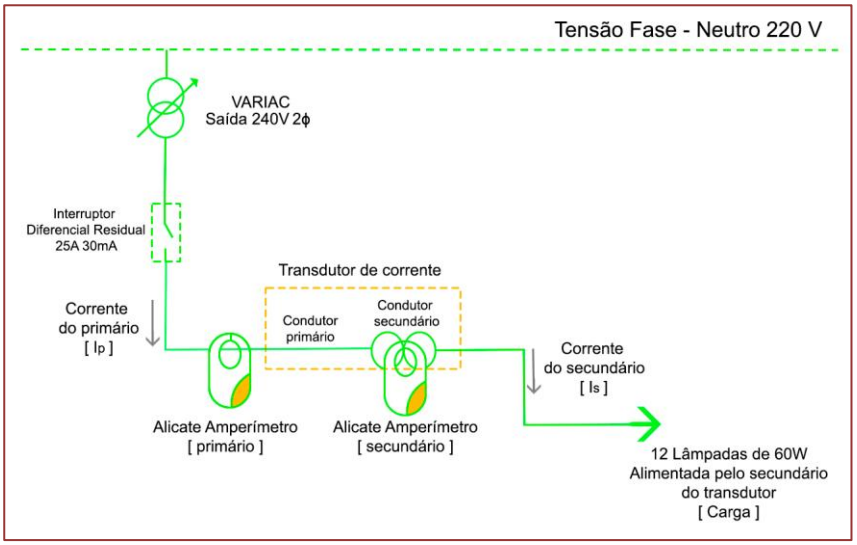
Figura 11: Protótipo do transformador de corrente



Fonte: Autoria própria.

Em uma análise mais inteligível, a Figura 12 ilustra as conexões de forma mais direta, dos componentes empregados, enfatizando que no primeiro momento os alicates amperímetros indicaram a relação de transformação do transdutor de corrente.

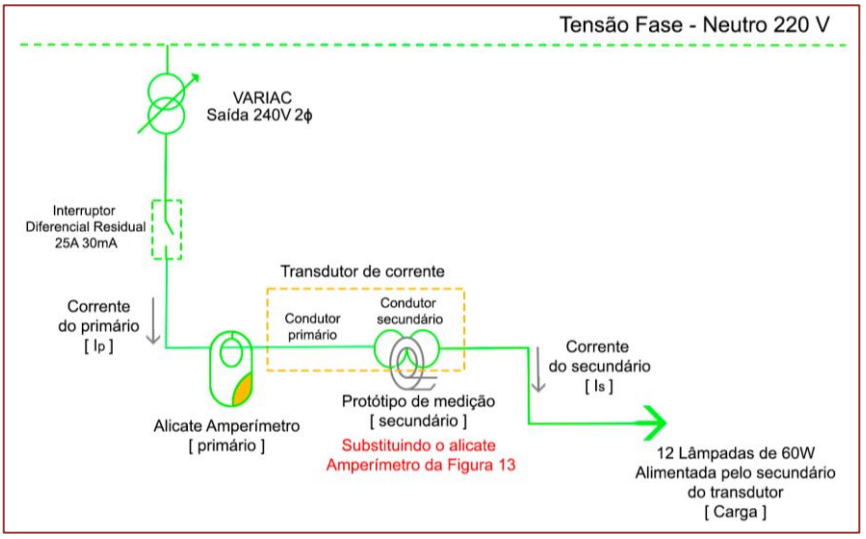
Figura 12: Sistema criado para obter elevadas correntes de medições, sendo a mesma elevada a partir de um transdutor de corrente. Os alicates amperímetros indicam a relação de transformação do transdutor



Fonte: Autoria própria.

Assim, com a relação obtida, o alicate amperímetro do secundário foi substituído pelo transformador de corrente e posteriormente pela bobina de Rogowski, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13: Sistema elaborado para realizar as medições com os protótipos



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, para realizar o processo de medição dos protótipos, efetuou-se a ligação do VARIAC na carga por meio do fio de cobre de 120 mm^2. Para obter uma corrente elevada, recorreu-se do artifício de um transdutor de corrente improvisado, desse modo, utilizando o fio de cobre como condutor primário e o fio de mesma espessura em formato

de infinito como sendo o secundário (I_s), obteve-se uma corrente elevada para alimentar a carga. E imprescindível salientar que os alicates amperímetros, esboçados na Figura 12, foram associados ao circuito de modo a monitorar a corrente do primário e do secundário do transdutor improvisado. Assim, estabeleceu-se a relação de transformação para cada protótipo. Mediante os fatos abordados, as condições almejadas para realizar as medições com o protótipo do transformador de corrente e da bobina de Rogowski, foram atendidas.

5.2. PROTÓTIPO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Perante o sistema projetado para o protótipo do transformador de corrente, o mesmo foi magneticamente associado ao secundário do transdutor improvisado e os seus terminais conectados no osciloscópio. Em seguida, aumentou-se gradativamente a tensão do VARIAC até visualizar o sinal no osciloscópio, registrando então o resultado obtido. A partir daí, zerando a tensão de alimentação do VARIAC e com o IDR (Interruptor Diferencial Residual) atuando, um filtro passa-baixa foi inserido nos terminais do TC. Após esse procedimento, o circuito foi restabelecido novamente. Com o IDR fora de atuação e o VARIAC fornecendo o mesmo nível de tensão do circuito primário, visualizou-se e registrou-se a forma de onda obtida na saída do filtro. A partir da inserção do filtro passa-baixa que também funciona como circuito integrador, procedeu-se com a coleta de dados. Os seguintes parâmetros foram anotados: Correntes medidas nos alicates amperímetros e tensão nos terminais do transformador de corrente. Vale ressaltar que o TC foi acoplado magneticamente no secundário do transdutor improvisado por isso foi importante anotar todos esses parâmetros a fim de achar uma relação equivalente entre a tensão induzida nos terminais do TC e o condutor primário do transdutor de corrente.

5.3. PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI

Perante o sistema projetado para o protótipo da Bobina de Rogowski, o mesmo foi magneticamente associado ao circuito e os seus terminais foram conectados no osciloscópio. Em seguida, aumentou-se gradativamente a tensão do VARIAC até visualizar o sinal no osciloscópio, registrando então o resultado obtido. A partir daí, zerando a tensão de alimentação do VARIAC e com o disjuntor atuando, um filtro passa-baixa foi inserido nos terminais do TC. Após esse procedimento, o circuito foi reestabelecido novamente. Com o disjuntor fora de atuação e o VARIAC fornecendo o mesmo nível de tensão do circuito primário, visualizou-se e registrou-se a forma de onda obtida na saída do filtro.

A partir da inserção do filtro passa-baixa que também funciona como circuito integrador, procedeu-se com a coleta de dados. Os seguintes parâmetros foram anotados: Correntes medidas nos alicates amperímetros e tensão nos terminais do transformador de corrente. Vale ressaltar que a bobina foi acoplada magneticamente no secundário do transdutor improvisado, por esse motivo foi importante anotar todos esses parâmetros, a fim de achar uma relação equivalente entre a tensão induzida nos terminais da bobina e o condutor primário do transdutor de corrente.

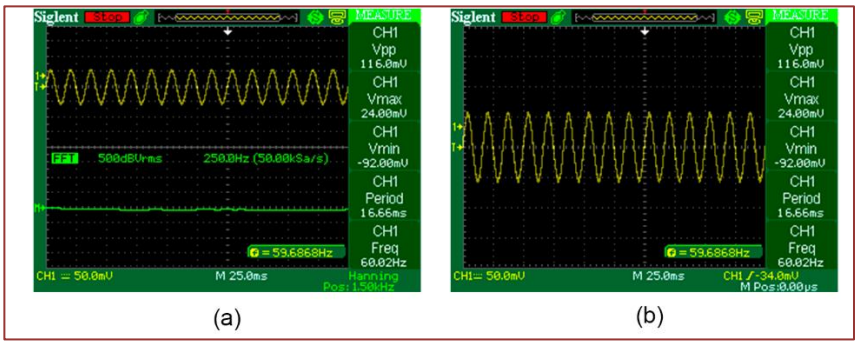
6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1. PROTÓTIPO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Antes de realizar as medições, registrou-se a resposta do transformador de corrente com e sem filtro. Desse modo, no TC o filtro não apresentou muita influência no resultado final

da medição conforme exibe a Figura 14. Isso devido a pequena quantidade de voltas utilizadas no protótipo, o que fez com que o sistema tivesse pouca interferência de ruídos de alta frequência.

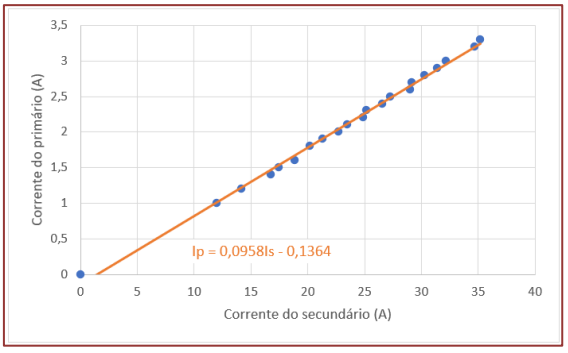
Figura 14: (a) Transformador sem o filtro conectado, (b) Transformador com o filtro conectado



Fonte: Autoria própria.

Assim, conforme ilustra a Figura 12, com o auxílio dos dois alicates amperímetros, obteve-se a corrente do condutor primário e dos enrolamentos do secundário quando aumentou gradativamente a tensão do VARIAC. A partir daí, organizando os dados em um gráfico, designou-se a relação de transformação do transdutor improvisado. A Figura 15, mostra a relação obtida (aproximada) a partir dos valores medidos dos amperímetros.

Figura 15: Aproximação linear obtida da relação da corrente do condutor primário com a corrente do secundário do transdutor de para medição do TC

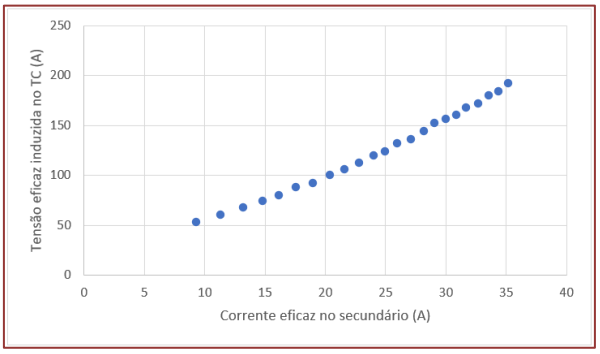


Fonte: Autoria própria.

Destarte, após acoplar magneticamente o transformador de corrente no secundário do transdutor, como ilustra a Figura 13, cuja a corrente estava alimentando a carga, obteve-se em seus terminais uma tensão induzida. Com o aumento gradativo da corrente, observou-se o aumento proporcional da tensão induzida, logo os dados obtidos de corrente e tensão foram dispostos em um gráfico (Figura 16). Visualizando o gráfico, o TC apresentou uma boa resposta para medir correntes acima de 10 A, mostrando que o TC conseguiu atender os valores estipulados, conseguindo medir corrente de até 35 A. Com

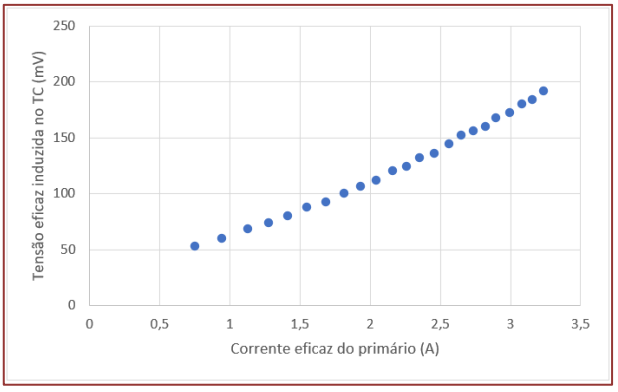
essa equação linear $I_p = 0{,}0958 I_s - 0{,}1364$ designou-se a relação entre a corrente que passa no condutor primário e seu secundário do transdutor, onde foi realizada as medições com o protótipo. Nesse sentido, utilizando o método de regressão linear designou-se a relação entre a tensão induzida nos terminais do TC e a corrente que passa no condutor primário, Figura 17.

Figura 16: Gráfico da tensão RMS induzida nos terminais do TC e a corrente eficaz medida no secundário do transdutor



Fonte: Autoria própria.

Figura 17: Dados da tensão RMS induzida nos terminais do TC e a corrente eficaz medida no primário do transdutor



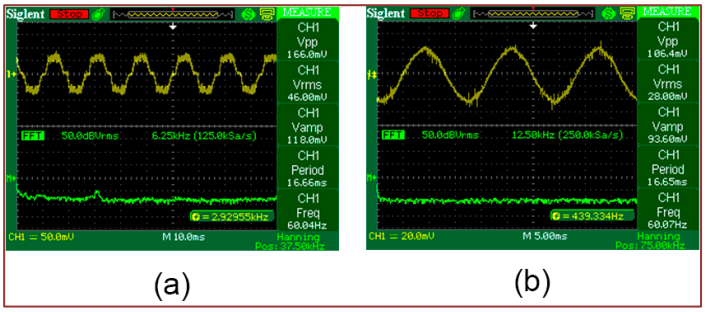
Fonte: Autoria própria.

O transformador de corrente apresentou uma boa resposta conforme o esperado, nesse sentido a projeção feita era de que o transformador de corrente fosse capaz de medir correntes de até 14 A (RMS), induzindo em seus terminais uma tensão de 60 mVp. Nesse aspecto, os valores medidos entre o secundário do sistema e a tensão induzida no TC.

6.2. PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI

Antes de realizar as medições, registrou-se a resposta de bobina com e sem filtro. Conforme ilustra a Figura 18, nota-se a necessidade da utilização do filtro passa-baixa de modo a garantir a eliminação de sinais de frequências elevadas.

Figura 18: (a) Resposta da bobina sem o filtro conectado. (b) Resposta do filtro conectado

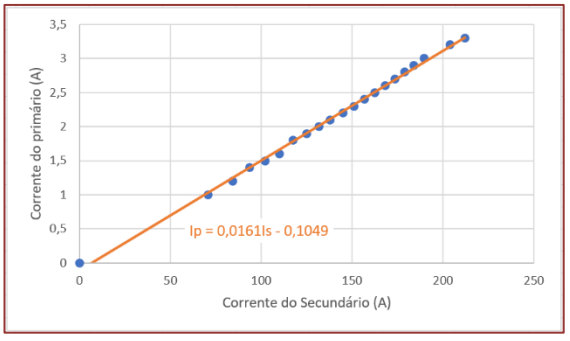


Fonte: Autoria própria.

Ademais, uma análise da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês Fast Fourier Transform) mostrou o espectro harmônico com e sem filtro, conforme ilustrado na Figura 19. Sendo assim, é possível notar que houve atenuação de faixas de altas frequências no sinal conforme o esperado.

Para deduzir a relação de transformação do transdutor improvisado, os dados de corrente do primário e do secundário (Figura 12) foram dispostos em um gráfico para então, por meio de uma aproximação linear, conhecer a relação de transformação desse transformador. Desse modo, conforme mostra a equação linear do gráfico abaixo, a relação obtida ente a corrente do primário e do secundário é: $I_p = 0{,}0161 I_s - 0{,}1049$. O protótipo da Bobina de Rogowski tem a capacidade de medir corrente de até 100 A, por esse motivo estabeleceu-se essa relação de transformação, garantindo então a medição dessa corrente no secundário do transdutor improvisado.

Figura 19: Aproximação linear obtida da relação da corrente do condutor primário com a corrente do secundário do transdutor de para medição da bobina

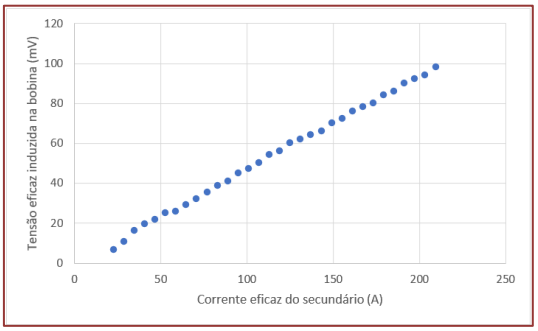


Fonte: Autoria própria.

Destarte, após acoplar magneticamente a bobina no secundário do transdutor como ilustra a Figura 13, cuja a corrente estava alimentando a carga, obteve-se em seus terminais uma tensão induzida. Com o aumento gradativo da corrente, observou-se o aumento proporcional da tensão induzida, logo os dados obtidos de corrente e tensão

foram dispostos em um gráfico (Figura 20). Assim, designou-se a relação linear obtida entre a tensão induzida nos terminais da bobina e a corrente no secundário do transdutor. Portanto, a bobina apresentou grande sensibilidade conseguindo medir uma faixa de corrente muito maior do que a projetada. Através da aproximação linear realizada, pode-se perceber a possibilidade de medição de correntes acima de 200 A conforme ilustrado na Figura 20.

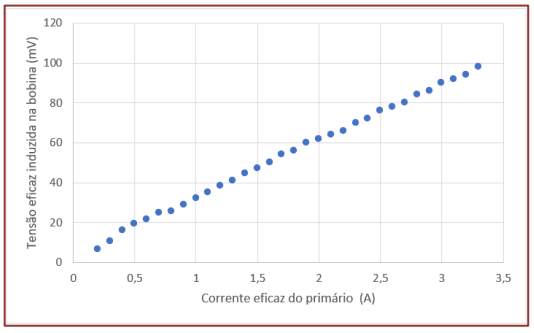
Figura 20: Gráfico da tensão RMS induzida nos terminais da bobina e a corrente eficaz medida no secundário do transdutor



Fonte: Autoria própria.

Por fim, sabendo que a corrente do secundário e do primário do transdutor utilizado tiveram um relação linear, utilizando essa relação, designou-se a proporcionalidade entre o condutor primário do transdutor e a tensão induzida na bobina. Portanto, ao utilizar a equação de relação linear apresentada, tem-se então um gráfico que demonstra a relação entre tensão induzida na bobina e a corrente no condutor primário do transdutor (Figura 21).

Figura 21: Dados da tensão RMS induzida nos terminais da bobina e a corrente eficaz medida no primário do transdutor



Fonte: Autoria própria.

A bobina de Rogowski atendeu bem o que era esperado, por estar bastante sensível, o fluxo magnético ficou concentrado em seu núcleo, sendo assim, tal instrumento conseguiu captar sinais de até 200 A (RMS) em seu primário (secundário do sistema criado) ou ainda 3,3 A no primário do sistema, por esse motivo e como o valor RMS utilizado na modelagem

matemática é uma média, tal instrumento necessita ainda de uma calibração para atuar exclusivamente na faixa de calculada.

7. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostraram que tanto a bobina quanto o transformador de corrente foram condizentes com a teoria.

7.1. TRANSFORMADOR DE CORRENTE

O transformador de corrente apresentou uma resposta não linear, evidenciada pelos gráficos de tensão induzida em seus terminais e correntes. Esse efeito ocorreu devido à presença do núcleo, que traz consigo os fenômenos eletromagnéticos de saturação e histerese. O núcleo do TC favorece a passagem do fluxo magnético e evita correntes parasitas, uma vez que a permeabilidade magnética do aço galvanizado é muito maior do que a permeabilidade do ar, o que resulta em uma baixa relutância do núcleo. Os resultados também demonstraram que, quando utilizado à vazio, o transformador de corrente necessita de um circuito integrador. Apesar de seus benefícios, o núcleo do TC traz perdas que podem aumentar exponencialmente com o aumento da temperatura.

Embora o transformador de corrente apresente um baixo custo de fabricação, sua execução apresentou grandes dificuldades. Diferentemente da bobina de Rogowski, o TC não pode ser aberto e acoplado diretamente no circuito devido ao seu núcleo, além de ser mais pesado. Além disso, o transformador de corrente atua em uma faixa de tensão menor do que a bobina de Rogowski, embora seja mais eficiente na captura do sinal.

7.2. BOBINA DE ROGOWSKI

A bobina de Rogowski é um instrumento que não apresenta um núcleo ferromagnético, sendo assim, não é afetada pelos fenômenos eletromagnéticos de saturação e histerese. Isso pode ser observado nas respostas lineares obtidas nos gráficos de tensão x corrente. Além disso, a bobina não possui perdas no núcleo. A bobina de Rogowski também apresentou a capacidade de medir elevadas correntes, na faixa de aproximadamente 0 a 200A RMS. Por não ter núcleo, a bobina é bastante flexível, podendo ser acoplada, de modo não invasivo, em diversos sistemas elétricos. Ademais, este dispositivo teve um baixo custo de construção e apresentou facilidade de construção.

No entanto, a bobina de Rogowski apresentou uma grande banda de passagem de frequência, resultando em ruídos no sinal de saída. Por esse motivo, foi necessário o uso de um filtro passa-baixa para filtrar o sinal medido. Esse circuito também foi utilizado como condicionamento do sinal. Como cada instrumento de medição tem uma faixa de atuação específica, que é determinada pelas características físicas e elétricas do dispositivo, a bobina projetada apresentou melhor comportamento quando utilizada em sua faixa nominal de projeto de frequência e corrente.

REFERÊNCIAS

[1] S. C. M. Goveia, “Transdutor de corrente do tipo bobina de Rogowski,” vol. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

[2] D. Halliday and R. Resnick, Fundamentos de Física: Eletromagnetismo, vol. 3. 2016.

[3] L. de Sousa Oliveira, “Implementação de protótipos de bobina de Rogowski para medição de corrente elétrica alternada”. Projeto final de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia, 2022.

[4] E. Abdi-Jalebi and R. McMahon, High-performance low-cost rogowski transducers and accompanying circuitry. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56. 2007.

[5] A. Malvino and J. D. Bates, Eletrônica, vol. 2, 7ª ed. bookman, 2007.

[6] G. Carvalho, Maquinas Elétricas: Teoria e Ensaios. vol. 1, 4ª ed. Editora Erica - Sob Demanda, 2006.

Capítulo 11

Comparativo entre as soldagens aluminotérmica e de topo com centelhamento em trilhos ferroviários

Artur Angelo Carvalho Martins
Carlos Eduardo Xavier Teixeira
Tarcísio Vieira Lisboa Araújo
Mayssa Alves da Silva Sousa

Reusmo: No cotidiano das indústrias, existe a necessidade de unir materiais diferentes ou análogos por determinações de projeto, as quais as peças finais tem que seguir. Para atingir tais especificações, é necessário que seja utilizada, na maioria dos casos, a soldagem. Dentre os processos de soldagem mais comuns na área ferroviária brasileira quando se trabalha com os trilhos, tem-se a soldagem aluminotérmica e a soldagem de topo com centelhamento. Nesse artigo, buscou-se, diante de uma revisão de literatura, comparar algumas características do produto desses processos, como a durabilidade da solda, confiabilidade e segurança, a fim de subsidiar a escolha do processo adequado e ressaltar os pontos de atenção que cada tipo de solda exige. Percebeu-se que a Solda de Topo com Centelhamento apresentou menor de tempo para sua realização, principalmente pelo maior controle do processo executive. Conclui-se que a Solda Aluminotérmica é indicada essencialmente para manutenção de trilhos, tendo como resultado um produto susceptível a defeitos que dificilmente ocorreriam na Solda de Topo com Centelhamento. Por outro lado, apesar da maior durabilidade, qualidade e segurança, destaca-se sua necessidade de equipamentos sofisticados e ótimo planejamento de execução, em decorrência de sua maior complexidade.

Palavras-chave: Soldagem Aluminotermica; Soldagem de topo de centelhamento; Área ferro- viária brasileira; Comparação.

1. INTRODUÇÃO

O sistema ferroviário possui enorme importância para a história e economia no Brasil. Apesar de ter sofrido um período de negligência, segundo Sousa (2016), atualmente o setor ferroviário está apresentando um cenário evolutivo positivo, devido principalmente à demandade reduzir os custos logísticos e a necessidade de acelerar o escoamento da produção agrícola,de produtos siderúrgicos, de minérios e de produtos derivados de petróleo.

Segundo a ANTF (Associação Nacional dos transportadores ferroviários, 2021), o transporte ferroviário, se comparado às rodovias, possui uma pequena participação no total da matriz de transporte no Brasil. Entretanto, para o escoamento de minério e produtos agrícolas,esse modal se mostra de extrema importância, sendo responsável pelo escoamento de 90% dosminérios que chegam aos portos e de 42% dos produtos agrícolas exportados.

Dessa forma, pela importância das malhas ferroviárias na economia do Brasil, é neces-sário investimentos contínuos em tecnologias nos diversos elementos que compõem o modal ferroviário, o que acaba favorecendo uma maior competitividade entre as empresas e também uma melhor eficiência.

Dentre as tecnologias desenvolvidas no ramo ferroviário, podemos destacar os tipos de soldagem utilizados. De acordo com Rosa (2008), os trilhos estão para a ferrovia assim como aestrada está para o modal rodoviário. Ou seja, essa estrutura é a responsável por guiar o material rodante na ferrovia, estando submetida aos desgastes devidos as condições de carregamento. Para serem assentados na via, os trilhos precisam ser soldados. Para isso, a soldagem alumino-térmica e a soldagem de centelhamento são utilizadas.

Segundo Nishikawa (2018), o surgimento da pressão no mercado gerado pela compe-titividade das empresas ocasiona o aumento do peso transportado por eixo, ou seja, aumenta-seo volume de carga e diminui-se o tempo de viagem. No entanto, devido a esse aumento na cargae na velocidade, ocorre um maior desgaste no conjunto roda-trilho.

Devido aos desgastes no conjunto roda-trilho, manifestam-se patologias na extensão da malha ferroviária, como por exemplo, o fenômeno da deterioração estrutural, que segundo Ribeiro (2018), é a causa típica de falha de trilhos modernos que envolve fadiga de controle de deformação. As juntas de soldas são as partes mais frágeis e essa característica afeta negativa-mente na vida útil das ferrovias.

Para coibir esses problemas que acabam surgindo, é necessário investigar o impacto dos processos de soldagem, com o objetivo de prevenir as falhas e acidentes. Dessa forma, este trabalho estuda os dois tipos de soldagem mais utilizados na indústria ferroviária, suscitando oprocesso de cada uma e também proporcionando um comparativo entre as duas, para que seja possível determinar suas qualidades e defeitos.

Com isso, o objetivo geral do trabalho é fazer um estudo comparativo, onde serão con-frontadas as diferentes técnicas e aspectos entre as características dos processos de soldagem aluminotémica e da soldagem de topo de centelha. Mais especificamente, objetiva-se:

- Estudar o procedimento de soldagem por centelhamento e aluminotérmica de trilhos ferroviários;

- Desenvolver um comparativo entre a qualidade, durabilidade e tempo das duas soldas, para determinar a mais vantajosa;
- Desenvolver um trabalho que sirva de base de conhecimento e consulta para futurospesquisadores na área de soldagem de trilhos ferroviários;

Por fim, para atingir os objetivos, geral e específico, iniciou-se o trabalho com a realiza- ção de uma revisão bibliográfica. Nessa etapa, aprofundou-se acerca dos processos de soldagem aluminotérmica e soldagem por centelhamento, sendo apresentado suas etapas e os fatores queinfluenciam no processo de soldagem.

Em segundo momento, realizou-se uma pesquisa sobre a qualidade e durabilidade das duas soldas, direcionando o estudo para características semelhantes entre as duas soldas, para poderdesenvolver um comparativo entre as duas.

Posteriormente, foi possível desenvolver uma visita em um estaleiro que utiliza a soldapor centelhamento. Lá, foi-se demarcado o tempo decorrente no processo de soldagem e tam- bém, por meio de pesquisa entre os trabalhados, foi encontrado um intervalo de tempo médio para a execução da soldagem.

Em seguida, para a obtenção do tempo de execução da soldagem aluminotérmica, foi realizada uma visita em um ponto do Terminal Ferroviário Ponta da Madeira (TFPM), em SãoLuís- MA, onde estava sendo realizada tal soldagem. Por fim, realizou-se o comparativo entre as duas soldas, identificando quais as vanta- gens que cada uma trás no setor ferroviário.

2. PROCESSO DE SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

A soldagem aluminotérmica é realizada em campo, diferentemente da soldagem por topo com centelhamento. De acordo com Lobato e Lima (2022), pode-se defini-la como a fusão de uma liga (porção de solda) por reação exotérmica (liberação de calor). Os mesmos autores ainda definem o seguinte esquema (Figura 1) para descrever a soldagem aluminotérmica.

Essa reação acontece em um cadinho, onde o material fundido irá preencher os vaziose os trilhos irão se unir em uma única peça. Esse método de soldagem objetiva a fabricação de trilhos longos contínuos, eliminação de talas metálicas e reparação de fraturas nos trilhos.

Figura 1: Esquema Soldagem Aluminotérmica



Fonte: Autores, 2022.

Dando continuidade aos processos dessa soldagem, têm-se os materiais utilizados. Segundo Lobato e Lima (2022), no Brasil, há dois fornecedores de materiais para solda, a Thermite a Pandrol (sendo a segunda evidenciada na Figura 2), no qual cada fabricante possui as suas especificações e portanto, o soldador deve ser treinado para cada procedimento dos fornecedores.

Figura 2: Materiais de Soldagem Aluminotérmica da Pandrol



Fonte: Pandrol, 2018.

Enumerando os materiais utilizados nos processos de soldagem, Lobato e Lima (2022) destacam: a porção de solda, acendedor ou ignitor, fôrma, cadinho, pasta ou areia de vedação. Os seguintes itens são melhor descritos na Figura 3, a seguir:

Figura 3: Materiais da solda aluminotérmica

MATERIAL	DESCRIÇÃO
Porção de Solda	É composto pelos componentes químicos: Fe2O3 + 2Al + (Mn, Si, Cr)
Acendedor ou ignitor	É um fosforo que precisa de um maçarico para acendê-lo
Fôrma	A fôrma armazena o material fundido da porção de solda
Pasta/areia de vedação	Auxilia cobrindo as frestas da fôrma, para que o material não vaze
Cadinho	Objeto de contenção onde ocorre a fundição da solda

Fonte: Autores, 2022.

Lobato e Lima (2022) enumeram algumas condições dos trilhos e das juntas a serem levadas em conta na hora da soldagem, sendo elas as seguintes:

- Os trilhos a serem soldados não devem apresentar defeitos superficiais na região de soldagem como: deformações, trincas, empenos e furos abertos com maçarico;
- Recomenda-se que os trilhos a serem soldados não contenham furação. Existindo a furação, esta deve ser emassada com massa de vedação;
- Os topos a serem unidos pela solda devem corresponder-se, permitindo os alinhamentos horizontal e vertical pela linha de bitola entre os trilhos;

- Os trilhos e/ou barras devem estar alinhados e com correspondência entre os topos de forma a garantir uma folga entre os trilhos especificada pelo fornecedor da porção de solda de acordo com o processo de soldagem a ser utilizado;
- As pontas defeituosas, como esmagamentos, fissurações da furação ou outros defeitos, devem ser eliminados por corte;
- O corte do trilho deve ser a frio, com serra ou disco de corte (conforme Figura 4) ;

Figura 4: Corte do Trilho



Fonte: SAIT, 2020.

Lobato e Lima (2022) apresentam o passo a passo da realização do processo de soldagem, o qual, em suma, envolve a limpeza da área que será realizada e a fixação das pontas dos dois trilhos. Seguido da montagem das formas e a vedação das mesmas. Já o processo reativo dessa soldagem inicia-se a partir do posicionamento do cadinho, o pré aquecimento do trilho e da ignição da porção. Por fim, são retiradas as formas e feitos os acabamentos finais após um período de resfriamento da solda. Na Figura 5, é apresentado um fluxograma desse processo.

Figura 5: Fluxograma passo a passo da soldagem aluminotérmica



Fonte: Autor, 2022.

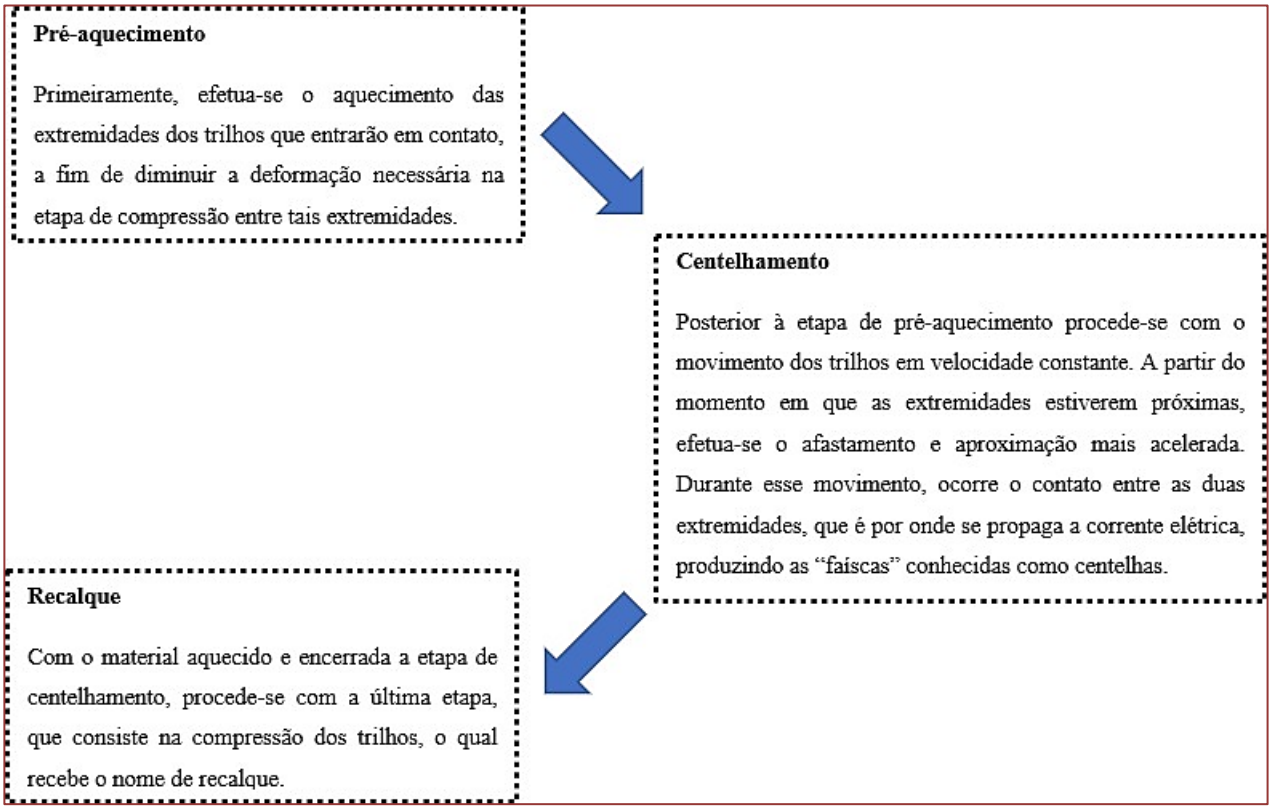
3. PROCESSO DE SOLDAGEM TOPO COM CENTELHAMENTO

Como dito anteriormente, a soldagem por topo de centelhamento não é executada em campo, mas sim, em estaleiros. De acordo com Bauri (2020), essa soldagem ocorre por meio de uma resistência elétrica, no qual a junção das partes é dada pelo calor gerado a partir da resistência à passagem de corrente elétrica (efeito Joule) e a pressão exercida

nas regiões de contato das peças a serem soldadas. Além disso, o aquecimento das peças promove a fusão localizada das superfícies de ligação.

Para a realização desse tipo de soldagem, de acordo com Bauri (2020), devemos seguiro seguinte fluxograma:

Figura 6: Fluxograma passo a passo da soldagem topo com centelhamento



Fonte: Autor, 2022.

4. QUALIDADE E DURABILIDADE DAS DUAS SOLDAS

Os processos de soldagem, a depender do fabricante, podem apresentar detalhes específicos que condicionam a garantia dos materiais que serão utilizados na solda. Assim, é de suma importância que as equipes de soldagem passem por reciclagens periódicas, mantendo-se atualizados com as condições de cada fabricante e os processos mais atuais de soldagem.

Ademais, é importante que os responsáveis pela fiscalização e soldadores sejam certificados pelos fornecedores da solda, a fim de otimizar o controle de qualidade. Além disso, nocaso de solda aluminotérmica, para o perfeito cumprimento dos requisitos de execução é neces-sário que os soldadores da frente de trabalho estejam em posse de um exemplar do manual de soldagem aluminotérmica.

No que tange aos aspectos que afetam a qualidade, na solda aluminotérmica, destaca-se que diversos autores (MYERS, 1982; OFFEREINS, 2004; DA SILVA, 1998) observaram a variação de dureza no perfil da solda, apesar de não apresentarem justificativas. Aliado a isso, autilização de equipamentos menos sofisticados do que aqueles usados em estaleiros

ocasionamalguns defeitos que prejudicam o desempenho da via permanente.

Nesse contexto, um dos principais defeitos são as **Black Holes** (Figura 7), que são vazios que surgem no canal de alimentação da solda, ocasionados pela introdução de gases. Esses poros, assim como ocorre em peças de concreto, diminuem a resistência do elemento.

Figura 7: Solda com porosidade



Fonte: WTIA, 2015.

Outro defeito muito comum é a contração da solda, que ocorre, geralmente, na última camada de solidificação. Esse tipo problema é ocasionado, dentre outros motivos, pelo pré- aquecimento insuficiente e movimento da junta anterior à conclusão de solidificação da solda.

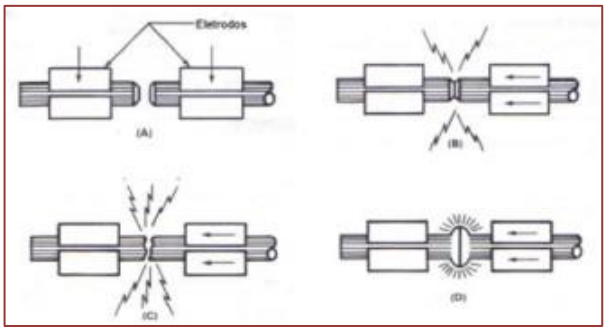
O último defeito, a título de exemplo, é a inclusão de areia. Esse problema ocorre quando a vedação, material utilizado para separar a solda do meio externo, entra em contato com a chama no pré-aquecimento ou com o metal líquido que irá unir os dois polos do trilho.

Esses defeitos demonstram algumas desvantagens de um processo utilizado in loco, principalmente por causa da impossibilidade de se obter o mesmo grau de controle que ocorre nos estaleiros.

Tendo isso em vista, percebeu-se a necessidade da utilização de outros processos de soldagem para a fabricação de soldas mais duráveis e resistentes, como a solda por centelhamento.

Nesse tipo de solda, onde há a ligação de dois polos por meio de centelhas, há a mitigação, ou até mesmo solução, de alguns problemas acentuados na solda aluminotérmica. Por exemplo, após a aplicação da corrente elétrica e consequente aquecimento das superfícies, dá-seprosseguimento ao processo com a aplicação de uma força de compressão de uma extremidade do polo em relação a outra (Figura 8), com o objetivo de redução ou eliminação das possíveis porosidades geradas, que, por sua vez, já se apresentam em menor quantidade se comparado com o outro processo, em decorrência do maior de controle de qualidade.

Figura 8: Soldagem de topo por centalhamento



Fonte: GOMES FILHO, 2007.

Além disso, esse processo comporta etapas adicionais, que se caracterizam, principalmente, pelo pós-aquecimento. Essa etapa também visa solucionar um dos defeitos apresentadosna solda anterior, que é a retração das juntas, onde a corrente elétrica regula a temperatura do material a fim de melhorar suas propriedades mecânicas.

Conforme o exposto não só nesse tópico, como também ao longo do trabalho, percebe-se a superioridade da solda de topo por centelhamento na durabilidade e qualidade, considerando a resistência e diminuição de defeitos.

5. TEMPO DE EXECUÇÃO DAS DUAS SOLDAS

O setor ferroviário, como área logística, tem que atentar-se a um fator crucial em suas atividades, o tempo. Todas as atividades realizadas sejam de manutenção ou operação devem ser planejadas e executadas de tal maneira que demandem não só o menor custo e impacto, como também o menor tempo. Um lote parado no setor ferroviário impacta significativamente no frete desses serviços e, posteriormente, em seu valor final. A soldagem, como atividade desse setor, também deve ser planejada e controlada no momento de sua execução para que se tenha uma solda de qualidade em um tempo hábil.

A solda topo centelha apresenta processos bem mais robustos e controlados devido a sua característica fabril pela utilização de maquinas pesadas. Em uma visita in situ em um estaleiro que utiliza desse modelo de soldagem pôde-se acompanhar o processo de uma solda e encontrou-se o tempo de 42 minutos para a realização desse processo (desde a limpeza das extremidades dos trilhos até o esmerilhamento final). Em entrevista realizada com os funcionários destacou-seque cada solda dura em torno de 40-60 minutos a depender do acabamento.

Ademais, têm-se um processo diferente na soldagem aluminotérmica. Por ter etapas mais manuais que a anterior há uma dificuldade em atingir um tempo médio desse processo tão precisamente, já que uma solda será realizada num local com condições diferentes da outra,levando, assim, a tempos variados. Apesar disso, em uma visita in situ da execução de uma solda aluminotérmica pôde-se encontrar o tempo de 68 minutos para sua realização, a contar da etapade nivelamento e alinhamento das extremidades do trilho (pós corte) até o acabamento final da solda.

6. CONCLUSÃO

Mediante o exposto no presente trabalho, conclui-se que a Solda Aluminotérmica é adotada, primordialmente, para trabalhos *in loco*, como manutenções, enquanto a Solda de Topo com Centelhamento é utilizada em estaleiros, onde o aparato ferramental é mais robusto. Além da diferença entre os equipamentos utilizados, nota-se, também, que o controle de qualidade nos estaleiros é maior, permitindo que, juntamente com processo executivo diferenciado, ocorra a mitigação, ou até mesmo solução, de defeitos de ocorrência comuns no outrotipo de solda supracitado, o que influencia na resistência e confiabilidade da solda.

Em consonância ao que foi citado, percebeu-se também uma diferença entre o tempo de execução exigido por cada tipo de solda, na qual os acompanhamentos *in loco* demonstraram que a Solda deTopo com Centelhamento apresentou menor de tempo para sua realização, principalmente pelo maior controle do processo executivo já mencionado.

Portanto, conclui-se que a Solda Aluminotérmica é indicada essencialmente para manutenção de trilhos, tendo como resultado um produto susceptível a defeitos que dificilmente ocorreriam na Solda de Topo com Centelhamento. Por outro lado, apesar dessa última solda ci-tada apresentar maior durabilidade, qualidade e segurança, destaca-se sua necessidade de equi-pamentos sofisticados e ótimo planejamento de execução, em decorrência de sua maior complexidade.

REFERÊNCIAS

[1] BAURI, Luiz Felipe. Soldagem com Topo de Centelhamento de trilhos ferroviários: caracte- rização microestrutural, propriedades mecânicas e desgaste. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

[2] LOBATO, Paulo; LIMA, Laura. Trilhos Ferroviários: Solda Aluminotérmica. Disponível em: https://www.brferrovia.com.br/post/trilhos-solda-aluminotrmica. Acesso em: 09/12/2022.

[3] NEGREIROS, Yuri Soares. Estudo da alteração dos parâmetros de solda a topo por centelha- mento para aumento de produção de bobina a quente decapada (bqd). Dissertação (Monografia) – UFC - Universidade Federal do Ceará, 2014.

[4] NISHIKAWA, Lucas Pintol. Soldagem de trilhos ferroviários perlíticos: origem das microestruturas. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.

[5] RIBEIRO, Danielle Domingos. Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por Centelhamento. Trabalho de Con- clusão de Curso – TCC, 2018.

[6] ROSA, Júlio César da Silva. Avaliação de soldagem aluminotérmica em ângulo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2008

[7] SILVA, Cláudio Mariano da. Perfil de dureza e composição química da solda e regiões afetadas pela solda aluminotérmica de trilhos empregados por uma empresa mineradora. Dissertação (Monografia) – UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

[8] SOUSA, Mayssa Alves da Silva. Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da estrada de ferro carajás para uso como camadas de pavimento rodoviário. Dissertação (Mes- trado) – Instituto Militar de Engenharia, 2016.

[9] VALE. Departamento de engenharia e Desenvolvimento Logístico. Manual técnico de via permanente. Belo Horizonte, 2013.

Capítulo 12

Concentration in the electricity market: A return to the old paradigm?

Sandra de Souza. Xavier
Mariana Padilha Campos Lopes
Monique Pinheiro Coimbra

Abstract: The market structure of the electricity distribution segment is delineated through mergers and acquisitions. These movements are affected by the current regulatory model, which may favor a certain scale size over another. Although several papers analyze the Brazilian electricity distribution segment, Business Groups (BGs) are usually neglected in efficiency analysis. In this context, the paper evaluates the efficiency of the BGs that make up the Brazilian electricity distribution segment. To this end, three models - based on the Data Envelopment Analysis - were developed to evaluate global, technical, and scale efficiency. On average, the groups obtained the value of 0.60 for global efficiency, 0.76 for technical efficiency, and 0.80 for scale efficiency. Under the technical efficiency frontier, approximately 24% of operating costs could be reduced, translating into an average drop in the tariff of R$ 65 in the year 2017. This study contributes, in an empirical manner, to a greater understanding of the phenomenon of market concentration in natural monopolies.

Keywords: Electricity Distribution, Incentive Regulation, Data Envelopment Analysis, Business Groups.

ANEEL - National Agency of Electric Energy
ANOVA - Analysis of Variance
BGs - Business Groups
CEB - Energy Company of Brasília (*Companhia Energética de Brasília*)
CR - Concentration Ratio
CRS - Constant Return to Scale
CSV - Composite Scale Variable
DEA - Data Envelopment Analysis
DMU - Decision-Making Units
GE - Global Efficiency
SE - Scale Efficiency
TE - Technical Efficiency
VRS - Variable Returns to Scale

1. INTRODUCTION

Before the 1990s, the global power sector was vertically integrated, with a single company dominating the entire process of generation, transmission, distribution, and trading. In addition to vertical integration, the sector was not subject to competition, given the prevalence of state monopolies. The form of regulation employed was Cost of Service, which did not encourage efficiency and resulted in high tariffs for consumers. The prevailing paradigm was the exploitation of economies of scale to provide a unified service through ownership of the entire production chain.

As of the 1990s, the electricity sector was subjected to several structural reforms, to make the utilities more efficient and economically autonomous, through mechanisms of competition, privatization, and pricing. The sector was segregated into four segments: generation, transmission, distribution, and commercialization. The objective - in line with minimal state economic thinking - is to encourage free competition in the possible segments, while regulation would remain in transmission and distribution due to their natural monopoly characteristics. This has been the new paradigm of the electricity sector since then, which seeks to overcome the flaws of previous model and maximize social welfare.

Incentive Regulation is present, mimicking market forces by limiting prices, establishing technical standards, and encouraging efficiency. Among the possible tools used for this purpose is benchmarking, which can be defined as a comparison between similar companies to establish a standard performance.

In the last twenty years, the Brazilian electric power distribution segment has been the object of study in several pieces of scientific research, motivated by the change from Cost of Service Regulation to Incentive Regulation.

Xavier, *et al.* (2015) proposed that the efficiency analysis of Brazilian distributors be conducted as Unit Networks - smaller parts of the distributor - motivated by the wide heterogeneity present in the country. Despite the originality in the selection of the evaluated units, the focus of the referred paper is on internal benchmarking to improve business performance.

In a complementary manner, Altoé *et al.* (2017) analyzed the relationship between technical efficiency and some financial variables in the years from 2006 to 2009. The regressions performed indicated that only the size of the company and the previous year's

revenue were statistically relevant to explain the differences between technical efficiencies.

Xavier, *et al.* (2018) proposed the adoption of total costs in the efficiency analysis model of Brazilian electric power distributors. The impact would be a possible reduction of around 7% of total costs. This efficiency gain would benefit consumers, through a cheaper electricity tariff.

With a more economic bias, Brandão *et al.* (2021) analyzed the performance of Brazilian distributors, clarifying why their earnings were, on average, below the limit allowed by the regulator. The main determinant identified was the adverse market effect, which was probably motivated by the economic crisis during the period evaluated.

Despite the aforementioned papers, studies that investigate the large BGs that operate in the electric power distribution segment are required.

On the business side, there are several reasons for integration, including economies of scope. Indeed, shared operation and maintenance staff and support departments, such as regulatory and legal, allow for cost savings. Similarly, managing two or more distribution networks at the same time allows for significant cost savings. On the other hand, interacting with these complex BGs can be difficult for both regulators and competitors, especially due to ignorance of the magnitude of cost savings. The result: high information asymmetry and reduced market transparency (Calzolari and Scarpa, 2016).

In the business media, frequent news is released about mergers and acquisitions in Brazil and worldwide. In 2020, 1,117 mergers and acquisitions were registered in Brazil, the fiscal year with the second highest number of transactions of this kind in the last 20 years (KPMG, 2021). The transactions, with announced value, totaled US$ 26.4 billion (PWC, 2021). Energy companies completed 56 transactions in 2020, the second-highest value in the last 20 years, accumulating 688 transactions in the period from 2001 to 2020.

Given this context, this paper seeks to fill the gap in previous research and shed some empirical light on the efficiency of BGs that comprise the Brazilian electric power distribution segment. For this, the paper presents a brief review of Business Groups, concepts, types, and concentration levels.

2. BUSINESS GROUPS

2.1. WHAT ARE BUSINESS GROUPS?

The concept of Business Groups (BGs) represents a recent phenomenon in economic theory. Classical economists, such as Smith and Ricardo, asserted that the individual search of agents for their private interests would lead, by itself, to an increase in social welfare (Gonçalves, 1991). There was not, therefore, in the classical theory, the idea of cooperation between different firms.

In the work "Capital", by Karl Marx, it is possible to observe the idea that the accumulation of capital would lead to centralization, with the largest capitalists absorbing the smallest, and the concentration of production capacity in large companies, through the expansion of the production base (Gonçalves, 1991). However, the author also does not explore the concept of collaboration among these capitalists.

In neoclassical microeconomics, on the other hand, when faced with the study of oligopolies, one observes the construction of cooperation between firms through

alliances, in which companies enter into agreements to establish prices and quantities produced to maximize their profits, forming cartels. However, the idea of BGs is not developed in this theory either (Gonçalves, 1991).

Thus, it can be noted that it took some time for theorists to recognize that firms would gather into larger social entities where there was cooperation. During the 1980s, with the economic success of Japan and South Korea, it was realized that the identity of individual firms in these countries was less significant and was subordinated to that of larger groups with which they were interconnected. The new interest in Japan's *keiretsu* and South Korea's *chaebol* highlighted the importance of BGs in modern capitalism (Khanna and Rivkin, 2001).

BGs can be understood as a particular form of corporate organization, universalized in emerging markets and some developed economies, acquiring different forms and compositions (Chang, 2013; Khanna and Yafeh, 2007). Over the past decades, the literature on the BGs presented not only a diversity of definitions but also theoretical perspectives around their participation in the structuring and concentration of markets (Yiu *et al.*, 2007). Nevertheless, contrary to the concept that BGs are a result of market imperfections, these groups have emerged as a dominant form of governance, before and after the consolidation of pro-market reforms, acquiring even more relevance in the period following the 1990s and, specifically, the restructuring verified in the electricity sector (Bucheli *et al*., 2019).

Despite the growing importance of BGs today, there is still no definitive consensus on their definition. In this paper, a broad definition will be used: BGs are a set of firms that, although legally independent, are linked by different economic or ownership ties, through which they carry out coordinated actions seeking to achieve common goals (Granovetter, 1995; Khanna and Rivkin, 2001; Pattnaik *et al*., 2018) This means that, although they are legally separate entities, the member companies have limited autonomy, since they are subject to interventions by the lead company (Popli *et al.*, 2017).

The absence of a categorical definition of a BG is partly fostered by two reasons. First, there are differences in the concepts and organizational structures associated with each group for each country (Khanna and Yafeh, 2007). Second is related to the diversity of perspectives adopted in the analysis of BGs as the theory of transaction costs, a political-economic perspective, and the agency theory. Through these, researchers explain the emergence of BGs as a response to the external environment (Yiu *et al.*, 2007).

According to Coase (1937) and Williamson, (1981) transaction costs play a decisive role in the choice of organizational structures. These costs are associated with the use of market mechanisms to satisfy the needs of the company and occur to a greater or lesser extent in all sectors. From this perspective, any transaction implies costs, whether preparation, follow-up, or monitoring of contracts. They are due to human factors - such as bounded rationality and opportunism - and to the complexity of the processes - imperfect information and uncertainties concerning contractual issues. Therefore, firms organize themselves into groups to increase their productivity through the internalization of these costs (Gonçalves, 1991). In this perspective, where there are high levels of transaction costs, the BGs show themselves as more efficient organizational structures than independent companies (Borda *et al*., 2017).

Researchers who adopt a political-economic perspective consider BGs as a means of promoting state control and fostering industrial development (Khanna *et al*., 2004). To this end, the state invests, directly or indirectly, in large groups that operate in sectors

considered strategic for the economy (Karl J. Fields, 1995; Kim *et al.*, 2005). However, this perspective views BGs dubiously: they act as government instruments for carrying out industrial development policies; and as political agents, exerting influence over the political-economic system for their benefit.

Agency Theory perceives BGs as a set of relationships between majority and minority shareholders, where the former seeks to appropriate the wealth of the latter. The theory has been useful to examine a specific organizational structure, one in which a leading company holds most of the shares and raises capital through other investors, who share the business risks *(Bebchuk et al.*, 2000). The majority shareholders ensure that management acts as desired, assigning strategic positions to people they trust. The advantage of this mechanism is to overcome the agency problem between majority shareholders and managers, but it raises another, perhaps more serious problem: managers acting exclusively for the benefit of the majority shareholders, neglecting the others. Therefore, agency problems do not exist between owners and managers, but among shareholders (Dharwadkar *et al.*, 2000).

Emerging countries, such as Brazil, are characterized by market imperfections that are not perceived in developed countries, recognized for having reliable and specialized institutions (Borda *et al.*, 2017). These market imperfections result in high transaction costs, which are even more significant in the electric power distribution segment, due to the asset specificity and the high interdependence among the different agents of the production chain. In addition, in this segment, the regulator has an essential role in guaranteeing the quality of supply, with fair prices for consumers. The central importance that the electricity sector has for the development of a country requires an alignment between utilities and government so that political-economic stability is maintained. Therefore, the three perspectives must be considered in the analysis of BGs in the Brazilian electricity distribution segment.

2.2. WHAT ARE THE TYPES OF BUSINESS GROUPS?

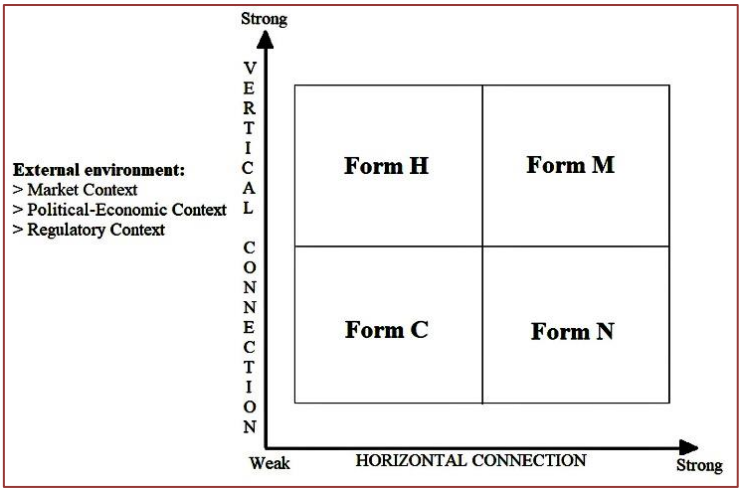
BGs represent strategic choices made by managers in response to environmental pressures, considering the different perspectives previously described. According to Ahmad (2018), BGs benefit from economies of scale and scope to minimize transaction costs and make asset allocation more efficient, resulting in better performance of member companies.

The internal mechanisms of BGs can be understood through a two-dimensional approach, in which the horizontal connection and the vertical connection between firms are measured (Yiu *et al*., 2007). The first dimension focuses on the relationship and degree of interdependence between different group members. Although legally independent, the member firms have a synergistic relationship among them. Thus, this dimension will address the various roles that each group member will play for the collective. The second dimension deals with the ownership control of resources. Although horizontally connected, there is, to a greater or lesser extent, a command hierarchy within BGs. Generally, this structure is concentrated in the holding company, which exercises control over other companies. Therefore, this dimension focuses on the vertical structure.

Based on this two-dimensional approach, it is possible to define four different forms (N, C, H, and M) for BGs. **Figure 1** illustrates the relationship between the external

environment, the two-dimensional approach, and the possible forms of organizational structures.

Figure 1: Companies' response to changes in the external environment



Source: authors' preparation.

In Form N, the vertical link between the groups is weak, as there is no well-defined command hierarchy. However, the leading firm maintains its control over the group through transactions and sharing of resources with the other firms. Thus, the leading firm focuses on one sector, while the other firms act as technology suppliers, or in the intermediary market, forming a horizontally connected network.

In Form C, BGs are linked through a presidential group or the formation of business groups, developing more complex structures than in form N, as each member can be a large corporation composed of numerous subsidiaries and individual firms. This type of Business Group may provide a platform or infrastructure for sharing strategic information and funding, and involve coordination of members in pursuit of mutual benefits. Hence, this type of group is not strongly verticalized. However, the horizontal connection is not as significant as in form N, since the level of interdependence among firms is lower.

However, in Form H, the degree of vertical linkage is high, as a holding company has corporate control of the group's member companies, which are described as affiliates of the parent company. Affiliates act as subsidiaries by receiving internal investments; however, they are legally independent of their parent company. BGs of this type share similar structural arrangements to conglomerates, in which a holding company invests in part or all in the ownership of individual firms that have operated in different markets. Thus, it is common for form-H BGs to be highly diversified. By achieving a high level of shareholding, the holding company can exercise more direct control over the management of affiliated firms and even appropriate some of their revenues.

Finally, in Form M, the main firm acts as headquarters, investing in the ownership of affiliates according to its strategic objectives. By operating in correlated sectors, the firms in the group benefit from the sharing of resources and technology. Thus, as far as horizontal connection is concerned, the affiliates of this group have divisions similar to those of an form-N group. When analyzing the other dimension, however, a structure

closer to the form-H BGs is observed in this type, with stronger vertical links, due to the command hierarchy and property hierarchy being well defined.

In the electric energy distribution segment, the BGs organized as M are predominant. The power sector has complex characteristics that differentiate it from other sectors of economic activity, among them: asset specificity, the presence of externalities along the production chain, the degree of transaction uncertainty, the difficulty of product storage, and the need for access to essential infrastructure facilities (Santana and Leite, 2007). Therefore, coordination between the firms operating in this sector is important to minimize the risks arising from the high degree of complexity.

Furthermore, Leite (2014) states that the verticalized structure - characteristic of BGs of form M - favors the gain of efficiency in the sector, because the hierarchical coordination is more effective than the market coordination in minimizing transaction costs.

2.3. CONCENTRATION LEVEL

Concentration indexes are indicators used to calculate the market power of the companies of a given segment or sector, allowing an analysis of how dominant the agents of the market in question are. The higher this index, the higher the level of market concentration and the lower the degree of competition among agents.

The concentration indexes consider - in addition to the absolute shares of each company - the distribution within the market, by applying the concept of market share (Kupfler and Hasenclever, 2002). To assess the level of concentration in the studied segment, the Concentration Ratio (CR) index was used, which is the sum of the market share of the *k* largest agents operating in the market, as shown in Equation (1):

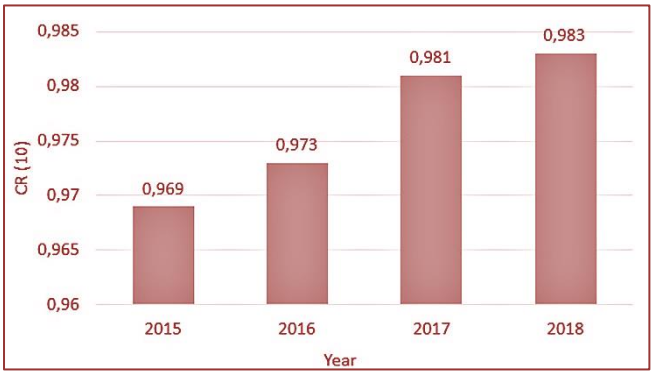
$$CR\ (k) = \sum_{i=1}^{k} s_i \qquad (1)$$

Where s_i represents the market share of the company *i* among the *k* largest companies in the market (Kupfler and Hasenclever, 2002).

The CR index was selected for two main reasons: first, because it is easy to calculate, and second, because of its applicability as an instrument to assess the degree of concentration of the segment over the years.

Figure 2 shows the evolution of the Concentration Ratio index in the studied segment between the years 2015 and 2018:

Figure 2: CR (10) of the Brazilian distribution segment



Source: authors' preparation.

Figure 2 shows a strong trend towards market concentration, with all indexes higher than 0.96 in the years evaluated. In practical terms, one can assume a greater market power by companies, especially by BGs. This scenario, instead of expanding competition in the segment, raises the barriers to entry for new participants.

In divergence with the objectives of the structural reforms of the 1990s, there is a trend towards high market concentration, especially due to upstream and downstream mergers and acquisitions in the Brazilian electricity system, as shown in Table 2. A trend towards re-verticalization among companies is perceived through the opening of trading companies. The objective is to attract large consumers - especially industrial ones - through the trading companies so that they are supplied by the generators of the same group. Therefore, this situation goes back to the old paradigm, but with a new guise: total re-verticalization through transactions with companies of the same Business Group.

Table 1: Business Groups operating in the Brazilian electricity sector (2021)

Group	Generation	Transmission	Distribution	Marketing
AES Corporation				
Cemig				
CPFL Energy				
EDP				
Eletrobras				
Enel				
Energisa				
Equatorial				
Neoenergia				

Source: authors' preparation.

From the information contained in **Table 1** and **Figure 2**, it is possible to see that the market is concentrated in a few large agents, whether they are BGs or individual companies. Therefore, in recent years, the studied segment has shown a strong tendency towards concentration, which corroborates the importance and timeliness of the proposal to analyze the efficiency of BGs operating in the Brazilian electric power distribution segment.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Data Envelopment Analysis (DEA) is a non-parametric method that uses linear programming to calculate the efficiency frontier of a given set of Decision-Making Units - DMU. The units that form the frontier involve the inefficient units and the efficiency score may vary from 0 to 1, where 1 is destined for efficient units (Charnes *et al.*, 1978; Farrell, 1957).

Efficiency analysis can focus on reducing inputs or maximizing outputs. The result of an input-oriented model is the maximum possible reduction in the level of inputs for a given level of product. The output-oriented model, on the other hand, seeks the maximum production quantities that can be generated by the same level of inputs. The input-

oriented model is generally accepted as the most appropriate for the electric power distribution segment, given that the demand for its services is a derived demand - which is beyond its control - and the utility is required to provide a distribution service to all consumers in its area of operation.

Most DEA models consider constant (Charnes *et al.*, 1978) or variable returns to scale (Banker *et al.*, 1984). For constant return, inputs and outputs increase (or decrease) in the same proportion along the frontier. When the technology presents increasing, constant, or decreasing returns along the frontier, the scale variable return is more appropriate (Banker *et al.*, 1984). The constant-return model measures both technical and scale efficiency, while a variable-return model measures only technical efficiency.

From a Linear Programming perspective, the efficiency of the i^{th} firm of N firms in models with constant return takes the form indicated in Equation (2), where θ is a scalar (equal to the efficiency) and λ is an N×1 vector that represents the weight of each DMU in the construction of the reference firm (Charnes *et al.*, 1978). The firms use inputs E, and outputs M, X and Y represent the input matrix E×N and output matrix M×N, respectively. The column vectors of inputs and products of i^{th} firm are represented by x_i and y_i, respectively.

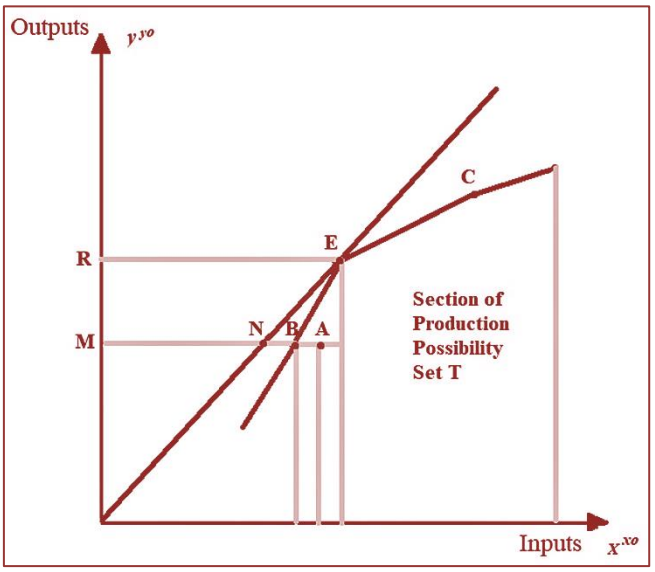
In Equation (2), firm *i* is compared to a linear combination of firms in the sample that produces at least the maximum of each product with the minimum possible number of inputs:

$$\begin{aligned} & min_{\theta,\lambda}\theta \\ & s.t. \\ & y_i \leq Y\lambda \\ & \theta x_i \geq X\lambda \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \qquad (2)$$

Equation (2) is solved once for each company. For models with variable returns, a convexity constraint is added, which ensures that the firm is compared to a standard that has a similar scale. The method deals directly with several inputs and outputs, and the linear programming model facilitates the implementation and the convergence process to solve the problem.

Under a graphical perspective, consider a DEA model, with input orientation, involving four DMUs (A, B, C, E), each with an input "x" to produce a product "y". In Figure 3, the constant return to scale (CRS) frontier is a radius from the origin that passes through DMU E, involving the other DMUs. DMU E is on the frontier and has technical and scale efficiency equal to one. The other three DMUs (A, B, C) are surrounded by the frontier, being therefore considered inefficient.

Figure 3. Technical efficiency and scale efficiency



Source: BANKER, CHARNES, and COOPER (1984).

The frontier with variable returns to scale (VRS) is formed by the straight-line segments that pass through the BEC DMUs. The global efficiency of DMU A is defined by $\overline{MN}/\overline{MA}$ and is calculated using the CRS frontier. Technical efficiency is equal to $\overline{MB}/\overline{MA}$and is computed using the VRS frontier, while scale efficiency is defined as $\overline{MN}/\overline{MB}$. Thus, global efficiency is the product between technical efficiency and scale efficiency.

(Banker *et al*., 1984) affirm that one of the most important advantages of the method is that efficiency is obtained directly, without the need to previously specify the production function. However, efficiency scores are sensitive to the choice of variables and, because it is a deterministic method, measurement errors are not considered. Furthermore, as more variables are included in the model, the number of efficient companies increases; therefore, it is important to examine the sensitivity of efficiency scores in the face of different variable specifications.

3.2. SELECTION OF DECISION-MAKING UNITS

The criteria that guided the selection of the Decision-Making Units were the concentration level of the distributors, the variability of the data, and the contribution of Banker (2011) to the Brazilian model.

Given the level of concentration of the utilities, as presented in Section 2.3, it was decided to statistically analyze two possible samples - Individual Companies and BGs - employing position and variability measures, collected in Table 2; the first sample comprised 48 observations, whilst the second sample has 10 observations.

Table 2: Descriptive statistics

Type	Descriptive Statistics	Opex (R$)	Network (km)	Market (MWh)	N° of Consumers
Individual Companies	Average	547,617,678	86,464	2,218,811,168	1,910,205
	Median	379,884,116	56,888	461,875,598	1,385,155
	Standard deviation	594,033,361	97,380	2,979,779,849	1,901,004
	C. Variation	108%	113%	134%	100%
Business Groups	Average	2,152,983,434	335,522	11,074,215,415	7,560,537
	Median	2,138,860,056	345,564	2,851,432,642	7,249,126
	Standard deviation	1,370,377,340	204,289	18,844,388,450	3,650,893
	C. Variation	64%	61%	170%	48%

Source: Adapted from (ANEEL, 2020).

The first sample - Individual Companies - presents distant mean and median values, indicating possible extreme values to the right; for instance: the distribution network length has a median of approximately 57,000 kilometers, while the average presents a value of around 86,000 kilometers. As expected, data variability is high, with all coefficients of variation exceeding 100% of the average; confirming that the sample includes companies with considerably distinct scales.

As for the second sample of Business Groups, the mean and median values are close, except for the Market variable, indicating greater uniformity in the data, which is corroborated by the variability measures. The coefficients of variation are less than 100% of the mean. Therefore, it can be deduced, except for the Market, that the second sample presents a lower variability among the data.

During the fourth tariff review cycle - where the regulatory rules for the electricity distribution segment are discussed - ANEEL received Professor Banker's contribution on Technical Note 101 of 2011. In the report, Banker pointed out the mistake, in the regulator's proposal, of comparing non-similar companies:

"The fundamental purpose of benchmarking for incentive regulation is to evaluate a company by comparing it with a reference set of other companies that are like it. It is important not to extrapolate the performance of any company to others that are not similar to it. Yet, ANEEL proposes to do just that by extrapolating between dissimilar companies based on rather tenuous arguments. ANEEL's choice of DEA as a methodology is indeed appropriate because DEA can provide a reference group of companies adhering to the two principles of benchmarking: (1) rely on observed data and (2) make minimum extrapolation" (Banker, 2011).

The existence of few large individual companies in the distribution segment combined with the premise of non-decreasing returns to scale imposes a penalty for large companies that, in some specific situations, operate with decreasing returns to scale. Consequently, by opting for BGs, this study safeguards the fundamental purpose of efficiency analysis: to compare performance between similar units.

That said, the representativeness of the selected sample corresponds to approximately 86% of network extension, 83% of distributed energy, and 88% of the number of consumers served in 2017 (ANEEL, 2020).

3.3. CHOICE OF VARIABLES

There is no definitive consensus in the literature on which variables best explain the operation of distribution companies (GIANNAKIS *et al.,* 2005).

Jamasb and Pollitt (2000) identify operating costs as being among the most used inputs in efficiency analysis models for distribution utilities. Total costs are also a possibility to be considered in efficiency analysis, especially because it avoids any possible trade-off between operational and capital costs. However, including the cost of capital in the analysis is complex due to the different accounting treatments adopted by the companies, which makes it difficult to determine the capital stock, and the interpretation of the efficiency score is not direct, given that the reduction of the capital stock is not possible (Nillesen and Pollitt, 2010).

Some authors - such as Jamasb and Pollitt (2003), Pérez-Reyes and Tovar (2009), and Çelen (2013) - follow Neuberg (1977) in advocating the inclusion of network extension, distributed energy, and the number of consumers as the main outputs in the electricity distribution segment, given that the utility's activity is to deliver a certain amount of energy to consumers through its network.

Thus, the input used in this study is the operating costs of electricity distributors in the year 2017; while the output is the Composite Scale Variable (CSV)[1] , a quantity weighting between network extension, distributed energy, and the number of consumers.

The choice for the product was based on two reasons: first, the small sample available - only 10 BGs; and second, the possibility of avoiding possible multicollinearity. Thus, the variable was calculated according to Equation (3) (OFGEM, 1999):

$$CSV = clients \left(1 + \alpha \frac{\delta M}{M} + \gamma \frac{\delta R}{R}\right) \quad (3)$$

Being:

$$\delta M = M_i - M;\ M_i = \frac{market_i}{consumer_i};\ M = \text{mean}\ (M_i)$$

$$\delta R = R_i - R;\ M_i = \frac{network_i}{consumer_i};\ M = \text{mean}\ (R_i)$$

The definition of the weights α and γ is arbitrary, in the 1999 revision, the British regulator assigned the values of both to 0.25. The CSV defines the number of consumers as the main product to explain the operational costs of electricity distributors, in line with that proposed by Neuberg (1977).

3.4. MODEL SPECIFICATION

In this paper, three models are analyzed - with input orientation - that reflect global, technical, and scale efficiency as detailed in Table 3

[1] Adopted by Office of Gas and Electricity Markets (Semolini, 2014).

Table 3: Efficiency Models

Model	Input	Output	Return
Global Efficiency	OPEX	CSV	CRS
Technical Efficiency	OPEX	CSV	VRS
Scale Efficiency	OPEX	CSV	Not applicable

Source: authors' preparation.

To support the choice of variables, a linear regression was performed that considered operating costs as the dependent variable and CSV as the independent variable. Table 4 shows the statistical parameters:

Table 4: R2 and ANOVA

Regression Statistics	
R^2	0.87
R^2 adjusted	0.85
F Value	52.24
Significance	8.99617E-05

Source: authors' preparation.

The value of R2 in Table 4 indicates that 87% of the variation in operating costs is subject to the variation in CSV. The results of Analysis of Variance (ANOVA) are also presented in the table, with the "F" value significant at $p < 0.05$. Therefore, the dependent variable of the proposed model is well explained by the independent variable.

However, one must emphasize that academic studies are a simple abstraction of reality. The real efficiency frontier is much more complex, with several inputs, products, and other variables that are beyond the company's management control. In this study, the abstraction was based on a few variables due to the size of the available sample.

4. RESULTS

Global efficiency (GE), technical efficiency (TE), and scale efficiency (SE) were calculated for the ten BGs in the year 2017 Table 4 presents the results for the selected sample.
On average, the global efficiency of the sample reached the value of 0.60, the technical efficiency approached 0.76 and the scale efficiency was calculated at 0.80.

Table 5: Efficiency of Business Groups in 2017

GE	GE	TE	SE
AES Corporation	0.45	0.54	0.83
Cemig	0.52	0.60	0.87
CPFL Energy	0.81	1.00	0.81
EDP	0.53	0.80	0.66
Eletrobras	0.42	0.46	0.91
Enel	0.54	0.57	0.95
Energisa	0.54	1.00	0.54
Equatorial	1.00	1.00	1.00
Iberdrola	0.60	1.00	0.60
Neoenergia	0.56	0.64	0.88
Average	0.60	0.76	0.80
Standard Deviation	0.18	0.22	0.15

Source: authors' preparation based on 2017 data.

Considering the managerial point of view, the technical efficiency result shows that, on average, the BGs could have the same level of product - a weighting between network extension, distributed energy, and the number of consumers - with 24% lower operating costs in the year evaluated.

The result of the scale efficiency suggests that there is a possible 20% reduction in operational costs if BGs were to operate on an optimal scale. This result is of interest to managers since it indicates which possible gains arise from mergers and acquisitions. An analysis of the scale of the selected sample is presented below.

Approximately 60% of the BGs present technical inefficiency, that is, these groups need to reduce operating costs to become technically efficient. In other words, the result indicates that there is room for the BGs to improve their technical efficiency.

On the other hand, about 90% of the groups have scale inefficiency, which can be solved through mergers and acquisitions; this practice has been adopted by the segment in recent years, as shown in Section 2.3.

The technically efficient BGs were CPFL Energia, Energisa, Equatorial, and Iberdrola. Equatorial achieved both technical efficiency and scale efficiency that year, exhibiting a global efficiency equal to 1. Iberdrola group was considered technically efficient, but due to scale inefficiency, its global efficiency was reduced to 0.60.

The groups with the lowest technical efficiency values were AES Corporation, Eletrobras, and Enel, with values lower than 0.60. However, the models did not consider environmental variables, so there is the possibility that part of the supposed inefficiency is the result of environmental aspects of the concession area, as well as measurement errors.

Table 5 indicates how BGs are performing at the optimal scale; however, it does not distinguish, for inefficient groups, whether the scale is sub-optimal or above optimal. Therefore, the scale analysis proposed by Bogetoft and Otto (2011) was implemented and the results for the year 2017 are summarized in Table6:

Table 6: Scale of the BGs

Business Group	Optimal Scale
AES Corporation	Below
Cemig	Above
CPFL Energy	Above
EDP	Below
Eletrobras	Below
Enel	Above
Energisa	Above
Equatorial	Great
Iberdrola	Below
Neoenergia	Above

Source: authors' preparation

Table 6 shows Cemig, CPFL Energia, Enel, Energisa, and Neoenergia operating on a higher than optimal scale. The other groups, except the Equatorial group, operate on a less than optimal scale.

The analysis of the group's scale of operation is useful in providing a measure of how much could be gained through scale adjustment. In BGs, the measure can be used as input in strategic planning, resulting in an intention to expand or contract. However, there are some caveats: (i) the idea of scale adjustment may not be possible in reality because markets are not competitive or firms - for natural reasons - cannot change their scale of operation; (ii) the optimal scale depends on the exact direction in the space created by the input-output matrices. Therefore, the elaboration of generic guidelines is not trivial (Bogetoft and Otto, 2011).

Last but not least, the results presented in Table 5 and Table 6 could enrich the discussion, still not exhausted, about the technical efficiency of large Brazilian distributors, together with the possibility of considering the variable return to scale in the evaluated segment:

"It is not correct to assume that all large companies are inefficient, and then try to support that assumption by extrapolating the performance of some smaller companies, as measured inaccurately through the lens of a misspecified model, to the larger dissimilar companies. Rather, if a simple abstraction must be used until a detailed cost model is developed, then the solution is to use the VRS model because it conceptually dominates the Non Decrising Return of Scale model in this setting" (Banker, 2011).

Therefore, by raising the level of analysis - from individual companies to BGs - comparable pairs will naturally be formed and at the same time, it will be analyzed whether the Groups - in aggregate - are efficiently using their resources to supply electricity to their consumers.

Identifying the BGs' full cost reduction potential is a challenge given the asymmetry of information. However, with the support of the DEA method, this section will identify *peers* for inefficient BGs as well as operational cost reduction targets for each sample group.

Aware of the limitation that a model is not able to capture all the complexity existing among the multiple inputs and outputs involved in the production process, the technical efficiency model, VRS, was chosen, following the guidelines proposed by Banker (2011).

Peers are a reference for inefficient Business Groups and can guide them on the path to increased efficiency. In this study, CPFL Energia, Energisa, Equatorial, and Iberdrola formed the empirical frontier against which other groups were evaluated, as shown in Table 7:

Table 7: Peers

Business Group	VRS	Peer 1	Peer 2
Aes Corporation	0.54	Equatorial (40%)	Iberdrola (60%)
Cemig	0.60	CPFL Energia (50%)	Equatorial (50%)
EDP	0.80	Equatorial (7%)	Iberdrola (93%)
Eletrobras	0.46	Equatorial (66%)	Iberdrola (34%)
Enel	0.57	CPFL Energia (17%)	Equatorial (83%)
Neoenergia	0.64	CPFL Energia (49%)	Equatorial (51%)

Source: authors' preparation.

As an example, AES Corporation was compared with a weighting made up of 40% of Equatorial and 60% of Iberdrola. The result was a technical efficiency score of 0.54, as seen in Table5 and 7.

Equatorial was part of the efficiency frontier for all BGs, thus impacting the efficiency of all the groups in the sample. On the other hand, Energisa was not considered a reference for any Business Group.

Special attention should be paid to peers: the Business Group in question must not be under administrative intervention by the regulator. Thus, the error is avoided of considering as best practice one that puts at risk the adequate provision of electricity distribution services.

Once the benchmarks for each Business Group are known, Table 8 shows the potential operational costs that can be reduced in the ten BGs studied, considering technical efficiency.

Table 8: Potential reduction in operating costs (in BRL)

Business Group	Opex realized	Efficiency score	Opex target	Potential reduction
AES Corporation	1,405,776,130	54%	763,675,052	642,101,078
Cemig	3,000,115,764	60%	1,804,725,788	1,195,389,976
CPFL Energy	2,505,834,454	100%	2,505,834,454	0
EDP	722,319,714	80%	581,445,113	140,874,601
Eletrobras	1,964,517,535	46%	903,206,154	1,061,311,381
Enel	2,313,202,577	57%	1,325,489,691	987,712,887
Energisa	5,197,839,501	100%	5,197,839,501	0
Equatorial	1,091,704,257	100%	1,091,704,257	0
Iberdrola	542,254,269	100%	542,254,269	0
Neoenergia	2,786,270,137	64%	1,788,945,615	997,324,522
Total	21,529,834,339	-	16,505,119,895	5,024,714,445

Source: authors' preparation.

The total possible reduction in operating costs is more than R$ 5 billion, or 23% of realized operating costs. In absolute terms, the largest reductions are in the Eletrobras and CEMIG groups. However, these results must be analyzed with reservations, since measurement errors and environmental variables were not considered. Thus, only after the insertion of these aspects can one affirm that the remaining possible reduction is due to managerial inefficiency.

The direct impact of the possible reductions is on the consumer's pocket: the average realized operating costs per consumer of the BGs is R$ 291, as shown in Table 9

Table 9: Operating costs per consumer

Business Group	Opex realized/consumer	Opex target/consumer	Reduction/consumer
AES Corporation	199	108	91
Cemig	245	147	98
CPFL Energy	207	207	0
EDP	214	172	42
Eletrobras	439	202	237
Enel	224	128	96
Energisa	701	701	0
Equatorial	217	217	0
Iberdrola	208	208	0
Neoenergia	254	163	91
Average	291	225	65

Source: authors' preparation.

Applying the technical efficiency score to the cost base, the average target operating cost per consumer decreases to R$ 225, or an average reduction of R$ 65 per consumer in the year 2017.

Once the detailed diagnosis has been made, the next step - the implementation of possible cost reductions - is left to the groups. The identification of how savings can be achieved requires a detailed analysis of the processes within each of the member companies. One approach would be the sharing of information on processes between companies of each group or the search for best practices outside the BGs (Nillesen and Pollitt, 2010).

5. CONCLUSION

Economic theory advocates natural monopoly as the most technically efficient market structure when a single firm can provide a product at a lower cost than two or more firms would operate in the market. In the electricity distribution segment, this monopoly is shaped by mergers and acquisitions between firms and by the regulator, who may, through incentives, favor a certain scale size to the detriment of others.

In the last two decades, a process of re-verticalization of the electricity sector has been observed, with companies seeking to reduce transaction costs through the formation of Business Groups. The strategy adopted is a response to the high degree of uncertainty inherent to the electricity sector: the non-stockability of the electricity product, which

causes a high interdependence among the agents of the production chain; besides, the high level of asset specificity.

In this context, the paper analyzed the efficiency of BGs operating in the Brazilian electric power distribution segment in 2017. Although several papers have thoroughly studied the Brazilian segment, an analysis based on a higher hierarchical level - such as BGs - remained unexplored.

In terms of magnitude, the BGs presented a higher efficiency score in the model that evaluates scale than the one that evaluates purely technical efficiency. In some groups, the difference between the results of the models is considerable, indicating that there are different competencies regarding the management of scale and the management of technical efficiency.

In the relationship between group size and technical efficiency, the results are ambiguous: there are groups with a larger than ideal scale that reached the technical efficiency frontier, but there is one group, which despite operating on a reduced scale, is also considered technically efficient. In specific terms, the technically efficient BGs were CPFL Energia, Energisa, Equatorial, and Iberdrola. The first two groups have a scale above the optimal one, Equatorial operates at the optimal scale, while Iberdrola has a scale below that considered optimal.

On the other hand, AES Corporation, Eletrobras, and Enel presented a technical efficiency score below 0.60. However, the models studied herein did not consider exogenous variables, i.e., those that are beyond management's direct control, such as environmental variables and measurement errors. Thus, the results should be used with caution.

It is noteworthy that the benchmarking methods should not be considered substitutes for decision-makers. Now, the main function of such methods is to serve as a tool for the decision-making process, which is surrounded by an increasingly complex environment.

With a caveat, consumers could benefit from the possible efficiency increase through an average tariff reduction of R$65, or 22%, per consumer in the year 2017.

In the post-reform period - since the end of the 1990s - mergers and acquisitions have dramatically increased market concentration, changing not only the size of companies but also the regulator's need for knowledge. With this in mind, this paper proposes to contribute, empirically, to a better understanding of the development of the electricity distribution segment in recent years. To this end, it was evaluated how well the BGs used their resources to provide electricity to their consumers.

Future studies may incorporate exogenous variables in the efficiency analysis model, as well as the quality of service. Furthermore, further studies on how to implement possible cost reductions would complement the diagnosis made herein.

REFERENCES

[1] Altoé, A.V., da Costa, N., Lopes, A.L.M., Veloso, T.R.M., Saurin, V., 2017. Technical efficiency and financial performance in the Brazilian distribution service operators. Socioecon. Plann. Sci. 59, 79–92. https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2017.01.003

[2] ANEEL, 2020. Technical Note n° 121/2020.

[3] Banker, R., 2011. Report on ANEEL's Proposal for Electricity Distribution Tariff Regulation Technical Note No . 101 / 2011 26.

[4] Bebchuk, L.A., Kraakman, R.H., Triantis, G.G., 2000. Stock Pyramids, Cross-Ownership, and Dual Class Equity: The Creation and Agency Costs of Separating Control from Cash Flow Rights, in: Concentrated Corporate Ownership. University of Chicago Press, pp. 295–318. https://doi.org/10.2139/ssrn.147590

[5] Bogetoft, P., Otto, L., 2011. Benchmarking with DEA, SFA, and R. Springer Science & Business Media, New York, Dordrecht, Heidelberg, London. https://doi.org/101007/978-1-4419-7961-2

[6] Borda, A., Geleilate, J.M.G., Newburry, W., Kundu, S.K., 2017. Firm internationalization, business group diversification and firm performance: The case of Latin American firms. J. Bus. Res. 72, 104–113. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2016.11.006

[7] Brandão, R., Tolmasquim, M.T., Maestrini, M., Tavares, A.F., Castro, N.J., Ozorio, L., Chaves, A.C., 2021. Determinants of the economic performance of Brazilian electricity distributors. Util. Policy 68, 101142. https://doi.org/10.1016/J.JUP.2020.101142

[8] Bucheli, M., Salvaj, E., Kim, M., 2019. Better together: How multinationals come together with business groups in times of economic and political transitions. Glob. Strateg. J. 9, 176–207. https://doi.org/10.1002/gsj.1326

[9] Calzolari, G., Scarpa, C., 2016. CONGLOMERATES AND REGULATION. Econ. Inq. 54, 1648–1669. https://doi.org/10.1111/ECIN.12338

[10] Çelen, A., 2013. Efficiency and productivity (TFP) of the Turkish electricity distribution companies: An application of two-stage (DEA&Tobit) analysis. Energy Policy 63, 300–310. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.09.034

[11] Chang, S.-J., 2013. Asli M. Colpan, Takashi Hikino, and James R. Lincoln, eds.: The Oxford Handbook of Business Groups: https://doi.org/10.1177/0001839213518023 59, NP12–NP14. https://doi.org/10.1177/0001839213518023

[12] Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. Eur. J. Oper. Res. 2, 429–444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

[13] Coase, R.H., 1937. The Nature of the Firm. Economic 4, 386–405. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x

[14] Dharwadkar, R., George, G., Brandes, P., 2000. Privatization in Emerging Economies: An Agency Theory Perspective. https://doi.org/10.5465/amr.2000.3363533 25, 650–669. https://doi.org/10.5465/AMR.2000.3363533

[15] Farrell, M.J., 1957. The Measurement of Productive Efficiency. J. R. Stat. Soc. Ser. A 120, 253. https://doi.org/10.2307/2343100

[16] Gonçalves, R., 1991. Vista do Grupos econômicos: uma análise conceitual e teórica. Rev. Bras. Econ. 4, 45.

[17] Granovetter, M.S., 1995. Getting a job : a study of contacts and careers, 2nd ed. Chicago.

[18] Jamasb, T., Pollitt, M., 2003. International benchmarking and regulation: an application to European electricity distribution utilities. Energy Policy 31, 1609–1622. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00226-4

[19] Jamasb, T., Pollitt, M., 2000. Benchmarking and regulation: international electricity experience. Util. Policy 9, 107–130. https://doi.org/10.1016/S0957-1787(01)00010-8

[20] Karl J. Fields, 1995. Enterprise and the State in Korea and Taiwan. Cornell University, New York.

[21] Khanna, T., Palepu, K.G., Srinivasan, S., 2004. Disclosure Practices of Foreign Companies Interacting with U.S. Markets. J. Account. Res. 42, 475–508. https://doi.org/10.1111/J.1475-679X.2004.00146.X

[22] Khanna, T., Rivkin, J.W., 2001. Estimating the performance effects of business groups in emerging markets. Strateg. Manag. J. 22, 45–74.

[23] Khanna, T., Yafeh, Y., 2007. Business Groups in Emerging Markets: Paragons or Parasites? J. Econ. Lit. 45, 331–372. https://doi.org/10.1257/JEL.45.2.331

[24] Kim, W.S., Lyn, E., Park, T.J., Zychowicz, E., 2005. The Wealth Effects of Capital Investment

Decisions: An Empirical Comparison of Korean Chaebol and Non-Chaebol Firms. J. Bus. Financ. Account. 32, 945–971. https://doi.org/10.1111/J.0306-686X.2005.00618.X

[25] KPMG, 2021. Mergers & Acquisitions 2020 – 4th quarter.

[26] Kupfler, D., Hasenclever, L., 2002. Economia Industrial – Fundamentos Teóricos e Práticos no Brasil. Rio de Janeiro.

[27] Leite, A.L. da S., 2014. Crescimento e estruturação das firmas: a formação dos conglomerados do setor elétrico brasileiro. REGE - Rev. Gestão 21, 343–359. https://doi.org/10.5700/REGE534

[28] Neuberg, L.G., 1977. TWO ISSUES IN THE MUNICIPAL OWNERSHIP OF ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS. Bell J Econ 8, 303–323. https://doi.org/10.2307/3003501

[29] Nillesen, P., Pollitt, M., 2010. Using Regulatory Benchmarking Techniques to Set Company Performance Targets: The Case of US Electricity: Cambridge Work. Pap. Econ. 11, 50–84. https://doi.org/10.1177/178359171001100103

[30] OFGEM, 1999. Review of Public Electricity Suppliers 1998-2000. Distribution Price Control Review.

[31] Pattnaik, C., Lu, Q., Gaur, A.S., 2018. Group Affiliation and Entry Barriers: The Dark Side Of Business Groups In Emerging Markets. J. Bus. Ethics 2018 1534 153, 1051–1066. https://doi.org/10.1007/S10551-018-3914-2

[32] Pérez-Reyes, R., Tovar, B., 2009. Measuring efficiency and productivity change (PTF) in the Peruvian electricity distribution companies after reforms. Energy Policy 37, 2249–2261. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2009.01.037

[33] Popli, M., Ladkani, R.M., Gaur, A.S., 2017. Business group affiliation and post-acquisition performance: An extended resource-based view. J. Bus. Res. 81, 21–30. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2017.08.003

[34] PWC, 2021. Mergers & Acquisitions in Brasil [WWW Document]. URL https://www.pwc.com.br/pt/estudos/servicos/assessoria-tributaria-societaria/fusoes-aquisicoes/2021/fusoes-e-aquisicoes-no-brasil-marco-21.html (accessed 3.15.22).

[35] Santana, E.A. De, Leite, A.L.S., 2007. Transaction costs economics, property rights, and the strategies of the firms of the Brazilian Electricity Industry, in: INTERNATIONAL CONFERENCE DEVELOPMENTS IN ECONOMIC THEORY AND POLICY. University of the Basque Country, Bilbao.

[36] Semolini, R., 2014. Eficiência dos Custos Operacionais das Empresas de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil. State University of Campinas, Campinas, Brazil.

[37] Williamson, O.E., 1981. The Economics of Organization: The Transaction Cost Approach. https://doi.org/10.1086/227496 87, 548–577. https://doi.org/10.1086/227496

[38] Xavier, S. de S., Semolini, R., 2018. Custos totais no modelo de eficiência das distribuidoras de energia brasileiras: uma análise Total costs in the brazilian efficiency model of energy distribuidors: an analysis. BRAZILIAN Appl. Sci. Rev. 2, 1696–1715. https://doi.org/10.34115/BASR.V2I5.557

[39] Xavier, S.S., Lima, J.W.M., Lima, L.M.M., Lopes, A.L.M., 2015. How Efficient are the Brazilian Electricity Distribution Companies? J. Control. Autom. Electr. Syst. 2015 263 26, 283–296. https://doi.org/10.1007/S40313-015-0178-2

[40] Yiu, D.W., Lu, Y., Bruton, G.D., Hoskisson, R.E., 2007. Business Groups: An Integrated Model to Focus Future Research. J. Manag. Stud. 44, 1551–1579. https://doi.org/10.1111/J.1467-6486.2007.00735.X

Capítulo 13

Poluição por partículas totais em suspensão nos silos públicos e na zona residencial na cidade portuária de Paranaguá-PR

Letícia dos Santos
Virnei Silva Moreira
Juliana Almansa Malagoli

Resumo:O presente trabalho apresenta um estudo sobre a poluição atmosférica por partículas totais em suspensão (PTS) que são emitidas na região dos silos públicos e na zona residencial da cidade portuária de Paranaguá-PR, durante o ano de 2020, comparando as concentrações de poluentes entre essas duas regiões. Neste contexto, os dados do monitoramento da qualidade do ar realizado na cidade foram fornecidos pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), os quais são tratados e plotados em gráficos para análise e comparação com os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar da Resolução CONAMA n° 491/2018. Os resultados obtidos demonstram que na região dos silos do Porto de Paranaguá, comparado com a zona residencial do município, há maiores emissões de PTS na atmosfera.

1. INTRODUÇÃO

A grande quantidade de materiais que são manuseados em um porto está relacionada com a poluição atmosférica que pode afetar a qualidade do ar (GUPTA; PATIL; GUPTA, 2002). Além disso, as atividades portuárias que envolvem carregamento, descarregamento e transporte de cargas a granel são importantes fontes de emissão de material particulado atmosférico (MPA) (ALMEIDA *et al*., 2012).

A Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) instituiu por meio da Resolução n° 2650, em 26 de setembro de 2012, um instrumento de acompanhamento e controle de gestão ambiental em instalações portuárias, conhecido como Índice de Desempenho Ambiental (IDA), com o intuito de avaliar a gestão ambiental de um porto, segundo parâmetros pré-estabelecidos. Deste modo, é muito importante para o setor portuário: (a) melhorar a atividade; (b) visualizar os impactos locais e (c) adotar planos para minimização e mitigação de possíveis desastres ambientais.

O IDA é composto por 38 indicadores, divididos em quatro categorias e quatorze indicadores globais, dentre eles, encontra-se o indicador específico de poluentes atmosféricos (gases e particulados), que é o escopo deste trabalho. Os Portos do Paraná são referência em gestão ambiental. Desta maneira, o porto de Paranaguá é o mais bem colocado no IDA, ficando na liderança do “ranking” pela terceira vez consecutiva entre os portos públicos.

Durante o manuseio de grãos em depósitos de armazenamento, há uma grande geração de poluição ambiental proveniente da ação da chuva e do vento, as quais espalham material particulado no local, poluindo o ar, a água e o solo (BOMFIM, 2014). Ademais, o presente trabalho tem como objetivo analisar as emissões de partículas totais em suspensão (PTS) nos silos públicos do porto de Paranaguá, e comparar a poluição atmosférica na zona portuária e na zona residencial do município.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atividades humanas, domésticas, industriais e urbanas levam à produção de diferentes componentes que são liberados para a atmosfera, modificando a composição e o equilíbrio natural do meio ambiente, dando origem à chamada "poluição atmosférica". Quando o ar está poluído, significa que há substâncias estranhas em sua composição, que em quantidades elevadas podem tornar o ar impróprio, nocivo ou inconveniente à saúde, à vida animal e vegetal, ao bem-estar público e até mesmo a alguns materiais (BRANCO; MURGEL, 2010).

Uma pesquisa feita por Couto *et al*. (2020) tinha como objetivo estimar a concentração diária do material particulado com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros ($MP_{2,5}$) no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no estado do Ceará, Brasil, as maiores concentrações encontradas foram no período de 2011 a 2017, em que as indústrias se consolidaram no local. Nesse trabalho, os autores puderam constatar que as condições meteorológicas influenciam nos processos de remoção e manutenção das concentrações do material particulado na região, ainda notaram que a umidade relativa tem grande influência em promover condições que favorecem a remoção de partículas finas no ambiente.

O trabalho feito por Gugartz (2018) teve como objetivo avaliar as concentrações de fuligem, do material particulado fino, do SO_2 e NO_2 na região portuária de Paranaguá, com

o intuito de verificar os riscos causados por esses poluentes à saúde da população. Os níveis de $MP_{2,5}$ excederam os valores recomendados pelo padrão americano, europeu e da OMS, com média anual de 15 $\mu g/m^3$, constatando-se que os terminais portuários são os principais responsáveis pela emissão deste poluente. Ao analisar as concentrações médias de fuligem, foi possível descobrir que a principal fonte de emissão é proveniente da navegação oceânica. Os veículos de grande porte juntamente com as embarcações são responsáveis pelos altos níveis de NO_2. Já ao analisar as concentrações de SO_2, obtém-se que a responsável por essa emissão é a navegação oceânica.

Ao analisar os resultados obtidos a partir do trabalho de Gugartz (2018), é possível constatar que os terminais portuários, a navegação oceânica e o tráfego de caminhões afetam a saúde da população do município, visto que, nas análises foram encontrados altos níveis de concentração, os quais excederam os padrões de qualidade do ar recomendados para o ser humano.

Um trabalho desenvolvido por Bomfim (2014) teve como objetivo retratar os problemas que as atividades portuárias, especialmente as que envolvem o transporte e armazenamento de granéis sólidos, podem ocasionar. Os terminais de grãos estão localizados no bairro Ponta da Praia, onde ocorre a maior emissão e dispersão de material particulado da região, o local ultrapassou parâmetros estaduais e nacionais de qualidade do ar, no ano de 2013 o material particulado que possui entre 2,5 e 10 micrômetros (MP_{10}) ultrapassou o limite estadual de 40 $\mu g/m^3$. Com os resultados obtidos nessa pesquisa, foi possível constatar que a poluição atmosférica proveniente das atividades de movimentação de granéis sólidos, as quais geram altas concentrações de material particulado inalável afeta diretamente a saúde da população e o meio ambiente da região do porto de Santos.

Os grãos são materiais muito valiosos para a indústria alimentícia, portanto, é necessário armazenar corretamente este produto a fim de manter a sua qualidade. As ferramentas mais preferidas da indústria de armazenamento de grãos são os silos, pois possuem como características um armazenamento controlado, um bom processo de secagem e uma boa ventilação em seu interior (YIGIT, 2019).

A produção de grãos em larga escala é uma atividade muito importante para a sobrevivência humana, pois os grãos têm capacidade de fornecer nutrientes ao organismo, tornando-se essencial para uma alimentação saudável e balanceada. Portanto, o armazenamento de grãos a granel possui um fator de extrema importância mundial. O armazenamento nas dependências de um porto é uma etapa chave na logística portuária, podendo ser vista como a etapa final do ciclo de produção agrícola e inicial do ciclo de exportação (MATTOZO, 2006).

Segundo D'Arce (2003?), os depósitos de armazenamento de grãos a granel são classificados em silos elevados e horizontais, segundo sua forma da estrutura. Os silos elevados são depósitos cuja altura é maior que o diâmetro, conhecidos como *bin*, *upright storage* e *vertical storage* (podendo ter sua construção em concreto ou em metal), e os silos horizontais, ou armazéns graneleiros, os quais possuem sua altura menor que a base, também conhecidos como *horizontal storage* ou *flat storage*.

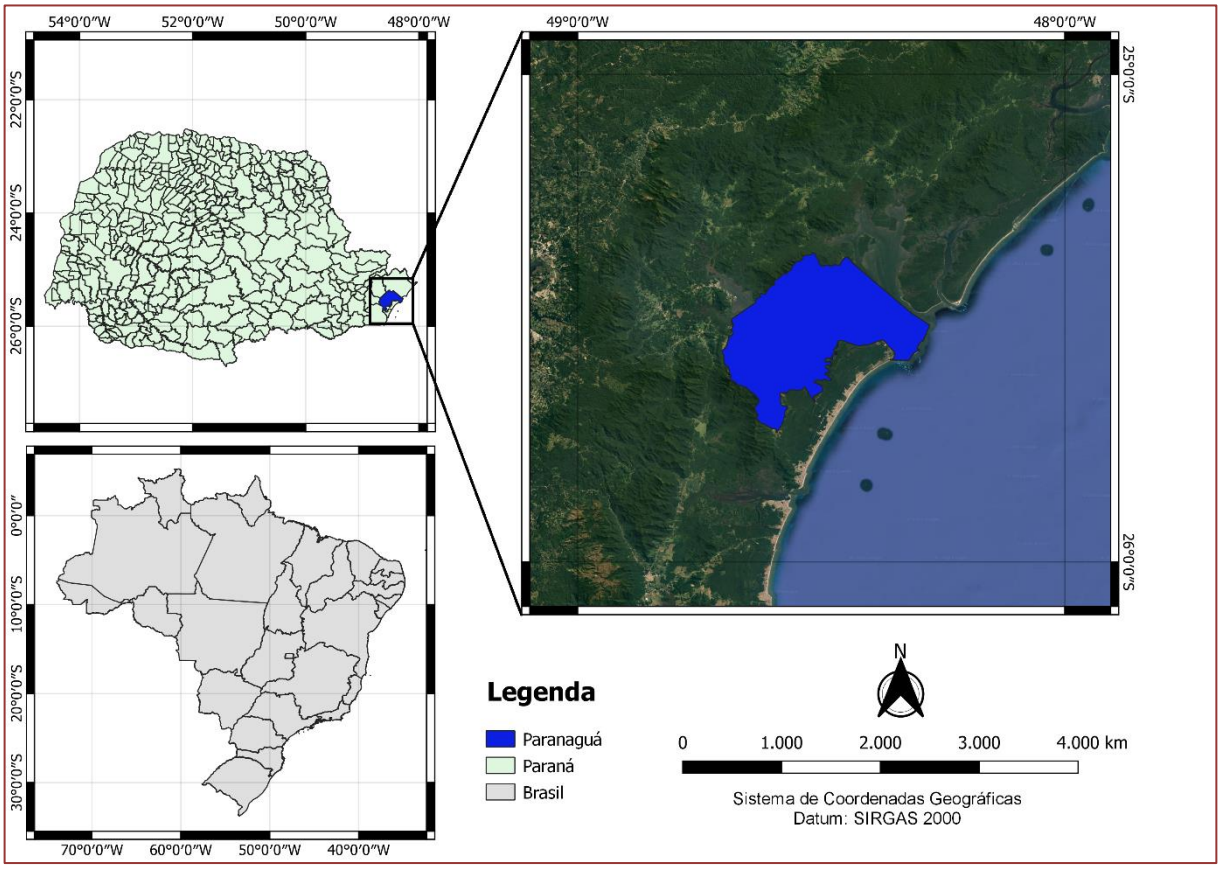
No período de 1981 a 1987 ocorreram surtos de asma na cidade Barcelona, na Espanha, afetando a população do município, diante disso, um trabalho desenvolvido por Aceves *et al*. (1991) teve como objetivo a realização de ensaios de aerossóis urbanos que foram coletados com amostradores de alto volume entre outubro de 1986 e maio de 1989, e como resultado disso, constatou-se que o pó de soja proveniente de atividades

portuárias foi o causador destes surtos de asma. Após a identificação de uma relação direta entre o desembarque de soja no porto e os episódios de asma, foram instalados filtros de mangas nos silos, ocasionando numa expressiva redução na emissão de poeira durante os processos de descarga de soja no porto. Sendo possível constatar que, a falta de controle nas atividades portuárias que envolvem o manuseio de granéis sólidos pode ocasionar em grandes emissões de poluição para a atmosfera, trazendo malefícios à saúde da população de uma região.

3. METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado no município de Paranaguá, representado na Figura 1, que está localizado no litoral do Paraná, entre as latitudes 25,365° S e 25,735° S, e longitudes 48,706° W e 48,277° W, abrangendo uma área territorial de 826,652 km^2. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2021 estima-se que a população seja de 157.378 habitantes.

Figura 1 – Localização do município de Paranaguá-PR



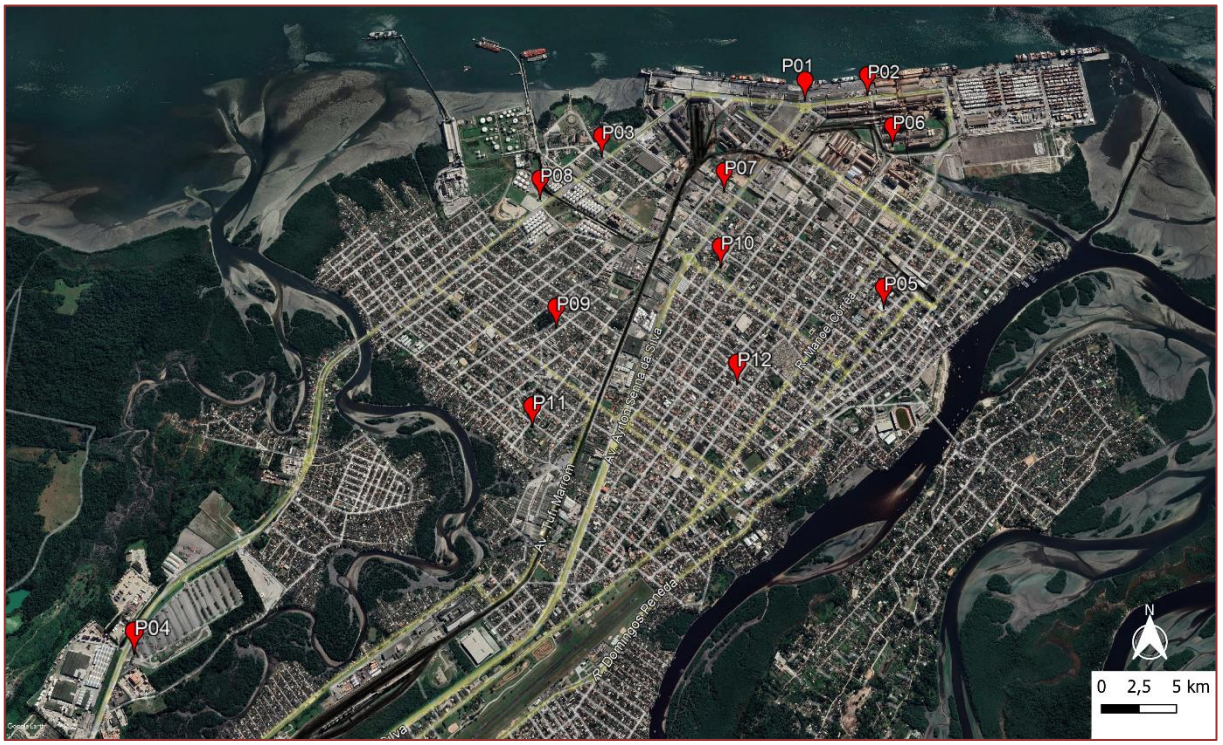
FONTE: Os Autores (2022).

Neste município está inserido o maior porto graneleiro da América Latina, sendo o principal canal de exportação da soja e do milho produzidos no Brasil para o mercado externo. Também, possui o título de terceiro maior porto de contêineres do Brasil, perdendo somente para os portos de Itajaí em Santa Catarina e de Santos

em São Paulo. Portanto, é a principal atividade econômica da cidade. Em 2020, o Porto de Paranaguá completou 85 anos, sendo consolidado como o mais eficiente do Brasil, movimentando mais de 50 milhões de toneladas por ano.

Os dados de monitoramento da qualidade do ar foram fornecidos pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), os quais são tratados e plotados em gráficos para análise e comparação com os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar da Resolução CONAMA n° 491/2018. No município de Paranaguá, a qualidade do ar é monitorada mensalmente em 12 estações localizadas na zona portuária e no seu entorno (Figura 2).

Figura 2 – Estações de monitoramento da qualidade do ar

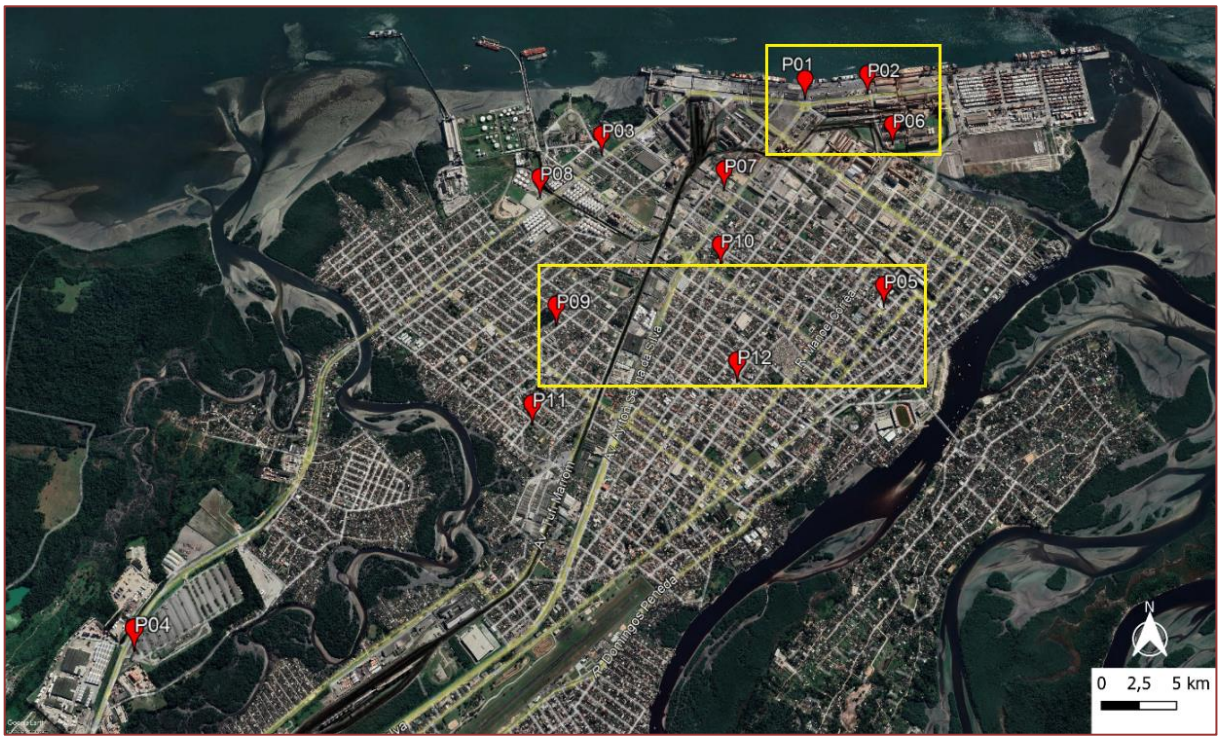


FONTE: Os autores (2022).

Nas 12 estações usadas para este monitoramento, são medidos sete parâmetros: níveis de partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI), fumaça (FMC), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Porém, para o presente trabalho, o parâmetro escolhido foi PTS, devido à grande movimentação de carga à granel na cidade portuária. A APPA forneceu os dados até a metade do ano de 2021, portanto, o ano escolhido foi 2020 pois é o mais recente e possui dados de todos os meses do ano.

Os pontos escolhidos para comparar as concentrações de PTS foram P01, P02, P05, P06, P09 e P12 que estão destacados em amarelo na Figura 3, os pontos 01, 02 e 06 compreendem a região dos silos públicos do porto e, os pontos 05, 09 e 12 estão na zona residencial de Paranaguá, em que não há proximidade com o corredor de exportação, onde ocorre o manuseio dos grãos.

Figura 3 - Pontos escolhidos para comparar as concentrações de PTS



FONTE: Os autores (2022).

Para demonstrar o Índice de Qualidade do Ar nas medições feitas em Paranaguá durante o ano de 2020, verificaram-se quais pontos e quantas vezes o padrão nacional da qualidade do ar foi excedido. Assim, os resultados são apresentados na Tabela 1, vale ressaltar que durante esse período foram totalizados 12 meses de monitoramento. Nota-se que o ponto que mais excedeu o padrão nacional da qualidade do ar foi o P02, em virtude disso, escolheu-se esse ponto para demonstrar o Índice da Qualidade do Ar nos resultados. A Tabela 2 mostra a melhor classificação para os índices.

Tabela 1 - Pontos que excederam o Padrão Nacional da Qualidade do Ar

PONTOS	QUANTIDADE DE ULTRAPASSAGENS
P01	4
P02	9
P04	5
P06	3
P07	1
P08	1

FONTE: Os autores (2022).

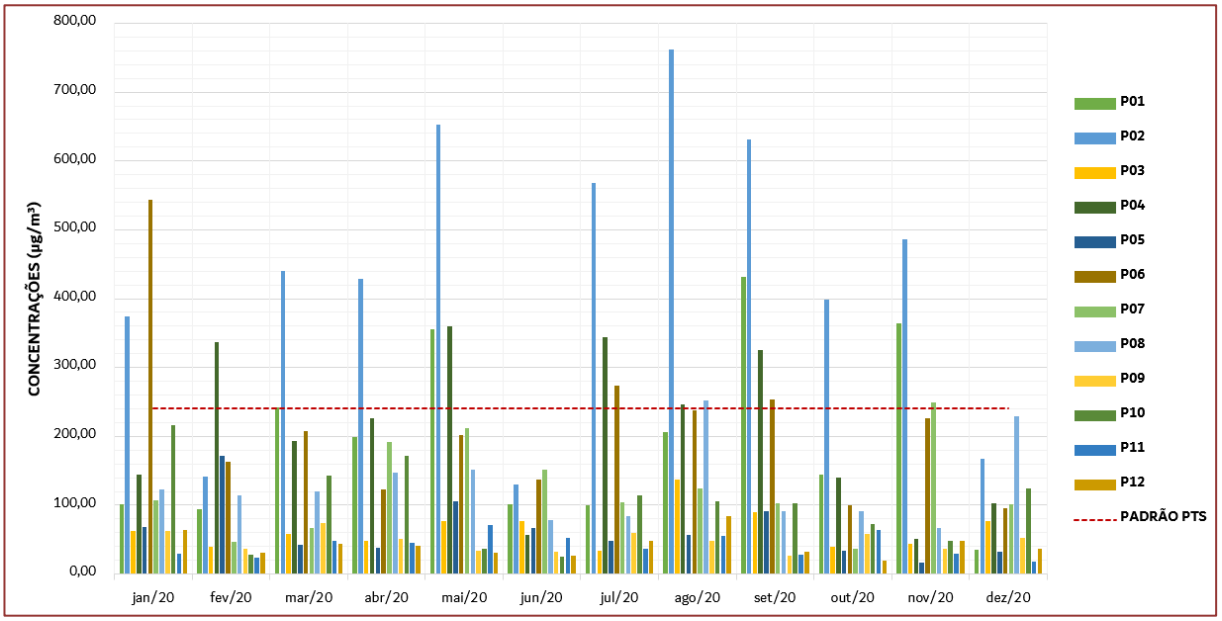
Tabela 2 - Classificação da Qualidade do Ar pelo IQAR

CLASSIFICAÇÃO	PTS (µg/m³) – 24h
BOA	0 – 80
REGULAR	> 80 e ≤ 240
INADEQUADA	> 240 e ≤ 375
MÁ	> 375 e ≤ 625
PÉSSIMA	> 625 e ≤ 875
CRÍTICA	> 875

FONTE: Os autores (2022).

As concentrações de PTS nas 12 (doze) estações de monitoramento da qualidade do ar em Paranaguá no período de janeiro a dezembro de 2020 são apresentados na Figura 4, juntamente com o padrão nacional da qualidade do ar de 240 µg/m^3, no período de 24 horas.

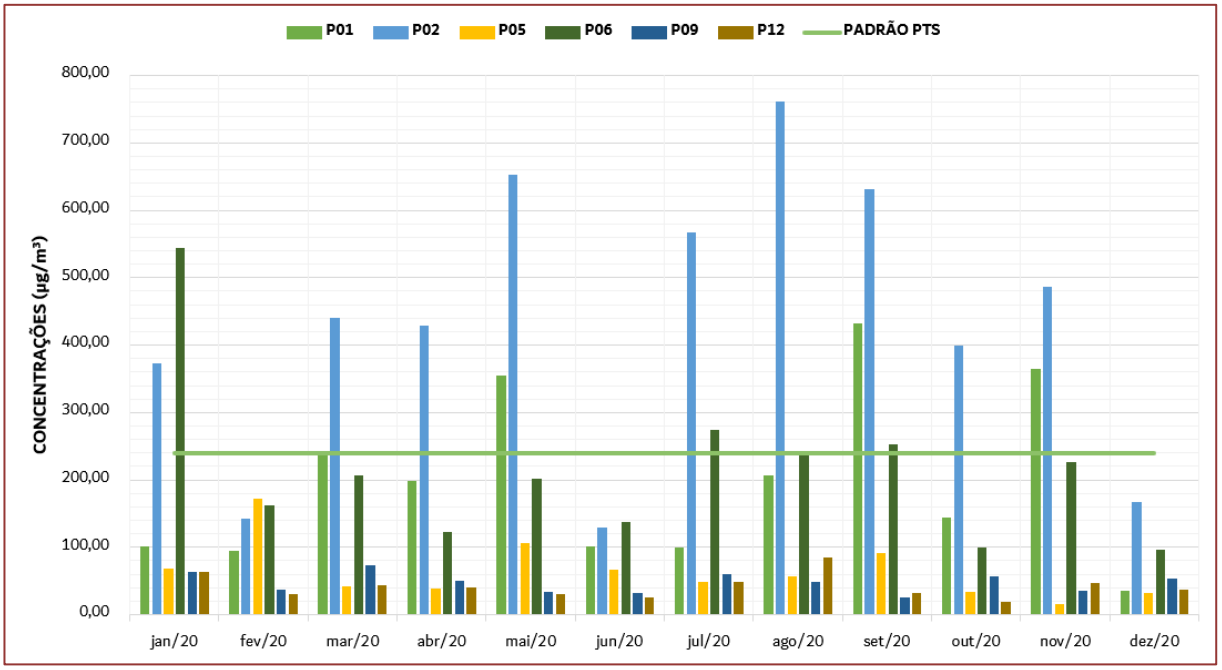
Figura 4 - Concentrações de PTS no período de janeiro a dezembro de 2020



FONTE: Os autores (2022).

Observa-se que em alguns meses o padrão nacional da qualidade do ar foi ultrapassado, especialmente, em pontos próximos aos silos públicos do município, onde há o manuseio de cargas a granel. Um trabalho desenvolvido por Moreno *et al*. (2007), com objetivo de verificar as emissões de material particulado durante as operações portuárias com grãos no porto de Tarragona, no nordeste da Espanha, constatou altos níveis de emissão de MP_{10} nessa região, variando entre 716 e 729 µg/m^3. Neste contexto, para melhor demonstração dos resultados obtidos no presente trabalho, a Figura 5 foi desenvolvida com o intuito de demonstrar a emissão de PTS no ar na região em que há movimentação de grãos e em locais que não há.

Figura 5 - Concentração de PTS nos pontos próximos aos silos públicos e nos pontos da Zona Residencial de Paranaguá



FONTE: Os autores (2022).

Na Figura 5, verificou-se que das doze medições feitas no ano de 2020, o padrão nacional da qualidade do ar foi excedido no P01 quatro vezes, no P02 dez vezes e no P06 somente três vezes. Um estudo de caso desenvolvido por Sorte *et al*. (2019) no Porto de Leixões, em Portugal, durante os anos de 2013 e 2016, demonstrou que as fontes de emissões que incluem a movimentação de carga e armazenamento de granéis apresentam as maiores contribuições para os altos níveis de concentração de MP_{10} na área de estudo. Se comparado ao valor legal anual de 40 µg/m^3, o MP_{10} mostrou-se com altos índices de concentrações principalmente, na região dos terminais de contêineres e cais convencionais de granéis sólidos.

Já na Tabela 3, apresenta-se o índice de qualidade do ar nas doze medições feitas no ano de 2020 no ponto 02. Em todas as medições feitas nesse ponto, o poluente responsável pelos maiores índices da qualidade do ar, foram as partículas totais em suspensão. Um trabalho desenvolvido por Bueno *et al*. (2010), encontrou uma relação direta entre a incidência de doenças respiratórias em crianças, a concentração de material particulado e o índice de qualidade do ar no município de Divinópolis em Minas Gerais. Um outro trabalho, desenvolvido por Zhang *et al*. (2010) demonstrou que as partículas totais em suspensão foram os principais poluentes que influenciaram no Índice de Poluição do Ar no norte da China durante o período de primavera e inverno.

Tabela 3 - Índice de Qualidade do Ar e sua classificação no ano de 2020 para o P02

DATA	IQAR	CLASSIFICAÇÃO
09/01/2020	199	Regular
05/02/2020	72	Boa
04/03/2020	227	Regular
01/04/2020	222	Regular
05/05/2020	312	Inadequada
04/06/2020	66	Boa
06/07/2020	277	Inadequada
07/08/2020	355	Inadequada
02/09/2020	303	Inadequada
07/10/2020	210	Regular
06/11/2020	245	Inadequada
08/12/2020	78	Boa

FONTE: Os autores (2022).

Rimetz-Planchon *et al*. (2008) desenvolveram um trabalho com o objetivo de investigar os episódios de poluição por MP_{10} associando a situações meteorológicas na cidade portuária de Dunquerque, na França, analisando a poluição próxima a indústrias e na zona urbana da cidade. Então, usando uma análise temporal, verificou-se que as estações de monitoramento que se encontravam próximas às indústrias apresentaram altas concentrações de MP_{10} durante a noite. Nos dias em que houve altas concentrações de MP_{10} na zona urbana, houveram regimes de alta pressão, em que a área urbana estava a favor do vento das plumas industriais, com baixa velocidade dos ventos na região. As condições de alta pressão coincidem com altas concentrações e as condições de baixa pressão estão relacionadas com baixas concentrações. Por fim, durante o período de estudo, houveram 5 dias de chuva intensa, em que foi possível verificar baixas concentrações de material particulado na atmosfera, em virtude de um fenômeno chamado de *washout*, que permite que os poluentes sejam carregados pela chuva.

4. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos para as partículas totais em suspensão, verificou-se que nos pontos que estão na região dos silos públicos do Porto de Paranaguá se comparado com a zona residencial, há uma maior emissão de PTS na atmosfera, o que se deve ao manuseio de granéis sólidos, como soja, farelo de soja e milho. Apesar do Monitoramento da Qualidade do Ar ser realizado somente uma vez ao mês em cada estação espalhada pelo município, nos dias em que ocorreram as medições nos pontos que estão localizados o corredor de exportação e os silos, os resultados mostraram alguns episódios maiores de emissão de PTS na atmosfera, isso se comparado a zona residencial, que fica longe do local em que ocorre o manuseio dos granéis sólidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Universidade Federal do Paraná/Tesouro Nacional pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa e a Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) por disponibilizar os dados que foram estudados.

REFERÊNCIAS

[1] ACEVES, Merce. et al. Identification of soybean dust as an epidemic asthma agent in urban áreas by molecular marker and RAST analysis of aerossols. Journal of Allergy and Clinical Immunology, Barcelona, v. 88, issue 1, p. 124-134, jul. 1991.

[2] ALMEIDA, Susana Marta. et al. Characterization of dust material emitted during harbour activities by k0-INAA and PIXE. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 291, p. 77-82, jul. 2012.

[3] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). Resolução n. 2.650, de 26 de setembro de 2012 – Aprova os instrumentos de acompanhamento e controle de gestão ambiental em instalações portuárias.

[4] ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA (APPA), com. pess. Documento assinado nos termos do art. 18 do Decreto Estadual 5389/2016. Disponível em: https://www.eprotocolo.pr.gov.br/spiweb/validarAssinatura.do?action=iniciarProcesso, utilizando o código de acesso: ecac5b1123184a5d82c695bed075c819, 2020.

[5] BOMFIM, Juliana Campos. A atividade portuária de transporte e armazenagem de granel no Porto de Santos, a poluição atmosférica por material particularizado e a responsabilização pelo dano. 94 f. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade Católica de Santos, Santos (SP), 2014. Disponível em: https://tede.unisantos.br/handle/tede/2382.

[6] BUENO, Flávia Faria. et al. Qualidade do ar e internações por doenças respiratórias em crianças no município de Divinópolis, Estado de Minas Gerais. Acta Scientiarum. Health Sciences, v. 32, n. 2, p. 185-189, set. 2010.

[7] BRANCO, Samuel Murgel.; MURGEL, Eduardo. Poluição do Ar. São Paulo: Moderna, 2010.

[8] COUTO, Lucas de Oliveira do. et al. Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 36, n. 7, p. 1-14, 2020.

[9] D'ARCE, Marisa A. B. Regitano. Pós colheita e armazenamento de grãos. Texto compilado para a disciplina LAN 2444 Tecnologia de Produtos Agropecuários II. Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, São Paulo, (2003?).

[10] GUGARTZ, Bruno Martins. Avaliação de material particulado fino, fuligem e poluentes gasosos na região portuária de Paranaguá. 103 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Territorial Sustentável) - Setor Litoral, Universidade Federal do Paraná, Matinhos (PR), 2018. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/55756.

[11] GUPTA, A. K.; PATIL, Rashimi. S.; GUPTA, S. K. Emissions of Gaseous and Particulate Pollutants in a Port and Harbour Region in India. Environmental Monitoring and Assessment, v. 80, p. 187-205, dec. 2002.

[12] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e Estados. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/paranagua.html. Acesso em: 10 set. 2022.

[13] MATTOZO, João Geraldo Orzenn. A Gestão do Armazenamento de Granéis Sólidos no Porto de Paranaguá. 99 f. Monografia MBA Portos e Logística Empresarial (Pós-Graduação Lato Sensu) – Universidade Católica de Santos, Santos, 2006.

[14] MORENO, Natalia. et al. Characterisation of dust material emitted during harbour operations (HADA Project). Atmospheric Environment, v. 41, issue 30, p. 6331-6343, sept. 2007.

[15] RIMETZ-PLANCHON, Juliette. et al. PM10 air quality variations in an urbanized and industrialized harbor. Atmospheric Environment, v. 42, issue 31, p. 7274-7283, oct. 2008.

[16] SORTE, Sandra. et al. Assessment of source contribution to air quality in an urban area close to a harbor: Case-study in Porto, Portugal. Science of The Total Environment, v. 662, p. 347-360, apr. 2019.

[17] YIGIT, Enes. Development of an expression for the volume of off-centered conical pile inside a cylindrical silo. Measurement, v. 146, p. 903-911, nov. 2019.

[18] ZHANG, Xiao Xiao. et al. Ambient TSP concentration and dustfall in major cities of China: Spatial distribution and temporal variability. Atmospheric Environment, v. 44, issue 13, p. 1641-1648, apr. 2010.

Capítulo 14

Otimização da técnica de eletrocoagulação/ floculação por meio de redução de DQO utilizando eletrodos de aço carbono avaliando redução de concentrações da matéria orgânica

Liana Geisa Conrado Maia
Luiz Thiago Vasconcelos da Silva
André Gadelha de Oliveira
Jefferson Pereira Ribeiro
Eliezer Fares Abdala Neto
Tais Coutinho Parente
Ronaldo Stefanutti
Jéssica Elen Costa Alexandre
Francisco Belmino Romero
Ronaldo Ferreira do Nascimento

Resumo: O emprego de técnicas que utilizam reatores eletroquímicos apresentam resultados bastante promissores para o tratamento de vários tipos de efluente, devido à ocorrência simultânea dos processos de coagulação, floculação, flotação e sedimentação, além de facilitar a automação da unidade de tratamento Este trabalho propõe desenvolver uma tecnologia de eletrocoagulação/flotação (ECF) para o pós-tratamento de efluentes sanitários. Investigou-se a aplicação da ECF com eletrodos confeccionados em liga de aço carbono no tratamento do efluente da lagoa de estabilização. Foram conduzidos testes em células eletrolíticas utilizando 2,6L de efluente, operando em batelada, variando-se pH inicial, velocidade de agitação e concentração de eletrólito. Com base na remoção de DQO, foram determinadas configurações ótimas de operação, pH inicial de 7,91, velocidade de agitação de 210 rpm e concentração de eletrólito de 0,5049 mg/L de NaCl e tempo de detenção (TDH) de 10 min. Obteve-se DQO inferior a 100 mg/L atendendo a legislação local para lançamento de efluentes.

Palavras-chave: Eletrocoagulação, Efluentes, Materia Orgânica, Lagoa de Estabilização.

1. INTRODUÇÃO

Apesar de apresentar-se como opção tecnológica viável quanto à remoção da matéria orgânica, constatou-se nos últimos anos que as lagoas facultativas apresentam pequena eficiência na remoção de nutrientes e sólidos em suspensão, representados pelas biomassas bacteriana e algal, o que pode ser crítico caso o corpo receptor seja sensível à eutrofização, como lagos e estuários. Embora o polimento do efluente possa ser realizado por diversas vias, a única que promove a remoção efetiva do fósforo, nutriente limitante do processo de eutrofização, é a via físico-química (OLIVEIRA E GONÇALVES, 1999).

Na tecnologia eletrolítica os elétrons são providos diretamente do material tratado, eliminando a necessidade da adição de substâncias redutoras ou oxidantes potencialmente tóxicas. Sua utilização tem larga importância, pois reduz a toxicidade dos efluentes através da transformação de substâncias persistentes em substâncias facilmente biodegradáveis. Dessa forma, o tratamento eletrolítico permite o aumento da eficiência do tratamento biológico convencional.

Vários autores consideram que a ECF tem se mostrado uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental, além de ser versátil e competitiva para instalações em tanques que requerem grandes volumes de água a ser tratada. As unidades de ECF são pequenase compactas, além de requererem pouca manutenção e custos operacionais menores quando comparados a outras unidades de flotação (MOLLAH *et al.*, 2001; CRESPILHO *et al.*, 2004; CERQUEIRA e MARQUES, 2012).

A oxidação em eletrodos que apresentam ferro em sua constituição em um sistema eletroquímico produz hidróxido de ferro, $Fe(OH)_n$, em que n pode ser 2 (Equações 1 a 4) ou 3 (Equações 5 a 8) (MOLLAH *et al.*, 2001; CASILLAS *et al.*, 2007).

As partículas de $Fe(OH)_n$ geradas formam uma suspensão gelatinosa que podem remover os poluentes por complexação ou atração eletrostática, seguidas de coagulação. Esse processo pode ocorrer segundo mecanismos distintos.

Mecanismo 1

Ânodo:

oxidação do ferro: $Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^-$ (1)

formação do hidróxido ferroso: $Fe^{2+}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \rightarrow Fe(OH)_{2(s)}$ (2)

Cátodo:

redução da água e formação de hidrogênio gasoso:

$8H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^-_{(aq)}$ (3)

Reação global: $Fe_{(s)} + 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow Fe(OH)_{2(s)} + H_{2(g)}$ (4)

Mecanismo 2

Ânodo:

oxidação do ferro: $4Fe_{(s)} \rightarrow 4Fe^{2+}_{(aq)} + 8e^-$ (5)

formação do hidróxido férico: $4Fe^{2+}_{(aq)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 8H^+_{(aq)}$ (6)

Cátodo:

formação de hidrogênio gasoso: $8H^{+(aq)} + 8e^{-} \rightarrow 4H_{2(g)}$ (7)

Reação global: $4Fe_{(s)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 4H_{2(g)}$ (8)

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a redução na concentração de matéria orgânica em termos de DQO, em efluente doméstico proveniente de lagoa de estabilização, submetido a EFC operando com eletrodos passivos de aço carbono, visando atender as normas de lançamento estabelecidas pelas leis ambientais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. EFLUENTE

O efluente utilizado para a realização deste estudo é proveniente de uma lagoa de estabilização facultativa da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) do Conjunto Nova Metrópole, na cidade de Caucaia-Ceará, suas características físico-químicas e bacteriológicas estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físico-químicas e bacteriológicas do efluente doméstico utilizado noestudo e valores estabelecidos pela legislação local, Portaria SEMACE 154 de 2002

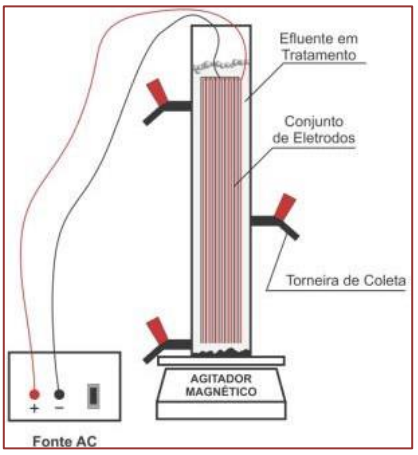
PARÂMETROS	Valores da Portaria 154/2002 SEMACE	Valores Obtidos
pH	7,5 a 10	10,14
Temperatura(ºC)	< 40	28,71
Turbidez(UNT)	*	544
DQO (mg/L)	200,0	356,88
DBO (mg/L)	<60	199,0
Coliformes Totais (NMP/100mL)	5000	275,5 X 10^4

*não é exigido para lançamento de esgoto.

2.2. ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

O processo eletrolítico foi promovido por corrente alternada utilizando-se uma fonte de tensão (Hayama® HY-125™), operando em 220-12V, montado conforme apresentado na Figura 1. Os cátodos e os ânodos empregados foram feitos de chapas de aço carbono perfazendo 18 unidades. Cada chapa mediu 400,0 x 9,0 x 3,0 mm, com área de superfície total de 0,18 m^2. As placas foram espaçadas entre si em 5 mm.

Figura 1 - Diagrama experimental do reator



O reator de bancada foi confeccionado em acrílico para melhor acompanhamento da evolução dos processos eletroquímicos envolvidos, com dimensões 60,0 x 10,0 cm, totalizando um volume de 4.710 cm^3. O formato cilíndrico foi usado para evitar que resíduos provenientes dos ensaios eletroquímicos ficassem aderidos em cantos "mortos" dentro do reator, como acontece em reatores de formato tipo tanque (cúbico), e também oferecer o mínimo de resistênciaà hidrodinâmica da flotação, favorecendo o processo.

2.3. ANÁLISES

Os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos foram determinados segundo metodologiasdescritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

2.4. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram feitos por meio de delineamento experimental de superfíciede resposta do tipo Box-Behnken. Quando se estudam três fatores, o delineamento Box-Behnken oferece a vantagem, sobre outras metodologias de superfície de resposta, de necessitar umnúmero menor de experimentos. A Tabela 2 mostra os valores codificados, não codificados de cada fator para os três níveis utilizados para as seguintes variáveis independentes: concentraçãode eletrólito (X_1), pH inicial (X_2) e velocidade de agitação (X_3). O percentual de remoção de DQO foi tomado como resposta do sistema.

Tabela 2 - Fatores codificados, não codificados e seus níveis no planejamento fatorial

Ensaio	X_1	X_2	X_3	Concentração de Eletrólito (mg/L)	pH	Velocidade de Agitação (rpm)
1	0	0	0	0,5	7	200
2	0	+1	+1	0,5	11	400
3	+1	-1	0	1,0	3	200
4	0	-1	+1	0,5	3	400
5	-1	0	-1	0,0	7	0
6	+1	0	+1	1,0	7	400
7	0	+1	-1	0,5	11	0
8	0	0	0	0,5	7	200
9	0	-1	-1	0,5	3	0
10	-1	+1	0	0,0	11	200
11	0	0	0	0,5	7	200
12	+1	+1	0	1,0	11	200
13	-1	-1	0	0,0	3	200
14	0	0	0	0,5	7	200
15	-1	0	+1	0,0	7	400
16	+1	0	-1	1,0	7	0

Os dados experimentais foram ajustados a um modelo polinomial de segunda ordem e coeficientes de regressão foram obtidos. O modelo polinomial de segunda ordem usado naresposta (DQO) foi:

$$DOO = 62,51 + 7,06X_1 - 4,98X_2 - 0,55X_3 - 27,62X_1X_2 - 24,47X_1X_3 + 4,19X_2X_3 + 28,42X_1^2 + 11,04X_2^2 - 1,48X_3^2$$

Onde: DOO é a resposta predita; X_1 concentração de eletrólito; X_2 é o pH inicial; X_3 é a velocidade de agitação.

3. RESULTADOS

O percentual de remoção de DQO foi analisado a partir de um estudo da cinética de degradação para os tempos 0, 10, 20, 30 e 40 minutos utilizando o modelo de cinética de primeiraordem (SFO) como base de análise. Para tal, utilizou-se o Software R versão 3.0.3 pelo métododo ajuste de regressão não linear.

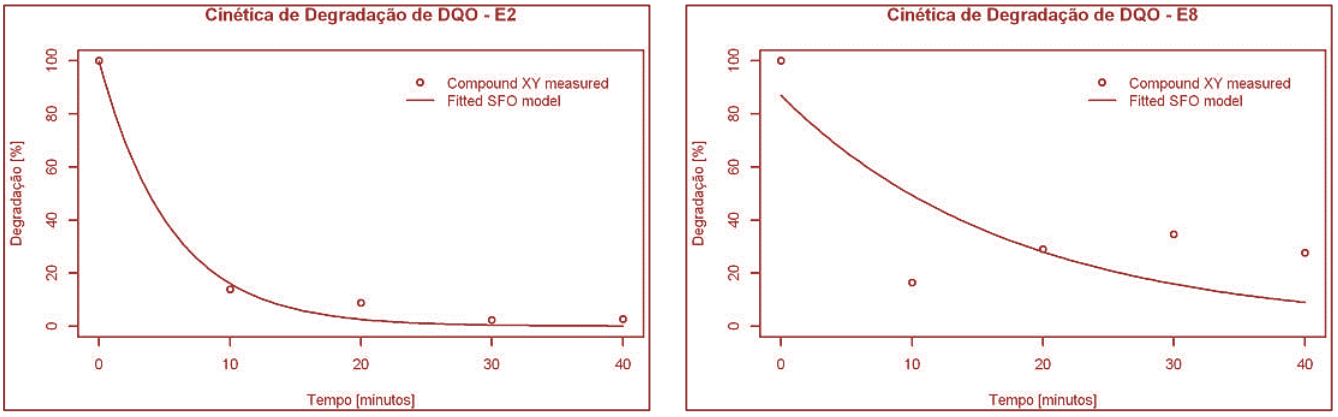
Os valores de R^2 para o modelo testado, utilizando-se o eletrodo de aço carbono, variaram de 0,56 a 0,99, como mostra a Tabela 3. De maneira geral e com base na análise visual, confirma-se o bom ajuste para o modelo SFO para o eletrodo em questão. Em geral, as estimativas dos valores de TD_{50} da DQO com base no modelo SFO variaram de 2,8 a 15,4 minutos, o ensaio 16 mostrou TD_{50} igual a 79,4, este foi desconsiderado nesta análise por seu comportamento fugir muito do esperado quando comparado com os demais ensaios.

Tabela 3 - Parâmetros do modelo de degradação de cinética de primeira ordem (SFO) da DQOnos ensaios a partir do planejamento fatorial Box-Behnken

Ensaio	R2	K	TD 50
1	0.9335	0.169	4.1
2	0.9922	0.182	3.8
3	0.8899	0.046	15
4	0.9474	0.209	3.3
5	0.9562	0.238	2.9
6	0.7209	0.067	10.2
7	0.9631	0.106	6.6
8	0.5600	0.056	12.2
9	0.8487	0.075	9.2
10	0.9147	0.099	6.9
11	0.6277	0.044	15.4
12	0.7969	0.056	12.2
13	0.8952	0.152	4.6
14	0.8161	0.250	2.8
15	0.9636	0.090	7.6
16	0.5660	-0.008	79.4

As curvas dos gráficos de cinética de degradação, a partir do planejamento fatorial Box-Bhenken, seguiram o mesmo comportamento em todos os ensaios. A Figura 3 mostra o gráfico dos ensaios 2 e 8 cujo R^2 foi máximo e mínimo respectivamente.

Figura 3 – Degradação de DQO a partir do planejamento fatorial Box-Bhenken para os ensaios 2 e 8



De acordo com os gráficos de cinética de redução de DQO observou-se um forte decaimento de DQO em 10 minutos de reação, atingindo remoção média de DQO na ordem de 77,53%. A faixa de tempo de reação determinada para avaliação da etapa de otimização do processo foi a compreendida entre 0 e 10 minutos.

3.1. OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Os gráficos de contorno de superfície de resposta para a estimativa da eficiência de variáveis independentes de concentração de eletrólito, pH inicial e velocidade de agitação são mostrados nas Figuras 4 a 6. Estas representações gráficas são derivadas do modelo da Equação (1). Os gráficos de contorno apresentados nestas figuras mostram os efeitos relativos das três variáveis, quando o tempo de tratamento é mantido constante (tempo de 10 min.). Com base nos resultados obtidos, as condições ótimas para as variáveis independentes são 0,5049 mg/L de concentração de NaCl, 7,91 de pH e 210 rpm de velocidade de agitação para uma redução de DQO de 69,20%, chegando a valores de 97,50mg/L.

Figura 4 – Efeito do pH inicial e concentração de eletrólito na redução da DQO

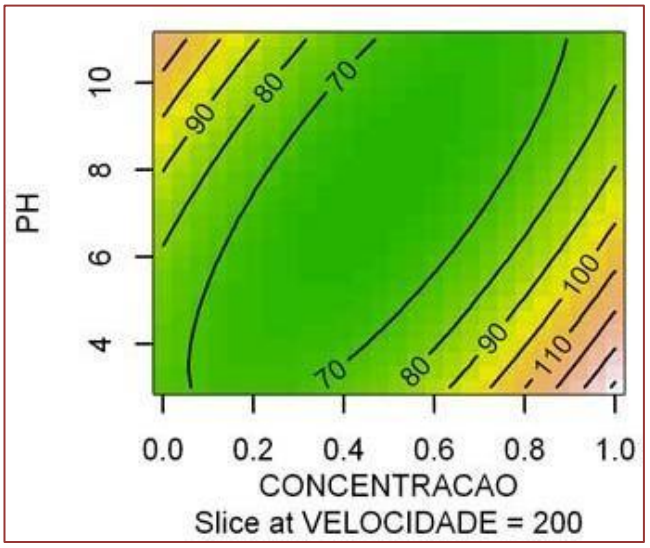


Figura 5 – Efeito da velocidade de agitação e concentração de eletrólito na redução da DQO

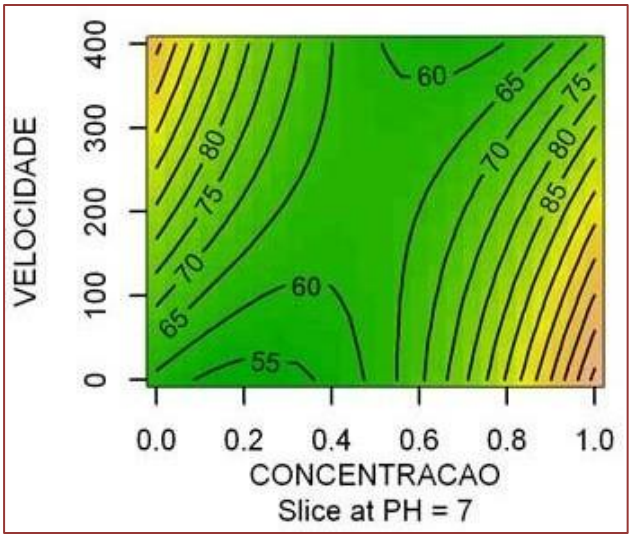
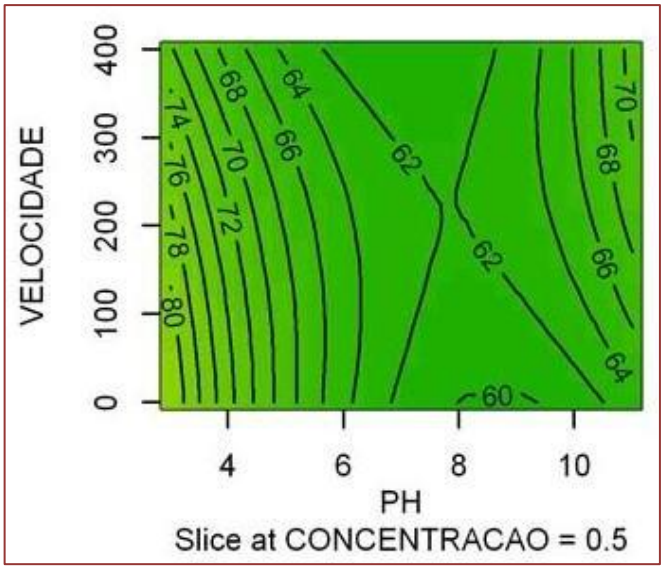


Figura 6 – Efeito da velocidade de agitação e pH inicial na redução da DQO



3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE APÓS ELETROCOAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Após a determinação dos parâmetros ótimos de operação do reator, fez-se a repetição do ensaio, a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos da caracterização do efluente antes (ET) e após (EPT) o tratamento por eletrocoagulação/floculação.

Tabela 3 – Caracterização do efluente antes e após eletrocoagulação/floculação

PARÂMETROS	ET	EPT	% de Remoção
pH	8,12	9,405	-
Temperatura (ºC)	29,76	30,18	-
Turbidez(UNT)	328	31,6	90,37%
DQO(mg/L)	316,56	97,50	69,20%
DBO	265,44	28,44	89,28%
Coliformes Totais	29,9 x 10^4	ND	100%

ND - não detectado

O tratamento do efluente melhorou suas condições, os resultados mostram que o tratamentoproposto permite uma degradação eficiente da fração orgânica mais resistente (representada pela DQO), porem leva a transformação em espécies de menor biodegradabilidade (representada pela DBO). A remoção de turbidez foi satisfatória, com percentual de remoção médio de 89,61%, em 10 minutos de operação. A inativação de coliformes fecais pode ser justificada pela geração do gás cloro, que em meio básico, pode formar íons hipoclorito. A geração deste ânion pode representar uma das grandes vantagens da ECF (VLYSSIDES *et al.*,1999).

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o tratamento proposto de ECF, nas condições estudadas, mostrou-se capaz de produzir um efluente tratado dentro dos padrões de lançamento (SEMACE, 2002), ao mesmo tempo em que se apresenta como uma tecnologia que potencializa ações de inativação de coliformes fecais, elevando a capacidade de precipitação de compostos dissolvidos e, por conseguinte aumentando a eficiência de clarificação e desinfecção.

REFERÊNCIAS

[1] APHA – AWWA – WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th edition. American Public Health association, American Water WorksAssociation and Water Environment Federation, 2005.

[2] CASILLAS, H.A.; COCKE, D.L.; GOMES,J.A.G.; MORKOVSKY, P.; PARGA, J.R.;

[3] PETERSON,E. Electrocoagulation mechanism for COD removal. Sep.Purif. Technol., v. 56, p. 204-211, 2007.

[4] SEMACE – Secretaria de Maio Ambiente do Ceará. Portaria 154, de 22/07/2002. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Disponível em: <http://antigo.semace.ce.gov.br/integracao/biblioteca/legislacao/conteudo_ legislacao.asp? cd=95> Acesso em: 12/01/2014.

[5] CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C.; Electrolytic Treatment of Wastewater in the Oil Industry. New Technologies in the Oil and Gas Industry, Ed. Rijeka, Croatia: INTECH, 2012, cap. 1.

[6] CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O., Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. Quím. Nova, vol 27, n 3, p. 387- 392, 2004.

[7] MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC)

[8] - science and applications. Journal of Hazardous Materials 2001, 1, 84.

[9] OLIVEIRA, L.H.; GONÇALVES. O.M.; Metodologia para a implantação de programa de uso racional da água em edifícios. São Paulo : EPUSP, 1999.

[10] VLYSSIDES, A. G.; KARLIS, P. K.; ZORPAS, A. A.; Environ. Int. 1999, 5, 25.

Capítulo 15

Projeto industrial para produção de etanol de segunda geração a partir do endocarpo do fruto do buriti (Mauritia flexuosa l.)

Plínio Ribeiro Rodrigues
João Vinícios Wirbitzki da Silveira

Resumo: O provimento das demandas para o desenvolvimento econômico global tem gerado uma crescente busca por recursos energéticos alternativos e sustentáveis, tendo em vista o crescimento da população humana no planeta, o esgotamento dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação acerca dos impactos antrópicos no meio ambiente. Neste contexto, o presente capítulo apresenta uma avaliação para possível implantação de uma indústria química produtora de etanol de segunda geração, obtido da fermentação dos resíduos dos frutos do Buritizeiro (*Mauritia flexuosa* l.), compreendidos da porção formada pelo endocarpo do vegetal. Com base em dados experimentais, foram estudadas as etapas de pré-tratamentos ácido, alcalino e enzimático dos endocarpos, bem como a sua fermentação para produção do etanol. Balanços de massa e de energia foram executados para um melhor entendimento das demandas do processo produtivo.

Palavras-chave: Resíduos, buriti, bioetanol, pré-tratamento.

1. INTRODUÇÃO

A manutenção da atual dinâmica do desenvolvimento tecnológico e econômico do planeta, diretamente associada ao crescente padrão de consumo da população humana, tem gerado grande demanda por recursos energéticos e deflagrado sérios danos à biosfera terrestre, principalmente no que se refere à emissão de poluentes.

Estes poluentes lançados no ar são apontados como responsáveis por mudanças climáticas causadoras de grande desequilíbrio ecológico e catástrofes naturais, devido à suas interações físicas e químicas com a atmosfera. Grande parte das emissões de gases são geradas por meio da queima de combustíveis fósseis para a sustento das atividades industriais e da frota de veículos ao redor do mundo.

Os combustíveis fósseis são hoje a principal fonte de energia utilizada em todo o mundo e estão em franca decadência no que tange à sua disponibilidade, uma vez que tais recursos não são renováveis e seu consumo vem sendo amplamente aumentado.

Diante dos eventos apresentados e todos os seus desdobramentos ambientais, sociais e econômicos, é clara a necessidade de se desenvolver novas tecnologias para a produção de energia renovável e com uma menor carga poluente.

Neste contexto, o presente capítulo tem por objetivo analisar o processo de uma usina produtora de bioetanol lignocelulósico obtido da fermentação alcoólica de resíduos compreendidos pelos endocarpos dos frutos do Buritizeiro (*Mauritia flexuosa* l.). O bioetanol, obtido da fermentação alcoólica de biomassa, é um combustível que vem sendo largamente afiançado por se tratar de um produto renovável e por exibir uma emissão reduzida de poluentes, se comparado aos combustíveis fósseis, além de poder ser utilizado em motores automotivos.

Este tipo álcool pode ser produzido por diversas espécies de matérias primas, classificadas em três grandes grupos quanto à disposição estrutural de seus carboidratos, as amiláceas, as açucaradas e as lignocelulósicas, que exigem a execução de diferentes operações unitárias até sua conversão a etanol.

Na biomassa lignocelulósica, os açúcares fermentescíveis estão presentes em maior parte na forma de fibras, celulose e hemicelulose, sendo assim, para que os microrganismos fermentadores tenham acesso a estes açúcares, há a necessidade de se proceder com a desestruturação do material, etapa crucial ao processo de produção de etanol.

Entretanto, não obstante as operações exigidas no tratamento da estrutura lignocelulósica, a sua utilização para produção de álcool é estimulada principalmente por não demandar o aumento do uso de terras agricultáveis e, por conseguinte, não ameaçar o setor alimentício. Além disso, há imensa disponibilidade de fontes de celulose em praticamente todas as regiões do globo, sobretudo nos países tropicais, como o Brasil.

Assim, a avaliação de processo de uma usina produtora de bioetanol a partir do endocarpo do buriti vem proporcionar uma alternativa para o aproveitamento do resíduo de uma matéria-prima nativa para a promoção sustentável de renda e desenvolvimento social.

1.1. *Mauritia flexuosa* L

A *Mauritia flexuosa* L., ou Buritizeiro, é uma palmeira largamente distribuída em regiões alagadas, pobremente drenadas, da América do Sul. No Brasil, esta palmeira é encontrada na Amazônia, no Acre, Rondônia, Mato Grosso, Goiás, Distrito federal, Pará, Minas Gerais, São Paulo, Piauí e Maranhão. O Buritizeiro se prolifera em grupamentos homogêneos conhecidos comumente como Veredas de Buritizais, sendo considerado a palmeira mais abundante do Brasil (LEAL, 2005; LORENZI et al., 2004).

A Figura 1 mostra o aspecto do vegetal na natureza e seus frutos com suas diferentes partes.

Figura 1: Aspecto da palmeira *Mauritia flexuosa* L. com seu fruto inteiro e seccionado



2. DESIGN DO PROCESSO

2.1. ETAPAS DO PROCESSO

O processo de produção de etanol de segunda geração a partir do endocarpo de buriti, desenvolvido para este projeto, é, resumidamente, constituído pela sequência das seguintes etapas, baseado em um trabalho previamente publicado (RODRIGUES et al., 2018):

- Cominuição dos endocarpos – Neste tratamento há o aumento da área superficial da biomassa;
- Pré-tratamento ácido – Remoção da hemicelulose da estrutura vegetal por meio de uma reação de hidrólise ácida;
- Pré-tratamento alcalino – Remoção da lignina por meio de uma reação de hidrólise alcalina;
- Hidrólise enzimática – Sacarificação da celulose a seus monômeros constituintes;
- Fermentação alcóolica – Produção de etanol utilizando-se as soluções de açúcares advindas do pré-tratamento ácido (pentoses) e da hidrólise enzimática (hexoses).
- Destilação – Purificação do etanol para a venda.

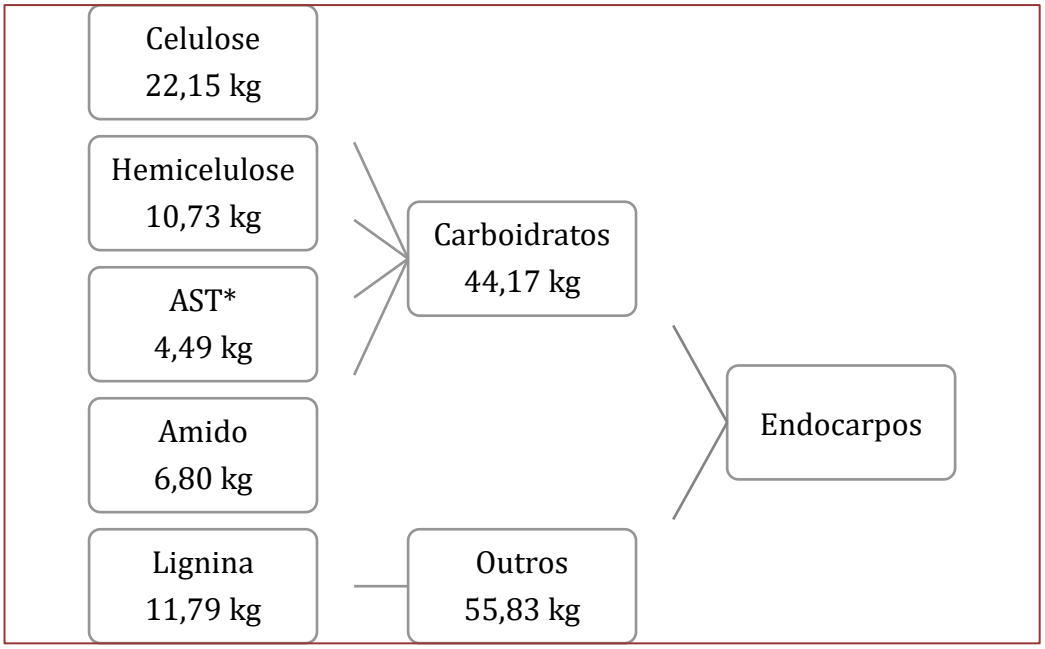
O diagrama de blocos do processo está apresentado na figura 2.

3. BALANÇO DE MASSA

Nesta seção estão dispostos os cálculos do balanço mássico do processo, com base em 100kg da biomassa, uma vez que este constitui-se de base para a cadeia produtiva, estabelecendo as quantidades de matérias primas necessárias e os produtos produzidos.

3.1. FLUXO PRINCIPAL - FERMENTAÇÃO DA CELULOSE

3.1.1. COMPOSIÇÃO DE ENTRADA



*Açúcares solúveis totais

3.1.2. DIGESTOR 1

a) Entrada

Condição de operação: Concentração de H2SO4 igual a 7% e razão sólido-líquido de 15%.

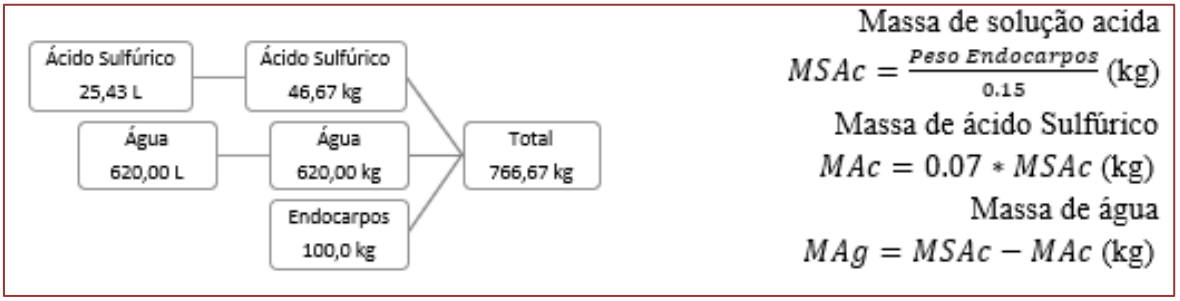
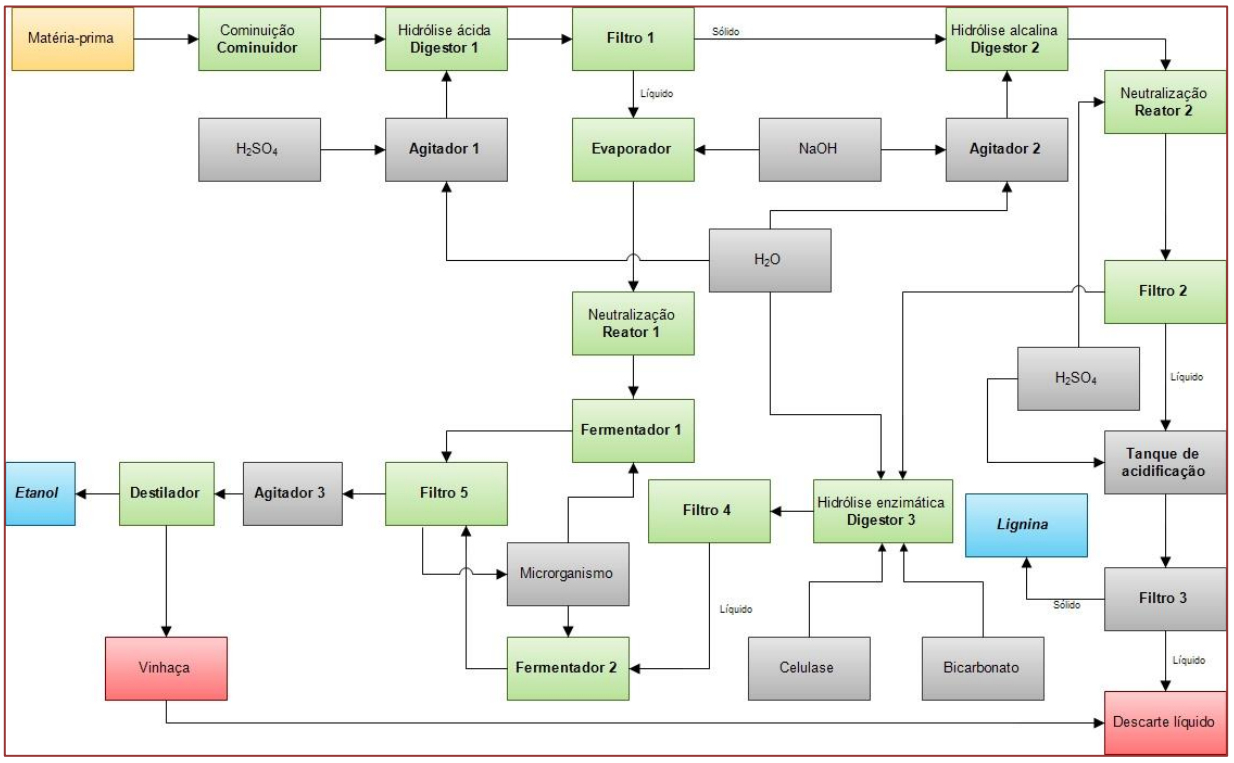
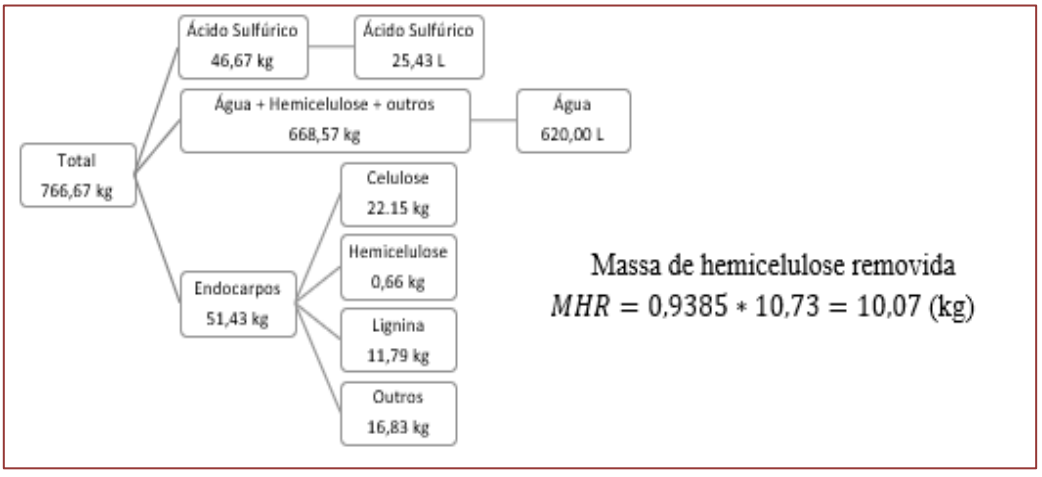


Figura 2: Diagrama de blocos do projeto industrial para produção de etanol de segunda geração a partir do endocarpo do fruto do buriti (*Mauritia flexuosa*.)



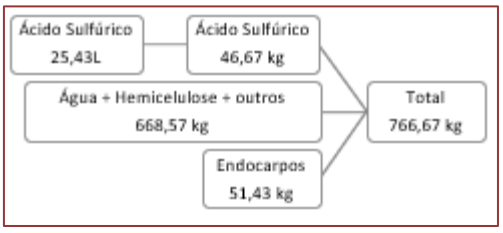
b) Saída

Base de cálculo: Remoção de 93.85% da hemicelulose originalmente presente nas amostras:



3.1.3. FILTRO 1

a) Entrada

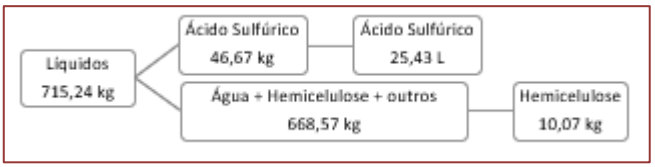


b) Saída

b-I Corrente Sólida



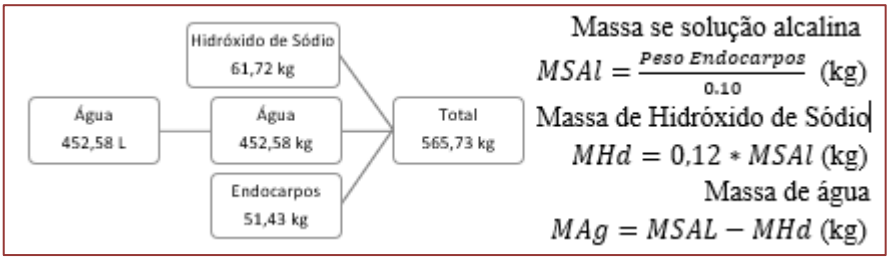
b-II Corrente Líquida



3.1.4. DIGESTOR 2

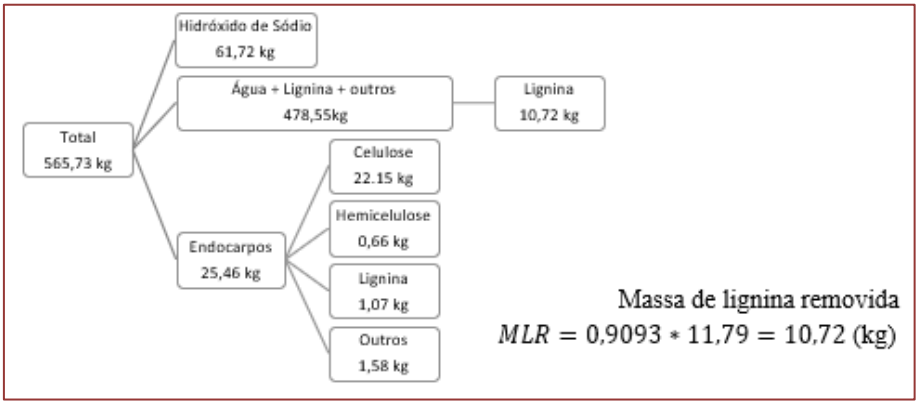
a) Entrada

Base de cálculo: Concentração NaOH de 12% (m/v) e razão sólido-líquido de 10%.



b) Saída

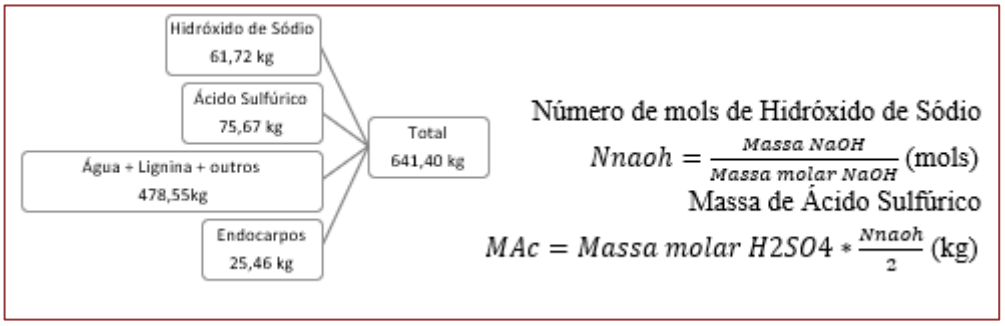
Base de cálculo: Remoção de 90,93% da lignina originalmente presente nas amostras



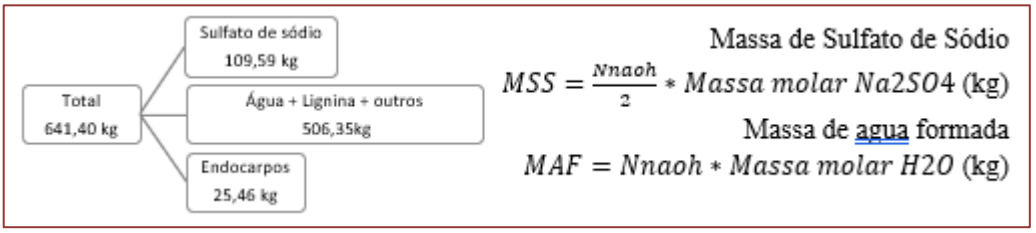
3.1.5. REATOR 2

Base de cálculo: Reação de neutralização $H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O$

a) Entrada

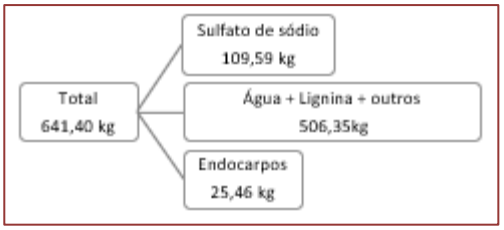


b) Saída



3.1.6. FILTRO 2

a) Entrada

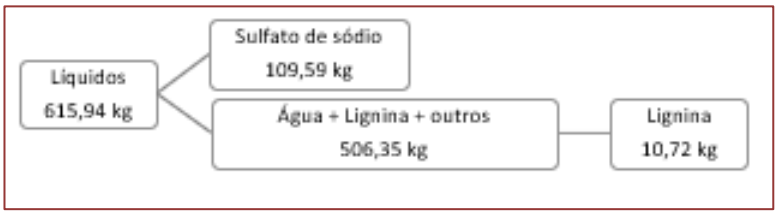


b) Saída

b-I Corrente Sólida



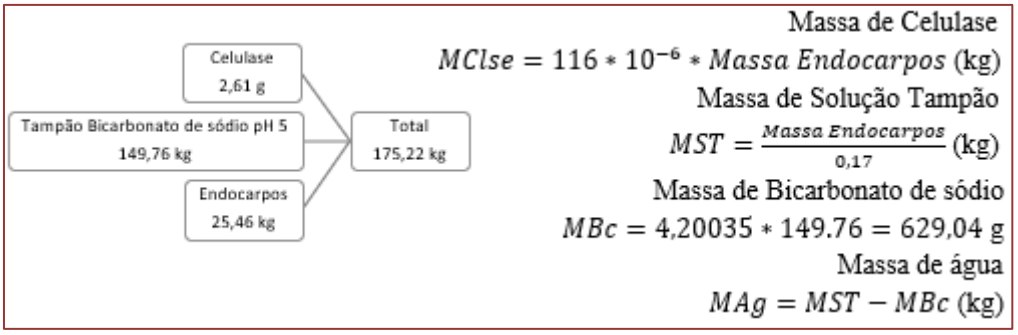
b-II Corrente Líquida



3.1.7. DIGESTOR 3

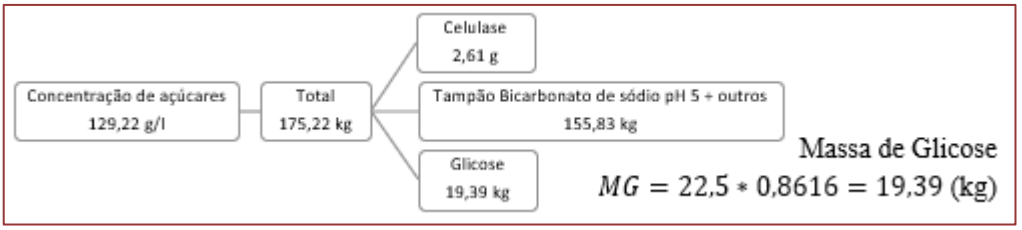
a) Entrada

Base de cálculo: Razão sólido-líquido de 17% (Bicarbonato de sódio 50mM) e 116µg de celulase por grama de biomassa.



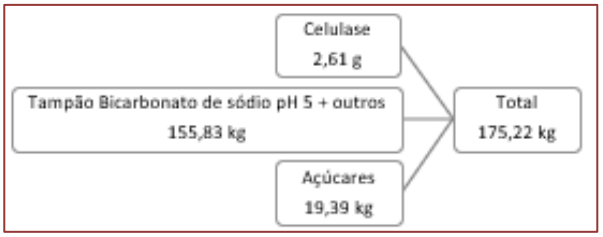
b) Saída

Base de cálculo: Eficiência hidrolítica correspondente a 86,16 ± 0,48%.

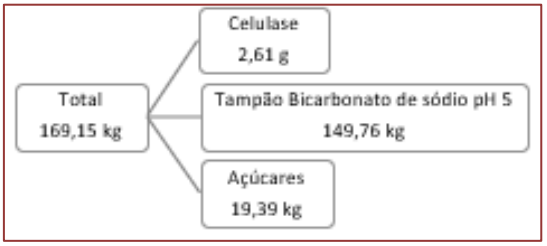


3.1.8. FILTRO 4

a) Entrada



b) Saída



3.1.9. FERMENTADOR 2

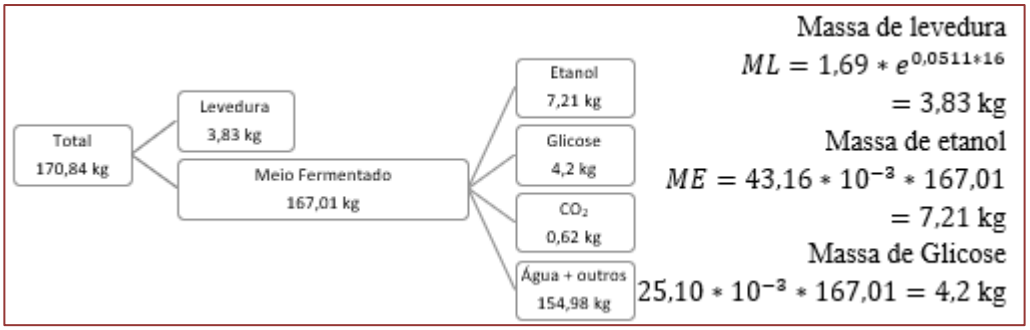
a) Entrada

Base de cálculo: Inoculo da levedura na proporção de 1% para o meio.



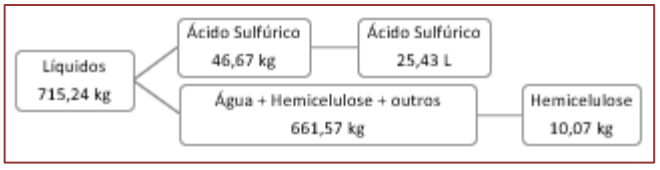
b) Saída

Base de cálculo: Taxa de crescimento da biomassa (0,0511 h-1) calculada segundo dados reportados por Batistote e colaboradores (2010). Concentração de etanol de 43,16 g/l.



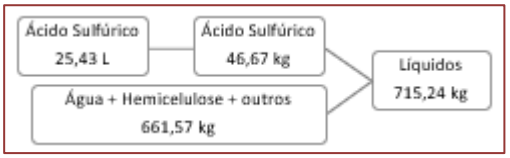
3.2. FLUXO SECUNDÁRIO - FERMENTAÇÃO DA HEMICELULOSE

3.2.1. CORRENTE LIQUIDA DA FILTRO 1

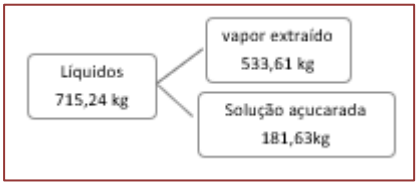


3.2.2. EVAPORADOR

a) Entrada



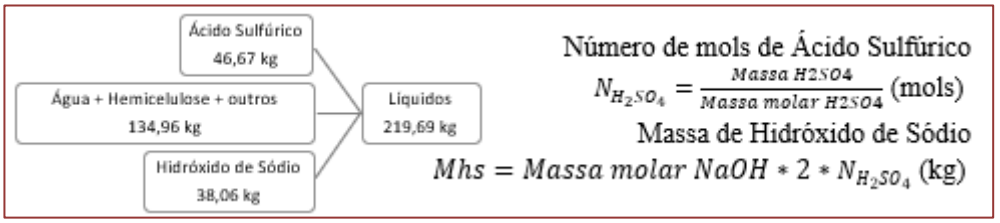
b) Saída



3.2.3. REATOR 1

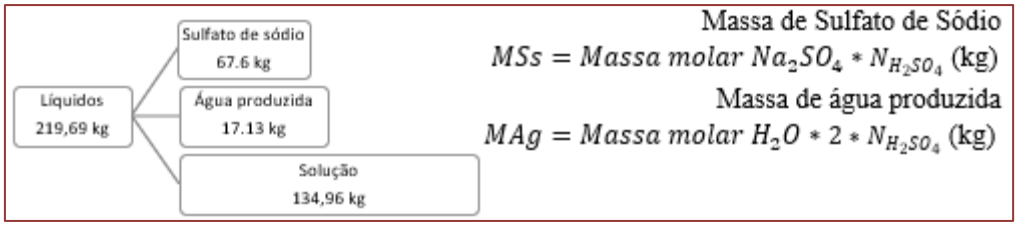
Base de cálculo: Reação de neutralização $H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O$

a) Entrada



b) Saída

Base de cálculo: O volume da solução de pentoses foi estimado utilizando-se o valor da densidade de uma solução de sulfato de sódio a 25% reportado por Garret (2001).



Após o resfriamento da corrente de saída do reator 1 até a temperatura ambiente (temperatura de fermentação), a solubilidade da solução açucarada em relação ao sal Na2SO4 cai para aproximadamente 25% em peso, de acordo com Garret (2001).

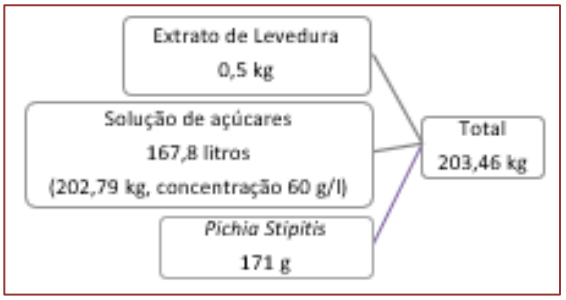
Desta forma, ao final do resfriamento 16,9 kg de Na2SO4 são precipitados formando um corpo de fundo. O conteúdo líquido restante, 202,79kg (187,8 litros a uma concentração de açúcares correspondente a 60g/l) é encaminhado para fermentação.

3.2.4. FERMENTADOR 1

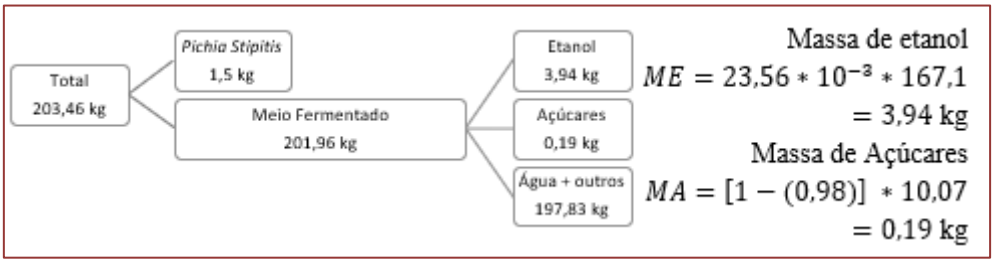
Base de cálculo: Estudo de fermentação de hidrolisado de hemicelulose não detoxificado com a levedura *Pichia Stipitis* reportado por Garcia (2012).

Suplementação do meio com extrato de levedura (Saccharomyces cerevisiae) 3 g/L, tempo de fermentação de 72 horas, inoculo a uma concentração de 1g/L, concentração de biomassa 9g/L, porcentagem de consumo de açúcares de 98,08% e produção de etanol de 23,56 g/L.

a) Entrada



b) Saída

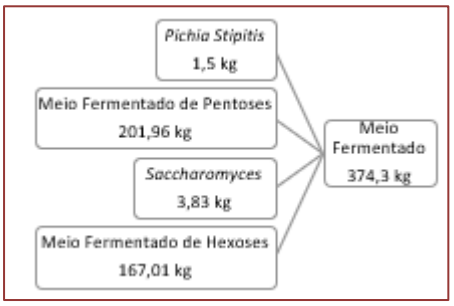


3.3. FLUXO DE DESTILAÇÃO

Para o processo de destilação, os fluxos principal e secundário de fermentação são homogeneizados no agitador 3 e então encaminhados para filtragem.

3.3.1 FILTRO 5

a) Entrada

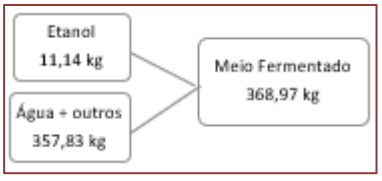


b) Saída



3.3.2 DESTILADOR

a) Entrada



b) Saída

Base de cálculo: Teor alcoólico determinado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP): 92,5 a 93,8% (p/p). Densidade do álcool hidratado igual a 0,8 Kg/L (FISPQ número BR0029, versão 6).

Tendo-se:

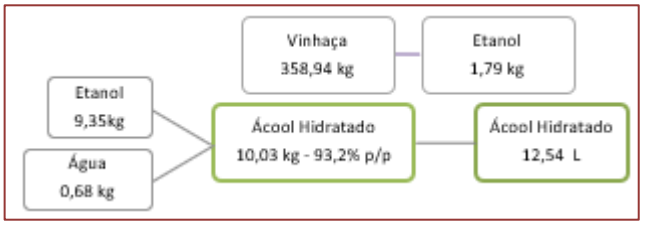
$$B=F-D \qquad FX_F=DX_D+BX_B$$

Onde B = produto de fundo (vinhaça), F = alimentação, D = destilado, xF = 0,0302 = fração de etanol na alimentação, xB = 0,005 = fração de etanol no produto de fundo, e xD = 0,932 = fração de etanol no destilado.

Assim:

$$368{,}97\ kg(0{,}0302) = D(0{,}932) + (368{,}97\ kg - D)(0{,}005)$$

$$D = 10{,}03kg \qquad B = 358{,}94kg$$



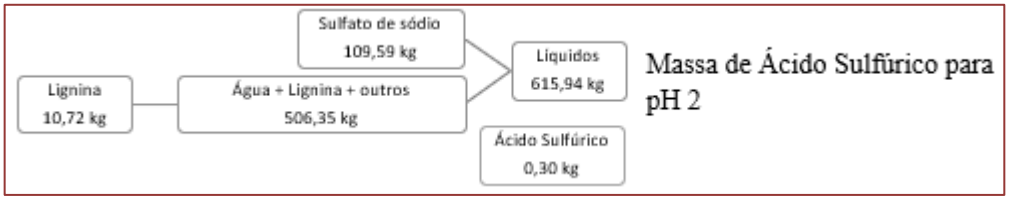
O valor de x_F foi determinado pelo balanço de massa do processo, o de x_D pelo teor alcoólico apontado pela ANP, e x_B pela viabilidade do cálculo do número de estágios realizado na seção 4.9 através do método de McCabe-Thiele.

3.4. FLUXO TERCIÁRIO – RECUPERAÇÃO DA LIGNINA

3.4.1. TANQUE DE ACIDIFICAÇÃO

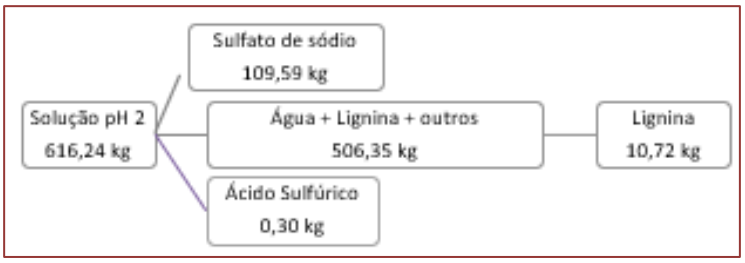
Base de cálculo: Precipitação da lignina em pH 2 ($pH=\log_{10}$ [H^]), porcentagem de recuperação da lignina de 91% (MONTEIRO et al., 2015).

a) Entrada



$$MAc = \left(Massa\ molar\ H2SO4 * {}^{10^{-2}}/_{2} * Volume\ da\ solução/1000\right) \text{(kg)}$$

b) Saída



3.4.2 FILTRO 3

Quantidade de lignina recuperada na fração sólida do centrifugado:



A fração líquida do centrifugado é acondicionada no tanque 6 para posterior tratamento e descarte.

O diagrama de processo com o resumo do balanço de massa para a produção de etanol a partir do endocarpo do Buriti está apresentado na Figura 3.

4. BALANÇOS ENERGÉTICOS

4.1. BALANÇO ENERGÉTICO DO COMINUIDOR

O cálculo do requerimento energético em uma operação de cominuição é efetuado empiricamente e não se aplica muito precisamente em situações práticas, contudo, como esta operação requer bastante energia, o uso de modelos que determinem tal grandeza torna-se relevante na medida em que fornece um parâmetro base para fins de orientação.

De acordo com Geankoplis (2013), um dos métodos mais recentes utilizados para estimar o requerimento energético de cominuidores, conhecido como lei de Bond, deriva da consideração de que o trabalho requerido na operação é proporcional à raiz quadrada da razão superfície/volume do produto.

Desta forma, a equação final de energia proposta por Bond é dada por:

$$W = 10W_i\left(\frac{1}{\sqrt{X_P}} - \frac{1}{\sqrt{X_F}}\right)$$

Onde Wi (kWh/ton) é o índice de trabalho e, X_P (µm) e X_F (µm) são, respectivamente, os diâmetros de partícula do produto e da alimentação.

Quanto aos cálculos, como não existem dados do valor do índice de trabalho para o endocarpo do buriti disponíveis na literatura, este elemento foi aproximado utilizando-se o Wi de uma biomassa lignocelulósica similar, a madeira (Wi = 413,03 kWh/ton), reportado por Williams e seus colaboradores (2014).

O diâmetro médio dos endocarpos integrais é de 31770 µm (ROSSI et al, 2014) e o diâmetro final utilizado no presente trabalho corresponde a 1000 µm.

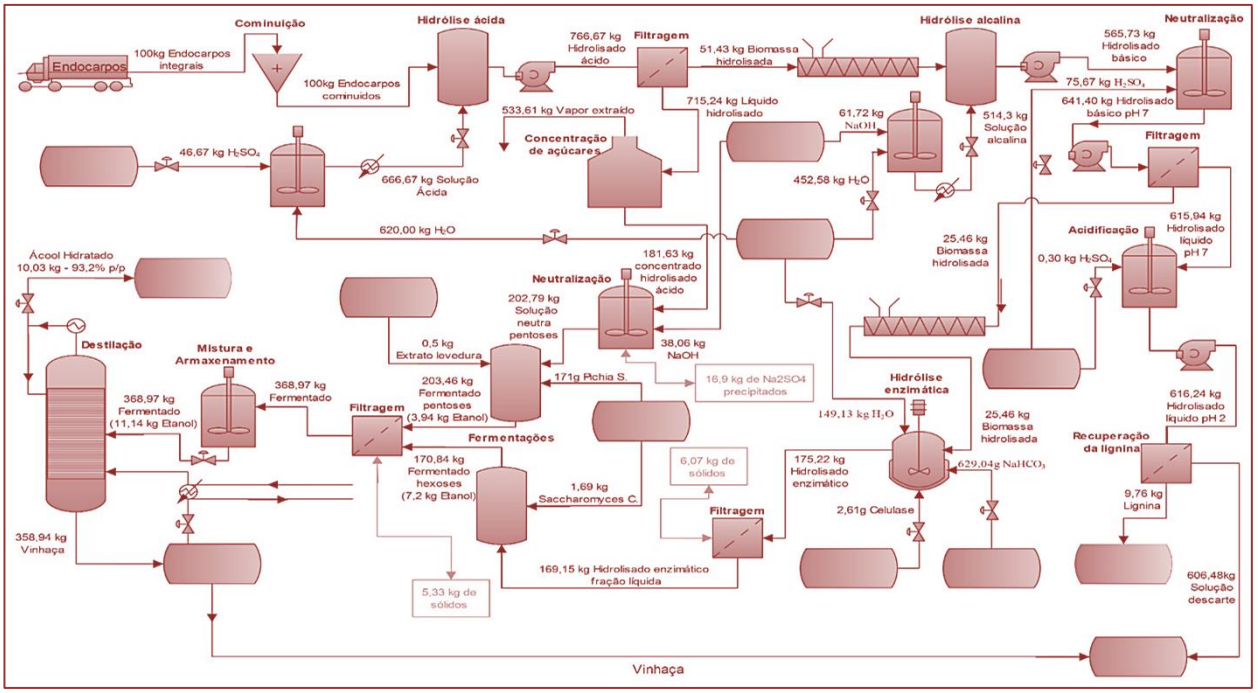
Desta forma:

$$W=386,78 \text{ kJ/kg}$$

Considerando que a operação é realizada semanalmente durante 45 min (processamento de 10000 kg de biomassa), tem-se um gasto energético de:

$$W=1.432,42 \text{ kW}$$

Figura 3: Diagrama para o balanço de massa global do processo de produção de etanol a partir do endocarpo do fruto do buriti (*Mauritia flexuosa*.) com base em 100 kg de biomassa



4.2. BALANÇO ENERGÉTICO DO DIGESTOR 1

Biomassa e solução ácida entram no digestor à temperatura ambiente (25ºC) e são aquecidas até 120ºC, temperatura final de operação no digestor. Parte do calor fornecido pelo equipamento é utilizado para aquecer a biomassa e a outra parcela eleva a temperatura da solução de ácido sulfúrico 7% até a temperatura de operação.

Assim, o balanço de energia construído para o equipamento em questão é dado pela seguinte expressão:

$$Q_{Requerido} = Q_{Biomassa} + Q_{Solução}$$

Onde:

$$Q_{Biomassa} = m_{Biomassa} * \int Cp_{Biomassa}\, dT \qquad Q_{Solução} = m_{Solução} * \int Cp_{Solução}\, dT$$

Os calores específicos da solução de ácido sulfúrico a 7% e da biomassa foram obtidos através de dados publicados por Perry et al. (1999), sendo estes correspondentes a 3936,43 J/kg*K e 2302,74 J/kg*K, respectivamente.

Cabe ainda ressaltar, que na ausência de dados que descrevam o comportamento térmico do endocarpo de buriti, o valor de seu calor específico foi aproximado utilizando-se o valor do calor específico da madeira, dada a similaridade da natureza de ambos os materiais. Adicionalmente, o valor do Cp da solução de ácido sulfúrico a 7% foi interpolado entre os valores equivalentes às concentrações de 5,16% e 9,82%.

Desta forma, realizando-se os devidos cálculos, tem-se: $Q'_{Requerido}$=15.147,35 kW

4.3. BALANÇO ENERGÉTICO DO EVAPORADOR

O balanço de energia para o evaporador é dado pelo modelo matemático que se segue:

$$Fh_F + SH_S = Lh_L + VH_V + Sh_S$$

$$Fh_F + S(H_S - h_S) = Lh_L + VH_V$$

Dado:

$$(H_S - h_S) = \lambda$$

Tem-se:

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + VH_V$$

O calor transferido no evaporador é então:

$$q = S\lambda = Lh_L + VH_V - Fh_F$$

Onde F, S, L e V são, respectivamente, as vazões de alimentação, vapor (fonte de calor), produto concentrado e solução evaporada. Já h_F, H_S, h_L, H_V e h_S dizem respeito às entalpias de alimentação, vapor (fonte de calor), produto concentrado, solução evaporada e vapor condensado.

Considerando-se um processamento semanal de 10000 kg de endocarpo, são produzidos 71524 kg de solução de pentoses diluída. Portanto, com um tempo de operação de 4 horas tem-se uma vazão de alimentação F correspondente à 17881 kg/h.

A solução de alimentação é composta basicamente por açúcares, extrativos orgânicos e pelo ácido H2SO4, desta forma, suas propriedades térmicas (ponto de ebulição e calor específico) podem diferir significativamente daquelas encontradas para a água.

Por outro lado, de acordo com Perry et al. (1999), o efeito de compostos orgânicos possui um impacto pequeno no aumento do ponto de ebulição de uma solução se comparados com o efeito de ácidos como o sulfúrico, assim, neste trabalho, somente o efeito do H2SO4 foi considerado como fator de influência nas propriedades da solução.

A corrente de alimentação entra no evaporador a uma temperatura de aproximadamente 100,6ºC (213ºF), temperatura de saída da operação posterior de hidrólise ácida, dada a concentração de H_2SO_4 correspondente a 6,1% em peso. Já a corrente de saída, constituída pelo produto concentrado L, possui uma concentração de H_2SO_4 de 25,7% em peso, o que gera um aumento no ponto de ebulição da água de 5ºC, de acordo com dados publicados pela General Chemical (1991).

O valor de entalpia para H_V e os valores de h_F e h_L, correspondentes ás soluções com concentrações de H_2SO_4 de 6,1% e 25,7%, foram obtidos através de dados publicados pela General Chemical (1991) e por Hougen e Watson (1943).

Uma vez que, pelo balanço de massa:

$F = 17.881\ kg/h$, $L = 4.550{,}75\ kg/h$ e $F = L + V$

Logo:

$$V = 13.340{,}25\ kg/h$$

Portanto, resolvendo a equação do balanço de energia tem-se:

H_V = 2378,102 kJ/kg (568 Cal/g) – Calor de vaporização da água em uma solução de ácido sulfúrico a 25,7%. h_F = 372,16 kJ/kg (160 Btu/lb) – Entalpia da solução de alimentação com ácido sulfúrico a 6,1%. h_L = 144,21 kJ/kg (62 Btu/lb) – Entalpia da solução concentrada, com ácido sulfúrico a 25,7%.

$$q = Lh_L + VH_V - Fh_F$$

$$q = 1.438{,}74\ kJ/kg \qquad q = 7.146{,}14\ kW$$

4.4. BALANÇO ENERGÉTICO DO DIGESTOR 2

No digestor 2, a solução alcalina entra à temperatura ambiente (25ºC), já a biomassa entra à temperatura de 100,5ºC. A energia térmica em excesso na biomassa é aproveitada para ajudar a elevar a temperatura da solução de hidróxido de sódio 12% até 80ºC, juntamente com o calor fornecido pelo equipamento.

Assim como no balanço de energia construído para o digestor 1, o balanço para o digestor 2 é dado pela seguinte expressão: $Q_{Requerido} = Q_{Biomassa} + Q_{Solução}$

Os calores específicos da solução de hidróxido de sódio 12% e da biomassa foram obtidos através de dados publicados por Perry et al. (1999), sendo estes correspondentes a 3439,87 J/kg*K e 2302,74 J/kg*K, respectivamente.

O valor do calor específico da biomassa foi novamente estimado como sendo aproximadamente igual ao da madeira, material de natureza mais compatível com a do endocarpo de buriti e cujos dados estão disponíveis na literatura, mesmo depois da biomassa de trabalho ter sido submetida a hidrólise ácida, que removeu quase todo seu teor de hemicelulose. O valor do Cp da solução de hidróxido de sódio 12% foi interpolado entre os valores equivalentes às concentrações de 9,09% e 16,7%.

Desta forma, realizando-se os devidos cálculos, tem-se: $Q'_{Requerido} = 45{,}82\ kW$

4.5. BALANÇO ENERGÉTICO DO DIGESTOR 3

No digestor 3, a solução tampão entra no digestor à temperatura ambiente (25ºC), juntamente com a celulase, já a biomassa entra à temperatura de 80ºC. A energia térmica em excesso na biomassa é aproveitada para ajudar a elevar a temperatura da solução de hidrólise enzimática até 50ºC, juntamente com o calor fornecido pelo equipamento.

O balanço para o digestor 2 é dado pela seguinte expressão:

$$Q_{Requerido} = Q_{Biomassa} + Q_{Solução}$$

Onde $Q_{Biomassa}$ e $Q_{Solução}$ são, respectivamente, as energias necessárias para aquecer a biomassa e a solução.

Os calores específicos da solução tampão e da biomassa foram obtidos através de dados publicados por Perry et al. (1999), sendo estes iguais a 4186,8 J/kg*K e 1339,8 J/kg*K, respectivamente.

O valor do calor específico da solução tampão foi estimado como sendo próximo ao Cp da água, dada a pequena concentração de bicarbonato de sódio na solução (50 mM) e a falta de dados termodinâmicos para esta solução na literatura.

O calor específico da biomassa foi estimado como sendo igual ao da celulose, visto que ela corresponde a 88,5% da composição do material.

Desta maneira: : $Q'_{Requerido} = 64{,}48\ kJ/kg$ $\quad Q'_{Requerido} = 20{,}92\ kJ/kg$

Adicionalmente, há que se contabilizar o valor da energia necessária para manter uma agitação de 100rpm no digestor ($E_{Agitação}$). O valor da energia necessária para manter a agitação mencionada com um agitador tipo âncora ou helicoidal é de aproximadamente 1 kW/m^3, de acordo com Battaglini (1998). Sabendo-se que o volume a ser agitado (descrição do cálculo na seção 10.2) é de 16.62 m^3, para um processamento de 10.000 kg de endocarpos integrais, tem-se um gasto energético, no Digestor 3, com agitação correspondente a:

$$E_{Agitação} = 1\frac{kW}{m^3}.16{,}62\ m^3 = 16{,}62\ kW$$

Os agitadores do tipo âncora ou helicoidais são mais indicados para este tipo de mistura dada a viscosidade mais elevada deste sistema reacional.

Somando os valores de $E_{Requerido}$ e $E_{Agitação}$, tem-se uma demanda energética de 37,54 kW para o processo de hidrólise enzimática.

4.6. BALANÇO ENERGÉTICO DOS AGITADORES 1, 2 E 3

Os agitadores 1, 2 e 3 são utilizados para a agitação das soluções de hidrólise ácida, de hidrólise alcalina e alcoólica, respectivamente. Nos agitadores 1 e 3, o objetivo é a mistura de dois líquidos miscíveis, já no agitador 2, o objetivo é promover a dissolução de um soluto no solvente.

Foust (2011) publicou dados da potência gasta por agitadores, por volume de mistura, de acordo com a aplicação do processo. Estes dados estão organizados na Tabela 1. Assim, tendo-se o volume das soluções a serem agitadas, pode-se estabelecer que a energia gasta em um agitador é determinada pela equação:

$$E_{Ag} = V_m . P$$

Na qual E_{Ag} é a energia necessária à agitação, V_m o volume de mistura e P a potência requerida por volume de mistura.

Para o Agitador 1:

$\rho_{Água} = 1000\ kg/m^3$ e $\rho_{H_2SO_4} = 1835{,}2\ kg/m^3$ (PERRY, 1999).

Tem-se:

$$V = \frac{M}{D}$$

Onde V = Volume, M = massa e ρ = Densidade

Tabela 1: Dados de potência de agitação por volume de mistura em função da aplicação do processo

Agitação	Aplicações	Potência (kW/m³)
Branda	Mistura	0,04 – 0,10
	Reações Homogêneas	0,01 – 0,03
Média	Transferência de calor	0,03 – 1,0
	Mistura de dois líquidos	1,0 – 1,5
Severa	Suspensão de lama	1,5 – 2,0
	Absorção de gás	1,5 – 2,0
	Emulsões	1,5 – 2,0
Violenta	Suspensão de lamas finas	> 2,0

Desta forma, incluindo os dados do projeto, calcula-se:

$$V_{Ag1} = \left(V_{Água} + V_{H_2SO_4}\right) = 64{,}54\ m^3$$

Com a potência média requerida de 1,25 kW/m³ (FOUST, 2011) e um volume de 64,54 m³: $E_{Ag1} = V_m . P = 80{,}68\ kW$

Para o Agitador 2:

$\rho_{Água} = 1000\ kg/m^3$ e $\rho_{NaOH} = 2130\ kg/m^3$ (PERRY, 1999).

$$V = \frac{M}{D}$$

$$V_{Ag2} = \left(V_{Água} + V_{NaOH}\right) = 48{,}16\ m^3$$

A potência média requerida é de 0,07 kW/m³ (mistura solvente-soluto), segundo Foust (2011), e com o volume de 48,16 m³, tem-se:

$$E_{Ag2} = V_m . P = 3{,}37\ kW$$

Para o Agitador 3:

$\rho_{Fermentado} = 991{,}57\ kg/m^3$(PERRY, 1999) e $\rho_{microrganismos} = 1220\ kg/m^3$ (KIZITO et al., 2003).

A densidade do fermentado foi aproximada utilizando-se a densidade de uma solução alcoólica a 30,19 g/l a 25°C, dado que a mistura é composta pelos fermentados de pentoses e hexoses.

Calcula-se:

$$V = \frac{M}{D}$$

$$V_{Fermentado} = \frac{36897\ kg}{991{,}57\ kg/m^3} = 37{,}21\ m^3$$

Com a potência média requerida de 1,25 kW/m³ (mistura de dois líquidos) descrita por Foust (2011) e o volume de 37,17 m³, assim, tem-se: $E_{Ag3} = V_m . P = 46{,}51\ kW$

4.7. BALANÇO ENERGÉTICO DOS REATORES 1 E 2

Nos reatores 1 e 2 ocorrem reações de neutralização entre a base NaOH e o ácido H_2SO_4 para que as condições nas demais operações unitárias sejam satisfeitas. Dado que tais reações ocorrem com agitação e seguindo o mesmo tratamento matemático utilizado na seção 4.6, a determinação do consumo energético dos sistemas de agitação é realizada.

Para o Reator 1:

O volume da solução do reator foi estimado utilizando-se como base o valor da densidade de uma solução de sulfato de sódio (produto da neutralização) a 30,8%, dado que este é o composto em maior quantidade na solução.

$\rho_{Na_2SO_4(30{,}8\%)} = 1301\ kg/m^3$ (GARRET, 2001).

Dado:

$$V = \frac{M}{\rho}$$

Onde: V = Volume, M = massa e ρ = Densidade

Assim, considerando a potência média requerida de 0,02 kW/m³ (reações homogêneas) publicada por Foust (2011), tem-se: $E_{Rt1} = V_m . P = 0{,}34\ kW$

Para o Reator 2:

O volume da solução do reator 2 foi estimado utilizando-se como base o valor da densidade da solução de sulfato de sódio a 17,8%. A influência da biomassa na contribuição do volume foi levada em conta neste caso dada a sua quantidade.

$\rho_{Na_2SO_4(17,8\%)} = 1167{,}4\ kg/m^3$ (GARRET, 2001) e $\rho_{Celulose} = 1500\ kg/m^3$ (USDA, 2010).

$$V = \frac{M}{\rho}$$

Desta forma, o volume a ser agitado no reator 2 é:

$$V_{Rt2} = \left(V_{Celulose} + V_{Na_2SO_4(17,8\%)}\right) = 54{,}45\ m^3$$

Deste modo, com a potência média requerida de 0,02 kW/m³ (FOUST, 2001), tem-se:

$$E_{Rt2} = V_m . P = 1{,}09\ kW$$

4.8. BALANÇO ENERGÉTICO DO TANQUE DE ACIDIFICAÇÃO

O tanque de acidificação é utilizado para a precipitação da lignina através da adição de ácido no meio até o pH 2. Desta forma a parte líquida filtrada advinda do reator 2 é agitada juntamente com ácido sulfúrico.

Como calculado na seção 9.7:

$$V_{Na_2SO_4(17,8\%)} = \frac{61594\ kg}{1167{,}4\ kg/m^3} = 52{,}76\ m^3$$

O volume de ácido sulfúrico também pode ser calculado através de sua densidade:

$\rho_{H_2SO_4} = 1835{,}2\ kg/m^3$ (PERRY, 1999).

$$V = \frac{M}{\rho}$$

O volume a ser agitado no tanque de acidificação é:

$$V_{Tac} = \left(V_{H_2SO_4} + V_{Na_2SO_4(17,8\%)}\right) = 52{,}78\ m^3$$

A potência média requerida é de 1,25 kW/m³ (mistura de dois líquidos), segundo Foust (2011). Assim: $E_{Tac} = V_m . P = 65{,}98\ kW$

4.9. BALANÇO ENERGÉTICO DO DESTILADOR

O requerimento energético do destilador é calculado através das seguintes relações publicadas por McCabe et al. (2005):

$$Q_B = Q_C + h_D . D + h_B . B - h_F . F$$

$$Q_C = (h_V - h_D) . V$$

$$F = D + B$$

$$V = (R + 1)D$$

Onde D = vazão de destilado (produto), B = vazão de produto de fundo (vinhaça), F = vazão de alimentação, V= vazão de vapor, Q_C = calor removido pelo condensador, Q_B = calor

fornecido pelo ebulidor, h_D = entalpia do destilado na temperatura de ebulição, h_B = entalpia da vinhaça na temperatura de ebulição, h_F = entalpia de da alimentação na temperatura de entrada, h_V = entalpia do destilado no ponto de orvalho e R = razão de refluxo.

Os valores de F, D e B foram calculados previamente no balanço de massa para o destilador na seção 3.3.2 e redimensionados para o processamento de 10.000 kg de biomassa e um tempo de destilação de 6 horas, assim, tem-se:

$$F = 6.149{,}5\ kg/h,\ D = 167{,}16\ kg/h \text{ e } B = 5.982{,}33\ kg/h$$

Para o cálculo da razão de refluxo (r), Perry (1999) afirma que o valor desta grandeza varia entre 1.2 á 1.5 vezes a razão de refluxo mínima (Rm), no presente trabalho a razão de refluxo foi tomada como 1.2 vezes a razão de refluxo mínima. De acordo com Geankoplis (2003), a vazão de refluxo mínima pode ser definida como a vazão de refluxo que irá requerer um número infinito de pratos no destilador para promover a separação necessária. Utilizando o método de McCabe-Thiele, quando as duas linhas de operação do destilador (linhas de enriquecimento e de esgotamento) tocam a curva de equilíbrio, um ponto (x',y') é formado, onde o número de pratos do destilador se torna infinito.

A inclinação da linha de enriquecimento é definida a seguir, uma vez que a mesma passe por (x',y'):

$$\frac{Rm}{Rm+1} = \frac{x_D - y'}{x_D - x'}$$

Para a qual x_D é definida como a fração de etanol em peso no destilado e r_m a vazão de refluxo mínima. Ainda, para o cálculo da vazão de refluxo mínima e posterior cálculo da vazão de refluxo, a curva q, que marca a interseção das linhas de operação, deve ser calculada:

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$$

$$q = \frac{(H_V\_H_L) + Cp_L(T_B - T_F)}{H_V - H_L}$$

Onde x_F = fração de etanol em peso na alimentação, Cp_L= calor específico da corrente de alimentação, T_B= temperatura de ebulição da alimentação, T_F = temperatura da corrente de alimentação, H_V = entalpia da corrente de alimentação no ponto de orvalho e H_L = entalpia da corrente de alimentação no ponto de ebulição.

Os valores de x_F, x_D e x_B também foram calculados previamente no balanço de massa para o destilador da seção 3.3.2:

$$x_F = 0{,}030,\ x_D = 0{,}932 \text{ e } x_B = 0{,}005$$

Após a realização de cálculos teste, decidiu-se alimentar o destilador com a corrente F na temperatura de ebulição T_B, uma vez que a alimentação na temperatura ambiente, previamente considerada, demanda um grande aumento no número de estágios de destilação nas presentes condições de projeto. Desta maneira, dado que $T_F = T_B$, o valor de q é igual a 1 e a equação da curva q se torna, para esta condição de alimentação:

$x = x_F$ (GEANKOPLIS, 2003).

De forma a obter o valor do par ordenado (x',y'), a linha de enriquecimento, a curva q e a curva de equilíbrio etanol-água foram plotadas e estão dispostas na Figura 4. Como pode ser observado, o valor de x' é 0,03 e o de y' corresponde a 0,24. Os valores do equilíbrio etanol-água foram obtidos de dados publicados por Perry (1999).

Com os valores de x'e y' a vazão de refluxo mínima pôde ser calculada, e por conseguinte, a vazão de refluxo propriamente dita:

$$\frac{Rm}{Rm+1} = \frac{x_D - y'}{x_D - x'}$$

$\mathrm{Rm} = 3{,}295 \quad \mathrm{R} = 1{,}2\mathrm{Rm} \quad \mathrm{R} = 3{,}954$

Recapitulando o objetivo principal da seção, a determinação do requerimento energético do destilador, com os dados obtidos através dos cálculos aqui realizados pode-se desenvolver:

$$V = (R+1)D \qquad V = 828{,}11\ kg/h$$

Tendo as entalpias do destilado na temperatura de ebulição (h_D) e no ponto de orvalho (h_V) sido coletadas de dados termodinâmicos para soluções aquosas de etanol publicados por Perry (1999), o calor removido pelo condensador é de:

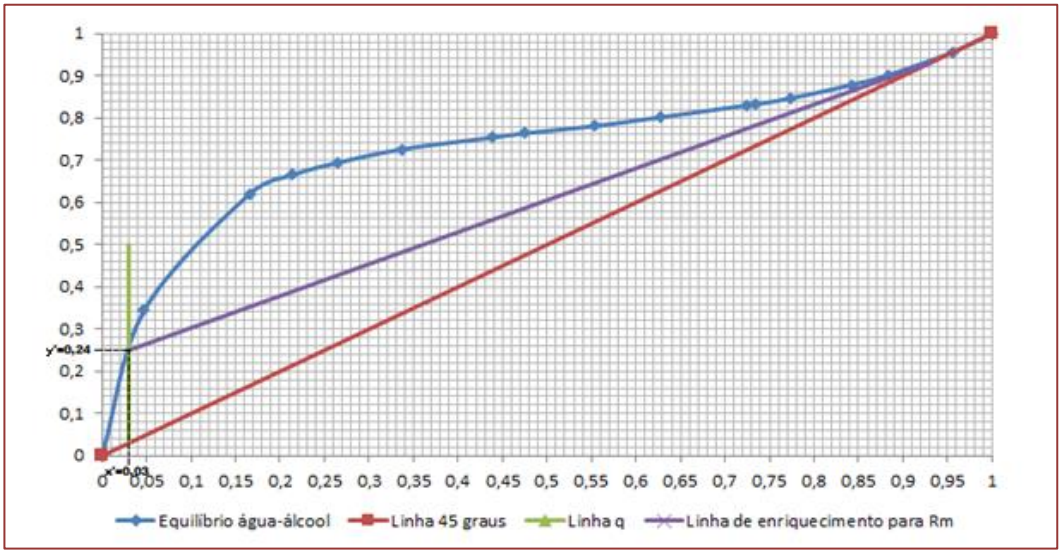
$$Q_C = (h_V - h_D).V \qquad Q_C = 244{,}47\ kW$$

Dado h_B = 418,68 kJ/kg, h_F = 96,59 kJ/kg e h_D = 257,66 kJ/kg (PERRY, 1999).

O calor fornecido pelo ebulidor para a operação de destilação pode então ser determinado por:

$$Q_B = Q_C + h_D.D + h_B.B - h_F.F \qquad Q_B = 824{,}69\ kW$$

Figura 4: Determinação cartesiana do par ordenado (x',y') através das curvas de enriquecimento, q e de equilíbrio etanol-água



REFERÊNCIAS

[1] BATISTOTE, M. et al. Desempenho de leveduras obtidas em indústrias de Mato Grosso do Sul na produção de etanol em mosto a base de cana de açúcar. Ciência e Natura, v. 32, n. 2, p. 83 - 95, 2010.

[2] BATTAGLINI, N. M. P. Avaliação do Comportamento de Impelidores Especiais em Mistura de Fluidos. 1998. 116 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Botucatu, 1998.

[3] FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das Operações Unitárias. LTC, ed. 2, Rio de Janeiro, 2011.

[4] GARCIA D. Estudo de produção de etanol pela levedura Pichia Stipitid, a partir do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de malte. 2012. 153 p. Tese (Doutorado. em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2012

[5] GARRETT, D. E. Sodium Sulfate: Handbook of Deposits, Processing, & Use. 6. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

[6] GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Separation Process Principles (includes Unit Operations). 4. ed. New Jersey: Pearson Education, 2013. 1026 p.

[7] GENERAL CHEMICAL. Sulfuric Acid Technical Data, 1991.

[8] HOUGEN, A. O.; WATSON, K. M. Chemical Process Principles, Part I. 3. ed. New York: J. Wiley, 1943. 1107 p.

[9] KIZITO, J. P. et al. Specific Gravity of Saccharomyces Cerevisiae using Stokes Law. American Society ofor Gravitational and Space Biology, v.17, n. 1, Nov. 2003.

[10] LEAL, A. F. Condições do extrativismo e aproveitamento das frutas nativas da microrregião de Teresina – Piauí. 2005. 93 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). - Universidade Federal do Piauí, Teresina. 2005.

[11] LORENZI, H. et al. Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas. 1. Ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2004. 416 p.

[12] MCCABE W. L., SMITH J. C., HARRIOTT P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7. ed. New York: McGraw Hill, 2005. 1140 p.

[13] MONTEIRO, C. et al. Potencial Energético da Lignina Extraída do Licor Negro de Eucalyptus. USP; n. 18, 2015.

[14] PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1999

[15] RODRIGUES, P. R. et al. Evaluation of buriti endocarp as lignocellulosic substrate for second generation ethanol production. PeerJ, v. 6, p. e5275, 2018.

[16] ROSSI, A. A. B. et al. Caracterização Morfológica de Frutos e Sementes de Mauritia Flexuosa L. F. (Arecaceae) Ccm Ocorrência Natural na Amazônia Matogrossense. Enciclopédia Biosfera, v.10, n.18; p. 2014.

[17] USDA. Wood Handbook Wood as an Engineering Material. 100. ed. United States: Department of Agriculture, 2010. 508 p.

[18] WILLIAMS, O. et al. Bond Index & Hardgrove Grindability Index Tests for Biomass and Coal. In: 10th European Conference on Coal Research and its Applications. United Kingdom: University of Hull, Sept. 2014.

Capítulo 16

Otimização de receita de fertirrigação do tomate de mesa na fase de floração

Ana Vitória Galvão Vieira
Eduardo Fernandes Nunes

Resumo: A fertilização é uma prática essencial na agricultura, e a fertirrigação é uma técnica que tem ganhado cada vez mais espaço, já que permite a aplicação de nutrientes diretamente na raiz das plantas. No entanto, é necessário um planejamento cuidadoso para garantir que a dosagem de nutrientes seja adequada e que não haja desperdício de recursos. Para solucionar esse problema, o trabalho apresenta o uso de algoritmos genéticos como uma ferramenta de otimização da receita de fertirrigação. É apresentado o contexto histórico do uso de algoritmos genéticos na agricultura, bem como as etapas necessárias para a implementação dessa técnica. O artigo também apresenta um exemplo prático de implementação de um algoritmo genético em Python, mostrando como a técnica pode ser aplicada para otimizar a dosagem de nutrientes na fertirrigação do tomate de mesa na fase de floração. No entanto, é importante destacar que a convergência do algoritmo pode apresentar problemas e que é necessário fazer ajustes para que a otimização seja efetiva. Por fim, o artigo apresenta conclusões sobre a efetividade do uso de algoritmos genéticos na otimização da receita de fertirrigação do tomate de mesa na fase de floração. Embora o método apresente alguns desafios, como a necessidade de ajustes para a convergência adequada, é uma ferramenta promissora para a agricultura, permitindo uma utilização mais eficiente dos recursos e contribuindo para a sustentabilidade do setor.

Palavras-chave: algoritmos genéticos, agricultura de precisão, fertirrigação, tomate de mesa.

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), o Brasil é o nono maior produtor mundial de tomate, com uma produção anual média de cerca de 3,7 milhões de toneladas, sendo o Estado de São Paulo o segundo produtor de tomate do Brasil, respondendo por aproximadamente 20,17% da produção nacional, de acordo com o SIDRA (Sistema IBGE de Recuperação Automática). Assim, a cultura do tomate de mesa é de grande importância para o Estado de São Paulo e para o Brasil como um todo, tanto do ponto de vista econômico como social. Ela compõe uma das principais fontes de renda para os agricultores familiares no Brasil, com cerca de 530 mil famílias envolvidas na produção do tomate, segundo dados do Censo Agropecuário de 2017 e é uma das hortaliças mais consumidas pelos brasileiros segundo estudo da produção de tomate de mesa sobre o perfil do consumidor e a cadeia de comercialização no Brasil que foi realizado pela Hortifruti Brasil/Cepea, da Esalq/USP, em colaboração com o Ibrahort/CNTM (BOTEON, 2021).

Com o intuito de aumentar a eficiência e produtividade dessa cultura, a inteligência artificial (IA) vem sendo cada vez mais utilizada no agronegócio. No Brasil e no Estado de São Paulo, a aplicação de IA no agronegócio vem crescendo significativamente (EMBRAPA, 2020). No Estado de São Paulo, o agronegócio representa 14% do PIB do estado (IEA-SP, 2020), segundo dados do Instituto de Economia Agrícola de São Paulo (IEA-SP). Dentre as culturas agrícolas do estado, o tomate é um dos principais produtos, com mais de 9 mil hectares plantados e produção de mais de 742 mil toneladas em 2021, de acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) do IBGE. (IBGE, 2021). A aplicação de IA na cultura do tomate de mesa pode ser utilizada em diversas áreas, como a monitoração do crescimento das plantas, detecção de pragas e doenças, previsão de colheita, otimização de recursos, entre outras. A partir dos dados coletados, as soluções de IA podem fornecer informações precisas e auxiliar produtores na tomada de decisões. Um estudo realizado pela consultoria McKinsey & Company em 2020 mostrou que a aplicação de IA no agronegócio pode gerar uma economia de até 15% em custos, além de aumentar a produtividade em até 20%. Já uma pesquisa da Embrapa em 2020 destacou que a utilização de tecnologias como IA e machine learning na produção de tomates pode reduzir o uso de água e defensivos agrícolas, além de aumentar a produtividade. Algumas iniciativas de empresas e instituições de pesquisa brasileiras já utilizam a IA na produção de tomates. A Agrosmart, por exemplo, utiliza sensores e análises de dados para fornecer informações sobre a irrigação e manejo de cultivos, enquanto a Embrapa Hortaliças desenvolve soluções de IA para detecção e classificação de doenças em tomateiros. Assim, a aplicação de IA na cultura do tomate de mesa se insere no contexto do agronegócio no Brasil e no Estado de São Paulo como uma solução tecnológica promissora para aumentar a eficiência e produtividade, além de reduzir custos e melhorar a sustentabilidade. A IA é uma tecnologia que vem sendo amplamente utilizada no agronegócio para aprimorar o desempenho e a produtividade da produção agrícola, por meio de técnicas avançadas de análise de dados e modelagem matemática. A implementação de algoritmos genéticos nessa cultura está diretamente relacionada com a implementação de Inteligência Artificial (IA) no agronegócio no Brasil e no Estado de São Paulo. Isso se deve ao fato de que a utilização de algoritmos genéticos permite a otimização de diferentes processos, como a fertirrigação do tomate de mesa, que é um dos principais desafios da produção agrícola. Isso pode contribuir significativamente para a redução de custos, aumento de produtividade, diminuição do impacto ambiental e melhor aproveitamento dos recursos

naturais. Esses fatores são de grande importância para a competitividade do agronegócio brasileiro e paulista no mercado global.

Além disso, a implementação de IA no agronegócio brasileiro tem se mostrado bastante promissora. Dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) mostram que o Brasil tem potencial para investir em aplicação de tecnologia no campo, com previsão de um mercado de US$ 29,3 bilhões em 2025. (EMBRAPA, 2018). Essa expansão também pode ser impulsionada pelo desenvolvimento de tecnologias como a implementação de algoritmos genéticos na cultura do tomate de mesa. Portanto, a implementação de algoritmos genéticos na cultura do tomate de mesa pode ser vista como uma forma de contribuir para a transformação digital do agronegócio brasileiro e paulista, gerando benefícios tanto para os produtores quanto para o mercado consumidor. Neste contexto, o trabalho tem por objetivo criar um algoritmo genético em Python para a receita de fertirrigação do tomate de mesa na fase de floração.

2. O TOMATE DE MESA

O cultivo do tomate de mesa em casa de vegetação em cultivo fechado é comum em muitas partes do mundo. O objetivo principal é produzir tomates de alta qualidade e proteger contra condições climáticas adversas. A preparação do solo ou substrato é a primeira etapa do cultivo e deve ser bem drenado e rico em nutrientes. A fenologia da cultura do tomate de mesa inclui fases como germinação, formação de mudas, transplante, crescimento vegetativo, florescimento, frutificação e colheita. As condições ideais de temperatura e umidade são fundamentais para o desenvolvimento adequado das plantas, enquanto a fertirrigação é uma técnica utilizada no cultivo em casa de vegetação para fornecer nutrientes necessários para o crescimento das plantas, incluindo macronutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, bem como micronutriente, conforme mostrado na Tabela 01.

Tabela 01: Composição dos fertilizantes em gramas por 1000 plantas

	Quantidade recomendada (gramas por 1000 plantas)	Intervalo mínimo (%)	Intervalo máximo (%)
MAP	210 – 320	15	20
Sulfato de magnésio	100 – 300	10	15
Sulfato de potássio	270 – 390	15	20
Nitrato de potássio	250 – 370	15	20
Nitrato de cálcio	190 – 290	15	20
Micronutrientes	0.08 – 0.12	10	15

De forma sucinta, o cultivo do tomate de mesa em casa de vegetação em cultivo fechado é uma técnica que envolve várias etapas, incluindo preparação do solo ou substrato, fenologia, condições de temperatura e umidade, e fertirrigação. Com o manejo adequado, é possível produzir tomates de alta qualidade e maior rendimento em comparação com o cultivo ao ar livre.

3. ALGORITMO GENÉTICO

3.1. CONTEXTO HISTÓRICO

Desde os anos 50, cientistas estudam inteligência artificial e computação evolutiva para criar programas que imitem processos naturais. Nils Barricelli, convidado para estudar inteligência artificial em Princeton em 1953, usou o computador digital para criar vida artificial por meio de software que imitava reprodução e mutação natural. Ele criou o primeiro software de algoritmos genéticos e seu trabalho foi publicado em 1954. Alexander Fraser, um biólogo de Londres, teve a ideia de criar um modelo de evolução por computador em 1957, pois observar diretamente exigiria milhões de anos. Ele foi o primeiro a usar programação de computadores para estudar a evolução, seguido por muitos biólogos no final dos anos 50 e 60 (SIMON, 2013, p. 42). Mitchell afirma que John Holland inventou os algoritmos genéticos na década de 1960. A versão de Holland envolvia uma simulação da "sobrevivência do mais apto" de Darwin, bem como os processos de cruzamento, recombinação, mutação e inversão que ocorrem na genética. Holland apresentou algoritmos genéticos como uma "abstração da evolução biológica e deu um quadro teórico para a adaptação" sob algoritmos genéticos. No mesmo ano, um dos alunos de Holland, Kenneth De Jong, apresentou o primeiro estudo abrangente do uso de algoritmos genéticos para resolver problemas de otimização. (MITCHELL, 1999, p. 3).

A pesquisa em algoritmos genéticos cresceu rapidamente nas décadas de 1970 e 1980 devido aos avanços tecnológicos e à percepção das limitações dos métodos convencionais de otimização para resolver problemas complexos. Os algoritmos genéticos foram descobertos como uma maneira de encontrar soluções para problemas que outros métodos não conseguiram resolver, testando simultaneamente muitas soluções em paralelo, tornando-os úteis para encontrar soluções em espaços de busca grandes e complexos. Eles podem lidar com ruídos e incertezas nos dados, sendo amplamente aplicados em várias áreas, incluindo engenharia, finanças, biologia, física, jogos e outras. Os algoritmos genéticos têm muitas vantagens em relação aos métodos tradicionais, como a capacidade de lidar com grandes espaços de busca e funções objetivo com vários ótimos locais. Eles podem encontrar soluções aproximadamente ótimas mesmo em problemas complexos e multidimensionais, e têm sido aplicados com sucesso em muitas áreas, incluindo engenharia, finanças, ciência de materiais, biotecnologia, aprendizado de máquina e inteligência artificial. Essas ferramentas são particularmente úteis quando se trata de problemas que envolvem muitas variáveis interdependentes e para os quais não existem soluções analíticas.

3.2. ETAPAS

A sua implementação contempla algumas etapas:

3.2.1. CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

É gerada uma população aleatória de indivíduos que representam possíveis soluções para o problema em questão. A criação da população inicial é uma etapa crucial do algoritmo genético, pois é a partir desses indivíduos que será iniciado o processo evolutivo. Para criar a população inicial, geralmente são utilizados métodos aleatórios de geração de indivíduos, que buscam garantir uma boa diversidade entre os indivíduos iniciais. Existem diversas estratégias para gerar a população inicial, dependendo do tipo de problema que

está sendo abordado e do tipo de codificação utilizada para representar os indivíduos. Algumas das estratégias mais comuns incluem:

- Geração aleatória de indivíduos: nesse método, os indivíduos são gerados aleatoriamente, com seus genes assumindo valores aleatórios dentro do intervalo permitido para cada gene. Essa estratégia é adequada para problemas onde a codificação dos indivíduos é direta e os genes podem ser facilmente mapeados para valores numéricos.
- Geração aleatória de sequências: em alguns casos, os indivíduos são representados como sequências de genes discretos, como em problemas de otimização combinatória. Nesse caso, a geração aleatória de sequências pode ser utilizada para gerar indivíduos com diferentes combinações de genes.
- Geração por amostragem: em problemas onde a solução ótima é conhecida ou pode ser aproximada, é possível gerar a população inicial amostrando aleatoriamente soluções próximas à solução ótima. Essa estratégia é adequada para problemas onde a solução ótima está concentrada em uma região específica do espaço de busca.

Independentemente da estratégia utilizada, é importante garantir que a população inicial seja grande o suficiente para permitir uma boa diversidade entre os indivíduos e para evitar que o processo evolutivo fique preso em mínimos locais. Além disso, é importante garantir que a população inicial seja representativa do espaço de busca para evitar que a solução ótima fique fora do alcance da população inicial.

3.2.2. AVALIAÇÃO DA APTIDÃO (FITNESS)

A avaliação de fitness é uma etapa crítica no algoritmo genético, que mede a qualidade da solução fornecida por cada indivíduo. É um processo computacionalmente intenso e pode ser a parte mais demorada do algoritmo. Depois de avaliar todos os indivíduos, o algoritmo usa essas medidas quantitativas para selecionar indivíduos para a próxima geração, com base em algum critério de desempenho. A avaliação de fitness varia dependendo do problema em questão e pode envolver medidas quantitativas complexas. No caso de otimização de uma receita de fertirrigação usando um algoritmo genético, a função fitness deve ser projetada para avaliar a qualidade da solução proposta por cada indivíduo em relação aos objetivos definidos, como maximizar a absorção de nutrientes pelas plantas, minimizar o desperdício de nutrientes ou maximizar a produtividade das plantas.

3.2.3. SELEÇÃO DOS PAIS

A partir da avaliação da aptidão, é realizada a seleção dos indivíduos mais aptos para se tornarem pais na próxima geração. A seleção dos pais é um processo fundamental em algoritmos genéticos, que consiste em escolher os indivíduos mais aptos para se reproduzirem e gerarem a próxima geração de soluções. Essa etapa é crucial para garantir a evolução da população de soluções ao longo das gerações e, consequentemente, para melhorar a qualidade da solução final do problema em questão.

Existem várias técnicas de seleção de pais em algoritmos genéticos, sendo que as mais comuns são a seleção por roleta, torneio, ranking e elitismo. Cada uma dessas técnicas

possui suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha da melhor técnica para o problema em questão depende de vários fatores, como o tamanho da população, o número de gerações, a diversidade da população, entre outros.

- A seleção por roleta é uma técnica que atribui uma probabilidade de seleção a cada indivíduo da população, proporcional à sua aptidão em relação aos demais indivíduos. Assim, os indivíduos mais aptos têm uma maior chance de serem selecionados como pais para a próxima geração, mas ainda há uma chance para os menos aptos.
- A seleção por torneio é outra técnica comum, na qual são selecionados aleatoriamente um número fixo de indivíduos da população e o mais apto dentre eles é escolhido como pai ou mãe para a próxima geração. Essa técnica tem a vantagem de favorecer os indivíduos mais aptos, mas ainda mantém uma certa diversidade na população.
- A seleção por ranking é uma técnica que atribui um rank a cada indivíduo da população de acordo com sua aptidão. Em seguida, os indivíduos são selecionados aleatoriamente, mas com uma probabilidade proporcional ao seu rank. Essa técnica tem a vantagem de favorecer os indivíduos mais aptos, mas também leva em consideração a diversidade da população.
- O elitismo é uma técnica que garante que os indivíduos mais aptos da população atual sejam selecionados como pais para a próxima geração, sem qualquer chance para os menos aptos. Essa técnica pode levar à convergência prematura da população, mas é útil para garantir que as melhores soluções sejam preservadas ao longo das gerações.

Observe que a seleção dos pais é uma etapa crítica em algoritmos genéticos, que deve ser cuidadosamente escolhida para maximizar a eficiência e eficácia do algoritmo. A escolha da melhor técnica de seleção depende de vários fatores, como o tamanho da população, o número de gerações, a diversidade da população, entre outros, e deve ser avaliada empiricamente para cada problema em questão.

3.2.4. CRUZAMENTO (CROSSOVER)

O cruzamento é uma etapa crucial dos algoritmos genéticos, que envolve a combinação de informações genéticas de dois indivíduos para gerar uma nova solução. Cada indivíduo é representado por um cromossomo que contém uma sequência de genes. Durante o cruzamento, dois indivíduos são selecionados, e parte de seus cromossomos são trocados para gerar um novo indivíduo. Existem vários métodos de cruzamento, incluindo o cruzamento de um ponto e o cruzamento de dois pontos, que tendem a gerar soluções mais diversificadas. Outros métodos mais avançados de cruzamento incluem o cruzamento uniforme e o cruzamento por mistura. As referências a esses métodos de cruzamento são importantes para entender suas vantagens e desvantagens.

A escolha da técnica de cruzamento mais adequada para a geração de receitas de fertirrigação em algoritmos genéticos depende da complexidade do problema e da diversidade desejada nas soluções. No caso específico da fertirrigação, algumas técnicas de cruzamento podem ser mais adequadas do que outras. Uma técnica de cruzamento que pode ser adequada para a geração de receitas de fertirrigação é o cruzamento por mistura. Nesse método, os genes dos pais são escolhidos alternadamente para gerar o

novo cromossomo. Isso pode ser vantajoso na fertirrigação, pois permite a combinação de diferentes elementos químicos e proporções de nutrientes de forma mais gradual, gerando soluções intermediárias que podem ser mais próximas da solução ideal. Outra técnica que pode ser adequada é o cruzamento de dois pontos. Nesse método, duas posições nos cromossomos dos pais são escolhidas aleatoriamente, e as partes entre essas posições são trocadas para gerar o novo cromossomo. Essa técnica pode ser vantajosa na fertirrigação, pois permite a combinação de diferentes proporções de nutrientes em partes distintas da receita, gerando soluções mais específicas e ajustadas às necessidades das plantas. Por outro lado, o cruzamento de um ponto pode não ser tão adequado para a geração de receitas de fertirrigação, pois ele pode gerar soluções mais simples e menos diversificadas. Já o cruzamento uniforme pode ser vantajoso em alguns casos, mas pode gerar soluções menos precisas e difíceis de ajustar. Portanto, a escolha da técnica de cruzamento mais adequada para a geração de receitas de fertirrigação em algoritmos genéticos depende das características específicas do problema em questão.

3.2.5. MUTAÇÃO

A taxa de mutação é um parâmetro ajustável em algoritmos genéticos que pode ser definido pelo usuário ou programador. Ela determina a probabilidade de um bit ou gene de um indivíduo ser alterado por uma mutação. A taxa escolhida depende de vários fatores, como o tamanho da população e dos indivíduos, e o problema a ser resolvido. A taxa de mutação é uma ferramenta poderosa em algoritmos genéticos, mas deve ser ajustada com cuidado para garantir um bom equilíbrio entre diversidade e convergência. Para problemas de otimização complexos, taxas de mutação menores, na faixa de 0,01 a 0,05, são comuns, enquanto em problemas menos complexos, taxas de mutação maiores, na faixa de 0,05 a 0,1, podem ser mais adequadas. No caso específico da otimização de uma receita de fertirrigação, é importante considerar vários fatores, e experimentar diferentes taxas de mutação em conjunto com outros parâmetros do algoritmo genético para determinar a melhor taxa de mutação para o problema em questão.

3.2.6. AVALIAÇÃO DA APTIDÃO DA NOVA GERAÇÃO

Os algoritmos genéticos são baseados na imitação do processo de seleção natural, onde os indivíduos mais aptos são selecionados para sobreviver e se reproduzir. A seleção é feita usando uma função de aptidão, que avalia o desempenho de cada indivíduo em relação ao problema em questão. Depois disso, os indivíduos mais aptos são combinados por meio de operadores genéticos, como cruzamento e mutação, para criar uma nova geração de indivíduos. Essa nova geração passa por uma avaliação de aptidão para determinar sua adequação para resolver o problema. O processo de avaliação da aptidão é repetido várias vezes, geralmente por muitas gerações, até que uma solução satisfatória seja encontrada. Durante cada iteração, os indivíduos mais aptos são selecionados para a próxima geração, com a esperança de que a qualidade da solução melhore a cada iteração.

4. OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE FERTIRRIGAÇÃO

A fertirrigação é uma técnica utilizada para nutrir plantas por meio da aplicação simultânea de fertilizantes e água. Para otimizar esse processo na cultura do tomate de mesa, é possível utilizar o algoritmo genético, que é uma técnica computacional inspirada

na seleção natural. Para isso, é necessário considerar um conjunto de variáveis que influenciam a qualidade da fertirrigação, tais como as características do solo, as necessidades nutricionais da planta em cada estágio de desenvolvimento, a disponibilidade dos nutrientes no solo e o custo dos insumos. Com essas informações, é possível definir uma função de aptidão, que será usada para avaliar a qualidade das soluções geradas pelo algoritmo genético. Como o substrato que normalmente é usado é o de fibra de coco, as questões de umidade do substrato e pH são "uma tela em branco" e podem ser trabalhadas na água que será utilizada para a dissolução dos fertilizantes.

A partir dessa função, é criada uma população inicial de soluções, a partir da qual são selecionados os indivíduos mais aptos para reprodução. O cruzamento e a mutação são realizados para gerar uma nova geração de soluções, que são avaliadas quanto à sua aptidão. Esse processo é repetido várias vezes, até que seja encontrada uma receita de fertilizante que atenda às necessidades nutricionais da planta, minimize os custos e respeite as restrições de incompatibilidade de nutrientes. (Ver Tabela 02)

Tabela 02: Matriz de compatibilidade

	MAP	Sulfato de magnésio	Sulfato de potássio	Nitrato de potássio	Nitrato de cálcio	Micronutrientes
MAP	1	0	1	1	0	1
Sulfato de magnésio	0	1	0	1	1	1
Sulfato de potássio	1	0	1	0	1	1
Nitrato de potássio	1	1	0	1	1	1
Nitrato de cálcio	0	1	1	1	0	0
Micronutrientes	1	1	1	1	0	1

1 = compatível e 0 = incompatível

A aplicação do algoritmo genético na fertirrigação do tomate de mesa pode trazer diversos benefícios, como o aumento da produtividade e a redução dos custos com insumos. Além disso, essa técnica pode ser aplicada em outras culturas, permitindo a otimização da fertilização de forma mais precisa e eficiente.

5. METODOLOGIA

5.1. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A escolha da melhor linguagem de programação para implementação de algoritmos genéticos pode variar de acordo com o contexto e objetivos do projeto. Python é uma linguagem popular para esse fim, sendo interpretada, orientada a objetos, com sintaxe simples e fácil de aprender. A plataforma de gerenciamento de pacotes e ambiente de programação Anaconda é frequentemente utilizada em ciência de dados e aprendizado de máquina, juntamente com o Spyder, um ambiente de desenvolvimento integrado de código aberto para ciência de dados em Python. Outras linguagens populares para implementação de algoritmos genéticos incluem Java, C++ e MATLAB, sendo importante considerar fatores como eficiência computacional na escolha da melhor linguagem.

5.2. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

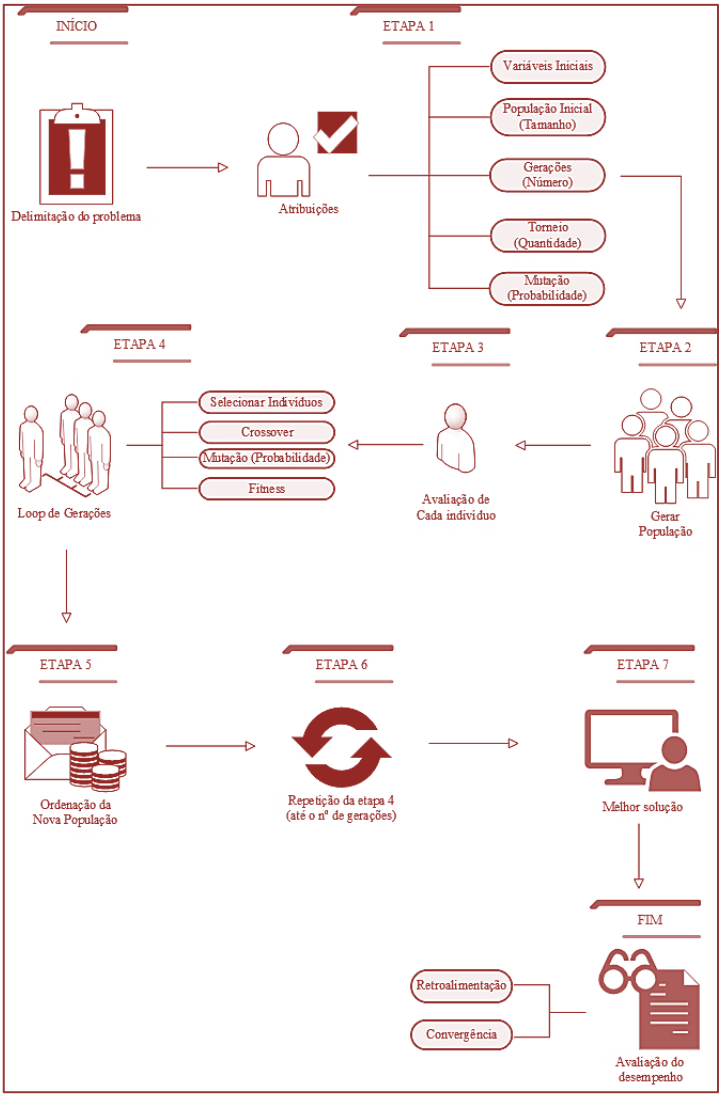
Delimitando o problema tem-se:

Criação de um algoritmo genético em python para uma receita de fertirrigação para o tomate de mesa na fase de floração. A receita é composta por 6 fertilizantes. A quantidade recomendada está em gramas num intervalo mínimo e máximo. Essas medidas não podem variar além de um limite que é informado em intervalo_gene. O custo de cada fertilizante é informado em custo_fertilizantes. A técnica de seleção é por torneio; o cruzamento é por mistura; a taxa de mutação é de 10% e a técnica é por mutação uniforme. Ao final será mostrado no console a melhor solução que é a melhor receita com base na concentração recomendada que tem menor custo total. Também será mostrado a divisão em caixas para levar em consideração a compatibilidade entre os fertilizantes. Essa divisão de caixas também será mostrada no console. Também será mostrado o gráfico de desempenho desse algoritmo genético.

Dessa forma, podemos elencar os seguintes passos:

1. Definir as constantes e variáveis iniciais, incluindo a quantidade recomendada de fertilizantes em gramas, o intervalo de variação para cada gene da receita, o custo do fertilizante, o tamanho da população inicial, o número de gerações, o tamanho do torneio e a probabilidade de mutação.
2. Gerar uma população inicial de soluções aleatórias, onde cada solução é uma lista de 6 números que representam a quantidade de cada fertilizante.
3. Avaliar cada solução na população inicial, calculando o custo total de cada solução com base na quantidade de cada fertilizante e no custo de cada fertilizante.
4. Executar um loop para o número de gerações desejado:
    a. Selecionar duas soluções da população atual usando a técnica de seleção por torneio.
    b. Cruzar as duas soluções selecionadas usando a técnica de mistura para gerar dois descendentes.
    c. Mutar cada descendente com uma determinada probabilidade, substituindo um dos genes por um valor aleatório dentro do intervalo de variação.
    d. Avaliar cada descendente e adicionar os dois melhores à nova população.
5. Ordenar a nova população pelo custo total crescente e manter apenas as melhores soluções, com base no tamanho da população inicial.
6. Repetir o passo 4 até o número de gerações desejado.
7. Imprimir a melhor solução encontrada, que é a solução com a menor custo total, e plotar um gráfico que mostra a evolução do custo total ao longo das gerações. Ver Figura 01.

Figura 01: Passo para a implementação de um algoritmo genético



Conforme Figura acima construímos a seguinte lógica programacional:

Início: isso pode ser feito formulando uma pergunta clara que descreva o problema a ser resolvido. Por exemplo, se o problema for encontrar a melhor solução para um problema de otimização, a pergunta pode ser: "Como podemos encontrar a melhor solução para este problema, considerando as restrições e as condições dadas?"

Etapa 1: Na etapa de atribuições de um algoritmo genético, é preciso definir as variáveis iniciais que vão guiar o processo de evolução.

- Tamanho da população inicial: define o número de indivíduos que serão gerados aleatoriamente na primeira geração do algoritmo. Quanto maior o tamanho da população, mais diversidade genética haverá e mais chances de se encontrar uma solução ótima. Por outro lado, um tamanho muito grande pode tornar o processo mais lento e consumir mais recursos computacionais.
- Número de gerações: define quantas gerações serão simuladas pelo algoritmo. Cada geração é composta por uma população de indivíduos que é avaliada e selecionada para gerar a próxima geração. É importante definir um número de

gerações suficiente para permitir que o algoritmo evolua e encontre soluções cada vez melhores, mas não tão grande a ponto de tornar o processo inviável.

- Quantidade de torneios: define quantos pares de indivíduos serão selecionados aleatoriamente para participar de torneios de seleção. O torneio é uma técnica de seleção que escolhe o indivíduo com melhor desempenho em uma determinada função de avaliação. Um maior número de torneios aumenta as chances de encontrar os indivíduos mais aptos, mas também aumenta o tempo de processamento.
- Taxa de probabilidade de mutação: define a probabilidade de um indivíduo sofrer uma mutação em seu código genético. A mutação é um processo aleatório que pode gerar novas soluções e aumentar a diversidade genética. Uma taxa de probabilidade de mutação muito baixa pode impedir que o algoritmo encontre soluções ótimas, enquanto uma taxa muito alta pode causar a perda de soluções já encontradas.

Etapa 2: envolve a criação de um conjunto inicial de soluções candidatas (indivíduos) que representam possíveis soluções para o problema que se quer resolver. Esses indivíduos são gerados aleatoriamente, seguindo uma distribuição de probabilidade, de forma que a população inicial tenha diversidade suficiente para cobrir o espaço de busca das possíveis soluções.

Etapa 3: um conjunto inicial de soluções é gerado e avaliado com base em uma função de aptidão. A função de aptidão é uma medida que determina a qualidade de cada solução em relação ao problema que está sendo resolvido. Essa etapa envolve uma série de etapas lógicas para avaliar cada indivíduo do conjunto inicial de soluções. Essas etapas podem incluir a verificação da validade das soluções, a medição do desempenho em relação a um conjunto de critérios de desempenho e a atribuição de uma pontuação de aptidão para cada indivíduo. Uma vez que a função de aptidão é definida e implementada, os indivíduos são avaliados e classificados de acordo com sua pontuação de aptidão. Isso permite que o algoritmo genético identifique as soluções mais promissoras e use-as como base para gerar novas soluções na próxima iteração do algoritmo.

Etapa 4: é aplicada em várias subetapas, como seleção de indivíduos, crossover, mutação e fitness. Cada uma dessas requer uma lógica específica que garanta que o processo evolutivo seja eficiente e eficaz:

- Seleção de indivíduos: é preciso escolher quais indivíduos da população atual irão gerar os filhos da próxima geração. A lógica programacional aqui pode envolver a aplicação de diferentes estratégias de seleção, como a seleção por torneio, roleta ou rank, com o objetivo de escolher indivíduos mais aptos para gerar os descendentes. É importante que essa lógica de seleção seja baseada na aptidão (fitness) dos indivíduos, que é calculada em função de sua capacidade de solucionar o problema proposto.
- Crossover: os indivíduos selecionados são combinados para gerar novos indivíduos filhos. A lógica programacional aqui envolve a definição de um ponto de corte ou uma máscara para a troca de material genético entre os pais, a fim de gerar indivíduos filhos que possuam características combinadas dos pais.
- Mutação: é introduzido um pequeno grau de aleatoriedade no processo, para evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais. A lógica programacional aqui

envolve a escolha de uma taxa de mutação apropriada, que determine a probabilidade de ocorrer uma mutação em cada gene de cada indivíduo.

- Fitness: é avaliada a aptidão dos indivíduos da nova geração, para determinar quais deles serão selecionados para gerar os filhos da próxima geração. A lógica programacional aqui envolve a definição de uma função de aptidão, que calcule o desempenho de cada indivíduo em relação ao problema proposto.

Etapa 5: classificam-se os indivíduos em ordem decrescente de aptidão. Isso envolve a criação de uma função de avaliação de aptidão que atribui uma pontuação a cada indivíduo com base em quão bem ele se ajusta ao problema em questão. Uma vez que a função de avaliação de aptidão é aplicada a cada indivíduo, a lógica programacional é usada para classificá-los em ordem decrescente de aptidão. Depois que os indivíduos são classificados em ordem decrescente de aptidão, a lógica programacional é usada para selecionar os indivíduos mais aptos para a próxima geração. Isso geralmente envolve a seleção dos indivíduos com as pontuações mais altas e a aplicação de operadores genéticos, como cruzamento e mutação, para gerar uma nova população de indivíduos.

Etapa 6: usada para controlar o número de vezes que o algoritmo irá gerar e avaliar a população de soluções candidatas. A condição de parada é definida pelo número máximo de gerações que o algoritmo deve executar. O controle do o número de vezes que o loop é executado, garante que o algoritmo pare de executar após um número determinado de gerações e retorne a solução mais adequada encontrada até aquele momento.

Etapa 7: a melhor solução (ou "convergência") é uma das etapas principais na implementação de um algoritmo genético. Essa etapa tem como objetivo encontrar a solução ótima ou a solução mais próxima possível da ótima para um determinado problema.

Fim: o algoritmo é executado várias vezes para avaliar a eficácia da solução proposta para o problema em questão. A lógica programacional nessa etapa envolve a implementação de um sistema de retroalimentação que coleta informações sobre o desempenho do algoritmo em cada execução e usa essas informações para ajustar os parâmetros do algoritmo. Essa retroalimentação permite que o algoritmo se adapte e melhore com o tempo. A convergência é outro conceito importante na avaliação de desempenho de algoritmos genéticos. Convergência significa que o algoritmo está se aproximando de uma solução ótima para o problema em questão. A lógica programacional deve levar em consideração a convergência do algoritmo para garantir que ele esteja se aproximando de uma solução ideal de forma eficiente. Para implementar a retroalimentação e garantir a convergência, deve ser definida uma função de avaliação que atribua uma pontuação ou "fitness" a cada solução proposta pelo algoritmo. Essa função de avaliação é usada para selecionar as soluções mais promissoras para continuar a evolução do algoritmo. Assim, o processo deve envolver a implementação de um sistema de retroalimentação que usa informações sobre o desempenho do algoritmo para ajustar seus parâmetros e garantir que ele esteja convergindo para uma solução ideal de forma eficiente.

A seguir apresentamos um código implementado com base no problema que foi delimitado:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Criado: Sexta, 03 de março de  2023 às 00:22 h

@author: Ana Vitória Galvão Vieira
"""
import random
import matplotlib.pyplot as plt

# Dicionário com as correspondências entre os índices dos genes e seus nomes
nomes_genes = {0: "MAP", 1: "Sulfato de Magnésio", 2: "Sulfato de Potássio", 3: "Nitrato de Potássio", 4: "Nitrato de Cálcio", 5: "Micronutrientes"}

# Quantidade recomendada de fertilizantes em gramas para 1000 plantas
quantidade_recomendada = [(210, 320), (100, 300), (270, 390), (250, 370), (190, 290), (0.8, 1.2)]

# Intervalo de variação para cada gene da receita
intervalo_gene = [(0.15, 0.20), (0.10, 0.15), (0.15, 0.20), (0.15, 0.20), (0.15, 0.20), (0.10, 0.15)]

#custo do fertilizante
custo_fertilizante = [0.04, 0.03, 0.04, 0.03, 0.02, 0.03]

# Tamanho da população inicial
tamanho_populacao = 100
#número de gerações
num_geracoes = 100
#tamanho do torneio
tamanho_torneio = 5
#probabilidade de mutação
probabilidade_mutacao = 0.10

def gerar_solucao_aleatoria():
    solucao = []
```

```
    for i in range(len(quantidade_recomendada)):
        solucao.append(random.uniform(quantidade_recomendada[i][0],
quantidade_recomendada[i][1]))
    return solucao

def avaliar_solucao(solucao):
    custo_total = 0
    for i, qtd in enumerate(solucao):
        custo_total += qtd * custo_fertilizante[i]
        if qtd < quantidade_recomendada[i][0] or qtd > quantidade_recomendada[i][1]:
            custo_total += 1000
    return custo_total

def cruzar_solucoes(solucao1, solucao2):
    descendente1 = []
    descendente2 = []
    for i in range(len(solucao1)):
        alpha = random.uniform(0, 1)
        descendente1.append(alpha * solucao1[i] + (1 - alpha) * solucao2[i])
        descendente2.append(alpha * solucao2[i] + (1 - alpha) * solucao1[i])
    return [descendente1, descendente2]

def mutar_solucao(solucao):
    for i in range(len(solucao)):
        if random.uniform(0, 1) < probabilidade_mutacao:
            solucao[i] = random.uniform(quantidade_recomendada[i][0],
quantidade_recomendada[i][1])
    return solucao

def dividir_em_caixas(melhor_solucao):
    # Capacidade de cada caixa em gramas
    capacidade_caixa = 1000

    # Dicionário com as correspondências entre os índices dos genes e seus nomes
    nomes_genes = {
```

```
    0: "MAP",
    1: "Sulfato de Magnésio",
    2: "Sulfato de Potássio",
    3: "Nitrato de Potássio",
    4: "Nitrato de Cálcio",
    5: "Micronutrientes"
}

# Matriz de compatibilidade entre os fertilizantes
#1 = compatível e 0 = incompatível
matriz_compatibilidade = [
    [1, 0, 1, 1, 0, 1],
    [0, 1, 0, 1, 1, 1],
    [1, 0, 1, 0, 1, 1],
    [1, 1, 0, 1, 1, 1],
    [0, 1, 1, 1, 0, 0],
    [1, 1, 1, 1, 0, 1]
]

# Dicionário que guarda os fertilizantes em cada caixa
caixas = {}
caixa_atual = 1

# Loop que percorre todos os genes da melhor solução
for i in range(len(melhor_solucao)):

    # Verifica se o fertilizante atual pode ser colocado na caixa atual
    compativel = True
    if caixa_atual in caixas:
        for j in caixas[caixa_atual]:
            if not matriz_compatibilidade[i][j]:
                compativel = False
                break
```

```
        # Se o fertilizante atual não pode ser colocado na caixa atual, cria uma nova caixa
        if not compativel:
            caixa_atual += 1

        # Adiciona o fertilizante atual na caixa atual
        if caixa_atual in caixas:
            caixas[caixa_atual].append(i)
        else:
            caixas[caixa_atual] = [i]

    # Impressão da divisão dos fertilizantes nas caixas
    print("\n***Divisão dos fertilizantes nas caixas***\n")
    for caixa, fertilizantes in caixas.items():
        print(f"Caixa {caixa}:")
        peso_total = 0
        for fertilizante in fertilizantes:
            nome_fertilizante = nomes_genes[fertilizante]
            peso_fertilizante = round(melhor_solucao[fertilizante], 2)
            print(f"- {nome_fertilizante}: {peso_fertilizante} g")
            peso_total += peso_fertilizante
        print(f"Peso total da caixa: {peso_total} g (capacidade utilizada: {round(peso_total
/ capacidade_caixa * 100, 2)}%)\n")

#execução do algoritmo genético

# Gerar população inicial
populacao = []
for i in range(tamanho_populacao):
    solucao = gerar_solucao_aleatoria()
    populacao.append(solucao)

custos = []
for i in range(num_geracoes):
    nova_populacao = []
    for j in range(tamanho_populacao):
```

```
    # Selecionar duas soluções da população atual usando a técnica de seleção por torneio
    torneio = random.sample(populacao, tamanho_torneio)
    vencedor1 = min(torneio, key=avaliar_solucao)
    torneio = random.sample(populacao, tamanho_torneio)
    vencedor2 = min(torneio, key=avaliar_solucao)

    # Cruzar as duas soluções selecionadas usando a técnica de mistura para gerar dois descendentes
    descendentes = cruzar_solucoes(vencedor1, vencedor2)

    # Mutar cada descendente com uma determinada probabilidade, substituindo um dos genes por um valor aleatório dentro do intervalo de variação
    descendentes[0] = mutar_solucao(descendentes[0])
    descendentes[1] = mutar_solucao(descendentes[1])

    # Avaliar cada descendente e adicionar os dois melhores à nova população
    custo_descendente1 = avaliar_solucao(descendentes[0])
    custo_descendente2 = avaliar_solucao(descendentes[1])
    nova_populacao.append(descendentes[0])
    nova_populacao.append(descendentes[1])

  # Ordenar a nova população pelo custo total crescente e manter apenas as melhores soluções, com base no tamanho da população inicial
  nova_populacao = sorted(nova_populacao, key=avaliar_solucao)[:tamanho_populacao]

  # Salvar o custo da melhor solução
  custos.append(avaliar_solucao(nova_populacao[0]))

  # Atualizar a população atual
  populacao = nova_populacao

  #Imprimir a melhor solução encontrada
  melhor_solucao = populacao[0]
  custo_melhor_solucao = avaliar_solucao(melhor_solucao)
```

```
    for solucao in populacao:
        custo_atual = avaliar_solucao(solucao)
        if custo_atual < custo_melhor_solucao:
            melhor_solucao = solucao
            custo_melhor_solucao = custo_atual

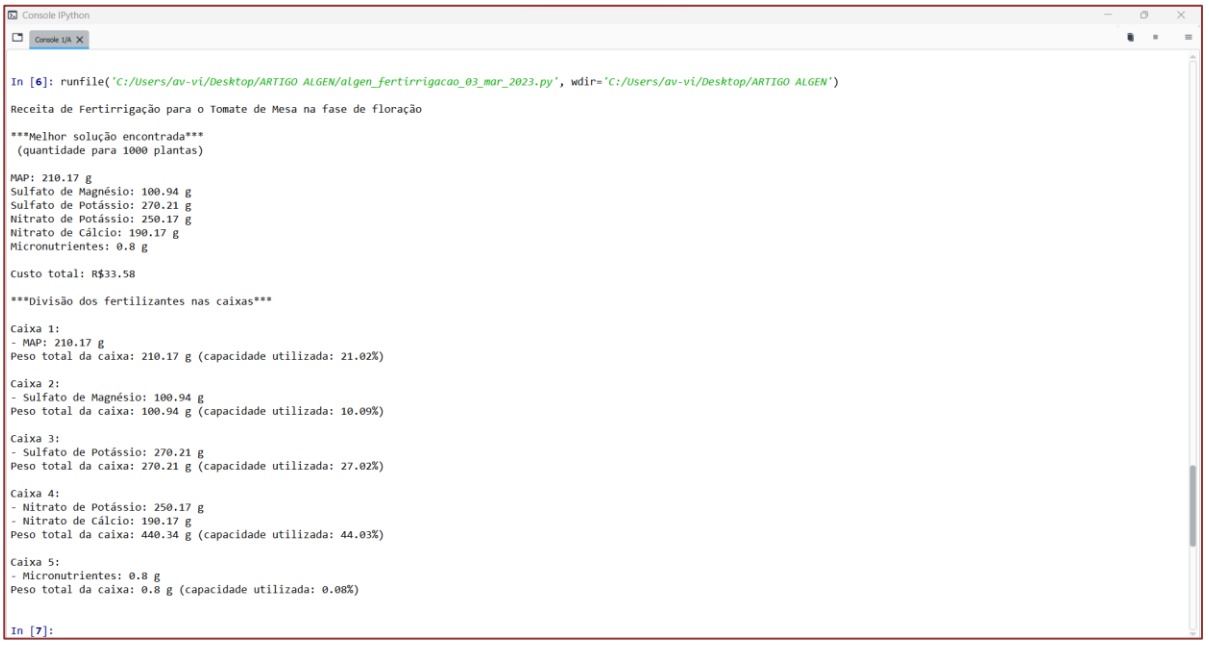
# Impressão da melhor solução
print("\nReceita de Fertirrigação para o Tomate de Mesa na fase de floração")
print("\n***Melhor solução encontrada***\n (quantidade para 1000 plantas)\n")
for i in range(len(melhor_solucao)):
    nome_gene = nomes_genes[i]
    valor_gene = round(melhor_solucao[i], 2)
    print(f"{nome_gene}: {valor_gene} g")
print(f"\nCusto total: R${custo_melhor_solucao:.2f}")

dividir_em_caixas(melhor_solucao)

# Plotar o custo da melhor solução por geração
plt.plot(custos)
plt.title("Custo da melhor solução por geração")
plt.xlabel("Geração")
plt.ylabel("Custo")
plt.show()
```

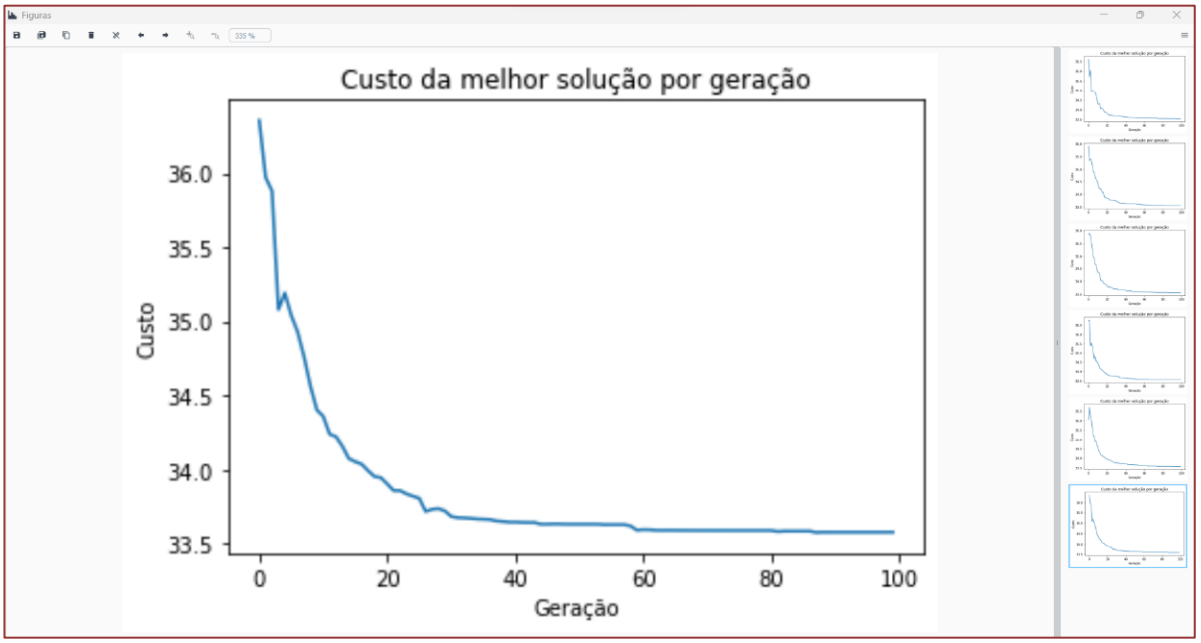
O código acima terá a seguinte saída conforme Figura 02:

Figura 02: Saida no console



Através do gráfico abaixo (Figura 03), podemos observar o desempenho do algoritmo genético:

Figura 03: Desempenho do Algoritmo Genético



6. DISCUSSÃO

Avaliando o Algoritmo Genético vemos que ele está colocando soluções sempre em torno de concentrações mínimas recomendadas (KATOCH & KUMAR, 2021).

Uma sugestão para resolver esse problema seria adicionar restrições adicionais ao algoritmo genético para incentivar a diversidade de soluções e evitar a convergência para concentrações mínimas recomendadas. Uma opção seria adicionar uma restrição que limite a porcentagem de soluções que podem ter concentrações mínimas recomendadas. Por exemplo, pode-se impor que pelo menos 20% das soluções geradas pelo algoritmo não podem ter concentrações abaixo de um certo limite, garantindo uma diversidade maior de soluções. Outra opção seria incluir um termo de penalidade no custo para soluções que estão muito próximas da concentração mínima recomendada. Por exemplo, pode-se adicionar uma penalidade maior para soluções que estão a menos de 10% da concentração mínima recomendada, incentivando o algoritmo a explorar soluções mais diversificadas. Além disso, pode ser considerado incluir outras variáveis além do custo, como a produtividade ou a qualidade do tomate, para que o algoritmo considere outros objetivos além do custo e das concentrações de fertilizante.

Com base na análise de desempenho, parece que o intervalo de variação para cada gene da receita está sendo considerado pelo algoritmo genético. No entanto, como mencionado anteriormente, é possível que o algoritmo esteja convergindo para concentrações mínimas recomendadas devido à falta de diversidade nas soluções geradas. Uma opção adicional seria incluir uma função de fitness que leve em consideração a diversidade das soluções. Diferentes estratégias de seleção de pais e de mutação podem ser adotadas. Por exemplo, em vez de selecionar apenas os pais mais aptos, selecionar aleatoriamente alguns pais, mesmo que eles não sejam os melhores em termos de aptidão. Isso pode ajudar a diversificar as soluções. Da mesma forma, experimentar diferentes tipos de mutações, como mutações mais agressivas ou mutações que levam em consideração a diversidade das soluções existentes.

Por exemplo, pode ser usada a distância euclidiana (MAULIK & BANDYOPADHYAY, 2000) entre as soluções como uma medida de diversidade e adicioná-la à função de fitness. Isso incentivaria o algoritmo a explorar soluções mais diversas, em vez de se concentrar em um subconjunto limitado de soluções. Usar a distância euclidiana entre as soluções como medida de diversidade significa calcular a distância entre as soluções geradas pelo algoritmo genético em um espaço n-dimensional, onde n é o número de genes na receita de fertirrigação. A distância euclidiana é uma medida de distância entre dois pontos em um espaço euclidiano e é calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre as coordenadas dos pontos.

Consideremos duas soluções geradas pelo algoritmo genético com as seguintes concentrações de fertilizante:

Solução 1: (0,16, 0,12, 0,18, 0,16, 0,19, 0,14)

Solução 2: (0,17, 0,14, 0,16, 0,14, 0,17, 0,12)

Calcula-se a distância euclidiana entre essas soluções usando a fórmula:

$$d = \sqrt{(0{,}17 - 0{,}16)^2 + (0{,}14 - 0{,}12)^2 + (0{,}16 - 0{,}18)^2 + (0{,}14 - 0{,}16)^2 + (0{,}17 - 0{,}19)^2 + (0{,}12 - 0{,}14)^2}$$

$$d = 0{,}098$$

Assim, a distância euclidiana entre essas duas soluções é 0,098. Quanto maior a distância euclidiana entre duas soluções, maior é a diversidade entre elas. Portanto, uma medida comum de diversidade é a média das distâncias euclidianas entre cada par de soluções no conjunto de soluções gerado pelo algoritmo genético. Isso pode ser útil para evitar que o algoritmo genético fique preso em uma região específica do espaço de solução, gerando soluções muito semelhantes entre si.

Uma abordagem comum é usar a distância euclidiana normalizada, que leva em consideração o intervalo de variação de cada gene na receita de fertilizantes. Isso evita que genes com maior variação tenham um peso maior na medida de diversidade. Para isso, cada diferença entre dois genes é dividida pelo intervalo de variação correspondente, antes de ser elevada ao quadrado e somada. Assim, usar a distância euclidiana entre soluções como medida de diversidade pode ajudar a promover uma maior exploração do espaço de soluções e evitar a convergência prematura do algoritmo genético. É importante ajustar os parâmetros do algoritmo para equilibrar a exploração e a explotação do espaço de solução e encontrar um conjunto diversificado de soluções de alta qualidade.

Outro ponto a considerar é a produtividade ou qualidade do tomate no contexto do algoritmo genético. Isso pode ser feito incorporando essas métricas como critérios adicionais na função objetivo usada pelo algoritmo ou usando-as como uma restrição adicional na busca pela solução ótima. A diversidade das soluções geradas pelo algoritmo genético também pode estar relacionada à qualidade e produtividade do tomate, portanto é importante monitorar a diversidade das soluções e ajustar seus parâmetros para garantir que ele esteja explorando uma ampla gama de soluções viáveis.

7. CONCLUSÃO

Com a estabilidade do algoritmo, agora é possível pensar em possíveis caminhos para que a pesquisa possa seguir em relação ao objetivo de embarcar uma IA em uma casa de vegetação que produza tomate de mesa. Algumas possibilidades a serem consideradas incluem:

- Validação do algoritmo genético: é importante realizar uma validação experimental para avaliar a eficácia do algoritmo genético desenvolvido. É possível comparar os resultados obtidos com os dados observados em campo, para determinar a eficácia do algoritmo.
- Integração com outros sistemas de monitoramento: para que o algoritmo possa ser integrado a uma casa de vegetação, é preciso considerar a integração com outros sistemas de monitoramento, como sensores de umidade, temperatura e pH, que possam fornecer informações adicionais para o algoritmo.
- Desenvolvimento de uma interface do usuário: para que o algoritmo possa ser utilizado por produtores, é importante que seja desenvolvida uma interface amigável, que permita a fácil configuração dos parâmetros e a visualização dos resultados.
- Exploração de outras aplicações para o algoritmo: além da aplicação específica para a produção de tomates de mesa, é possível explorar outras aplicações para o algoritmo genético desenvolvido. Por exemplo, ele pode ser utilizado para otimizar

a receita de fertirrigação para outras culturas, ou mesmo para otimizar outras práticas agrícolas, como o controle de pragas e doenças.

Portanto, a pesquisa pode seguir diversos caminhos a partir do desenvolvimento do algoritmo genético para otimizar a receita de fertirrigação para o tomate de mesa na fase de floração. É importante continuar explorando as possibilidades de integração do algoritmo em sistemas de monitoramento e desenvolvimento de interfaces amigáveis, além de explorar outras aplicações para o algoritmo em outras culturas e práticas agrícolas. O aprimoramento contínuo do algoritmo e sua integração em sistemas de monitoramento e interfaces amigáveis são passos importantes para sua aplicação prática em larga escala, contribuindo para a evolução da produção agrícola e a solução de desafios futuros.

REFERÊNCIAS

[1] AGROLINK. Estudo faz mapeamento da produção de tomate de mesa. São Carlos – SP, 26 jan. 2021. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/estudo-faz-mapeamento-da-producao-de-tomate-de-mesa_453056.html. Acesso em: 27 mar. 2023.

[2] BOTEON, Margarete; DELEO, João Paulo Bernardes; MOREIRA, Marina Marangon. Os caminhos do tomate até o prato do brasileiro. Revista Hortifruti Brasil, Piracicaba, v. 20, n. 213, p. 8-14, jul. 2021. ISSN 1981-1837.

[3] CARR, Jenna. An Introduction to Genetic Algorithms. 1. ed. [S.l.]: Smashwords, 2014. p. 17-19.

[4] CIOFFI, Raffaele et al. Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions. Sustainability, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 492, 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12020492. Acesso em: 27 mar. 2023.

[5] COLEY, David A. An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers. Singapore: World Scientific, 1999. p. 3-19.

[6] EMBRAPA. Pesquisa contribui para transformação digital da agricultura brasileira. 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/51706860/pesquisa-contribui-para-transformacao-digital-da-agricultura-brasileira. Acesso em: 27 mar. 2023.

[7] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2018). VISÃO 2030: O Futuro da Agricultura Brasileira. Embrapa, Brasília, DF. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1. Acesso em: 27 mar. 2023.

[8] FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. FAOSTAT: crops. USA, 2021. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 27 mar. 2023.

[9] Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. p 121-125.

[10] HOLLAND, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. Disponível em: https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001. Acesso em: 27 mar. 2023.

[11] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/23072-censo-agropecuario-2017-resultados-definitivos.html. Acesso em: 27 mar. 2023.

[12] IBGE. Produção Agrícola Municipal: Tomate. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/sp. Acesso em: 27 mar. 2023.

[13] INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA DE SÃO PAULO (IEA-SP). PIB do Agronegócio de São Paulo. São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-de-sao-

paulo.aspx. Acesso em: 27 mar. 2023.

[14] JEBARI, Khalid; MADIAFI, Mohammed. Selection methods for genetic algorithms. International Journal of Emerging Sciences, Lahore, v. 3, n. 4, p. 333-344, dez. 2013. ISSN 2222-4254.

[15] KATOCH, S.; CHAUHAN, S. S.; KUMAR, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications, v. 80, p. 8091-8126, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6. Acesso em: 27 mar. 2023.

[16] MARTÍNEZ-RUIZ, A.; LOPEZ-CRUZ, I.; RUIZ GARCIA, A.; PINEDA, J.; PRADO HERNÁNDEZ, J. A decision support system for fertigation management based on a growth and transpiration model for greenhouse-grown tomatoes. ResearchGate, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320809432_A_DECISION_SUPPORT_SYSTEM_FOR_FERTIGATION_MANAGEMENT_BASED_ON_A_GROWTH_AND_TRANSPIRATION_MODEL_FOR_GREENHOUSE-GROWN_TOMATOES. Acesso em: 27 mar. 2023.

[17] McKinsey & Company. Agriculture's connected future: How technology can yield new growth. 2019. Disponível em: https://www.mckinsey.com.br/industries/agriculture/our-insights/agricultures-connected-future-how-technology-can-yield-new-growth. Acesso em: 27 mar. 2023.

[18] Mitchell, M. (1998). An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press. pp 124-128

[19] MAULIK, Ujjwal; BANDYOPADHYAY, Sanghamitra. Genetic algorithm-based clustering technique. Pattern Recognition, v. 33, n. 9, p. 1455-1465, 2000. ISSN 0031-3203. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00137-5. Acesso em: 27 mar. 2023

[20] MOTA, Flávia Diniz. Modelo matemático para otimização na seleção de fertilizantes a aplicação via fertirrigação. 2020. 121 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2020.

[21] SION, Dan. Evolutionary optimization algorithms: biological inspired and population-based approaches to computer intelligence. USA: Wiley, 2013. 684 p.

[22] Shukla, A.; Pandey, H.; Mehrotra, D. Comparative Review of Selection Techniques in Genetic Algorithm. In: 1st International Conference on Futuristic Trends in Computational Analysis and Knowledge Management, ABLAZE 2015, 2015, Jaipur, India. Proceedings of the 1st International Conference on Futuristic Trends in Computational Analysis and Knowledge Management, ABLAZE 2015. p. 1-5. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273612460_Comparative_Review_of_Selection_Techniques_in_Genetic_Algorithm. Acesso em: 27 mar. 2023.

[23] TRANI, Paulo Espíndola et al. Calagem e adubação do tomate de mesa. Boletim Técnico IAC (215), Série Tecnologia APTA, n. 215, ISSN 1809-7936, 2015.

Autores

AUTORES

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

ALESSANDRO RANULFO LIMA NERY

Professor do Centro Universitário SENAC das disciplinas Pesquisa Operacional, Simulação e Processos Estocásticos nos cursos de Engenharia de Produção e Ciência da Computação. Graduado em Engenharia Química pela Escola Politécnica da USP e Administração Pública pela FGV/SP. Mestre e Doutor pelo Instituto de Química da UNICAMP.

ALEXANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA

Possui Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1992), Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Brasília (1996), Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2004) e Pós-Doutorado em Tecnologias Minerais realizado através da parceria VALE S.A e WorleyParsons em Edmonton-Canadá (2013). Atualmente é Professor Titular na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua nos Programas de Pós-Graduação da UFPA em Engenharia Mecânica (PPGEM), Engenharia Civil (PPGEC) e Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE). Possui experiência na área de Dinâmica Aplicada, atuando principalmente nos seguintes temas: vibrações, análise modal, dinâmica de rotores, processamento de sinais, acústica, controle de ruído e método dos elementos discretos aplicado ao transporte de minérios.

AMIR MATTAR VALENTE

Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial PPGTG da Universidade Federal de Santa Catarina, pesquisador de Desenvolvimento Tecnológico, nível 2 do CNPq. Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina.

ANA CLARA BRAGA DA MOTTA

Tecnóloga em Sistemas Navais pela FATEC-JAHU; Pesquisa na naval e projetos de embarcação de turismo; participou do projeto sobre segurança física do tripulante a bordo e vulnerabilidade e instabilidade humana; e no projeto de viabilidade econômica de comboios na lagoa dos Patos-RS.

AUTORES

ANDRÉ LUIS LOPES MORIYAMA

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2009), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2014), e doutorado em Química pela Université de Toulon (2014). Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Engenharia Química e Ciências e Engenharia de Materiais. Atualmente, desenvolve atividades focadas em tecnologias ambientais e energéticas, envolvendo a produção de nanomateriais à base de óxidos mistos para aplicação em diferentes processos químicos catalíticos e fotocatalíticos.

ANA VITÓRIA GALVÃO VIEIRA

Graduanda em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Universitário Unimetrocamp Wyden. Em 1992 pós graduou-se em Administração Financeira com Especialização em Custos PELA Universidade de Pernambuco. Em 1990 graduou-se em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Pernambuco. Em 1990 também se graduou em Administração pela Universidade de Pernambuco. Desde 2023 estagia na Empresa R4F Tecnologia em Telecomunicações Ltda. na área de agricultura de precisão. Experiência em empresas de pequeno, médio e grande porte nos ramos de automação comercial, instituição de geração e difusão de tecnologia e editorial, principalmente nas áreas de custos, orçamentos, planejamento estratégico, qualidade e OSM. Implantação do Custo Total da Qualidade em uma empresa têxtil e de confecção e experiência em sistemas de informações gerenciais, consultoria e treinamento em normas e ferramentas da qualidade. Habilidades em tarefas operacionais, administrativas, de qualidade, de comunicação, de recursos humanos e gerenciais, bem como em demonstrativos financeiros e análise de resultados estratégicos da empresa.

ANDRÉ STUDART

Civil Engineer, and MsC and PhD researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University Beira Interior, and member research centers FibEnTech and GeoBioTec in Portugal.

ANTÓNIO ALBUQUERQUE

Associate Professor and researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Beira Interior (Portugal), and FibEnTech and GeoBioTec research centers

ARTUR ANGELO CARVALHO MARTINS

Acadêmico de Engenharia Civil na Universidade Estadual do Maranhão desde 2019. Foi por 1 ano e meio membro da empresa júnior do seu curso (Opus engenharia Jr) atuando nas áreas de marketing e projetos. Desenvolveu uma pesquisa sobre o uso do DCP para determinar correlações com os ensaios de caracterização do solo. Estagiou em áreas de projetos de construção e canteiro de obras.

AURELIA ALTERMIRA ACUNA IDROGO

Possui graduação em Agronomia - Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (1977), mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal da Paraíba (1983) e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003). Avaliadora do Prêmio Paraibano da Qualidade (ciclo 2004-2007); Prêmio Competitividade da Micro e Pequena Empresa (ciclo 2003-2008); Avaliadora em nível nacional do Prêmio MPE Brasil desde 2009; Prêmio Qualidade no Governo Federal (ciclo 2002); Prêmio Sesi de Saude e Segurança no Trabalho (ciclo 2006-2007), dentre outros. Atualmente é professora da Universidade Federal da Paraíba, atuando principalmente nas seguintes aréas: Gestão da Qualidade, Normalização, Gestão Empresarial e Elaboração de Projetos de Investimento.

AUTORES

CARLOS EDUARDO XAVIER TEIXEIRA

Ingressou no curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão em 2019. Desde então acumulou conhecimentos em programas aplicados à engenharia, como AutoCad, Excel e Sisdea. Com foco integral no Setor Público, principalmente na área de Controle, tendo sido classificado como “aprovado” no certame da CGU (Controladoria Geral da União).

DEIVIDI DA SILVA PEREIRA

Realizou em 2015 estágio sênior nos Estados Unidos, na University of Minnesota, participando de projetos com a FHWA e MnDOT. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria (1998), mestrado (2001) e doutorado (2003) em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo (EPUSP). Foi professor assistente e adjunto na Universidade Católica de Pelotas (UCPEL). Desenvolveu atividades profissionais de engenharia em empresas de consultoria e concessão rodoviária entre 2003 e 2007. Atualmente é professor associado da UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, atuando no curso de Engenharia Civil e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Mestrado e Doutorado). Tem experiência na área de Engenharia Civil e de Transportes, com ênfase em infraestrutura viária, atuando principalmente em pavimentação asfáltica e de concreto, mecânica de pavimentos, elementos de segurança viária, avaliação funcional e estrutural de pavimentos e custos rodoviários.

DIEGO HABIB SANTOS NOLASCO

Bacharel em Engenharia Elétrica, formado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA, Pós-graduado em Engº de Segurança do Trabalho pela Faculdade de Tecnologia e Ciência - FTC, Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia pela Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC e Doutor em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Atividades profissionais atuais: Profº EBTT/IFBA - Campus de Vitória da Conquista, atuando com docência em eletrotécnica: instalações elétricas prediais e industriais, máquinas elétricas, acionamentos e comandos elétricos, análise de circuitos elétricos, dentre outros temas referente a área de atuação docente. Áreas de interesse em pesquisa: sistemas de tomada de decisão inteligente, qualidade de energia, proteção de sistemas elétricos, segurança em eletricidade, dentre outros temas na área deeletrotécnica.

EDUARDO FERNANDES NUNES

Em 2004, graduou-se como Engenheiro de telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Em 2008, formou-se mestre pela Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Em 2015, doutorou na mesma Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. De 2004 a 2012 trabalhou na Expertise Engenharia atuando em projetos de pesquisa na área de automação de subestações e sistemas de medição e gestão da qualidade da energia elétrica. Desde 2012 atua na R4F Tecnologia em Telecomunicações Ltda, Campinas-SP, Brasil, onde desenvolve projetos de pesquisa na área de rede de sensores sem fio para a agricultura. Desde 2016 é professor Titular da Faculdade Metropolitana de Campinas (METROCAMP) nas disciplinas de Máquinas Elétricas e Acionamentos, Medidas Elétricas e Instrumentação, Eletrônica Analógica, Redes de Comunicação Industriais, Redes de Computadores, Sistemas de Comunicações, Sistemas de Telecomunicações, projeto de Sistemas Embarcados, Circuitos Elétricos e Análise de Circuitos Elétricos. http://lattes.cnpq.br/0995997530035949

ELIEZER FARES ABDALA NETO

Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Fortaleza (1992). Especialização em Administração, pela Universidade Federal do Ceará (2002). Mestrado em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pela Universidade Federal do Ceará (2006). Doutorado em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pela Universidade Federal do Ceará (2012).

AUTORES

FILIPE CARVALHO DE ANDRADE

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil. Membro do IEEE e do capítulo MTTS, desde de 2021 e, atuou como Tesoureiro do MTTS-IFBA-VCA. Participa ativamente como bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Engenharias) desde 2020. Atua como Assessor da Coordenadoria de Projetos do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia Junior da Bahia (CreaJr). Possui interesse de pesquisa na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em áreas que envolvam o eletromagnetismo aplicado e automação industrial.

GIOCONDA SUNCION ACUNA

Graduada em Administração de Empresas, com Mestrado em Engenharia de Produção pela UFRN, atuando como consultora em Pesquisa de Satisfação do Cliente pelo atacarejo NOSSA, atuou como Docente no Curso de Administração de Empresas da UFRN, atuou também no SEBRAE em Inovação e Produtividade para Pequenas e Médias Empresas.

JOÃO VINÍCIOS WIRBITZKI DA SILVEIRA

Doutor em engenharia química pela UNICAMP

JOSÉ SALVINO DA SILVA

Bacharelado em Engenharia de Produção Mecânica pela UFPB, pela Voitto possui Formação de LeanPractitioner em Lean Manufacturing, Engenharia e Gestão Industrial, possuindo também pela mesma empresa treinamento Green Belt. Atua como Engenheiro de Processos e Melhoria Contínua na Gráfica Santa Marta.

JULIANA FARAH

Profisisonal graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade Santa Cecília, Pós graduada em Competências Comportamentais pela BBI of Chicago e Especialista em Engenharia da Confiabilidade, atua há 20 anos na área de Manutenção Industrial, em empresas de médio e grande porte.

LEONARDO MARCHIORI

Master of Science in Civil Engineering (Environment and Geotechnics), and PhD researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University Beira Interior, and member research centers FibEnTech and GeoBioTec in Portugal. Research fields: 1. Industrial wastes geotechnical valorization 2. Wastewater induced bioclogging in porous materials 3. In situ and laboratorial soil's geotechnical and geological characterization

LEONARDO SOUZA CAIRES

Possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA, campus de Vitória da Conquista, onde também concluiu o curso Técnico Profissionalizante em Eletromecânica. Trabalha no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA, como professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT, ministrando disciplinas nos cursos de Engenharia Elétrica e no curso Técnico em Eletromecânica. Tem interesse nas seguintes áreas de conhecimento: Acionamentos Elétricos, Qualidade de Energia Elétrica, Eletrônica de Potência e Técnicas de Controle e Filtragem passivaeativa.

AUTORES

LIANA GEISA CONRADO MAIA

Graduação em Licenciatura em Química , Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental e Doutorado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará.

LUCAS DOTTO BUENO

Doutor em Engenharia Civil, formado pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - Graduação, Mestrado e Doutorado). Possui experiência profissional e docente com ênfase nos setores da Geotecnia e Pavimentação. Atuou como docente no Centro Universitário e Faculdades UNIFTEC e na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), além da vinculação como Engenheiro Civil junto a Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC), com lotação no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Atualmente, é Professor Adjunto A - Nível 1, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no campus de Cachoeira do Sul/RS.

LUCIANO PIVOTO SPECHT

Realizou pós-doutorado na École Nationale des Travaux Publics de LÉtat (Université de Lyon) em 2015. Concluiu seu doutoramento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2004. Foi professor assistente, associado e adjunto da UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul em Ijuí - RS, atuando no curso de Engenharia Civil e no Mestrado em Modelagem Matemática no período de 2001 a 2011. Atualmente é professor associado da UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, atuando no curso de Engenharia Civil e no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Mestrado e Doutorado). Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Pavimentação, Geotecnia e Transportes, atuando principalmente nos seguintes temas: pavimentos flexíveis, infraestrutura de transportes, materiais de pavimentação, concreto asfáltico e meio ambiente.

LUIS ANDRADE PAIS

Auxiliar Professor and researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Beira Interior (Portugal), and GeoBioTec research centers

LUIS ANTONIO GOMES DA COSTA MOURA DA SILVA

Graduando em Engenharia Civil, com ingresso na Universidade Estadual do Maranhão em 2019. Integrou por um ano a Opus Engenharia Jr. como Gerente Comercial e estagiou entre junho de 2021 a outubro de 2022 na Assessoria Técnica da Diretoria de Operações da CAEMA. Atualmente, estagia na GIHABSL, unidade da CAIXA, acompanhando as obras de mercado financiadas no estado do Maranhão.

MARIA CLARA MUNIZ

Acadêmica de Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão. Com ingresso no curso em 2019, já atuou como professora estagiária de matemática no Colégio Educator. Participou do Programa Institucional de Bolsas de Extensão - PIBEX da UEMA como aluna bolsista no projeto “O fogão solar como desenvolvimento econômico e ambiental para os moradores do bairro Bob Kenedy no município de Paço do Lumiar\" em 2020. Voluntariou-se como estagiária do Laboratório de Concreto e Materiais de Construção - LABCOM da UEMA em 2022 e, atualmente, estagia no Tribunal Regional Eleitoral do Maranhão - TRE MA no setor de manutenção predial - SEMAP.

MARIA EUGÊNIA GIMENEZ BOSCOV

Titular Professor at the Department of Structural and Geotechnical Engineering of University of São Paulo (USP).

AUTORES

MARIA GABRIELA DE SOUSA SILVA

Graduanda em Engenharia Civil Bacharelado pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Possui experiência em acompanhamentos de execução de obras de construção civil e de procedimentos para a regularização de imóveis. Interessa-se pelas áreas Patologias das Construções e Pavimentação voltadas à aplicação de práticas sustentáveis, assim como por Geotecnia e Segurança do Trabalho.

MARIA VITORIA MORAIS

Civil Engineer, and MsC and PhD researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University Beira Interior, and member research centers FibEnTech and GeoBioTec in Portugal.

MAYSSA ALVES DA SILVA SOUSA

Doutora em Engenharia Civil (AC: Geotecnia) pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Recife, PE). Mestra em Engenharia de Transportes (AC: Infraestrutura de Transportes) pelo Instituto Militar de Engenharia - IME (Rio de Janeiro, RJ). Bacharela em Engenharia Civil pela Unidade de Ensino Superior Dom Bosco - UNDB (São Luís, MA). Especialista em Ciência de Dados pela Universidade de São Paulo - USP (São Paulo, SP). Atualmente é Professora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA e desenvolve trabalhos técnicos, científicos e de consultoria nas áreas de Pavimentação e Ciência de Dados. Foi professora e membro do NDE - Núcleo Docente Estruturante dos cursos de Engenharia Civil e de Produção da UNDB. Trabalhou na empresa Ductor Implantação de Projetos Ltda., prestando serviços de análise e fiscalização de projetos ferroviários (Área de concentração em Engenharia Geotécnica e de Pavimentos), sendo principal projeto o de Expansão da Estrada de Ferro Carajás - EEFC da VALE.

MIKELLY BONFIM ANJOS

Graduada em Gestão Empresarial pela Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC) - campus Sertãozinho e Graduanda em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia da Bahia (IFBA) - campus Vitória da Conquista. Trabalhou em duas microempresas exercendo a função de Assistente Administrativo, atuando principalmente nas áreas de Gestão de Recursos Humanos e Gerenciamento Financeiro, e na função de Gerente Administrativo respectivamente. Atualmente é estagiária do setor de fechamento de obras na empresa Sino Eletricidade LTDA, é membro do Programa de Educação Tutorial - PET Engenharias, onde desenvolve atividades relacionadas ao ensino, pesquisa e extensão, da Empresa Junior de Engenharia Elétrica (EJEEL) atuando no setor comercial e do Diretório Acadêmico de Engenharia Elétrica, onde atua na coordenação financeira.

PLÍNIO RIBEIRO RODRIGUES

Doutor em engenharia química pela UNICAMP

RAFAEL DE PAULA LACERDA PIO

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) - campus Vitória da Conquista. Trabalha há 4 anos no setor administrativo e fiscal de uma distribuidora de embalagens e há 2 anos é estagiário, desenvolvendo atualmente a função de gerente de obras em uma empresa de engenharia e fontes renováveis, na qual desenvolveu experiência em instalações elétricas residências e industriais, dimensionamento e instalações de sistemas fotovoltaicos on-grideoff-grid.

RONALDO FERREIRA DO NASCIMENTO

Professor do Departamento de Química Analítica e Físico-Química – Universidade Federal do Ceará (UFC). Coordenador do Laboratório de Análise de Traços (LAT). Graduação em Química Industrial,

AUTORES

Universidade Federal do Maranhão, UFMA (1991) Doutorado em Química Analítica, Instituto de Química de São Carlos(1997).

SÂMYO RODRIGUES COSTA

Graduando em Engenharia Civil Bacharelado pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Tem experiência em acompanhamentos de execução e acabamento de obras de alvenaria e aplicação de métodos alternativos de construção. Interessa-se por tecnologia, inovações da construção e métodos sustentáveis da construção civil.

TARCÍSIO VIEIRA LISBOA ARAÚJO

Acadêmico de Engenharia Civil na Universidade Estadual do Maranhão desde 2019. Foi por dois anos membro da empresa júnior do seu curso (Opus engenharia Jr) atuando nas áreas de comercial, gestão de pessoas, marketing e projetos além de ocupar o cargo de diretor comercial da mesma por um ano. Membro do programa CREA jr desde 2021. Já atuou como monitor na disciplina de Instalações elétricas e prediais tendo amplo conhecimento neste tipo de projeto complementar. Estagiou em áreas de projetos de construção, canteiro de obras e no setor ferroviário.

THYAGO VINÍCIUS SANTOS DA SILVA

Graduando em Engenharia Civil Bacharelado pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Possui experiência em acompanhamento de execução de obras residenciais de construção civil. Interessa-se pelas áreas de Geotecnia, saneamento e tecnologias voltadas à construção civil.

VICTOR CAVALEIRO

Full Professor and researcher at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Beira Interior (Portugal), and GeoBioTec research centers

VINÍCIUS DA FONSÊCA SANTOS

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) e membro da Empresa Júnior de Engenharia Elétrica (EJEEL) desde 2020, atuou como bolsista em outros projetos de extensão. Devido a vasta carga horária cumprida no curso, acumulou experiência com softwares de simulação em circuitos eletrônicos, eletropneumáticos, modelagem computacional matemática e dentre outros. Edificou conhecimentos obtidos em minicursos e palestras dispostos nos eventos do campus e como futuro engenheiro pretende seguir carreira no ramo de eletrotécnica, além de automaçãoecontrole.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson