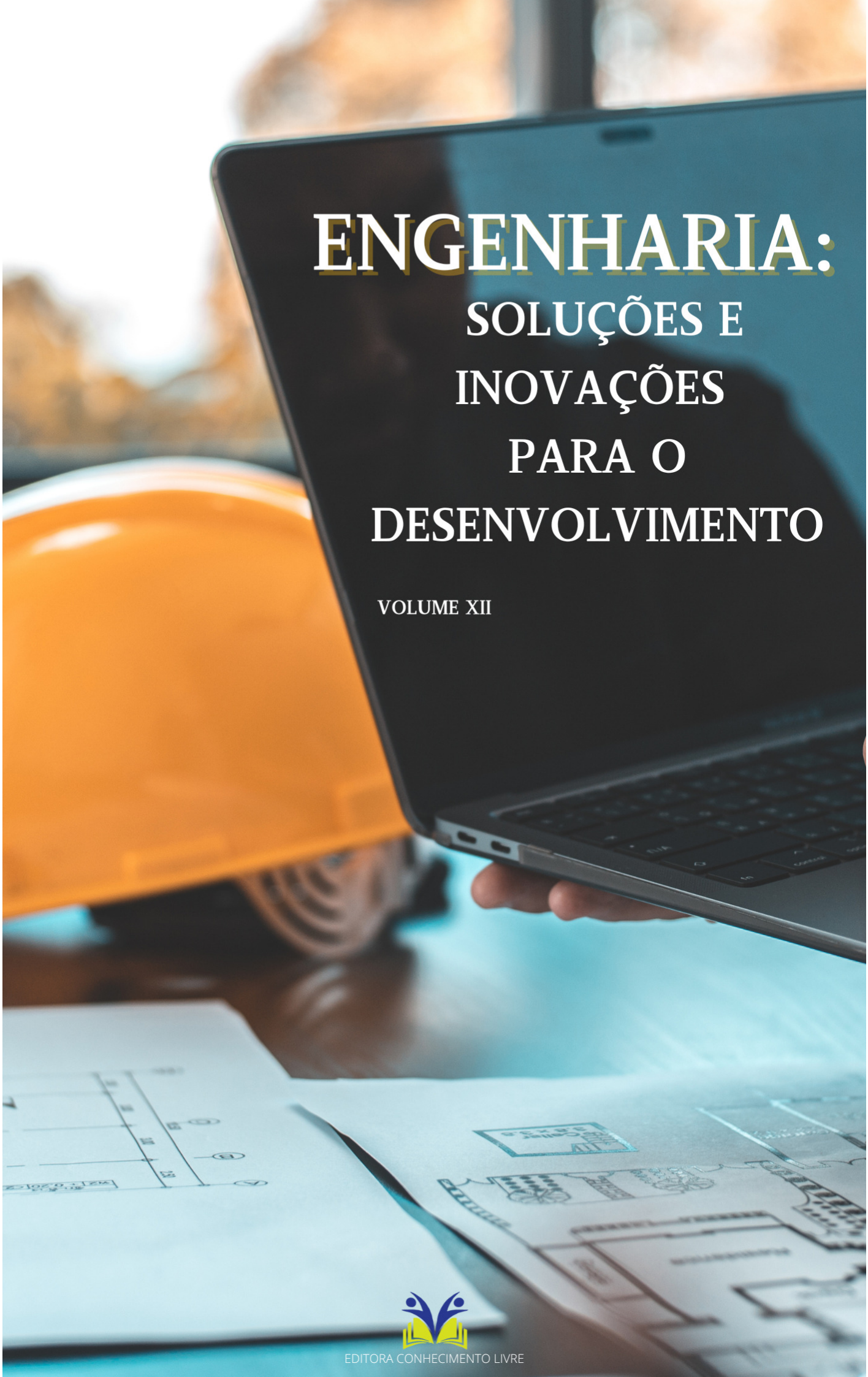


ENGENHARIA: SOLUÇÕES E INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO

VOLUME XII

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: soluções e inovações para o desenvolvimento

12ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

Copyright© 2024 por Editora Conhecimento Livre

12ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: soluções e inovações para o desenvolvimento
/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2024

203 f.: il
DOI: 10.37423/2024.edcl1010
ISBN: 978-65-5367-552-0
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. projeto 2. construção 3. melhorias I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

https://doi.org/10.37423/2024.edcl1010

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO
2024

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 7
ÁNALISE DE VIABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA RESIDENCIAL
Naldileide Azevedo Casado
DOI 10.37423/240909290

CAPÍTULO 2 37
SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO E MONITORAMENTO PARA HORTAS COMUNITÁRIAS
Thiago de Santana Souza
Robério de Jesus
Klebson Silva Santos
Bruno Nery Emilio Santos
Marco Aurélio Pereira Buzinaro
Elenilton Teodoro Domingues
Anderson Lima Pereira
Rubens Araujo Silva
Diego Lopes Coriolano
DOI 10.37423/240909299

CAPÍTULO 3 52
OTIMIZAÇÃO DE MÉDIA E VARIÂNCIA DA RUGOSIDADE RA NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205
WANDER PINTO RIBEIRO
Gustavo Rocha de Queiroz
Harue Genghini Shibuta
Carlos Henrique de Oliveira
Leonardo Albergaria de Oliveira
Tarcísio Gonçalves de Brito
DOI 10.37423/240909307

CAPÍTULO 4 69
SÍLICA ALUMINA COBERTA POR CARBONO E SUA APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DO CORANTE VERDE MALAQUITA: QUANTIFICAÇÃO POR ESPECTROFOTOMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA
Julyane Rocha Santos Solano
David Clebson de Melo Silva
Thaís Regina Silva Ribeiro
Soraya Lira Alencar
Maritza Montoya Urbina
Nehemias Rodrigues de Alencar Júnior
DOI 10.37423/240909308

CAPÍTULO 5 75
CRISTALIZAÇÃO E PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA ZSM-23 SINTETIZADA COM DIFERENTES COMPOSTOS ORGÂNICOS
Julyane Rocha Santos Solano
Bruno José Barros da Silva
Soraya Lira Alencar
Maritza Montoya Urbina
Nehemias Rodrigues de Alencar Júnior
Antonio Osimar Sousa da Silva
DOI 10.37423/240909311

CAPÍTULO 6 87
WETLANDS NO TRATAMENTO DO EFLUENTE DE SUINOCULTURA: UMA AVALIAÇÃO NO DESEMPENHO DE REMOÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS UTILIZANDO DIFERENTES MACRÓFITAS
Fátima Luana Techy
Guilherme Gavlak
Kely Viviane de Souza
Carlos Raphael Pedroso
Bruna Barendrechte
Emilly Giacobbo
Robert William Florentino
Erivelton César Stroparo
Silvane Carolina Gonçalves da Rosa de Assis
DOI 10.37423/240909313

CAPÍTULO 7 103
HABITAÇÃO NO CEARÁ: PERFIL DE OCUPAÇÃO E CONDIÇÃO DOS IMÓVEIS ANÁLISE DESCRITIVA DE DADOS OFICIAIS.
José de Souza Alencar Junior
Ana Milena Silva Feitosa
Bruno Vinícius de Menezes Barros
Cicero Cezar Ferreira Dantas
Raquel Colares Abreu
DOI 10.37423/240909320

CAPÍTULO 8 111
MATHEMATICAL MODELLING OF A FIXED BED ADSORBER: PROCESS SIMULATION
Jornandes Dias da Silva
DOI 10.37423/240909323

CAPÍTULO 9 120
NUMERICAL ANALYSIS OF A LUMPED-PARTICLE CATALYTIC TRICKLE-BED REACTOR USING THE LAPLACE TRANSFORM METHOD
Jornandes Dias da Silva
DOI 10.37423/240909324

CAPÍTULO 10 130
APPLICATION OF KINETIC MODEL FOR CATALYTIC HYDROGENATION-BASED BIOMASS CONVERSION IN SLURRY REACTOR
Jornandes Dias da Silva
DOI 10.37423/240909325

CAPÍTULO 11 142
HYDROGEN PRODUCTION VIA STEAM REFORMING OF METHANE IN A PD-BASED FIXED-BED MEMBRANE REFORMER
Jornandes Dias da Silva
DOI 10.37423/240909326

CAPÍTULO 12 153
A THERMOCHEMICAL EVALUATION FOR BIOMASS-DERIVED CARBOHYDRATE CONVERSION: MONOSACCHARAIDE PRODUCTION
Jornandes Dias da Silva
DOI 10.37423/240909327

CAPÍTULO 13 163
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CIRCUITO ELÉTRICO RLC PARALELO POR MEIO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE A PARTIR DOS SOFTWARES MATLAB® E LTSPICE®
Ayan Gustavo Nakamura Yoshida
Eriko Vinicius Vieira do Nascimento
Guilherme dos Santos Proença
Leonildo Hilton Alves Junior
Lucas Carmona de Oliveira
Flávio Luiz Rossini
DOI 10.37423/240909330

CAPÍTULO 14 190
ANÁLISE ERGONÔMICA DO POSTO DE TRABALHO DE UM ESTOQUISTA EM UMA DISTRIBUIDORA DE ALIMENTOS UTILIZANDO OS MÉTODOS NIOSH E REBA
André Luis da Silva
Maria Carolina Rizola
DOI 10.37423/241009359

Capítulo 1

10.37423/240909290

ÁNALISE DE VIABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA RESIDENCIAL

Naldileide Azevedo Casado *FACULDADE MAURICIO DE NASSAU*

Resumo: O uso de fontes de energia renováveis ou de alternativas sustentáveis na construção civil intensificou-se nos últimos anos, como forma de minimizar os impactos ao meio ambiente. No Brasil, a geração de resíduos orgânicos é bastante elevada, e grande parte desse material é destinado a aterros ou lixões, sendo uma fonte de energia desperdiçada mediante o potencial de geração de biogás. Nesse contexto, o presente trabalho propõe um sistema de aproveitamento de resíduos orgânicos para geração de biogás e cogeração de energia residencial através do uso de um biodigestor, como forma de reduzir os custos do uso de eletricidade fornecida pelos meios tradicionais, hidroelétricas e termoelétricas, gerenciada pelas concessionárias de energia. Tomou-se como base uma residência unifamiliar popular econômica, foi realizado o dimensionamento do biodigestor, o cálculo da demanda de energia e produção pelo biogás a ser produzido, além do orçamento para construção e implantação do sistema. A partir dos dados obtidos, tem-se que a carga de alimentação diária de resíduos orgânicos, necessária para suprir a demanda de energia da habitação tomada como referência, deve ser de 1,42 m³. A energia produzida a cada 1m³ de biogás é de 2,61 kW. O custo para construção e implantação do sistema proposto é de aproximadamente R$ 1.433,40. A partir dos dados obtidos, certifica-se que o sistema é de grande viabilidade técnica e econômica, ocasionando um impacto na redução do custo na conta de energia residencial familiar, podendo ser implementada a outros estilos de habitações, como escolas, faculdades, condomínios verticais e horizontais, hospitais etc., o qual proporcionará uma significativa economia de energia e contribuirá para a redução de resíduos orgânicos depositados no meio ambiente.

Palavras-chave: Biogás. Economia. Habitações. Meio Ambiente. Resíduos Orgânicos.

1. INTRODUÇÃO

Segundo De Andrade (2004) o alto consumo da tecnologia gera grandes impactos ao meio ambiente. O crescimento populacional gerou grandes mudanças no setor econômico e industrial de todo o mundo. O consumo elevado de energia elétrica e a utilização da tecnologia contribuíram para o avanço da poluição e degradação do ecossistema.

No mundo é produzido em média 1,4 bilhões de toneladas de lixo por ano, no qual estima-se uma produção média de 1,2 kg/dia per capita. A taxa de crescimento da produção de resíduos sólidos vem crescendo a cada ano (PNRS, 2011).

Segundo o presidente da ISWA, David Newman, os países com maior índice de produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), são os países com situação econômica mais elevada. Isso significa que quanto mais alto o padrão de vida de cada indivíduo maior será o consumo e consequentemente haverá um acréscimo na produção de resíduos sólidos (PNUMA, 2015).

Baseado em dados do Banco Mundial, o Brasil está inserido na escala entre os dez maiores produtores de lixo do mundo. Os resíduos orgânicos representam mais da metade desta produção. No Brasil apenas 1% dos resíduos orgânicos produzidos são reaproveitados, havendo um grande desperdício desta matéria prima que pode ser utilizada na produção de energia (PNRS,BRASIL, 2017)..

Levando em consideração os fatores sociais e econômicos do nosso país, e as consequência causadas devido à disposição inadequada dos resíduos orgânicos, é de grande importância a apresentação de uma solução viável e de fácil compreensão para solucionar os problemas gerados pela poluição e eventual desperdício de matéria prima provenientes desses resíduos orgânicos. Os biodigestores apresentam-se como uma alternativa viável e nos últimos anos têm ganhado espaço dentre os métodos de reaproveitamento de matéria orgânica para geração de biogás e cogeração de energia.

A partir de tal concepção surgiu a preocupação que direcionou o desenvolvimento do presente trabalho, baseada na realização do dimensionamento de um biodigestor compatível com o reaproveitamento de restos orgânicos provenientes de resíduos alimentares. De modo que os resultados do presente trabalho possam ser estendidos a grupos familiares residentes tanto em áreas urbanas, quanto em comunidades rurais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o dimensionamento de um biodigestor para a produção de biogás a partir de resíduos alimentares residenciais enquanto fonte energética.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar um biodigestor para cogeração de energia residencial, modelo chinês;
- Fazer uma estimativa da energia produzida;
- Apresentar o orçamento para montagem do sistema proposto;
- Apresentar uma esquematização do processo e sistema.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS ORGÂNICOS

Estima-se que 55% dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil são constituídos de resíduos orgânicos putrescíveis. Esse tipo de material quando descartado no meio ambiente de modo inadequado gera percolado responsável pela contaminação dos corpos aquáticos e do solo, além da poluição do ar proveniente de gases tóxicos, intensificadores do efeito estufa e outros que são formados na degradação do material orgânico na digestão anaeróbia (SILVA, 2009; DA ROCHA, 2016).

Neto et al., (2007) reporta que o crescimento populacional urbano junto com o desenvolvimento industrial impôs a criação de novas opções de consumo ao homem, gerando assim muitos problemas para o meio ambiente com a geração dos resíduos orgânicos. Os efeitos negativos sobre o meio ambiente, levaram a busca por alternativas para minimizar tal problemática. Entre as soluções apontadas está o Princípio dos Três “Erres” (3R’s) que compreende as palavras reduzir, reutilizar e reciclar. Cada termo apresenta um significado no âmbito da sustentabilidade:

- Reduzir: corresponde consumir menos produtos e preferir aqueles que ofereçam menor potencial de geração de resíduos e tenha maior durabilidade;
- Reutilizar: compreende a reutilização de matérias, como usar novamente as embalagens plásticas;
- Reciclar - Envolve a transformação dos materiais, por exemplo, fabricar um produto a partir de um material usado.

Outra alternativa para o problema dos resíduos sólidos orgânicos é a reutilização ou aproveitamento dessa matéria para a geração do biogás, o qual é utilizado como fonte energética. Para isso, faz-se o uso de dispositivos denominados de biodigestores onde ocorre a degradação da matéria orgânica, por ação microbiológica, obtendo como subproduto, o biogás (REIS, 2012; DA ROCHA, 2016).

O biogás mistura gasosa proveniente do processo de decomposição, é conceituado por Balmant (2009) como: "mistura gasosa composta essencialmente de metano (CH4) e gás carbônico (CO2), com alto potencial de combustão, utilizada na geração de energia elétrica e no aquecimento.

3.2 BIODIGESTORES E GERAÇÃO DE BIOGÁS

A conjuntura do setor energético mundial a partir dos anos 70 diante da crise do petróleo, sugeriu mudanças importantes no desenvolvimento e exploração de novas fontes de energia. Com isso uma das medidas apontadas para minimizar os impactos decorrentes da utilização de hidrocarbonetos na cadeia de produção energética, consiste no reaproveitamento dos resíduos sólidos provenientes do descarte doméstico, industrial e agrícola (DA ROCHA, 2016).

A necessidade de reaproveitamento desses resíduos levou a difusão de uma tecnologia inicialmente desenvolvida na China e na Índia, mas que veio a ser bastante relevante para os demais países desenvolvidos e subdesenvolvidos, que foi a construção de biodigestores. A esse respeito Deubleinb Steinhauser (2008), destacam que:

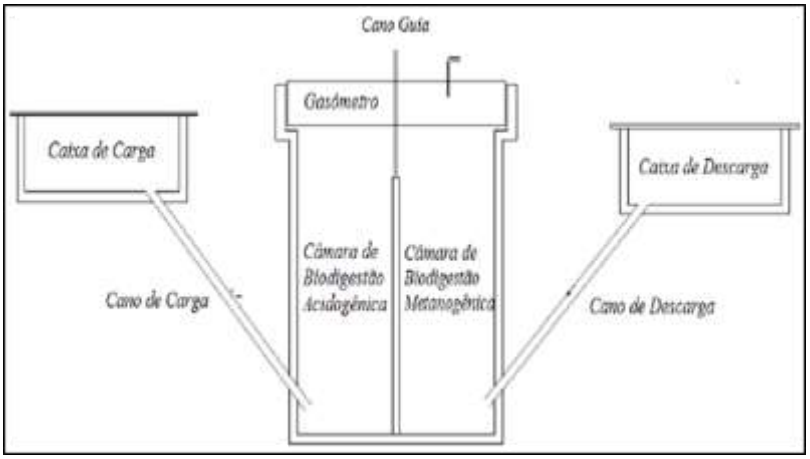
> O uso de biodigestores foi difundido através de várias pesquisas, e em 1939 foi criado em Kampur, na Índia, o Institute Gobár Gás (Instituto de Gás de Esterco), sede da primeira usina de gás de esterco, que objetivava tratar os dejetos animais, obter biogás e aproveitar o biofertilizante. Esse trabalho pioneiro permitiu a construção de quase meio milhão de biodigestores na Índia. A utilização do biogás na Índia, como fonte de energia, motivou a China a adotar tal tecnologia a partir de 1958, em 1972, já possuíam aproximadamente 7,2 milhões de biodigestores em atividade (DEUBLEINB e STEINHAUSER, 2008, p.15).

A conceituação de Magalhães (1986), define os biodigestores enquanto equipamentos herméticos e impermeáveis, onde materiais orgânicos são depositados e ficam retidos por tempo suficiente para que ocorra a digestão anaeróbica (Figura 1), ou seja a decomposição sem o contato com o ar, em que se obtém como resultado a formação e armazenagem de gases, principalmente metano e dióxido de carbono, bem como o descarte da parte líquida, que origina os biofertilizantes.

Dhanalakshmie Ramanujam (2012), apontam que entre os diversos processos para o tratamento de resíduos, ao permitir a obtenção de biogás e de biofertilizante, a biodigestão anaeróbica, se destaca

enquanto tecnologia eficiente, pois além contribuir na amortização do custo de instalação, consiste também em uma solução eficaz para o problema de saneamento dos resíduos depositados no meio ambiente.

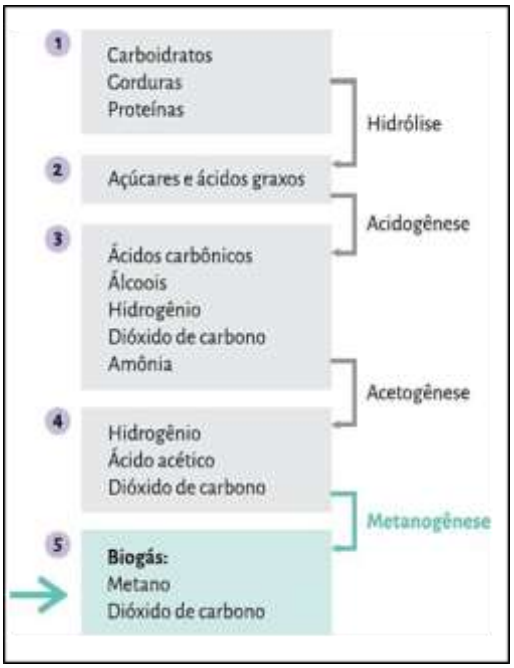
Figura 1. Diagrama esquemático de um biodigestor anaeróbio.



Fonte: COUTO (2019).

Conforme descreve Palhares (2019), o processo de geração do biogás compreende quatro fases (Figura 2), onde na biodigestão anaeróbia da matéria orgânica fatores intervenientes como temperatura, pH e condição nutricional do dejeto são primordiais para degradação da matéria.

Figura 2. Geração de Biogás - Resumo das fases do processo de biodigestão anaeróbia.



Fonte: PALHARES (2019).

Segundo reportam Belli Filho et al (2004), Willians et al (2013) e Palhares (2019), o processo de biodigestão anaeróbia, em que ocorre com a degradação da matéria passa pelas seguintes fases:

• **Hidrólise:** a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados, transformando-os em compostos solúveis mais simples.

• **Acidogênese:** nesta etapa, os produtos que resultam da hidrólise são metabolizados pelas bactérias fermentativas em compostos orgânicos simples, como álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos graxos voláteis de cadeia curta, gás carbônico e gás hidrogênio. Esta fase propicia o crescimento de novas comunidades microbianas, pois a fermentação ocorre por um grupo diversificado de bactérias.

• **Acetogênese:** trata-se de uma etapa que possibilita a transformação de produtos da Acidogênese em ácido acético (precursor da formação do metano). Os ácidos, em concentrações elevadas, inibem a etapa final da digestão anaeróbia, ou seja, os ácidos precisam ser consumidos durante o processo.

• **Metanogênese:** esta é a etapa final do processo de biodigestão anaeróbia, em que os compostos produzidos na fase acidogênica são transformados em biogás por microrganismos carbono, o hidrogênio, o ácido acético, o ácido fórmico e o etanol. As principais vias para a formação do metano são a descarboxilação do ácido acético (microrganismos metanogênicas acetoclásticos) ou a redução do dióxido de carbono (microrganismos, metanogênicos hidrogenotróficos).

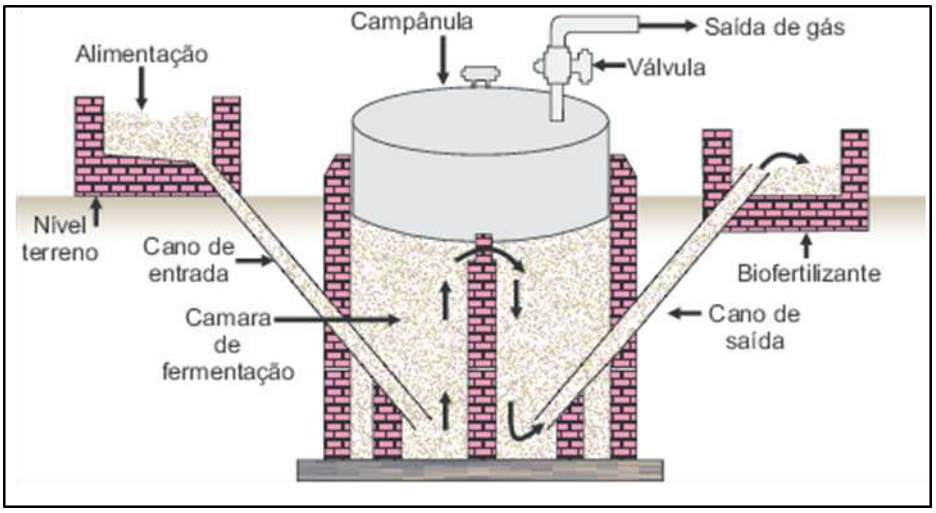
3.2.1 TIPOS DE BIODIGESTORES

Conforme Lopes et al (2003) os biodigestores apresentam tipos variados considerando a origem dos resíduos, sendo operados com cargas contínuas ou batelada. Dentre os principais modelos de biodigestores, destacam-se: o chinês, o indiano e o canadense.

3.2.1.1 BIODIGESTOR INDIANO:

O modelo de biodigestor indiano, esquematizado na Figura 3, consiste em uma construção cilíndrica, composta de tijolos e impermeabilizada internamente com cimento, e construída de câmara dupla separada por uma parede central (NISHIMURA, 2009).

Figura 3. Esquematização do biodigestor modelo indiano.



Fonte: CASSINI *et al* (2014).

Pereira (2005) e Cassini et al (2014) reportam que o modelo indiano de biodigestor que tem como característica principal o uso de uma campânula flutuante como gasômetro, sendo que a mesma pode estar mergulhada ou inserida sobre a biomassa em fermentação. Existe ainda uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, direcionando todo o material em processamento pelo interior da câmara de fermentação de forma homogênea. O biodigestor possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o biogás é produzido e não é consumido, o gasômetro desloca-se verticalmente, aumentando o volume deste, mantendo dessa forma a pressão constante em seu interior.

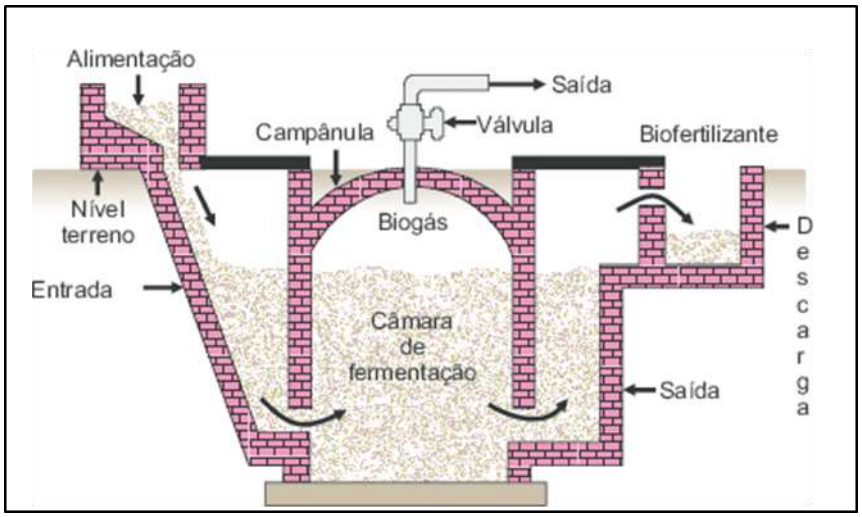
Deganutti et al (2008) destaca que a campânula (gasômetro) pode ser mergulhada na biomassa no interior do biodigestor ou externamente em um selo de água. Desse modo se o volume de gás produzido não for consumido de imediato, ocorre o deslocamento vertical do gasômetro, indicando o aumento de volume, o que mantém a pressão de operação constante. Para que não haja entupimentos ou danos nos sistemas de entrada e saída de material é recomendado ainda segundo o autor supracitado, que o abastecimento seja contínuo e a concentração de sólidos totais (ST) não seja superior a 8%.

Do ponto de vista construtivo, o biodigestor modelo indiano apresenta-se de fácil construção. Entretanto, o gasômetro de metal pode encarecer o custo final e, também, a distância da propriedade pode dificultar e encarecer o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor (PEREIRA, 1999)

3.2.1.2 BIODIGESTOR CHINÊS

Conforme Deganutti et al (2008), o modelo de biodigestor chinês é constituído de uma câmara cilíndrica construída em alvenaria, impermeável, onde é realizada a fermentação e o biogás é armazenado, conforme a esquematização da Figura 4.

Figura 4. Esquematização do biodigestor modelo chinês.



Fonte: CASSINI *et al* (2014).

Na medida em que o biogás se acumula no interior da câmara, ocorre o aumento da pressão, resultando no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a saída. Este modelo a semelhança do modelo indiano, deve ser alimentado continuamente com substrato cuja concentração de sólidos totais seja em torno de 8%, evitando entupimentos do sistema de entrada e saída, facilitando a circulação de material (DEGANUTTI et al, 2008).

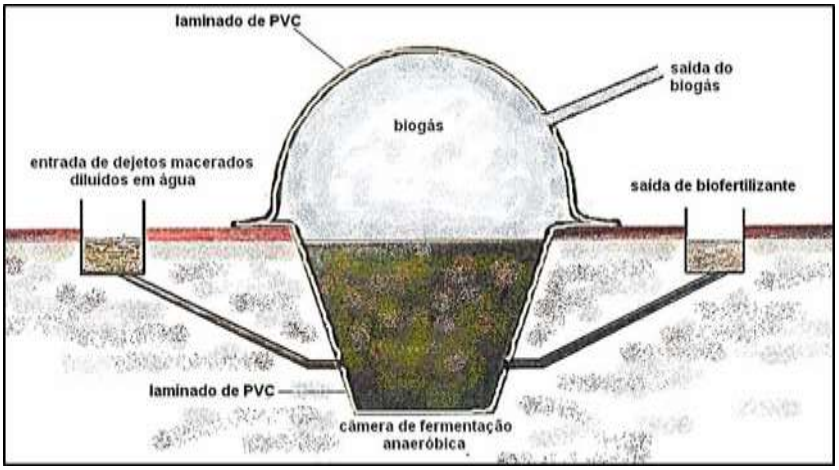
Oliveira (2009) salienta que este modelo trabalha com base no princípio de prensa hidráulica, aumentando a pressão em seu interior acumulando biogás, o que resulta em arrastos do efluente da câmara de metabolização para o reservatório de saída e em sentido contrário ocorre descompressão.

Segundo Nishimura (2009), o biodigestor chinês não possui gasômetro, possui um custo de construção inferior ao modelo indiano, por utilizar materiais de menor custo. É construído em alvenaria de tijolos, totalmente enterrado no solo. A redução de custos é resultado da não necessidade de utilização de partes de aço. Mas, o rendimento do reator será comprometido, caso o processo de impermeabilização do sistema apresente falhas que resultem em vazamento de efluentes ou gases.

3.2.1.3 BIODIGESTOR CANADENSE

Desenvolvido pela Marinha Brasileira na década de 1970, este modelo apesar da sua construção simples, possui tecnologia mais moderna reporta Pereira (2005). Sua composição básica é do tipo horizontal, a caixa de entrada construída em alvenaria, e constituída de uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável de material plástico, conforme é esquematizado na Figura 5.

Figura 5. Esquematização do biodigestor modelo canadense.



Fonte: OLIVER *et al* (2008).

Nesse modelo, o biogás produzido pode ser acumulado na cúpula plástica ou direcionado a um gasômetro separado, permitindo melhor controle do sistema operacional. Se comparado ao modelo Indiano, a vantagem deste modelo consiste no fato de que ele pode receber uma maior quantidade de resíduos (JUNQUEIRA2014).

Segundo Oliveira (2009), ao comparar o modelo canadense com o modelo chinês, nota- se que a vantagem está na estrutura, pois o modelo chinês é suscetível a rachaduras e danos relacionados à composição do solo brasileiro que possui dinâmica intensa de acomodação, resultando em perda de gás, exigência constante de manutenção e monitoramento. O fato de ser elaborado com base em padrões e condições físicas locais, torna esse modelo mais vantajoso em relação aos demais.

3.2.2 BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA

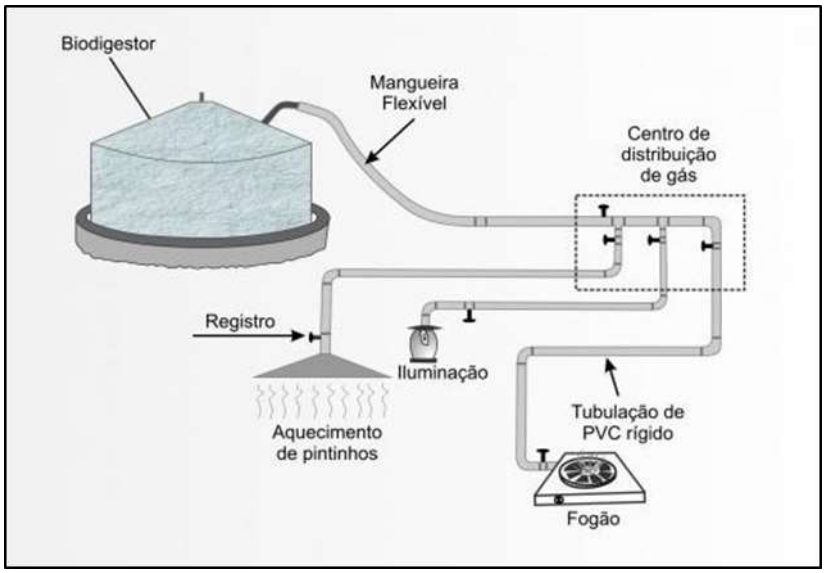
Como subproduto da fermentação anaeróbia de resíduos orgânicos, o biogás constituído principalmente por metano (CH_4) e gás carbônicos (CO_2), apresenta grande potencial de suprir necessidades energéticas. É considerado uma fonte de energia renovável com conteúdo energético

semelhante ao gás natural, portanto, sua produção é limpa e não degrada o meio ambiente, além de diminuir a quantidade de resíduos orgânicos a serem depositados nos aterros e lixões (NEPPA, 2015; PIMENTEl et al., 2015).

O biogás pode ser utilizado como combustível para a geração de energia elétrica, térmica ou mecânica, com poder calorífico variando de 5.000 a 7.000 kcal/m³. Em relação a fontes de energia, 1 m³ de biogás equivale a 0,61 litros de gasolina; 0,58 litros de querosene; 0,55 litros de óleo diesel; 0,45 litros de gás de cozinha; 1,50 quilos de lenha e 0,79 litros de álcool hidratado (NEPPA, 2015; PIMENTEL et al., 2015).

Segundo reporta Franco 2018), para que seja efetiva a geração da energia, é necessário canalizar esse biogás. Neste caso há duas formas de utilização: a primeira o biogás é destinado ao consumo como gás de cozinha e em aquecedores (Figura 6) e a segunda forma de aproveitamento energético é através da utilização de motores térmicos de combustão interna (Figura 7).

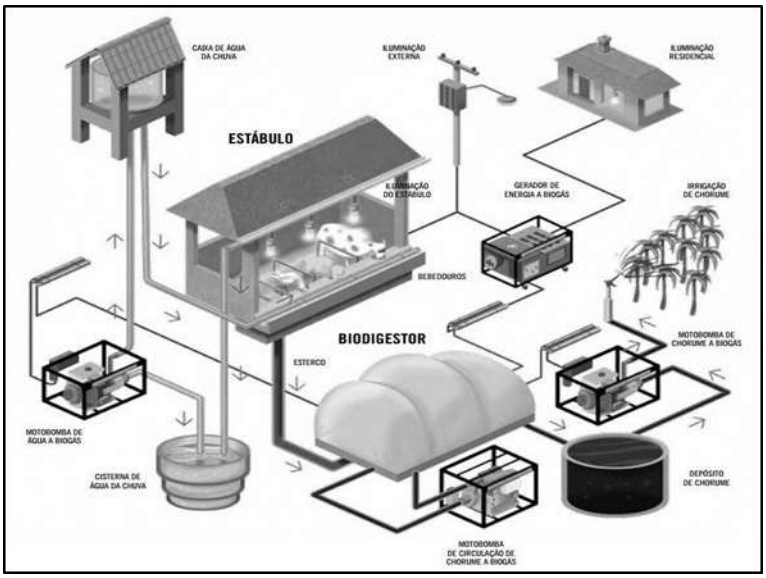
Figura 6. Utilização de biogás como gás de cozinha e aquecimento.



Fonte: GESTÃO AMBIENTAL (2013).

Figura 7. Utilização de biogás para geração de eletricidade.

Figura 7. Utilização de biogás para geração de eletricidade.



Fonte: (STRASSBURG, OLIVEIRA e ROCHA, 2015).

Os motores de combustão interna são as máquinas primárias mais utilizadas na geração de energia elétrica com aproveitamento do biogás como combustível primário. Os motores utilizados para biogás podem ser de dois tipos: o ciclo Otto e o ciclo diesel, sendo que o ciclo Otto ou de ignição por centelha é o mais fácil de adaptar para biogás, devido as unidades já existentes e adaptadas para gás natural (DE SOUZA, 2016).

O ciclo diesel pode operar com 100 % de biogás, mas para isso ele precisa ser ottolizado, ou seja, convertido para ciclo Otto. A conversão não é tão simples, pois envolve a remoção da bomba injetora, a introdução de um carburador e sistema de ignição por centelha, redução na taxa de compressão, entre outros. Os principais fornecedores de motor a gás no Brasil fazem essa conversão (DE SOUZA 2016).

3.2.3 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES

O dimensionamento de um biodigestor depende do modelo a ser adotado e da carga de resíduo orgânico ou carga diária que irá alimentar o equipamento. Os parâmetros a serem determinados para cada modelo de biodigestor é apresentado a seguir.

3.2.3.1 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR MODELO INDIANO

De acordo com Lucas Junior e Souza (2009) e Araújo et at (2015), os principais componentes dos biodigestores modelo indiano, esquematizado na Figura 8, são:

- caixa de carga (local de diluição dos dejetos);
- caixa de descarga (local de saída dos dejetos);
- câmara de biodigestão cilíndrica (local onde ocorre a fermentação anaeróbia com produção de biogás);
- gasômetro (local para armazenar o biogás produzido formado por campânula que se movimenta para cima e para baixo);
- tubo-guia;
- tubo de carga;
- tubo de descarga.

Figura 1- Parâmetros de dimensionamento do biodigestor modelo

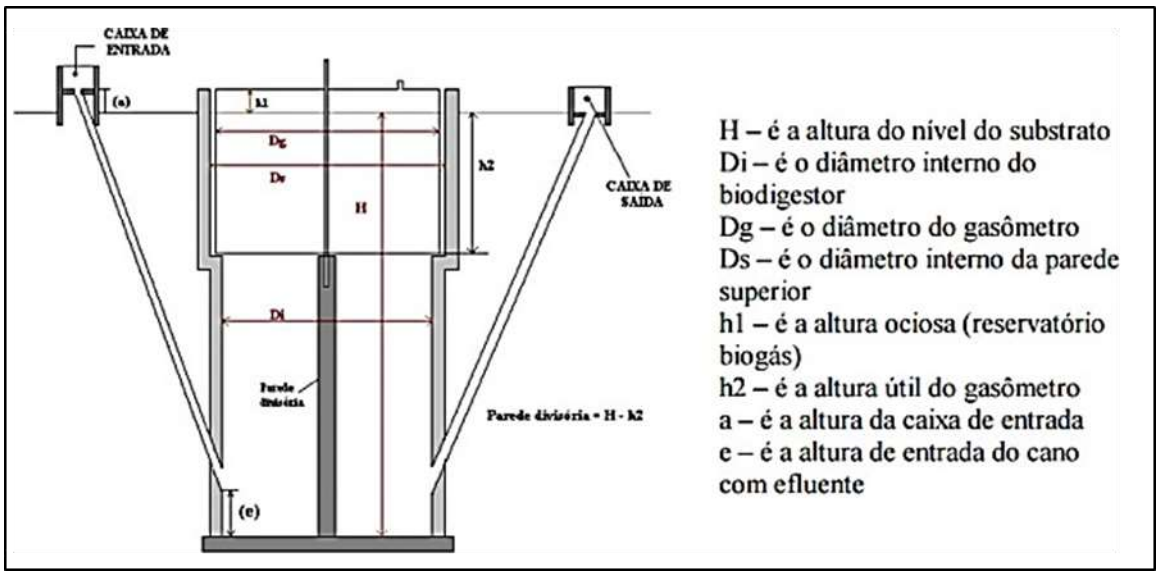


Figura 1- Parâmetros de dimensionamento do biodigestor modelo

Fonte: MARTINKOKI et al (2007)

Conforme cita Biodieselbr (2009) e reporta Araújo *et al* (2015), um método prático de estimular o tamanho do biodigestor é dado pela Equação a seguir:

$$V_B = V_C \times T_{HR} \quad (1)$$

Sendo:

V_B: Volume do biodigestor, em m³; V_C: Volume da carga diária, em m³;

T_{HR}: Tempo de retenção hidráulico, em dias.

Para se calcular a capacidade ou volume do biodigestor considerando-se um formato cilíndrico, utiliza-se a Equação 2, correspondente ao volume de um cilindro, onde o termo Vc (volume do cilindro) é substituído pelo termo V_B (volume do biodigestor).

$$V_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \qquad (2)$$

Sendo:

V_B: volume ou capacidade do biodigestor, em m³; D : diâmetro do biodigestor, em metros;

H : altura do biodigestor, em metros.

É importante citar que existe uma faixa ótima aceitável para a relação D/H. Para biodigestores de grandes dimensões essa razão deve ser próxima ou igual a 1. Com esse valor é possível proporcionar uma maior eficiência de fermentação e evita com que a altura não dificulte a instalação (ARAÚJO et al, 2015).

De acordo com Carneiro (2007), o dimensionamento do gasômetro pode ser realizado aplicando-se a Equação 3,Para calcular a altura real do gasômetro (Hrg), deve ser considerado as mesmas condições do volume do biodigestor.

$$Dg = Di + 2L + 0{,}10 \qquad (3)$$

Sendo:

Dg : diâmetro do gasômetro, em metros; Di : diâmetro do biodigestor, em metros; L : largura do biodigestor, em metros;

No caso do biodigestor modelo indiano, existe uma parede divisória que divide o cilindro de cada biodigestor em duas subcâmaras. A largura dessa parede, segundo Carneiro (2007) e Araújo et al (2015), deve possuir a largura igual ao diâmetro interno do biodigestor e espessura igual a 0,1m, que é a largura do tijolo utilizado. A altura da parede divisória pode ser calculada através da Equação 4:

$$Hp = Hrg - Hr \qquad (4)$$

Sendo:

Hp: altura da parede, em metros;

Hr: altura real do biodigestor, em metros; Hrg: altura real do gasômetro em metros.

O comprimento do tubo-guia, cuja função é orientar o deslocamento do gasômetro é determinado pela Equação 5.

$$Cg = 1 + Hrg + \frac{Hrg}{2} \quad (5)$$

Sendo, Cg o comprimento do cano guia, em metros.

De acordo com Araújo et al (2015), os tanques de carga e descarga devem apresentar um volume capaz de armazenar as cargas diárias. As suas dimensões são determinadas pela fórmula de volume de um cubo. É importante observar a relação das dimensões dos tanques de carga e descarga para que não tenham valores com grande disparidade, à altura não deve ser superior a 1,20m para não dificultar o manuseio do resíduo. O comprimento dos canos de carga (local de recebimento do material fermentado sólido e líquido) e descarga (condutor para saída do material fermentado sólido e líquido) podem ser determinados, respectivamente, pela Equações 6 e 7:

$$C_c = \sqrt{(Hrg - 0{,}6)^2 + 2{,}56} \quad (6)$$

$$C_{dg} = C_c + 0{,}2 \quad (7)$$

Em que:

Cc: comprimento do cano de carga, em metros; Cdg: comprimento do cano de descarga, em metros.

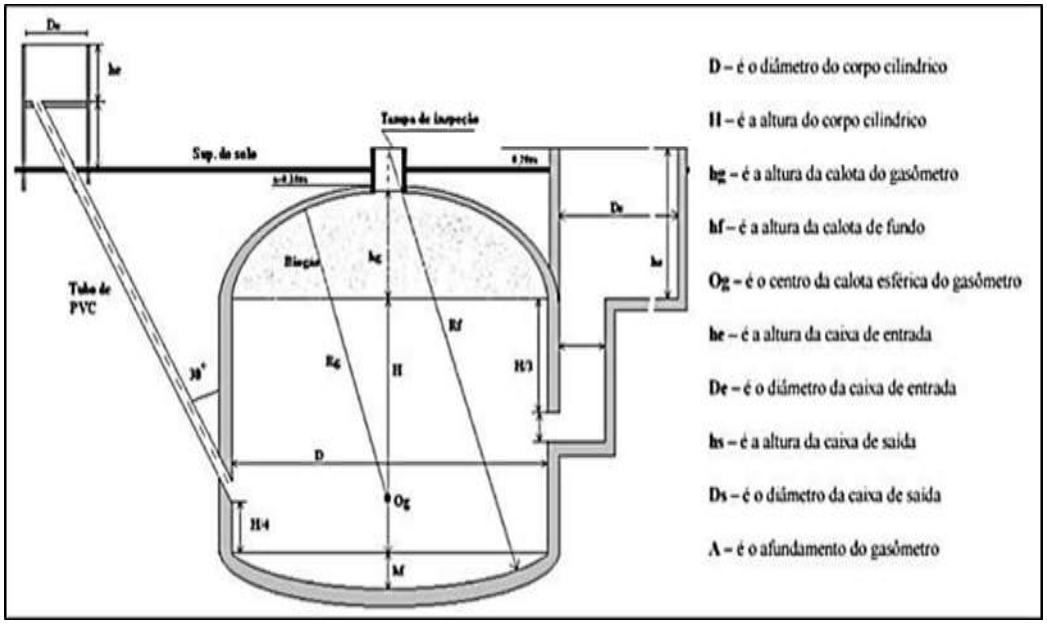
3.2.3.2 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR MODELO CHINÊS.

Para o biodigestor modelo chinês, conforme a esquematização da Figura 9, o dimensionamento compreenderá a obtenção dos parâmetros citados.

- Diâmetro do corpo cilíndrico (biodigestor);
- Altura do corpo cilíndrico (biodigestor);
- Diâmetro da caixa de entrada;
- Diâmetro da caixa de saída;
- Altura da caixa de entrada
- Altura da caixa de saída;
- Área do biodigestor;

- Razão Área-Altura;
- Volume do biodigestor;
- Tempo de retenção hidráulica;
- Volume de carga (matéria orgânica);
- Tubulações de carga e descarga;
- Dimensionamento do gasômetro.

Figura 2 - Parâmetros de dimensionamento do biodigestor modelo chinês.



Fonte: MARTINKOSKI et al (2017).

Como no modelo indiano, o biodigestor chinês apresenta corpo cilíndrico, de modo que o seu diâmetro e altura podem ser calculados, respectivamente, pelas Equações 8 e 9:

$$A_{bg} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (8)$$

$$V_{bg} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H \quad (9)$$

Sendo:

A_{bg} : área do biodigestor, em m²;

D : diâmetro do biodigestor, em metros; V_{bg}: volume do biodigestor, em m³;

H : altura do biodigestor, em metros.

É importante observar que existe uma faixa ótima aceitável para a relação entre a raiz da área do biodigestor e a altura, a qual proporciona uma maior eficiência de fermentação. Para biodigestores de modelo indiano ou chinês, esta faixa está entre 0,532 e 0,886, conforme a Equação 10:

$$0{,}532 \leq \frac{\sqrt{A_{by}}}{H} \leq 0{,}886 \qquad (10)$$

Segundo Veloso (2011), para o caso da razão entre a área e a altura do biodigestor se aproximar do valor de 0,886, haverá facilidade na escavação, não permitindo que a altura do substrato (h) do biodigestor atinja um valor muito alto. Para os biodigestores com volume total menor que 10 m³, onde a altura não dificulta a escavação, valores próximos de 0,532 contribuem para que o biodigestor não sofra interferências em virtude de variações climáticas, por se encontrarem muito próximos à superfície do sol. O volume da carga ou matéria orgânica a ser depositado no biodigestor pode ser estimado pela Equação 11:

$$Vbg = V_C . T_{HR} \qquad (11)$$

Sendo:

V_{bg} : volume do biodigestor, em m³;

V_c : volume de carga ou matéria orgânica, em m³/dia;

T_{HR}: tempo de retenção hidráulica, em dias.

O tempo de retenção hidráulica corresponde ao período necessário para que a matéria orgânica seja decomposta no biodigestor. Esse tempo, num processo contínuo, varia de acordo com o tipo de matéria a ser digerida. Em geral, o tempo usual é de 30 a 45 dias (EMBRAPA, 2016).

O diâmetro da caixa de saída deverá ser maior do que o diâmetro da caixa de entrada, sendo ambos obtidos pelas Equações 12 e 13 (PORTES e FLORENTINO, 2006):

$$De = \frac{1}{3}H \qquad (12)$$

$$Ds = \frac{2}{3}H \qquad (13)$$

Sendo:

De : diâmetro da caixa de entrada, em metros; Ds : diâmetro da caixa de saída, em metros; H; altura do biodigestor, em metros.

De acordo com Portes e Florentino (2006), as alturas da caixa de saída e da caixa de entrada podem ser determinadas pelas Equações 14 e 15:

$$Hs = Hg + F + 0{,}20 \quad (14)$$

$$V_e = \frac{\pi \cdot De^2 \cdot (He - 10.0)}{4} \quad (15)$$

Sendo:

Hs : altura da caixa de saída, em metros; He : altura da caixa de entrada, em metros; Hg : altura do gasômetro, em metros;

F : fator de afundamento do biodigestor no solo (adota-se: 0,25 m). De : Diâmetro da caixa de entrada, em metros;

Ve: Volume da carga diária, em m³.

O dimensionamento do gasômetro compreende a altura, o volume e a pressão máxima do gás. De acordo com a metodologia proposta por Portes e Florentino (2006), tais parâmetros podem ser obtidos pelas Equações 16 e 17:

$$H_g = \frac{1}{4} \cdot D \quad (16)$$

$$V_g = \frac{\pi \cdot H_g}{6} \cdot \left(\frac{3}{4} D^2 + H_g^2\right) \quad (17)$$

Sendo:

Hg : altura do gasômetro, em metros;

D : diâmetro do biodigestor, em metros; Vg : volume do gasômetro, em m³.

Assim como no biodigestor modelo indiano, os comprimentos das tubulações de descarga e carga são estimados pelas Equações 18 e 19:

$$C_d = \sqrt{H^2 - 1{,}2 \cdot H + 2{,}92} \quad (18)$$

$$Cc = Cd + 0{,}2 \quad (19)$$

Sendo:

Cd : tubulação de descarga, em metros.

Cc : tubulação de carga, em metros.

3.2.3.3 DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR MODELO CANADENSE

O biodigestor canadense também denominado de biodigestor tubular é dividido em duas partes: uma para a fase líquida e outra para a fase de gás. Isto é, dentro do biodigestor existe na parte superior, uma área denominada campana, destinada para reservar o biogás produzido pela fermentação anaeróbica e na parte inferior uma área denominada fossa, destinada à mistura líquida, (excremento animais mais água) que entra no sistema (PRESTON, 2002; RIBEIRO, 2004 e BOTERO, 2006). O dimensionamento do biodigestor modelo canadense ou tubular é realizado conforme as equações dispostas a seguir:

Perímetro da bolsa plástica ou câmpanula (metros) :	$P = 2\pi R$	(20)
Porcentagem do perímetro transversal:	$A(\%) = 0{,}621p^2 - 0{,}042p + 0{,}352$	(21)
Lateral menor da fossa (metros):	$b = (-\frac{1}{3}A(\%) + \frac{1}{3}).P$	(22)
Largura maior da fossa (metros):	$a = 1{,}618.b$	(23)
Profundidade da fossa (metros):	$h = 0{,}951.b$	(24)
Área transversal da fossa (m²):	$A_f = 0{,}4755\ (a + b).b$	(25)
Área total transversal da fossa (m²):	$A_t = (\frac{A_c}{1-p})$	(26)
Área transversal da câmpanula (m²):	$Ag = A_t - A_f$	(27)
Volume total do biodigestor (m³):	$Vt = At\ .\ L$	(28)
Volume total da fossa (m³):	$V_f = A_f\ .\ L$	(29)
Volume total de gás (m³):	$Vg = Ag\ .\ L$	(30)

Sendo:

P: perímetro total transversal, em metros;

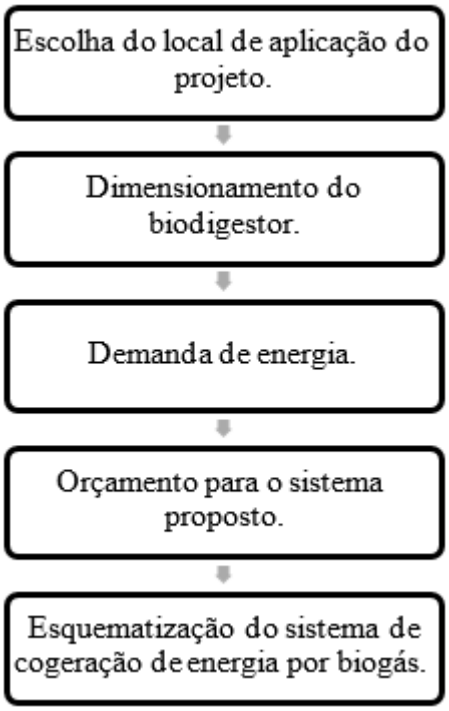
R: raio da bolsa plástica (câmpanula), em metros;

p: proporção na fase gasosa desejada ($p \leq 0,4$);

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido seguindo a sequência apresentada no fluxograma da Figura 10.

Figura 3- Fluxograma das etapas de execução da pesquisa.



Fonte: autoria própria, 2020.

As fases da pesquisa são descritas a seguir:

- 1ª Fase: compreendeu a escolha do local de referência para levantamento dos dados necessários a execução das demais fases da pesquisa;
- 2ª Fase: correspondeu ao dimensionamento do biodigestor;
- 3ª Fase: nesta fase foram determinados o consumo residencial de energia, a produção de energia por biogás necessária a suprir o consumo, assim como definida a forma de distribuição do sistema de geração (microgeradores).
- 4ª fase: aqui foi mostrado o custo dos materiais para a construção do biodigestor, dos dispositivos de geração de energia e para implementação do projeto.
- 5ª Fase: aqui foi apresentada uma esquematização simplificada o sistema proposto e do modo de funcionamento do sistema.

4.1 ESCOLHA DO LOCAL DE APLICAÇÃO DO PROJETO

Escolheu-se para ser referência na implementação do sistema proposto uma habitação unifamiliar popular econômica, semelhante a imagem apresentada na Figura 11. Tal habitação, apresenta área total de 46 m², largura e profundidade do terreno iguais a 9,0 m e 13,0 m, respectivamente. A habitação fica localizada no município de Campina Grande, Paraíba, no Bairro Santa Cruz.

Figura 4- Habitação unifamiliar

Fonte: SOPROJETOS (2020)

4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

O biodigestor adotado para o projeto e execução do sistema de cogeração de energia foi o do modelo chinês por apresentar o menor custo para execução. Os parâmetros e equações para o dimensionamento do biodigestor são apresentadas no item 3.1.3.2.

4.3 CONSUMO RESIDENCIAL DE ENERGIA

Para realizar o cálculo do consumo residencial de energia, foi considerado a quantidade de equipamentos elétricos na habitação e a potência elétrica de cada aparelho, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Relação dos aparelhos de uso e potência.

Equipamento	Quantidade	Potência (Kw)	Tempo Ligado (h/d)	Consumo Mensal (KW/h)
Celular	3	0,02	4,00	7,2
Chapinha	1	0,20	0,25	1,5

Chuveiro Elétrico	1	5,00	0,50	75
Ferro de Passar	1	1,50	0,25	11,25
Geladeira	1	0,17	24,00	122,4
Lâmpada Led	9	0,01	6,00	16,2
Máquina de Lavar	1	1,00	1,00	30
Notebook	1	0,30	8,00	72
Secador	1	1,20	1,00	36
Televisão	1	0,09	6,00	16,2
Liquidificador	1	0,40	0,10	1,2
Ventiladores	1	0,08	10,00	24
SOMATÓRIO MENSAL (30 DIAS)				412,95

Fonte: autoria própria, 2020.

A partir da soma das potências dos equipamentos elétricos, foi estimado o consumo de energia pela Equação 31:

$$W = P. T \quad (31)$$

Sendo:

W: energia consumida, em KWh;

P: potência do equipamento elétrico, em Watts;

T: tempo de uso do equipamento, em horas

4.4 ESTIMATIVA DA ENERGIA PRODUZIDA

A estimativa da quantidade de energia elétrica produzida pode ser obtida pela Equação 32:

$$P_{ge} = (V_{bg}. P_{cb} .R_{mt} .R_{ge} .F_c) / C_{kw} \quad (32)$$

Sendo:

P_{ge} : Potencial de geração de energia elétrica gerada no ano (kWh).

P_{cb} : Poder calorífico do biogás (kcal).

R_{mt} : Rendimento do motor (%).

R_{ge} : Rendimento do gerador (%).

C_{kw} : Conversão de kcal para kwh.

Onde, o fator de correção para motor Otto, Fc, é estimado a partir da Equação 33:

$$F_c = \left(\frac{99}{P_{as}}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{298}\right)^{0,6} \quad (33)$$

Sendo:

P_{as} = representa a pressão do ar seco (kPa).

T_{adm} = representa a temperatura de admissão (Kelvin).

4.5 MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR E SISTEMA DE COGERAÇÃO

Para a construção e instalação de um biodigestor modelo chinês são necessários os seguintes materiais:

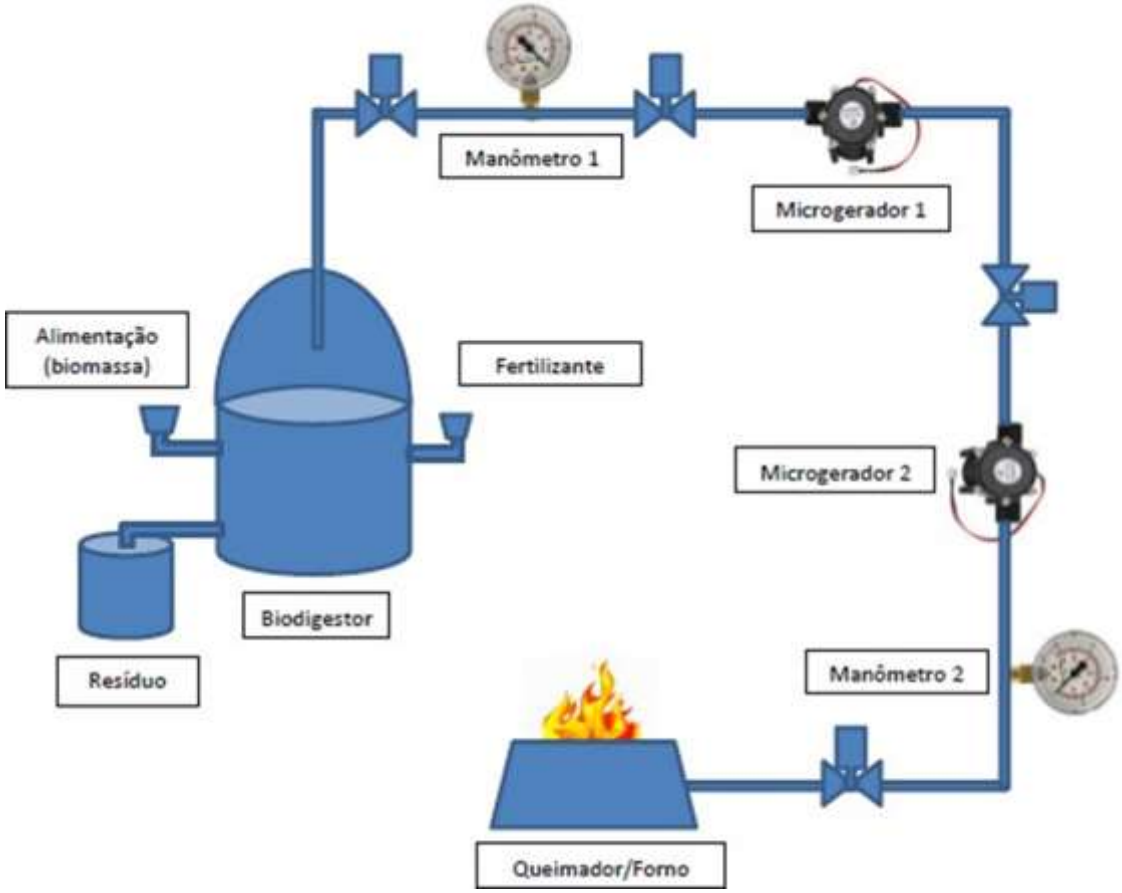
- Manômetros para gás;
- Caixa ou bombona de PVC de 100 litros;
- Manta de cobertura de PVC flexível de 1,0 mm;
- Tubulação de PVC de 150 mm para esgoto (branca), para a entrada de dejetos e
- saída de biofertilizante;
- Tubulação de PVC de 20 mm soldável (marrom) para a condução do biogás;
- Conexões de PVC de 20 mm soldável (marrom): válvulas, joelhos de 90º, etc.
- Reservatório de PVC rígido para o armazenamento do biofertilizante;
- Microgeradores de 12 Volts;

Deve ser utilizada uma tubulação de 20 mm de modo a se obter a vazão suficiente para operação do microgerador. Além disso, todas as emendas das tubulações com as conexões deverão ser bem vedadas, a fim de evitar vazamentos.

4.6 ORÇAMENTO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO PROPOSTO

Foi definido, conforme o esquema presente na Figura 12 abaixo, os materiais necessários para a execução do projeto proposto para o biodigestor.

Figura 5 - Esquematização do sistema de cogeração proposto.



Fonte: autoria própria, 2020.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Considerando-se a área útil da residência multifamiliar que é de 46 m², além da largura e profundidade do terreno que são iguais a 9,0 m e 13,0 m, como o biodigestor será construído no terreno de fundo da edificação, adotou-se o diâmetro igual a 110 cm e altura de 150 cm, de modo a ocupar apenas uma porção pequena do mesmo, para aplicação dos cálculos, transformamos as medidas para metros. Os resultados para os parâmetros do biodigestor são expressos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros para o biodigestor.

Parâmetros	**De (m)**	**Ds (m)**	**Abg (m^2)**	**Vbg (m^3)**	**Vc (m^3/dia)**	**Hg (m)**	**Vg (m^3)**	**Cd (m)**	**Cc (m)**
Valores	0,50	1,00	0,950	1,424	0,047	0,275	0,142	1,836	2,836

Fonte: autoria própria, 2020.

Sendo:

De : diâmetro da caixa de entrada; Ds : diâmetro da caixa de saída; A_{bg} : área do biodigestor;

Vbg : volume do biodigestor;

Vc: volume da carga ou matéria orgânica a ser depositado no biodigestor; Hg: altura do gasômetro;

Vg: volume do gasômetro;

Cd: cano ou tubulação de descarga do material orgânico; Cc: cano ou tubo de carga do material orgânico.

É importante ressaltar que para o dimensionamento do biodigestor e também para avaliar a produção de energia a partir da decomposição da matéria orgânica, considerou-se o tempo de retenção hidráulica, que corresponde ao tempo estimado para início da produção de biogás, de 30 a 45 dias, segundo o manual técnico da EMBRAPA (2016).

5.2 RESULTADOS DA COGERAÇÃO DE ENERGIA

Com base nos parâmetros obtidos para o dimensionamento do biodigestor, foi possível estimar a geração de energia partindo-se do volume estimado que foi de 1,425m³. Para tal estimativa, utilizou-se a Equação 32, e considerou-se um motor para queima do gás com um rendimento de 37% conforme indicado no trabalho de Souza e Machado (2004).

O motor adotado para garantir a produção de energia necessária a demanda estimada para a edificação tomada como modelo, dever ser ligado a um gerador de energia com eficiência de 50% conforme descreve Costa et al (2019), pois é levado em conta o valor calórico do gás natural como 6.000,00 kcal/m³ (NEPPA, 2015; PIMENTEL et al., 2015).

Assim, chegou-se à uma cogeração de aproximadamente 1.600 Kcal, entretanto, considerando que o sistema proposto conta com 2 microgeradores, a quantidade de energia gerada será dobrada, sendo aproximadamente 3.200 Kcal. Convertendo-se para Kw/h, esse valor teria a geração diária de aproximadamente 3,72Kw/h.

Portanto, os resultados demonstram que a geração mensal de energia seria de 111,6Kw/h, o suficiente para abastecer cerca de 27% do consumo de energia de toda a casa. Esse desempenho é bem considerável, uma vez que se trata de um biodigestor de dimensões compactas e que tem o intuito de complementar o abastecimento energético da residência e não substituir o abastecimento pela rede elétrica da concessionária.

5.3 ESTIMATIVA DE CUSTO

Com base neste esquema e conforme levantado no item anterior, buscou-se a elaboração de um orçamento simplificado conforme as demandas de materiais necessários para a execução do projeto. Neste orçamento são descritos o custo dos materiais, conforme o Tabela 3.

Considerando-se que o retorno se dará a médio prazo, mesmo sem levar em consideração a mão de obra, uma vez que o sistema é de fácil montagem pelos próprios materiais a serem utilizados, pode-se dizer que há viabilidade na sua implantação, pois implica em uma economia significativa na conta de energia, além de pode possibilitar a própria utilização do biogás para fins de consumo como gás de cozinha, o que também se torna vantajoso para os usuários.

Tabela 3 - Orçamento simplificado para o sistema de cogeração de energia por biogás.

Equipamento/Material	Quantidade	Preço	Total Unitário
Manômetros para gás	2	R$ 179,90	R$ 359,80
Caixa ou bombona de PVC de 100 litros	1	R$ 249,90	R$ 249,90
Manta de cobertura de PVC flexível de 1,0 mm (rolo)	1	R$ 269,50	R$ 269,50
Tubo PVC Esgoto 150mm c/ 6m	1	R$ 171,00	R$ 171,00
Bombona de PVC de 50 litros	1	R$ 39,00	R$ 39,00
Tubo PVC Soldável 20mm c/ 6m	5	R$ 15,90	R$ 79,50
Conexões de PVC Diversas (custo total)	1	R$ 100,00	R$ 100,00
Reservatório PVC p/ Biofertilizante	1	R$ 64,90	R$ 64,90
Micro Gerador 12 V	2	R$ 49,90	R$ 99,80
CUSTO TOTAL			**R$ 1.433,40**

Fonte: autoria própria, 2020.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de um biodigestor de pequeno porte, levando em consideração que o intuito da criação dele se dá para cogeração de energia, funcionando como um complemento a energia recebida da concessionária, num sistema de geração distribuída de energia, a capacidade de geração do biodigestor é satisfatório para atender a finalidade proposta.

Além disso, um biodigestor também auxilia na preservação do meio ambiente, uma vez que produz energia de forma renovável e limpa. Além de produzir também biofertilizantes, que podem auxiliar no cultivo de pequenas hortas domésticas.

Dessa forma, o biodigestor atende as demandas de cogeração de energia, sendo responsável por mais de ¼ da energia consumida na residência, ocasionando a redução de cerca de R$ 61,37 mensais na conta de energia familiar.

Considerando que o custo de confecção do biodigestor são, aproximadamente, de R$ 1.433,40, o custo de execução do projeto seria reposto pela energia gerada em aproximadamente 24 meses ou 2 anos. Além deste retorno financeiro direto, o biofertilizante produzido pode ser vendido, pelo preço médio de R$ 25,00 o litro, ou atuar na fertilização de uma pequena horta ou jardim da residência, agregando valor de retorno ao investimento na confecção do biodigestor. Sendo assim, este projeto atende as necessidades de uma unidade residencial unifamiliar como fonte de cogeração de energia, através do reaproveitamento de materiais e dejetos dos animais e da residência.

Dessa forma, sua importância se dá na demonstração da aplicabilidade dessa tecnologia sustentável no uso residencial como cogerador de energia, atendendo as demandas familiares.

REFERÊNCIAS

BALMANT, W. Concepção, construção e operação de um biodigestor e modelagem matemática da biodigestão anaeróbica. Dissertação (Mestrado em Processos Térmicos e Químicos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BELLI FILHO, P.; DE OLIVIERA PINTO, R..; KOERICH, K.; GERSON MATIAS, W.;

MOREIRA SOARES, H. Lodos de Tanques Sépticos. Caracterização e Tratamento Anaeróbio em um Digestor Piloto. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 29., San Juan. Anais: San Juan: Aidis, p. 1-7, 2004.

BIODIESELBR. Biogás – Considerações gerais. 2009. Disponível em: http://www.biodieselbr.com/energia /biogas/biogas.htm. Acesso em: 17 de junho de 2020.

BOTERO, R; AGUILAR, F.X. Estimación De Los Beneficios Económicos Totales De La Producción De Biogás Utilizando Un Biodigestor De Polietileno De Bajo Costo. Tierra Tropical, Universidad EARTH, v. 2, n. 1, p 15-25. 2006.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, 2011. BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, 2017.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. Biogás - Biocombustíveis ANP. In: Carlos Augusto G. Perlingeiro. (Org.). Biocombustíveis no Brasil - Fundamentos, Aplicações e Perspectivas. C. Rio de Janeiro: Synergia Editora, v. 1, p. 136-167, 2014.

COSTA, A. L. M. et al. Mcrogerador de Energia Elétrica por Motor de Indução Eletromagnética e Roda D'água. IFMG. Arcos. Minas Gerais. 2019. Disponível em: https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20191_TAI3_Microgeradordeenergiaeltrica.pdf.

Acesso em 08 de dez de 2020.

COUTO,J. L. V. Saneamento em Comunidades Isoladas - Uso de Biodigestor Modelo Indiano. Rev. Rede Agronomia. 2019. Disponível em: http://agronomos.ning.com/profiles/blogs/saneamento-em-comunidades-isoladas?overrride MobileRedirect=1. Acesso em:17 de julho de 2020.

DA ROCHA, C. M. Proposta de Implantação de Um Biodigestor Anaeróbio de Resíduos Alimentares. Monografia. 61f. Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

DE ANDRADE, T. Inovação Tecnológica e Meio Ambiente: A Construção de Novos Enfoques. Rev. Ambient. Soc. Vol7. No.1. Campinas, 89-105 p, 2004.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. Bauru/SP, 2008.

DEUBLEINB, D., STEINHAUSER, A. BiogasFromWasteandRenwableResources, WILEY-VCH VerlagGmbH& Co. KGaA, Weinheim, 368p, 2008.

DHANALAKSHMI,S.V.;RAMANUJAM,R.A.Biogasgenerationina vegetablewasteanaerobicdigester:Ananalytical approach. ResearchJournalofRecentSciences, v.1, n.3, p.41-47, 2012.

FONGARO, G. P.; J. SCHISSI, C. D. N.; M. A. BAMPI, G. B. V.; A. BARARDI, C. R. M.

HumanAnd Animal EntericVirus In GroundwaterFromDeep Wells, andRecreationaland Network Water. Environmental Science andPollutionResearch, 2224, 20060-20066, 2015.

JUNQUEIRA, SLCD. Geração de Energia Através de Biogás Proveniente de Esterco Bovino: Estudo de Caso na Fazenda Aterrado. Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

MAGALHÃES, A. P. T. Biogás: Um Projeto de Saneamento Urbano. São Paulo: Nobel, 120p, 1986.

NEPPA. NÚCLEO DE ESTUDO E PESQUISA EM PRODUÇÃO ANIMAL. Manual de

Biodigestão. 2015. Disponível em: <http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/ manuais/manual_biodigestor_winrock.pdf>. Acesso em: 17 de junho de 2020.

NETO, H. C. A.; MARQUES, C. C.; DE ARAÙJO, P. G. C.; GONÇALVES, W. P.; MAIA,

R.; BARBOSA, E. A. Caracterização de Resíduos Sólidos Orgânicos Produzidos no Restaurante Universitário de Uma Instituição Pública (Estudo de Caso). XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, PR, Brasil 2007. Disponível em:http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0422.pdf. Acesso em: 15 de Junho de 2020.

NISHIMURA, R. Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

OLIVEIRA, R. D. Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido Pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e As Possibilidades no Mercado de Carbono. Monografia. 98f. EESC/USP - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

OLIVER, A. P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. Disponível em: http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-emBiodigestao.pdf.

Acesso em: 15 de junho de 2019.

PALHARES, J. Produção animal e recursos hídricos Tecnologias para manejo de resíduos e uso eficiente dos insumos. Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), editor técnico – Brasília, DF : Embrapa, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335880078. Acesso em: 20 de julho de 2020.

PEREIRA, M. F. Biodigestores: Opção Tecnológica Para Redução de Impactos Ambientais na Suinocultura. Embrapa, 2005.

PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Relatório Anual de Emissão de Gases. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pnuma-divulga-versao-completa- do-relatorio-sobre-a-lacuna-de-emissoes-2015/. Acessado em: 10 de maio de 2020.

PRESTON, T. R; RODRIGUEZ, L. Biodigestor: Manual de Instalação. Ho Chin Minh City: Universityof Tropical Agriculture Foundation, 7 p. 2002.

REIS, A. S. Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos em Biodigestor Anaeróbio. Dissertação de Mestrado. 2012. 79f. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Caruaru, Pernambuco, 2012.

RIBEIRO, D. Biodigestor: Maximizacióndelvolumen. Universidade EARTH, Guácimo. 13p. 2004.

SILVA, W. R. Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais. 159 f .Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SOUZA, J.; SOUZA, S. N. M.; MACHADO, P. R. M. Desempenho de um motor ciclo otto utilizando biogás como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL,5.Campinas.2004.Disponívelem: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000 100044&lng=en&nrm=abn. Acessoem 07 de dez de 2020.

STRASSBURG, U.; OLIVEIRA, N. M.; ROCHA, W. F. Cadeia do Biogás no Oeste do Paraná: À luz da nova economia institucional. Revista de Estudos Sociais.N.34. V.17, 2015.

WILLIANS, J.; WILLIANS, H.; DINSDALE, R.; GUWY, A.; ESTEVES, S.

MonitoringMethanogenicPopulation Dynamics In A Full ScaleAnaerobicDigesterToFacilitateOperationalMonitoring Management. Bioresource Technology, v. 140, p. 234-242, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.089>. Acesso em: 21 de junho de 2020.

Capítulo 2

10.37423/240909299

SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO E MONITORAMENTO PARA HORTAS COMUNITÁRIAS

Thiago de Santana Souza — *Universidade Tiradentes*

Robério de Jesus — *Instituto Federal de Sergipe*

Klebson Silva Santos — *Instituto de Tecnologia e Pesquisa*

Bruno Nery Emilio Santos — *Faculdade Pio Décimo*

Marco Aurélio Pereira Buzinaro — *Instituto Federal de Sergipe*

Elenilton Teodoro Domingues — *Instituto Federal de Sergipe*

Anderson Lima Pereira — *3E Eficiência Energética Engenharia LTDA*

Rubens Araujo Silva — *3E Eficiência Energética Engenharia LTDA*

Diego Lopes Coriolano — *Instituto Federal de Sergipe*

Resumo: Atualmente, a irrigação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de diversas culturas agrícolas, sendo um fator indispensável para garantir a produção de alimentos em várias partes do mundo. No passado, muitas regiões enfrentavam dificuldades para cultivar, principalmente devido à escassez de chuvas em determinadas épocas do ano. Essas limitações naturais impediam o desenvolvimento contínuo da agricultura, restringindo a produção apenas aos períodos em que havia precipitação suficiente. Entretanto, com o avanço das tecnologias de irrigação, esse cenário mudou drasticamente, permitindo que o cultivo fosse realizado de maneira contínua durante o ano todo, mesmo em regiões onde as condições climáticas não eram favoráveis. Apesar dos avanços, um grande número de agricultores ainda enfrenta desafios no manejo adequado da irrigação. A falta de conhecimento técnico leva muitos a adotarem práticas empíricas, ou seja, sem base científica ou orientação especializada. Como consequência, a irrigação é frequentemente realizada de maneira inadequada, o que pode causar danos tanto ao solo quanto às lavouras. Além disso, essa má gestão resulta em desperdício de recursos naturais valiosos, como água e energia elétrica, o que agrava ainda mais a situação em um contexto de crescente escassez hídrica. Diante da necessidade urgente de utilizar a água de forma mais consciente e eficiente, tornou-se imperativo o desenvolvimento de soluções tecnológicas que auxiliem os agricultores na otimização do uso dos recursos hídricos. Em resposta a esse desafio, foi criado um sistema de irrigação automatizado de baixo custo. Este sistema visa oferecer aos agricultores uma ferramenta acessível e eficaz, que permita a irrigação de suas culturas de maneira precisa e sustentável, reduzindo o desperdício de água e energia. O protótipo deste sistema foi implementado no Colégio Professor Abelardo Romero Dantas (CEPARD), localizado na cidade de Lagarto, no estado de Sergipe. A instalação foi realizada com o objetivo de irrigar uma horta cultivada por alunos do ensino médio como parte de uma disciplina optativa. Além de contribuir para o desenvolvimento sustentável da agricultura, o projeto também desempenha um papel educacional importante, capacitando os estudantes em práticas agrícolas inovadoras e responsáveis, alinhadas com a conservação dos recursos naturais.

Palavras-chaves: Irrigação automatizada; Agricultura sustentável; Monitoramento de umidade do solo.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta um grande desafio: produzir alimentos em quantidade suficiente para atender à crescente demanda da população mundial, que deverá atingir 9,1 bilhões de pessoas até 2050, em meio à crescente escassez de recursos hídricos. A irrigação, responsável por uma grande parcela do uso de água doce no setor agrícola, desempenha um papel essencial na produtividade agrícola, sendo responsável por cerca de 70% do consumo global de recursos hídricos (FAO, 2009). Nesse cenário, o desenvolvimento e a adoção de sistemas de irrigação inteligentes, que utilizam automação e monitoramento preciso das condições do solo e do clima, surgem como alternativas fundamentais para garantir a sustentabilidade da agricultura (Kponyo et al., 2019; Manchanda, 2021; Ramachandran et al., 2022).

A implementação de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA), na gestão da irrigação possibilita uma aplicação mais eficiente da água, reduzindo desperdícios e melhorando o uso dos recursos hídricos. Pesquisas recentes mostram que sistemas de irrigação automatizados e inteligentes podem promover um crescimento mais eficiente das culturas, ao mesmo tempo em que reduzem o consumo de água e energia (Kponyo et al., 2019; García et al., 2020; Khebbache et al., 2023).

No entanto, ainda há desafios consideráveis para a adoção dessas tecnologias. O alto custo de instalação e a falta de capacitação técnica por parte de alguns agricultores podem limitar o acesso e o uso dessas inovações (Manchanda, 2021). Além disso, a adaptação dessas tecnologias às diferentes condições agrícolas e a necessidade de personalização para cada tipo de cultura e solo ressaltam a importância de pesquisas e inovações contínuas no campo da irrigação inteligente (Nawandar et al., 2019; Vij et al., 2020).

A escolha da plataforma Arduino para o desenvolvimento deste projeto exemplifica a busca por soluções de automação de irrigação acessíveis e eficazes. Dispositivos eletrônicos baseados no Arduino, como o Arduino Mega 2560, demonstram que é possível alcançar um controle preciso e automatizado da irrigação com custos reduzidos, tornando essa tecnologia uma ferramenta valiosa para agricultores de todos os portes que buscam otimizar suas práticas agrícolas de maneira sustentável (Boursianis et al., 2021).

Com isso, o desenvolvimento deste sistema de irrigação automatizado, controlado pelo microcontrolador Arduino Mega 2560, representa uma contribuição significativa para o avanço da

agricultura sustentável. Ele visa não apenas aumentar a eficiência da irrigação e a produtividade agrícola, mas também promover a conservação dos recursos hídricos, uma questão central para a sustentabilidade ambiental e a segurança alimentar em escala global.

2. EXPERIMENTAL

2.1. MONTAGEM E COMPONENTES

O desenvolvimento de um sistema automatizado de irrigação, implementado na horta comunitária do Colégio Professor Abelardo Romero Dantas (CEPARD) em Lagarto/SE, exigiu a integração cuidadosa de diversos componentes eletrônicos e mecânicos para garantir uma operação eficiente. Na Figura 1, detalham-se os principais componentes utilizados, com base em tecnologias amplamente reconhecidas na literatura sobre sistemas de irrigação automatizada.

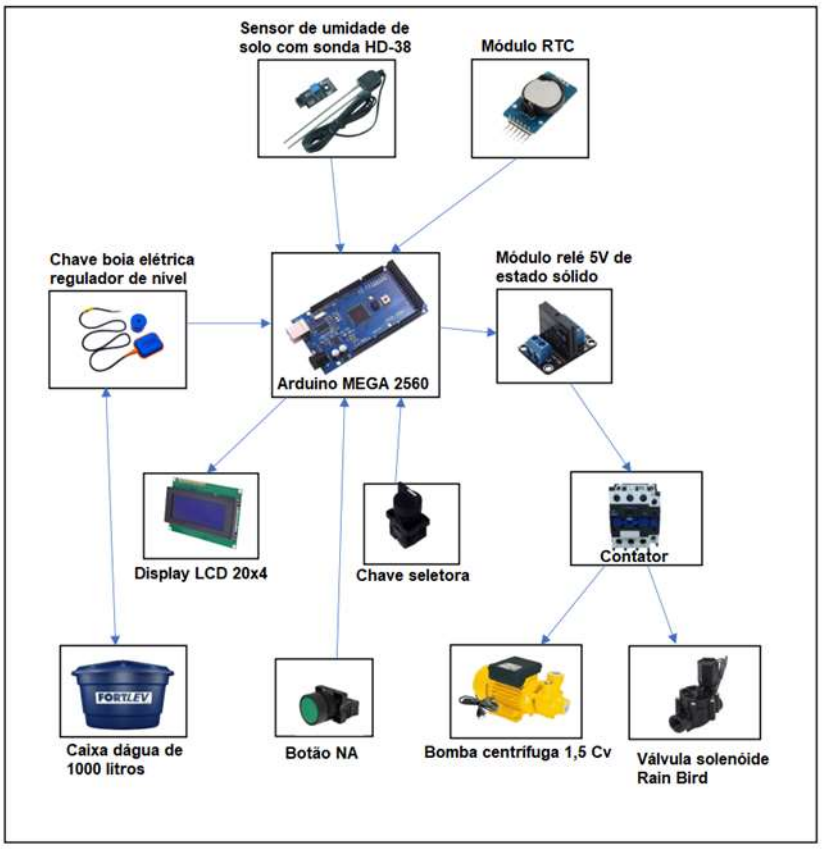


Figura 1. Componentes do sistema de irrigação automatizado implementado na horta comunitária.

2.1.1. ARDUINO MEGA 2560

O Arduino MEGA 2560 foi escolhido como o controlador principal do sistema devido à sua capacidade superior de processamento e sua ampla variedade de pinos de entrada e saída. Esta placa foi

fundamental para o controle de múltiplos sensores e atuadores, além de permitir a execução de algoritmos complexos de irrigação. A robustez e flexibilidade do Arduino têm sido amplamente reconhecidas em projetos de automação de baixo custo na agricultura, onde desempenha o papel de central de controle (Casado et al., 2018).

2.1.2. MÓDULO RTC (REAL TIME CLOCK)

O módulo RTC foi integrado ao sistema para fornecer uma medição precisa do tempo, essencial para garantir que a irrigação ocorra em horários predeterminados, como de manhã e no final da tarde, quando a evaporação da água é menor. O uso de RTC em sistemas automatizados é amplamente recomendado para agendar processos de irrigação com base no tempo e nas condições climáticas (Koprda et al., 2016).

2.1.3. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO COM SONDA HD-38

O sensor de umidade do solo HD-38 foi utilizado para monitorar os níveis de umidade do solo em tempo real. Esse componente permitiu ao sistema ajustar automaticamente a quantidade de água fornecida, evitando tanto o excesso quanto a falta de irrigação, práticas que podem prejudicar o desenvolvimento das plantas e desperdiçar recursos hídricos. Sensores como o HD-38 são amplamente utilizados em projetos de irrigação inteligente, garantindo uma gestão eficiente da água (Bhatnagar et al., 2018).

2.1.4. DISPLAY LCD 20X4

Para facilitar a interação entre o operador e o sistema, um display LCD de 20x4 foi utilizado. Este dispositivo fornece uma interface visual para a exibição de dados críticos, como os níveis de umidade do solo, o status atual da irrigação e qualquer possível falha no sistema. A implementação de interfaces visuais simples e acessíveis melhora a usabilidade dos sistemas automatizados, permitindo que agricultores com pouco conhecimento técnico interajam com eficiência com a tecnologia (Minz et al., 2019).

2.1.5. MÓDULOS RELÉ

Os módulos relé desempenharam um papel essencial no controle de dispositivos elétricos como a bomba centrífuga e a válvula solenoide. Estes relés atuaram como interruptores, ligando e desligando os dispositivos de acordo com a demanda de irrigação identificada pelos sensores e controlada pelo

Arduino. A utilização de relés em sistemas automatizados é uma prática comum, permitindo o controle remoto de componentes com alta demanda de energia (Karar et al., 2020).

2.1.6. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação do projeto foi composto por uma fonte de alimentação de 9V DC para o Arduino e outros componentes eletrônicos, além de uma válvula solenoide Rain Bird de 12V DC, alimentada por um transformador que converte a tensão de 127V para 12V. Esse arranjo garantiu uma operação estável e contínua do sistema, fornecendo a energia necessária para os diferentes componentes. A escolha de fontes de alimentação adequadas é fundamental para garantir a confiabilidade em sistemas de automação agrícola (Sy et al., 2020).

2.1.7. BOMBA CENTRÍFUGA DE 1,5 CV (220V / 380V)

A bomba centrífuga de 1,5 CV foi utilizada para garantir o fornecimento adequado de água da fonte de armazenamento até a horta. Com uma alimentação de 220V ou 380V, a bomba assegura que a pressão e o volume de água sejam suficientes para irrigar toda a área da horta. O uso de bombas de alta eficiência é essencial em sistemas de irrigação automatizados para garantir a distribuição homogênea de água (Aurel, 2021).

2.1.8. COMPONENTES ADICIONAIS

A implementação bem-sucedida do sistema automatizado de irrigação também envolveu o uso de diversos componentes adicionais, que contribuíram para a integração e operação eficiente de todo o conjunto. Entre eles, foram utilizados uma chave seletora, três botões NA (Normalmente Aberto), um disjuntor bifásico, um contator, três barramentos, uma chave boia elétrica para o controle do nível da água, uma caixa d'água de 1000 litros e diversos jumpers para garantir as conexões internas.

A chave seletora foi integrada para permitir a alternância entre diferentes modos de operação, como manual ou automático, dando ao usuário flexibilidade na gestão do sistema. Os botões NA foram incorporados para ações específicas de comando manual, possibilitando, por exemplo, o acionamento direto da bomba ou a parada do sistema em situações de emergência. O disjuntor bifásico e o contator desempenharam papéis cruciais na proteção e controle do circuito elétrico, garantindo a segurança do sistema ao monitorar a corrente elétrica e ativar/desativar os dispositivos de alta potência. Esses componentes ajudaram a evitar sobrecargas e curtos-circuitos, proporcionando um ambiente seguro para o funcionamento contínuo do sistema.

Os barramentos foram incluídos para organizar e distribuir as conexões elétricas, permitindo a centralização dos fios e a correta alimentação dos diferentes componentes. A chave boia elétrica foi integrada ao sistema para monitorar o nível da água na caixa d'água de 1000 litros, ativando automaticamente a bomba quando o nível de água atingisse o mínimo necessário, garantindo assim que a irrigação nunca fosse interrompida por falta de água. Além disso, os jumpers foram utilizados para realizar as conexões internas entre os diferentes componentes, assegurando uma comunicação eficaz entre eles e contribuindo para a operação coesa do sistema.

A seleção e integração cuidadosa desses componentes adicionais ilustram um avanço importante na aplicação de tecnologias de automação para a gestão sustentável da água na agricultura. Além disso, demonstram o potencial para aumentar a eficiência no uso dos recursos hídricos e melhorar a produtividade agrícola, alinhando-se às práticas modernas de agricultura sustentável (García et al., 2020; Ramachandran et al., 2022).

2.2. FUNCIONALIDADES E OPERAÇÃO

O sistema automatizado de irrigação foi programado para oferecer três modos de operação distintos: configuração, automática e manual. Essa abordagem proporciona flexibilidade ao usuário, permitindo a personalização dos parâmetros de irrigação e a opção de intervenção manual quando necessário. Todas as opções de operação, bem como as configurações, podem ser acessadas através de um painel de controle customizado (Figura 2).

Figura 2. Quadro de comando.

No modo automático, o sistema exibe informações como horário, data, níveis de umidade do solo e o status operacional da bomba centrífuga e da válvula solenoide. A partir dessas informações, o sistema ajusta automaticamente o ciclo de irrigação com base nas leituras de umidade do solo, garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água. Isso assegura que o uso da água seja otimizado, minimizando o desperdício e aumentando a eficiência.

MONITORAMENTO E AJUSTES DA UMIDADE DO SOLO

Um dos principais focos do sistema é o controle da umidade do solo, realizado por meio da integração de sensores e atuadores programados para garantir o melhor desempenho, conforme os requisitos definidos na programação. Cada espécie de planta pode ter uma necessidade específica de irrigação, mas, de forma geral, o sistema adota recomendações amplamente aceitas sobre os melhores horários para irrigar. O módulo RTC é utilizado para agendar a irrigação nos horários mais adequados, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de horários mais adequada para irrigação.

Horário mais adequado para irrigação	**Faixa de horário**
Manhã	$5h \leq$ horário $\leq 8h$
Tarde	$14h \leq$ horário $\leq 18h$

Com base em estudos recentes, ficou comprovado que os melhores períodos para irrigar as plantas, na região em que foi implementado o sistema, são nas primeiras horas da manhã e no final da tarde, após as 14 horas. Irrigar durante esses horários ajuda a minimizar a evaporação excessiva, que é maior nas horas mais quentes do dia. Isso resulta em maior eficiência no uso da água, evitando seu desperdício e garantindo uma melhor absorção pelas plantas. Irrigar em horários mais quentes pode gerar um consumo elevado e ineficiente, conforme observado por Palumbo *et al.* (2021), que demonstraram que a irrigação realizada em períodos de maior calor aumenta significativamente a evaporação e reduz a eficiência hídrica. Além disso, a irrigação noturna não é recomendada, uma vez que a absorção de água pelas plantas é menor e a umidade nas folhas pode favorecer o crescimento de fungos e bactérias, prejudicando o desenvolvimento das culturas e causando até perdas, como demonstrado por Nam *et al.* (2020).

A utilização de sensores de umidade, como o modelo HD-38, também é fundamental para garantir uma irrigação eficiente. Esses sensores funcionam medindo a resistência elétrica no solo: quanto mais água presente no solo, menor será a resistência, e quanto mais seco o solo, maior a resistência. Essa tecnologia permite ajustar a irrigação conforme a necessidade real das plantas, evitando tanto a sub-irrigação quanto o excesso de água, ambos prejudiciais ao crescimento saudável das culturas. Estudos recentes demonstram que o uso de sensores para monitorar a umidade do solo é uma prática eficaz para otimizar o uso da água, promovendo uma irrigação mais precisa e reduzindo o desperdício (Tavan *et al*., 2021).

A faixa de umidade do solo pode ser determinada empiricamente, utilizando o sensor de umidade. Quando o solo está seco, o sensor registra um valor alto, variando de 0 a 1023 (valores analógicos). O sistema de irrigação é ativado manualmente até que o solo atinja um nível de umidade adequado para o desenvolvimento das plantas. O monitoramento em tempo real da umidade do solo tem se mostrado essencial para garantir uma irrigação eficiente e sustentável, especialmente em sistemas agrícolas modernos (De Oliveira *et al*., 2021). Essas práticas, combinando horários adequados de irrigação e o uso de sensores de umidade, asseguram que as plantas recebam a quantidade ideal de água, preservando os recursos hídricos e promovendo o crescimento saudável das culturas. Na Tabela 2 tem-se a faixa de condições pré-estabelecidas para o funcionamento do sistema automatizado de irrigação.

Tabela 2. Umidade do solo.

Condições do solo	**Faixa de umidade**
Solo molhado	umidade ≤ 270
Solo seco	umidade ≥ 310

Quando o solo atinge um nível de umidade acima do limite estabelecido (umidade ≥ 310), o sistema aciona a bomba centrífuga de 1,5 CV, que desloca a água do reservatório para a horta, e a válvula solenoide é ativada, liberando o fluxo de água. O controle da válvula é feito através de um módulo relé, que permite o acionamento automático baseado nas condições monitoradas. Esse ciclo se repete, mantendo a horta do CEPARD adequadamente irrigada.

Quando o solo atinge um nível de umidade abaixo do limite estabelecido (umidade ≤ 270), o sistema desliga a bomba centrífuga de 1,5 CV. A válvula solenoide é então desativada, impedindo o fluxo de água e, consequentemente a água para de ser deslocada do reservatório para a horta.

A programação do sistema garante que, sempre que necessário, as plantas recebam água suficiente para seu desenvolvimento, respeitando as condições ideais de umidade e horários de irrigação. Isso contribui não apenas para o crescimento saudável das plantas, mas também para a conservação de recursos hídricos, promovendo práticas agrícolas mais eficientes.

3. RESULTADOS

A implementação do sistema de irrigação automatizado, com base no microcontrolador Arduino MEGA 2560, em uma horta comunitária resultou em significativas observações experimentais e técnicas ao longo do período de teste.

Inicialmente, foram necessárias adaptações como a instalação de válvulas solenoides e ajustes no código para melhorar o controle da irrigação. Essas modificações permitiram que o sistema respondesse adequadamente aos diferentes níveis de umidade do solo, como observado no estudo de Sudarmaji et al. (2019), onde um sistema de irrigação automática baseado em temporizadores e sensores foi aplicado com sucesso em plantações de cebolas e couves-flores.

A análise visual, registrada nas Figuras 4 (a) e 4 (b), demonstrou que o crescimento das hortaliças ao longo do tempo indicou um desenvolvimento saudável das plantas. O uso de sistemas automatizados, como no estudo de Munusamy et al. (2021), demonstrou que o controle automatizado da irrigação reduziu significativamente o consumo de água e melhorou a produtividade das culturas, o que corrobora com as observações feitas na horta.

Figura 3. Evolução da horta sob irrigação automatizada. (a) horta na primeira semana após instalação do sistema de irrigação; (b) horta na terceira semana de irrigação.

O uso de um datalogger provisório permitiu a coleta e análise detalhada dos níveis de umidade do solo, estabelecendo um registro empírico do comportamento do sistema sob diferentes condições. Os dados coletados (Tabela 3) indicaram que o sistema manteve a umidade do solo dentro da faixa ideal (270 a 310), validando a capacidade do Arduino MEGA em executar as leituras dos sensores de forma precisa e confiável. Estudos anteriores, como o de Shrivastava *et al*. (2018), já demonstraram a eficácia de sistemas de monitoramento baseados em Arduino para a coleta de dados em tempo real, possibilitando ajustes precisos na irrigação.

Tabela 3. Dados obtidos no datalogger implementado no sistema.

Data	**Umidade da horta (Valor analógico)**
(9/10/2023)	300
(10/10/2023)	285
(11/10/2023)	308
(12/10/2023)	282

(13/10/2023)	345
(14/10/2023)	293
(15/10/2023)	332
(16/10/2023)	273

A Figura 4 apresenta a variação da umidade da horta, medida como valores analógicos, ao longo de um período de oito dias, de 9 de outubro de 2023 a 16 de outubro de 2023.

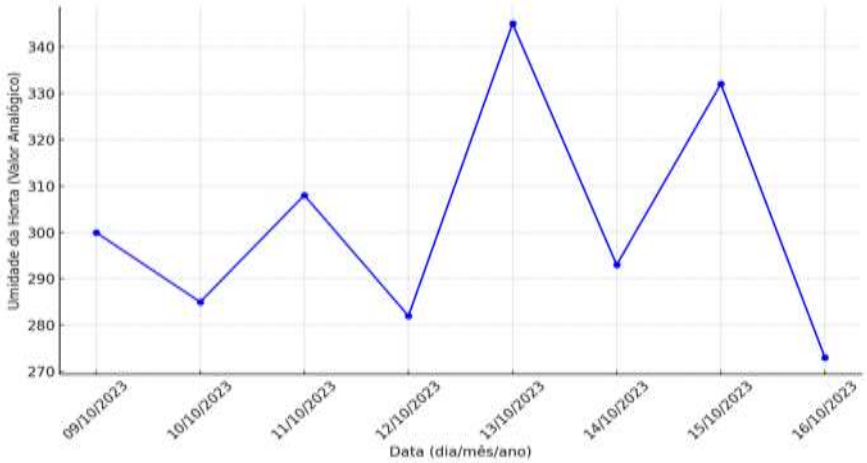


Figura 4. Variação diária da umidade do solo.

Através da Figura 4, observamos que a umidade do solo flutua dentro de um intervalo específico ao longo do período monitorado. A flutuação dos valores de umidade está em linha com o comportamento esperado para sistemas de irrigação inteligentes, que ajustam automaticamente a irrigação com base nas leituras dos sensores, como demonstrado no estudo de Agarwal et al. (2017). A capacidade do sistema de ajustar a irrigação baseada na umidade do solo é importante para evitar tanto o excesso quanto a deficiência de água, garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal para seu crescimento saudável.

O uso de um sistema de irrigação automatizado, como indicado pelos dados coletados e representados neste gráfico, demonstra a importância de monitorar e ajustar continuamente a irrigação para manter a saúde das plantações. A flutuação dos valores de umidade ao longo dos dias destaca a adaptabilidade

do sistema em manter as condições ideais de cultivo, essencial para a agricultura sustentável e eficiente.

Além disso, o sistema foi projetado com mecanismos de segurança que desligam a bomba de água na ausência de água no reservatório, prevenindo possíveis danos ao equipamento. Esse recurso assegura que a bomba seja reativada apenas quando houver água suficiente, contribuindo para a sustentabilidade e longevidade do sistema de irrigação. Os resultados obtidos enfatizam a viabilidade e eficiência de sistemas de irrigação inteligentes na otimização do uso de recursos hídricos na agricultura, isso reforça a sustentabilidade do sistema, conforme destacado por Yasin et al. (2019) em sistemas de irrigação automatizada controlados por sensores de umidade, evidenciando um caminho promissor para o avanço da automação agrícola e gestão sustentável da água.

4. CONCLUSÃO

Frente aos desafios crescentes de aumentar a produção de alimentos e lidar com a escassez de recursos hídricos, a implementação de sistemas de irrigação inteligentes se mostra indispensável para a sustentabilidade agrícola. Esses sistemas automatizados, com precisão no monitoramento e controle do uso de água, representam uma transformação significativa na gestão dos recursos naturais, permitindo um uso mais eficiente da água e maior produtividade agrícola. A adoção de práticas agrícolas inteligentes surge como uma resposta necessária às demandas globais, proporcionando soluções que equilibram a produção com a preservação dos recursos.

Este estudo destaca o papel fundamental da inovação tecnológica, incluindo o uso de microcontroladores como o Arduino Mega 2560, no desenvolvimento de sistemas que não apenas otimizam o uso de água e energia, mas também promovem práticas agrícolas ambientalmente sustentáveis. Embora desafios como os custos iniciais e a necessidade de conhecimento técnico existam, os benefícios superam essas barreiras, oferecendo uma solução prática para aumentar a eficiência agrícola e reduzir os impactos ambientais.

A continuidade na pesquisa e no desenvolvimento dessas tecnologias é vital para garantir a segurança alimentar e a gestão eficiente dos recursos hídricos. A cooperação entre setores — de pesquisadores a agricultores, desenvolvedores tecnológicos e formuladores de políticas — será essencial para maximizar os benefícios da irrigação inteligente. A implementação de sistemas como os baseados em Arduino demonstra o potencial inovador para uma agricultura mais eficiente, capaz de atender às demandas de uma população crescente sem comprometer os recursos naturais.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S.; AGARWAL, N. An algorithm based low cost automated system for irrigation with soil moisture sensor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION AND INFORMATICS (ICCCI), 2017, Coimbatore, India. Proceedings [...]. Coimbatore: IEEE, 2017. p. 1-5.

AUREL, G. Arduino platform for optimized irrigation in strawberries fields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN POWER SYSTEMS (MPS), 9., 2021, Cluj-Napoca, Romania. Proceedings [...]. Cluj-Napoca: IEEE, 2021. p. 1-5.

BHATNAGAR, M.; JAIN, S.; RATHI, P. Arduino based SMS controlled irrigation system. International Journal of Engineering Research and Technology, v. 2, 2018.

BOURSIANIS, A.; PAPADOPOULOU, M. S.; GOTSIS, A.; WAN, S.; SARIGIANNIDIS, P.; NIKOLAIDIS, S.; GOUDOS, S. K. Smart irrigation system for precision agriculture—The ARETHOU5A IoT platform. IEEE Sensors Journal, v. 21, p. 17539-17547, 2021.

CASADO, C. G.; CISQUELLA, M. L.; LÓPEZ, S. A. Intelligent irrigation system based on Arduino. 2018.

DE OLIVEIRA, H. F. E. et al. Horticultural Performance of Greenhouse Cherry Tomatoes Irrigated Automatically Based on Soil Moisture Sensor Readings. Water, v. 13, n. 19, p. 2662, 1 jan. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. How to feed the world in 2050. Rome: FAO, 2009.

GARCÍA, L.; PARRA, L.; JIMÉNEZ, J. M.; LLORET, J.; LORENZ, P. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. Sensors, v. 20, n. 1042, 2020.

KARAR, M.; AL-RASHEED, M.; AL-RASHEED, A.; REYAD, O. IoT and neural network-based water pumping control system for smart irrigation. ArXiv, abs/2005.04158, 2020.

KHEBBACHE, R.; MERIZIG, A.; REZEG, K.; LLORET, J. The recent technological trends of smart irrigation systems in smart farming: a review. International Journal of Computing and Digital Systems, 2023.

KOPRDA, Š.; MAGDIN, M.; MUNK, M. Implementation of microcontroller Arduino in irrigation system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER SCIENCE AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2 ago. 2016, Žilina, Slovakia. Proceedings [...]. Žilina: IEEE, 2016. p. 133–144.

KPONYO, J. J.; OPARE, K. A.; ABDUL-RAHMAN, A.; AGYEMANG, J. O. An intelligent irrigation system for rural agriculture. International Journal of Applied Agricultural Sciences, v. 5, n. 3, 2019.

MANCHANDA, A. Smart irrigation system for Indian agriculture. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2021.

MINZ, S.; SAHA, A.; DEV, M. Arduino based automatic irrigation system. ADBU Journal of Electrical and Electronics Engineering (AJEEE), v. 3, p. 31-36, 2019.

MUNUSAMY, S.; AL-HUMAIRI, S.; ABDULLAH, M. Automatic irrigation system: design and implementation. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTER APPLICATIONS & INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISCAIE), 2021, Penang, Malaysia. Proceedings [...]. Penang: IEEE, 2021. p. 256-260.

NAWANDAR, N. K.; SATPUTE, V. IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system. Computers and Electronics in Agriculture, v. 162, p. 979-990, 2019.

NAM, S.; KANG, S.; KIM, J. Maintaining a constant soil moisture level can enhance the growth and phenolic content of sweet basil better than fluctuating irrigation. Agricultural Water Management, v. 238, p. 106203, ago. 2020.

PALUMBO, M. et al. Sensor-Based Irrigation Reduces Water Consumption without Compromising Yield and Postharvest Quality of Soilless Green Bean. Agronomy, v. 11, n. 12, p. 2485–2485, 7 dez. 2021.

RAMACHANDRAN, V.; RAMALAKSHMI, R.; KAVIN, B. P.; HUSSAIN, I.; ALMALIKI, A. H.; ALMALIKI, A. A.; ELNAGGAR, A. Y.; HUSSEIN, E. E. Exploiting IoT and its enabled technologies for irrigation needs in agriculture. Water, 2022.

SHRIVASTAVA, A.; RAJESH, M. Automatic irrigation system with data log creation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE COMMUNICATION AND COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES (ICICCT), 2018, Coimbatore, India. Proceedings [...]. Coimbatore: IEEE, 2018. p. 632-635.

SUDARMAJI, A.; SAHIRMAN, S.; RAMADHANI, Y. Time based automatic system of drip and sprinkler irrigation for horticulture cultivation on coastal area. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 250, 2019.

SY, J.; PANGANIBAN, E.; ENDRIS, A. A low-cost Arduino-based smart irrigation system (LCABSIS). International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020.

TAVAN, M. et al. Optimizing Sensor-Based Irrigation Management in a Soilless Vertical Farm for Growing Microgreens. Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 4, 26 jan. 2021.

VIJ, A.; VIJENDRA, S.; JAIN, A.; BAJAJ, S.; BASSI, A.; SHARMA, A. IoT and machine learning approaches for automation of farm irrigation system. Procedia Computer Science, 2020.

YASIN, H.; ZEEBAREE, S.; ZEBARI, I. Arduino based automatic irrigation system: monitoring and SMS controlling. In: SCIENTIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE NAJAF (SICN), 2019, Najaf, Iraq. Proceedings [...]. Najaf: IEEE, 2019. p. 109-114.

Capítulo 3

10.37423/240909307

OTIMIZAÇÃO DE MÉDIA E VARIÂNCIA DA RUGOSIDADE RA NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

WANDER PINTO RIBEIRO — *Universidade Federal de Itajubá*

Gustavo Rocha de Queiroz — *Universidade Federal de Itajubá*

Harue Genghini Shibuta — *Universidade Federal de Itajubá*

Carlos Henrique de Oliveira — *Universidade Federal de Itajubá*

Leonardo Albergaria de Oliveira — *Universidade Federal de Itajubá*

Tarcísio Gonçalves de Brito — *Universidade Federal de Itajubá*

Resumo: O desempenho dos processos na indústria metalmecânica é influenciado pela presença de variáveis de ruído que interferem nos valores de média e variância reduzindo a qualidade definida para os produtos. A utilização de setups não condizente das variáveis de controle inseridas nas máquinas ferramentas contribui para o aumento do deslocamento de média e variância em relação aos limites especificados pela engenharia, tal fenômeno pode ser observado principalmente em processos de fabricação onde existe a necessidade de se controlar o acabamento das superfícies de peças usinadas. Essas superfícies apresentam irregularidades quando observadas em detalhes utilizando equipamentos adequados. Os aços inoxidáveis duplex, devido às suas propriedades mecânicas, apresentam dificuldades na usinabilidade, inclusive para o processo de fresamento, representando um grande desafio para as indústrias que fabricam peças e equipamentos para atender condições de operacionalidade com qualidade. Este trabalho tem como objetivo estabelecer os parâmetros ótimos do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 e estabelecer valor de média e variância para a rugosidade Ra pela minimização do erro quadrático médio (EQM). A análise de variância foi realizada para identificar quais os parâmetros de corte foram os mais significativos. Pelo conceito de projeto de parâmetros robusto e a teoria de propagação de erro foi estabelecida equação de média e variância a resposta Ra, a partir da modelagem dual do processo, a otimização foi realizada utilizando o gradiente reduzido generalizado (GRG). A fronteira de Pareto foi construída em função dos diferentes pesos em relação à média e variância da rugosidade Ra. Os resultados mostraram que o método foi eficiente para um valor médio de 0,4464 µm e variância 0,0109 µm². Para a confirmação dos ensaios, foi utilizado um arranjo ortogonal de Taguchi (L9).

Palavras-chave: aço inoxidável duplex, fresamento de topo, rugosidade Ra, otimização.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex (DSS) apresentam microestrutura contendo austenita e ferrita. Tais ligas proporcionam ao DSS, como propriedades mecânicas, excelente resistência à corrosão por pites e sob tensão, justificando assim sua aplicação na indústria petrolífera e de gás (Gamarra e Diniz, 2018; Policena *et al*., 2018; Selvaraj, 2018). Estes materiais são de difícil usinabilidade e isso se deve à alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alto grau de endurecimento, dificultando a fabricação de peças e equipamentos nos diversos processos de usinagem, como o fresamento (Selvaraj, 2018).

O fresamento de topo é um processo que apresenta grande importância na indústria manufatureira, sendo utilizado para confecção de perfis, ranhuras, contornos, além de componentes mecânicos das indústrias de petróleo e gás (Kalidass e Palanisamy, 2018).

Devido à capacidade de endurecimento dos aços inoxidáveis duplex (*Duplex Stainless Steels* - DSS), e considerando suas propriedades termomecânicas, são geradas elevadas temperaturas nas áreas de contato entre ferramenta de corte – cavaco e ferramenta de corte – peça, ocorrendo maior força de corte, desgaste da ferramenta e diminuição da qualidade Wander P. Ribeiro, Gustavo R. de Queiroz, Harue G. Shibuta, Carlos H. de Oliveira, Leonardo A. de Oliveira, Tarcísio G. de Brito OTIMIZAÇÃO DE MÉDIA E VARIÂNCIA DA RUGOSIDADE Ra NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 da superfície usinada. A qualidade da superfície da peça é um dos pontos de grande importância para determinação da vida útil dos componentes fabricados (Policena *et al*., 2018).

Vasconcelos *et al* (2021) utilizaram planejamento fatorial completo e gradiente reduzido generalizado (GRG) para estabelecer pontos ótimos de variáveis de processo que minimizaram o valor da rugosidade na peça usinada. Concluíram que a análise estatística se revelou como uma ferramenta importante na modelagem da resposta *Ra* e que a otimização pelo GRG mostrou ser eficiente na determinação dos parâmetros ideias.

Paiva *et al.* (2009) utilizaram otimização multivariada e erro quadrático médio no processo de torneamento do aço temperado AISI 52100, combinando análise de componentes principais (ACP) com metodologia de superfície de resposta (RSM).

Duarte Costa *et al.* (2016) apresentaram uma nova abordagem híbrida multiobjetivo chamada NBI-MMSE, que combina as funções NBI com o erro quadrático médio multivariado (MMSE).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a determinação de parâmetros robustos para a otimização da rugosidade *Ra* no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. As variáveis

velocidade de corte (*vc*), penetração de trabalho (*ae*), avanço por dente (*fz*) e profundidade de corte (*ap*).

2. PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS

Projeto de parâmetros robustos (*Robust Parameter Design* - RPD), é um conjunto de técnicas para determinação de níveis de variáveis de controle, visando: (a) garantir que o valor médio das respostas se estabeleça próximo ao alvo e (b) promover que a variabilidade dos valores em torno do alvo seja mínima (Montgomery, 2013).

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR, é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelagem e análise de problemas onde a resposta de interesse sofre influência de diversas variáveis onde a resposta deve alcançar um resultado ótimo (Montgomery, 2013).

A abordagem Projeto de Parâmetro Robusto com arranjo combinado trata todas as variáveis da mesma forma, sendo elas variáveis controláveis e de ruído, usando um modelo capaz de delinear os efeitos principais e as interações destes parâmetros de processo (Montgomery, 2013).

Os arranjos combinados são definidos como o sequenciamento de experimentos nos quais as variáveis de ruído, para fins de experimentação, são tratadas como variáveis de controle e, dessa forma, variáveis de controle e ruídos são combinadas em um único arranjo experimental. A partir das informações coletadas nos experimentos, torna-se possível a construção de um modelo de superfície de resposta que relaciona as variáveis de controle, os ruídos e suas respectivas interações. A Eq. 1 descreve o modelo de segunda ordem desenvolvido a partir de um arranjo combinado(Montgomery, 2013).

$$y(x,z) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{r} \gamma_i z_i + \sum_{i-1}^{k} \sum_{j=1}^{r} \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

y – Resposta de interesse
xi – Variáveis de controle
zi – Variáveis de ruído
$\beta 0$, βi, βii, βij, γi, δij – Coeficientes a serem estimados
k – Número de variáveis de controle
r – Número de variáveis de ruído

ε – Erro experimental

Os coeficientes $\beta 0$, βi, βii, βij, γi, δij são estimados através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS). Uma vez que o modelo de superfície de resposta foi estabelecido (Eq. 1), a equação para a média da resposta *y* pode ser extraída diretamente do modelo combinado, conforme Eq. 2:

$$\mu(y) = f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

O modelo de variância é desenvolvido utilizando o princípio da propagação de erro, empregando a derivação, conforme Eq. 3:

$$\sigma^2(y) = \sum_{i=1}^{r} \left[\frac{\partial_y(x,z)}{\partial_{z_1}}\right]^2 . \sigma_{z_1}^2 + \sigma^2 \quad (3)$$

Observa-se ainda que grande parte dos trabalhos que envolvem Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) utilizam a combinação de média e variância em uma função única que deve ser minimizada. Essa função é conhecida como Erro Quadrático Médio (EQM), (Brito, 2012). Essa função fica restrita ao espaço de experimentos da solução, de forma que $Min\ [\hat{y}](x)-T]^2+ \sigma^2$ (Paiva *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2011).

Considerando a existência de diferentes graus de importância entre média e variância, a função objetivo EQM pode assumir a forma $EQMw=w_1\times(\hat{y}(x)-T)^2+w_2 \times \hat{\sigma}^2(x)$, onde os pesos w_1 e w_2 são definidos como constantes positivas pré-especificadas (Kazemzadeh *et al.*, 2008). Tais pesos também podem ser escolhidos em diferentes combinações convexas, de forma que possa ser gerado um conjunto de soluções, onde $w_1+w_2=1$ com w_1 e $w_2 \geq 0$.

Neste trabalho, foi utilizado o conceito do erro quadrático médio (EQM), apresentado por Köksoy e Yalcinoz (2006), sendo definido como a soma da variância com a diferença quadrática entre a média da resposta e o valor definido como alvo. Assim, a minimização do EQM garante que o valor médio da resposta fique o mais próximo possível do seu alvo, com a menor variabilidade. Essa otimização pode ser obtida conforme Eq. 4.

$$EQM\ (y) = \left[\mu(y) - T_y\right]^2 + \sigma^2(y) \quad (4)$$

$$Sujeito\ a: \quad x^T x \leq \alpha^2$$

Onde:

EQM (y) – Erro quadrático médio da resposta *y*

μ(y) – Modelo para a média da resposta *y*

Ty – Alvo da resposta y

$\sigma^2(y)$ – Modelo para variância da resposta *y*

$xTx \leq \alpha^2$ - Restrição esférica para o espaço experimental

Destaca-se que o conceito do erro quadrático médio tem sido empregado para a otimização robusta de diferentes processos de fabricação, (Paiva *et al.*, 2012) e (Gomes *et al.*, 2012).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a coleta de dados, os experimentos do fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram planejados por arranjo combinado com quatro variáveis de controle e três variáveis de ruídos, totalizando 82 experimentos. As Tab. 1 e 2 apresentam as variáveis de controle e de ruídos com os respectivos níveis de operação.

Tabela 1. Variáveis de controle

Variáveis	Níveis				
	-2,83	-1	0	1	2,83
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	32,50	60,00	75,00	90,00	117,40
Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,04	0,10	0,13	0,16	0,21
Penetração de trabalho (a_e) [mm]	12,26	15,00	16,50	18,00	20,74
Profundidade de corte (ap) [mm]	0,43	0,80	1,00	1,20	1,57

Tabela 2. Variáveis de ruído

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Desgaste de flanco (v_b) [mm]	0	0,15	0,30
Vazão do fluido (Q) [l/min]	0	10	20
Balanço da ferramenta (lt_0) [mm]	30	40	50

O material usinado foi o aço inoxidável duplex UNS S 32205, em bloco com dimensões de 115 x 115 x 170 mm e com dureza média de 250 HB, cuja composição química é apresentada conforme Tab. 3.

Tabela 3. Composição química (% em peso) do aço inoxidável duplex UNS S32205 (IMOA, 2014)

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0,013	0,47	1,22	0,019	0,010	0,19	0,008	22,24	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05

Em relação aos equipamentos utilizados, os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem CNC da marca Eurostec, com 15 kW de potência e rotação máxima de 10.000 rpm. Como fluido de corte, empregou-se o óleo sintético Quimatic MEII. A ferramenta utilizada se constituiu de uma fresa de topo código R390-025A25-11M, com diâmetro de 25 mm, ângulo de posição χr = 90º, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Os insertos foram de metal duro ISO M30, código R390-11 T3 08M-MM 2030 (Sandvik-Coromant, 2018), revestidos com (Ti,Al)N +TiN pelo processo de deposição física de vapor (*Physical Vapor Deposition* - PVD), conforme Fig. 1.

Figura 1. Ferramenta de corte utilizada

Após o fresamento do bloco de aço inoxidável duplex UNS S32205, no sentido discordante/concordante utilizando os parâmetros definidos pelo arranjo experimental, a rugosidade de superfície Ra foi medida na superfície usinada por um rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest SJ-201 M/P conforme Fig. 2, utilizando *cut-off* de 0,8 mm (Grouss, 2011).

A rugosidade *Ra* foi medida em três pontos do bloco, no centro e em cada extremidade, tal decisão possibilitou que o valor médio das leituras fosse considerado.

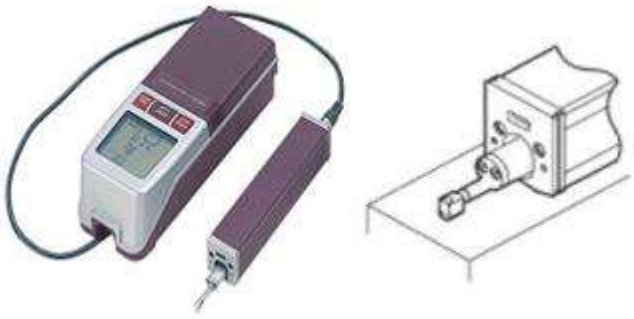


Figura 2. Rugosímetro portátil utilizado no experimento

Para a otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, este trabalho fez uso da experimentação como método de pesquisa.

Dentre as diversas técnicas de experimentação neste trabalho foi utilizado o Projeto de Experimentos (DOE) de forma que os dados apropriados fossem coletados e depois analisados por métodos estatísticos, (Montgomery, 2013). Os conceitos de Projeto de Parâmetros Robusto juntamente com metodologia de superfície de resposta também foram aplicados a fim de formular analiticamente as equações de média e variância, separadamente, conforme idealizado por Myers *et al*. (1992).

O fundamento do projeto de parâmetro robusto consiste na minimização da variabilidade de produtos e processos com o objetivo de melhorar qualidade e confiabilidade (Souza *et al.* 2018). De acordo com Arkadani e Noorossana (2008), o objetivo do RPD é identificar os níveis dos parâmetros de controle que reduzem a sensibilidade das respostas em relação às variáveis de ruído, garantindo a robustez do processo.

A coleta de dados é uma das atividades mais importantes na execução do trabalho. Um banco de dados inadequado conduz a resultados questionáveis. Dessa forma, é extremamente importante o planejamento detalhado do experimento, bem como sua adequada execução e registro conforme os passos a seguir:

1° passo – Metodologia de Superfície de Resposta (MSR): utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros em *Ra*;

2° passo – Otimização do Erro Quadrático Médio (EQM): utilizada para obter a combinação mais adequada dos parâmetros de usinagem que vão permitir a maximização dos resultados do processo.

O arranjo CCD foi definido utilizando o *software* estatístico MINITAB 19 tendo sido definidos 7 fatores, totalizando 82 experimentos.

O *software* MINITAB 19 gerou um conjunto de corridas considerando quatro fatores controláveis (velocidade de corte - *vc*, avanço por dente - *fz*, profundidade de usinagem - *ae*, e penetração de trabalho - *ap*) e três variáveis de ruído (desgaste de flanco - *vb*, vazão do fluido de corte - *Q* e balanço da ferramenta – *lt0*), conforme Tab. 4.

Tabela 4. Matriz experimental

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruído			Respostas
	v_c	f_z	a_e	a_p	v_b	Q	lt_0	R_a
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0,520
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,347
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0,630
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0	0	0	0	0	0	0	0,380
81	0	0	0	0	0	0	0	0,340
82	0	0	0	0	0	0	0	0,397

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de superfície de resposta do arranjo combinado escrito em termos das variáveis de controle e ruído consideradas neste trabalho é apresentado conforme Eq. 5.

$$R_a(x,z) = \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 lt_0 + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z lt_0 + \delta_{42} a_e lt_0 + \delta_{43} a_e Q \quad (5)$$

As variáveis de controle *vc*, *fz*, *ae* e *ap*, foram expressas em sua forma codificada. Os coeficientes foram estimados utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), utilizando o *software* estatístico MINITAB 19, que proporcionaram um R^2 ajustado de 93,91%. Desta forma foi possível estimar os coeficientes do modelo conforme Eq. 6:

$$R_a(x,z) = 0{,}4256 + 0{,}01597 v_c + 0{,}05574 f_z + 0{,}00198 a_e + 0{,}00826 a_p + 0{,}13823 v_b - 0{,}05342 Q + 0{,}00452 lt_0 + 0{,}04525 v_c^2 + 0{,}06038 f_z^2 + 0{,}06725 a_e^2 + 0{,}04563 a_p^2 + 0{,}08814 v_c f_z - 0{,}00517 v_c a_e - 0{,}01127 v_c a_p + 0{,}03502 v_c v_b + 0{,}00005 v_c Q + 0{,}00117 v_c lt_0 + 0{,}00542 f_z a_e + 0{,}01033 f_z a_p - 0{,}07577 f_z v_b - 0{,}00805 f_z Q + 0{,}00295 f_z lt_0 - 0{,}00548 a_e a_p + 0{,}00492 a_e v_b - 0{,}00173 a_e Q - 0{,}00555 a_e lt_0 + 0{,}01014 a_p v_b + 0{,}00392 a_p Q - 0{,}00545 a_p lt_0 \quad (6)$$

Com a construção do modelo *Ra*(*x*,*z*), foi possível estabelecer as equações de média e variância da rugosidade *Ra* conforme Eqs. 7 e 8:

$$\mu(R_a) = 0{,}4256 + 0{,}01597v_c + 0{,}05574f_z + 0{,}00198a_e + 0{,}00826a_p + 0{,}04525v_c^2 + 0{,}06038f_z^2 + 0{,}06625a_e^2 + 0{,}04563a_p^2 + 0{,}08814v_cf_z - 0{,}00517v_ca_e - 0{,}01127v_ca_p + 0{,}00542f_za_e + 0{,}01033f_za_p - 0{,}00548a_ea_p \quad (7)$$

$$\sigma^2(R_a) = 0{,}02477 + 0{,}00969v_c - 0{,}02006f_z + 0{,}00149a_e + 0{,}00234a_p + 0{,}00123v_c^2 + 0{,}00581f_z^2 + 0{,}00006a_e^2 + 0{,}00015a_p^2 - 0{,}00530v_cf_z + 0{,}00033v_ca_e + 0{,}00070v_ca_p - 0{,}00075f_za_e - 0{,}00163f_za_p + 0{,}00015a_ea_p \quad (8)$$

Fig. 3 mostra a superfície de resposta para a média da rugosidade *Ra*. Pode ser observado que o aumento da velocidade de corte (*vc*) juntamente com o avanço por dente (*fz*) contribuem para o acréscimo do valor da rugosidade R_a.

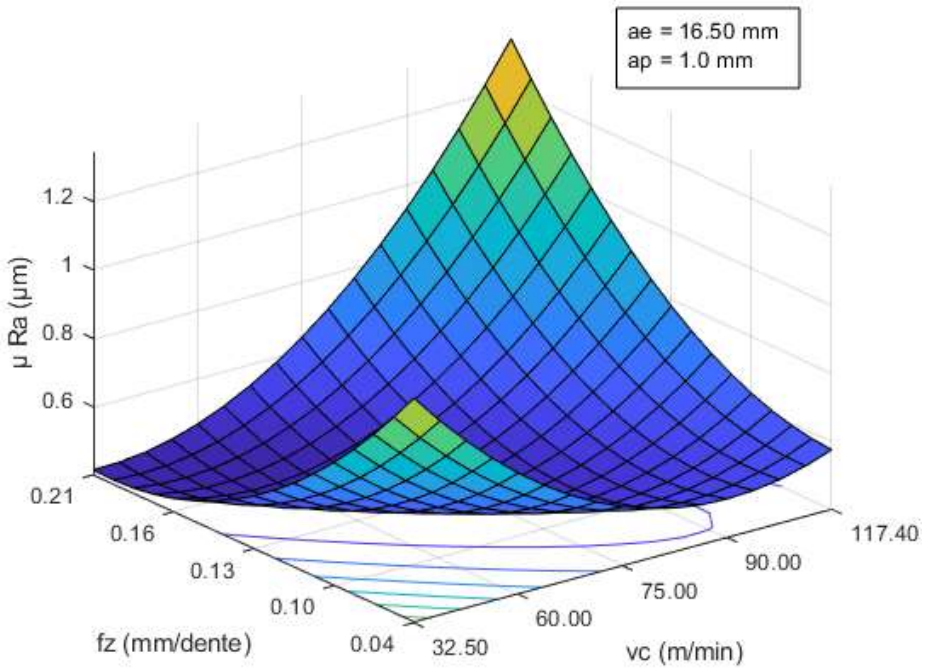


Figura 3. Superfície de resposta para a média de R_a: velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z)

Pode ser observado que diminuindo a velocidade de corte (*vc*) e aumentando o avanço por dente (*fz*) a variância da rugosidade *Ra* foi maximizada, conforme Fig. 4.

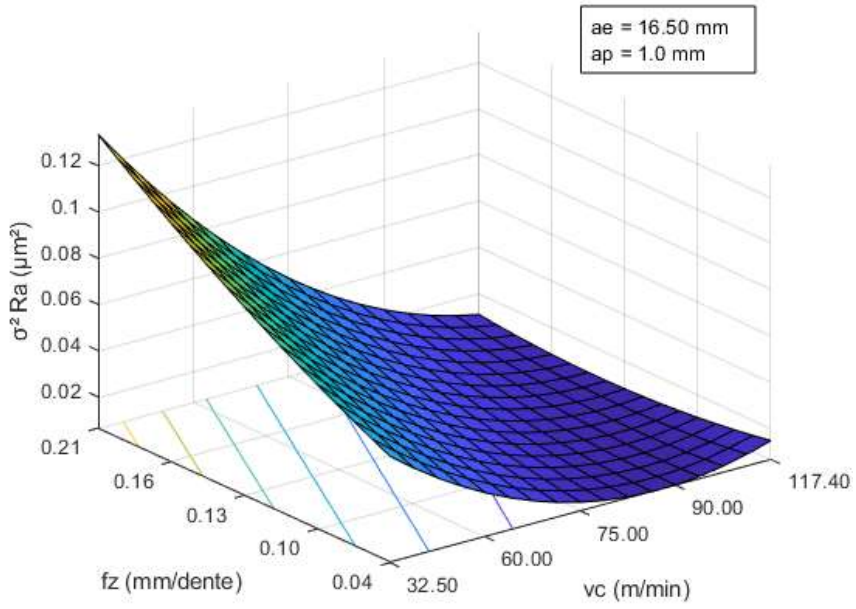


Figura 4. Superfície de resposta para a variância de R_a: interação entre avanço por dente (f_z) e penetração de trabalho (a_e)

Após a definição das equações de média e variância, o passo seguinte foi realizar a otimização do processo conforme Eq. 9. O valor calculado como alvo (*T*) de 0,3992 µm foi determinado minimizando o modelo *Ra*(*x*,*z*) utilizando o algoritmo GRG.

$$Minimizar\ EQM\ (R_a) = w_1 \times [\mu(R_a) - 0{,}3992]^2 + w_2 \times \sigma^2(R_a) \quad (9)$$

$$Sujeito\ a:\ f_z^2 + a_p^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4{,}00$$

Onde:

EQM (*Ra*) – erro quadrático médio para rugosidade *Ra*

*w*1 e *w*2 – pesos atribuídos à média e variância da rugosidade *Ra*

µ(Ra) – modelo para média

σ² (y) (*Ra*) – modelo para variância

Utilizando o Solver, disponível no *software* Microsoft Excel 2019, os parâmetros robustos para o fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram determinados com o emprego do método erro quadrático médio (EQM), conforme Tab. 5.

Tabela 5. Parâmetros robustos determinados com emprego do EQM

Peso $\mu(R_a)$	Peso $\sigma^2(R_a)$	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_e (mm)	a_p (mm)	$\mu(R_a)$ (µm)	$\sigma^2(R_a)$ (µm²)
0,00	1,00	53,09	0,16	15,73	1,13	0,5461	0,0064
0,05	0,95	49,55	0,16	16,09	1,00	0,4945	0,0065
0,10	0,90	51,64	0,16	16,18	0,96	0,4815	0,0067
0,15	0,85	52,75	0,16	16,22	0,95	0,4771	0,0068
0,20	0,80	53,54	0,16	16,24	0,94	0,4744	0,0069
0,25	0,75	54,21	0,16	16,25	0,93	0,4722	0,0070
0,30	0,70	54,83	0,16	16,27	0,93	0,4702	0,0071
0,35	0,65	55,44	0,16	16,28	0,93	0,4682	0,0072
0,40	0,60	56,05	0,15	16,28	0,93	0,4661	0,0074
0,45	0,55	56,69	0,15	16,29	0,93	0,4639	0,0076
0,50	0,50	57,36	0,15	16,30	0,93	0,4616	0,0079
0,55	0,45	58,09	0,15	16,31	0,93	0,4591	0,0082
0,60	0,40	58,89	0,15	16,32	0,93	0,4564	0,0087
0,65	0,35	59,78	0,15	16,33	0,94	0,4535	0,0092
0,70	0,30	60,79	0,15	16,34	0,94	0,4502	0,0099
0,75	**0,25**	**61,97**	**0,14**	**16,35**	**0,94**	**0,4464**	**0,0109**
0,80	0,20	63,38	0,14	16,36	0,95	0,4421	0,0122
0,85	0,15	65,15	0,14	16,38	0,95	0,4370	0,0142
0,90	0,10	67,56	0,13	16,40	0,96	0,4318	0,0174
0,95	0,05	71,38	0,13	16,44	0,97	0,4270	0,0237
1,00	0,00	92,06	0,09	16,63	1,04	0,4175	0,0827

A Fig. 5 apresenta a fronteira de Pareto construída a partir da determinação dos parâmetros robustos. Foi escolhido o primeiro ponto fora da aglutinação, relacionado aos pesos *w1* = 0,75 e *w2* = 0,25, que é uma característica do método de somas ponderadas.

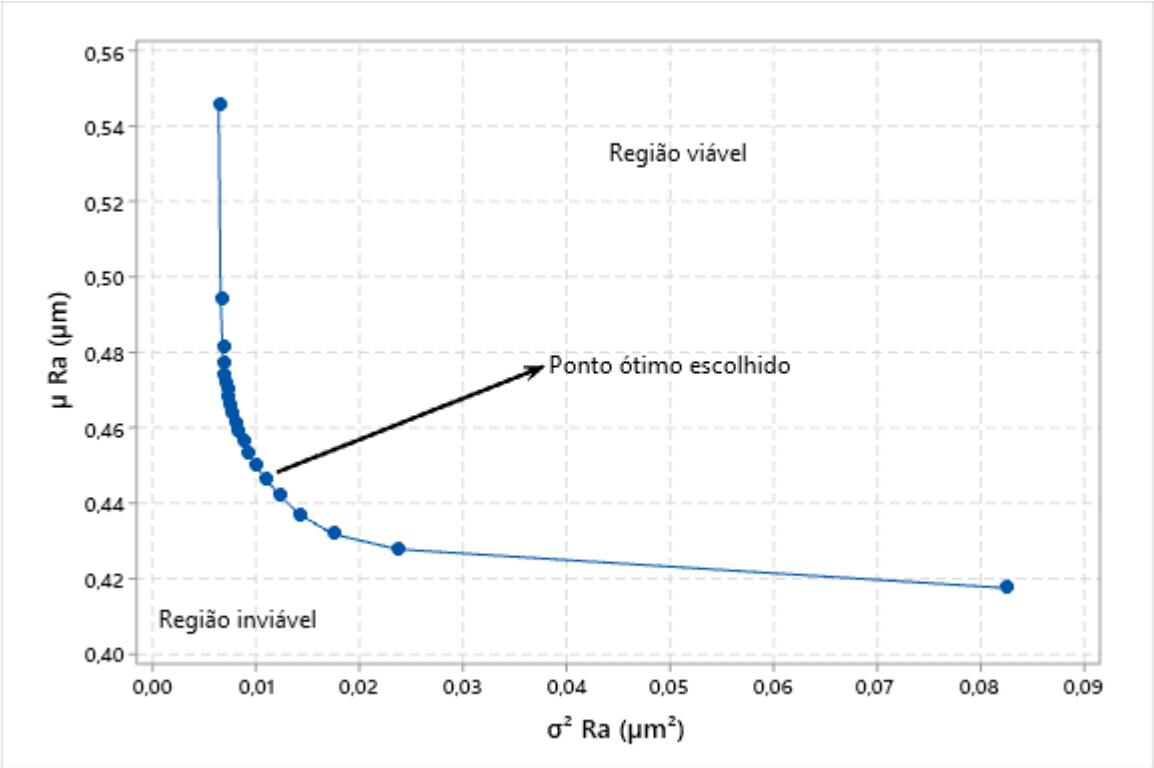


Figura 5. Fronteira de Pareto

Pode ser observado que o PPR (Projeto de Parâmetro Robusto) elaborado para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 indica o ponto ótimo apresentando uma configuração satisfatória para o processo justificando assim pequena variação nos valores de média (*w1* = 0,75) e variância (*w2* = 0,25) da rugosidade *Ra*, conforme Tab. 6.

Tabela 6. Parâmetros robustos determinados pela fronteira de Pareto para EQM

	Variáveis de controle				$\mu(R_a)$	$\sigma^2(R_a)$	$EQM(R_a)$
	v_c	f_z	a_e	a_p			
Valores ótimos (decodificados)	61,97	0,14	16,35	0,94	0,4464	0,0109	0,00440
Valores ótimos (codificados)	-0,8690	0,4760	-0,1000	-0,2907			
Unidade	m/min	mm/dente	mm	mm	μm	μm²	------

Os parâmetros robustos definidos para o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 indicam o ponto de ótimo como um estado eficaz para o processo, na dimensão em que o resultado desejado para a média da rugosidade *Ra* se apresenta como um valor baixo quando comparado aos valores observados nos experimentos.

Os valores ótimos das variáveis de controle foram inseridos na máquina-ferramenta e variou-se o desgaste de flanco da ferramenta (v_b), vazão do fluido (Q) e balanço da ferramenta (l_{t0}) conforme

projeto L9 de Taguchi. Após a execução dos ensaios de confirmação obteve-se os seguintes resultados, conforme Tab. 7.

Tabela 7. Resultados dos experimentos de confirmação

v_b	Q	lt_0	Ra (Real)
0,00	0	30	0,431
0,00	10	40	0,427
0,00	20	50	0,474
0,15	10	30	0,456
0,15	20	40	0,441
0,15	0	50	0,482
0,30	20	30	0,451
0,30	0	40	0,470
0,30	10	50	0,513
		Média (real)	0,4606
		Valor Previsto	0,4464
		Erro	3,18%

Os resultados dos experimentos de confirmação mostraram que o valor médio da rugosidade *Ra* real e o previsto foram próximos, com erro de 3,18%, sendo considerado uma pequena variação em se tratando do parâmetro em análise. Portanto, devido à baixa variação entre o número real e o previsto, ficam validados os resultados obtidos na otimização do processo no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Os resultados dos testes de confirmação foram verificados empregando a Análise de Variância (ANOVA), conforme Tab. 8. Conclui-se que os fatores de ruído não influenciam significativamente a resposta de rugosidade *Ra*, uma vez que os *P-value* são superiores a 5%.

Tabela 8. Análise de variância para experimento de confirmação de μRa

Fonte	*GL*	*SQ (Aj.)*	*QM (Aj.)*	*Valor F*	*Valor – P*
v_b	2	0,001738	0,000869	6,38	0,135
Q	2	0,003814	0,001907	14,01	0,067
lt_0	2	0,000151	0,000075	0,55	0,643
Erro	2	0,000272	0,000136		
Total	8	0,005974			

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma aplicação do método EQM para minimização da média e variância da resposta *Ra* no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, buscando-se assim a minimização do erro quadrático médio calculado a partir dos modelos de média e variância estabelecidos para a resposta *Ra*.

O modelo de superfície de resposta desenvolvido utilizando arranjo combinado apresentou uma qualidade de ajuste adequada uma vez que o R^2 (*adj.*) foi de 93,91 %.

A fronteira de Pareto, com 21 pontos ótimos foi construída variando os pesos *w1* e *w2*, na média e variância de *Ra* respectivamente. O melhor ponto selecionado foi w_1 = 0,75 e $_{w2}$ = 0,25, e nessas condições os valores das variáveis de controle são: *vc* = 61,97 m/min; *fz* = 0,14 mm/dente; *ae* = 16,35 mm e *ap* = 0,94 mm. Para esses parâmetros de corte, o valor médio da rugosidade foi 0,4464 µm e variância igual a 0,0109 μm^2.

Os experimentos de confirmação mostram que a diferença entre as respostas reais e as teóricas resultou em 3,18% validando assim os resultados ótimos obtidos com os modelos desenvolvidos.

A ANOVA dos experimentos de confirmação mostrou que as variáveis de ruído não influenciaram na rugosidade *Ra* pois apresentam *P-value* acima de 5%.

7. REFERÊNCIAS

Ardakani, M. K.; Noorossana, R. “A new optimization criterion for robust parameter design — the case of target is best”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Eng*, vol. 38, n.° 9-10, pp. 851-859, 2008, https://doi.org/10.1007/s00170-007-1141-6

Dambatta, M. M.; Sayuti, M.; Sarhan A. A. D.; Bin Ab Shukor, H. B. A.; Derahman, N. A. B.; Manladan, S. M. 2019. “Prediction of specific grinding forces and surface roughness in machining of Al6061-T6 alloy using ANFIS technique”. Industrial Lubrification and Technology, Vol. 71, N 2, p. 309-317, https://doi.org/10.1108/ILT-03-2018-0098

Duarte Costa, D. M.; Brito, T. G.; Paiva, A. P.; Leme, R. C.; Balestrassi, P. P. “A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel”, Journal of Cleaner Production (2016), http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.062

Gamarra, J.R. e Diniz, A.E., 2018. “Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness.” Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 40 (1), p. 1-13.

Garcia, R. F.; Policena, M.; Souza, A. J. 2021, “Análise das forças de usinagem geradas pelo fresamento frontal do aço inoxidável Forta DX 2303, 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2021.COB21-0034.

Gomes, J.H.F., Campos, P.H.S., Lopes, L.G.D., Costa, S.C., Paiva, A.P., 2012, “Otimização robusta da diluição e da largura do cordão na soldagem com arame tubular para aplicações de revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L”, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.

Grouss, A. “Applied metrology for manufacturing engineering”. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011.

Hanif, M.; Ahmad, W.; Hussain, S; et al. “Investigating the effects of electric discharge machining parameters on material removal rate and surface roughness on AISI D2 steel using RSM-GRA integrated approach”. Int J Adv Manuf Technol 101**,** 1255–1265, 2019.

IMOA, 2014. “International Molybdenum Association”. <https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/ downloads>.

Kalidass, G.; Palanisamy, P., “Experimental Investigation on the Effect of Tool Geometry and Cutting Conditions Using Tool Wear Prediction Model for End Milling Process”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 89, p.95-109, 2014.

Köksoy, O.; Yalcinoz, T., 2006, “Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm”, Appl. Math. Comput., n. 175, p. 1657-1674

Lin, D. K. J.; Tu, W., 1995, “Dual response surface optimization”, Journal of Quality Technology 27:34-39

Montgomery, D.C., 2013, “Design and Analysis of Experiments”, Ed. John Wiley, New York, 757p.

Myers, R. H.; Khuri, A. I.; Vining, G. “Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach”. *Am. Stat*, vol. 46, n.° 2, pp. 131-139, 1992, https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475869

Paiva, A. P.; Paiva, E. J.; Ferreira, J. R.; Balestrassi, P. P. “A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning”, *Int J Adv Manuf Technol* 43, 631–643 (2009). https://doi.org/10.1007/s00170-008-1745-5

Paiva, A. P.; Pontes, F. J.; Balestrassi, P. P.; Ferreira, J. R.; Silva, M. B. Optimization of Radial Basis Function neural network employed for prediction of surface roughness in hard turning process using Taguchi’s orthogonal arrays, Expert Systems with Applications, Volume 39, Issue 9, 2012, Pages 7776-7787, ISSN 0957-4174, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.058.

Policena, M.R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R.F. e Souza, A.J., 2018. “Surface Roughness Analysis in Finishing EndMilling of Duplex Stainless Steel UNS S32205”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 98, p. 1617-1625.

Ross, P. J. “Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade”. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo,1991.

Sandivik Coromant. “Ferramentas Sólidas Rotativas”, 2018.

Selvaraj, D. P., 2018. “Optimization of Surface Roughness of Duplex Stainless Steel in Dry Turning Operation Using Taguchi Technique”. Materials Physics and Mechanics, Vol. 40, p. 63-70.

Shi, K., Zhang, DP., Ren, J., Yao, C. e Yuan, Y., 2014. “Multiobjective Optimization of Surface Integrity in Milling TB6 Alloy Based on Taguchi-Grey Relational Analysis”. Advances in Mechanical Engineering, Vol. 6 (12), p. 280-313.

Souza, B.; Santos, A. P. L.; Filho, M. L. S. “Use of the Robust Design Methodology for Identification of Factors that Contribute to the Intensity of the “Orange Peel” Aspect on Painted Bumper Surfaces”. Gestão & Produção, Vol. 25, n. 3, p. 513-530, 2018, https://doi.org/10.1590/0104-530X3160-18

Taguchi, G.; Elsayed, E. A.; Hsiang, T. C. “Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção”. McGraw-Hill, 1990.

Vining, G. G., Myers, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. Journal of Quality Technology 22:38-45, 1990.

Vasconcelos, G. A. V. B; Oliveira, C. H.; Carolho, L. F. S. “Otimização dos Parâmetros de Corte no Torneamento do Aço Inoxidável 304 para Redução da Rugosidade Superficial”. Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Curitiba (PR), Brasil, http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2021.COB21-0160

Vosniakos, G. C.; Bernardos, P.; Krimpenis, A. A. “Intelligente Optimisation of 3-Axis Sculptured Surface Machining on Existing CAM Systems”. Machining of Complex Sculptured Surfaces (pp. 157-189)

Capítulo 4

10.37423/240909308

SÍLICA ALUMINA COBERTA POR CARBONO E SUA APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO DO CORANTE VERDE MALAQUITA: QUANTIFICAÇÃO POR ESPECTROFOTOMETRIA E TERMOGRAVIMETRIA

Julyane Rocha Santos Solano — *Universidade Federal de Alagoas*

David Clebson de Melo Silva — *Universidade Federal de Alagoas*

Thaís Regina Silva Ribeiro — *Universidade Federal de Alagoas*

Soraya Lira Alencar — *Universidade Federal de Alagoas*

Maritza Montoya Urbina — *Universidade Federal de Alagoas*

Nehemias Rodrigues de Alencar Júnior — *Universidade Federal de Alagoas*

Resumo: A versão modificada de sílica alumina comercial foi obtida a partir de sacarose por deposição. A capacidade do material resultante para remover o corante Verde Malaquita de soluções aquosas foi avaliada. A adsorção foi investigada por estudos de banho finito. Para caracterizar o comportamento de adsorção, foram avaliados: o sobrenadante, por espectrofotometria, e análise termogravimétrica do sólido utilizado na adsorção ao final do ensaio. Para a quantidade de sólido utilizada nos ensaios (100 mg), não se chegou ao máximo de adsorção com o aumento da concentração da solução de corante. A deposição de carbono na superfície da sílica alumina favoreceu a adsorção do corante e as análises de espectrofotometria e termogravimétrica forneceram resultados equivalentes para a quantificação.

1. INTRODUÇÃO

A sílica-alumina amorfa (SAA) é amplamente utilizada como um ácido sólido catalisador em várias reações químicas, incluindo hidrocraqueamento, isomerização e alquilação, que são importantes na refinação de óleo indústria petroquímica 1, 2. Sua alta área superficial (cerca de 427 m^2/g) é capaz de permitir a entrada de muitas substâncias que que reagem com os sítios ácidos e podem ficar presos ou serem liberados com um novo rearranjo atômico. A deposição carbono pode ser uma vantagem em modificar o material para uma aplicação em que se obtenha um resultado otimizado. Wang et al. (2014) desenvolveram a deposição de carbono por pirólise de sacarose e o utilizaram como suporte para partículas de titânia; eles aplicaram o material resultante na adsorção de rodamina B. Wang et al. (2008) estudaram a sacarose e a dispersão de glicose em três diferentes aluminas para produzir a deposição de carbono. As características dos materiais resultantes dependiam do precursor de carbono. Há uma falta de informação sobre o uso de sílica alumina coberta por carbono como agente adsorvente de corantes, e nunca foi usada para remoção do corante verde malaquita. Com base nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal estudar a eficiência do adsorvente Sílica Alumina modificada por deposição de carbono na remoção do corante verde malaquita em fase líquida a diferentes concentrações.

2. METODOLOGIA

Foi adicionado à sílica alumina comercial (Sigma Aldrich), uma solução de 35% (m/m) de sacarose (Synth) em relação a sílica. Após homogeneização, a solução foi aquecida em estufa até secagem total e o sólido recuperado foi calcinado a 600 °C por 30 min, em nitrogênio (30 ml/min). Os ensaios de adsorção foram realizados em batelada, em diferentes concentrações de solução de corante (50 – 1000 ppm). Utilizou-se 100 mg de material com o carbono depositado na superfície e 20 mL da solução do corante. A solução permaneceu em contato com o sólido adsorvente por 2 horas, seguido de separação por centrifugação. O sobrenadante foi analisado em um espectrofotômetro UV-Vis modelo Hach/DR 2700 no comprimento de onda de λ = 615 nm, e as análises térmicas ocorreram numa termobalança Shimadzu modelo DTG-60H, a uma taxa de 10 °C/min até 100 °C e permaneceu nessa temperatura por 30 min para remoção de umidade, seguido aquecimento à mesma taxa inicial até 800 °C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de adsorção forneceram inicialmente uma modificação na cor da solução ao final do tempo de contato. O resultado dos cálculos obtidos a partir dos dados da análise por espectrofotometria e termogravimetria estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Eficiência (%) da adsorção: quantificação por espectrofotometria e termogravimetria.

Concentração inicial	Espectrofometria	Termogravimetria	Erro
50 ppm	99,24	99,08	0,16
100 ppm	98,54	98,06	0,48
200 ppm	95,71	94,60	1,11
400 ppm	84,88	84,13	0,75
600 ppm	80,69	80,48	0,21
800 ppm	79,07	78,89	0,18
1000 ppm	71,66	70,80	0,86

Para o cálculo utilizando a análise térmica, foi verificado em que ponto a massa não variou, ou seja, o material estava livre de umidade – isso acontece quando a derivada da curva da perda de massa passa a ser horizontal e próxima de zero, conforme a Figura 1. A partir daí a quantificação do corante foi determinada levando em consideração a quantidade de carbono depositada a cada 100 mg de material que ainda não foi utilizado nos ensaios, o que foi determinado também por termogravimetria.

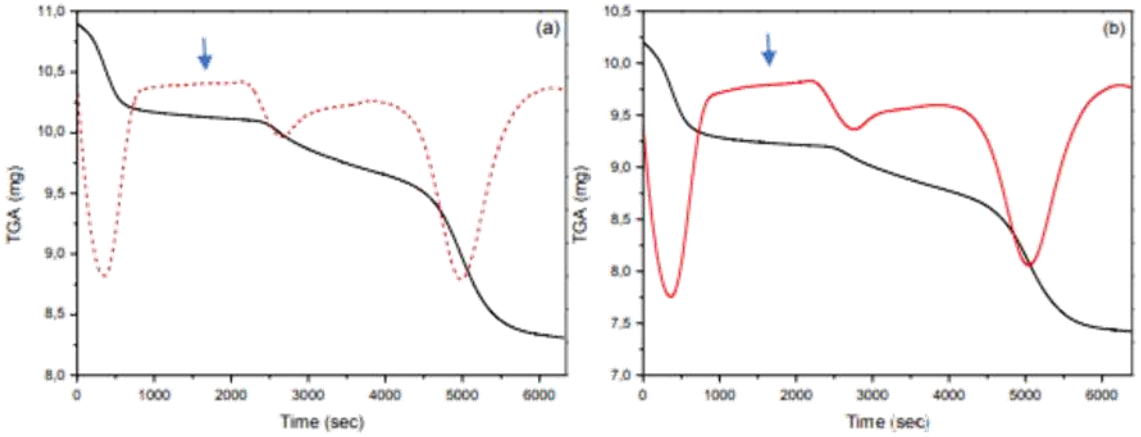


Figura 1 – Gráfico de perda de massa com indicação da derivada horizontalizada: (a) sílica alumina + carbono e (b) sílica alumina + carbono + corante.

As curvas de eficiência para os dois testes estão dispostas na Figura 2 e se comportaram de forma muito parecidas, indicando que ambas são análises capazes de determinar, com certo erro, a quantidade de corante adsorvido nos ensaios.

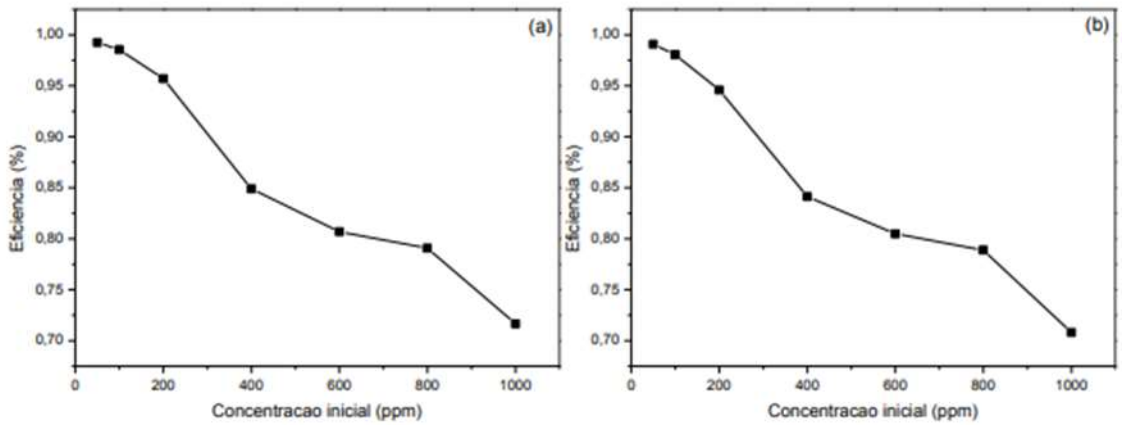


Figura 2 – Curvas de eficiência para as análises por espectrofotometria e termogravimetria. (a) análise por espectrofometria e (b) análise por termogravimetria.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, conseguiu-se verificar que a sílica alumina coberta por carbono é capaz de adsorver o corante utilizado com verificação visível na mudança de coloração da solução final. O tempo de 2h utilizados nos ensaios não foram suficientes para se chegar ao máximo de adsorção, em 1000 ppm a adsorção foi é 14,33 mg de corante por 100 mg de material adsorvente. As análises para quantificação de corante removido foram satisfatórias e equivalentes mesmo considerando o erro de cada uma delas. Para trabalhos futuros, iremos avaliar o tempo de equilíbrio para determinar a máxima adsorção e verificar qual a influência do aumento e/ou diminuição da quantidade sacarose em relação à sílica.

5. REFERÊNCIAS

[1] J. Ward, Hydrocracking processes and catalysts. Fuel Process. Technology 1993.

[2] J. Scherzer, A. J. Gruia, Hydrocracking Science and Technology, Dekker, New York, 1996. p. 215.

[3] Wang X, Li J, He Y, et al. Hierarchically pores carbon-covered alumina/TiO2 catalysts from particle stabilized foams. Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2014.

[4] Wang Y, Lin L, Zhu BS, et al. Different dispersion behavior of glucose and sucrose on alumina and silica surfaces. Appl. Surf. Sci. 2008.

Capítulo 5

10.37423/240909311

CRISTALIZAÇÃO E PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA ZSM-23 SINTETIZADA COM DIFERENTES COMPOSTOS ORGÂNICOS

Julyane Rocha Santos Solano — *Universidade Federal de Alagoas*

Bruno José Barros da Silva — *Universidade Federal de Alagoas*

Soraya Lira Alencar — *Universidade Federal de Alagoas*

Maritza Montoya Urbina — *Universidade Federal de Alagoas*

Nehemias Rodrigues de Alencar Júnior — *Universidade Federal de Alagoas*

Antonio Osimar Sousa da Silva — *Universidade Federal de Alagoas*

Resumo: A síntese da zeólita ZSM-23 com razão SiO_2/Al_2O_3 = 100 foi estudada utilizando quatro compostos orgânicos (isopropilamina, etilenoglicol, pirrolidina e N, N-dimetilformamida) atuando como agentes direcionadores de estrutura (SDA). A difratometria de raios X (DRX) indicou a obtenção da ZSM-23 altamente cristalina em todos os sistemas reacionais. As curvas termogravimétricas (TG/DTA) apresentaram cinco regiões principais de perda de massa, onde a perda total das amostras variou entre 8 e 15%. As isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio a -196 °C indicaram a obtenção de materiais com valores semelhantes para microporosidade e área superficial, tendo a amostra sintetizada com pirrolidina os melhores resultados de área superficial e volume de poros, além de apresentar uma mesoporosidade secundária mais expressiva (V_{meso} = 0,21 $cm^3.g^{-1}$) . Os espectros de infravermelhos (FTIR) mostraram as bandas características de estruturas zeolíticas. As curvas de dessorção de amônia á temperatura programada (TPD-NH_3) apresentaram dois eventos entre 100 à 350°C e 350 à 650°C, respectivamente, com a amostra obtida com etilenoglicol apresentando uma maior densidade de sítios ácidos (607 μmol de $NH_3.g^{-1}$).

Palavras chave: ZSM-23; Isopropilamina; Etilenoglicol; Pirrolidina; N, N-dimetilformamida.

1. INTRODUÇÃO

A ZSM-23 é uma zeólita com altas razões de Si/Al e estrutura topológica MTT, contendo canais unidimensionais de 10-MR não interconectados e poros em forma de gota com diâmetro de 0,52 x 0,45 nm [1]. A ZSM-23 foi sintetizada pela primeira vez por Plank e colaboradores em 1976 usando pirrolidina como agente orgânico direcionador de estrutura [2]. Posteriormente, cátions de amônio diquaternários foram utilizados em um novo procedimento de síntese patenteado por Valyocsik em 1984 [3]. KZ-1, ISI-4, EU-13, e SSZ-32 são zeólitas isoestruturais a ZSM-23, onde estas foram sintetizadas com pirrolidina ou com outras aminas neutras como a isopropilamina ou dimetilamina. Uma estrutura análoga rica em alumínio (Si/Al = 20–40) foi preparada com hidróxido de diisopropilimidazólio e patenteada pela Chevron com o código de SSZ-32 [4-6].

A ZSM-23 exibe excelente atividade catalítica e seletividade de forma para a hidroisomerização de parafinas de cadeia longa [7-9], isomerização de xilenos [10-11], e isomerização esquelética de n-buteno [12]. Recentemente, foi descrito a utilização ZSM-23 como catalisador na produção de etileno e propileno no craqueamento catalítico de misturas de alcenos C4 [13]. O interesse contínuo na estrutura MTT é ilustrado nas numerosas patentes recentes relativas às suas aplicações em hidrocraqueamento, isomerização ou reações de metátese de olefinas leves [14-17], tão como patentes com enfoque em modificações da estrutura pela inserção de outros átomos metálicos ou modificação das rotas de síntese para diminuir o tamanho de partícula e morfologia [18-23].

Este trabalho teve como objetivo sintetizar a zeólita ZSM-23 utilizando quatro compostos orgânicos diferentes, isopropilamina, etilenoglicol, pirrolidina e N,N-dimetilformamida, e avaliar as propriedades físico-químicas dos materiais obtidos através das técnicas de caracterização de DRX, TGA/DTA, FTIR, TPD-NH3 e adsorção/dessorção de nitrogênio à -196 °C.

2. EXPERIMENTAL

2.1 SÍNTESE DAS ZEÓLITAS ZSM-23

As sínteses foram realizadas com silicato de sódio (Quimesp, 29,6% SiO2 e 9,2% Na2O), sulfato de alumínio (Merck, 99%), ácido sulfúrico (Sigma-Aldrich, 99%), isopropilamina-IPA (Sigma-Aldrich, 99%), etilenoglicol-ETG (Dinâmica, 99,5%), N,N–dimetilformamida-DMF (Sigma-Aldrich, 99,8%), pirrolidina-PYR (Sigma-Aldrich, 99%) e água destilada.

O preparo do gel de síntese foi realizado com as seguintes composições molar:

100l PA:30 Na_2O:1 Al_2O_3:100 SiO_2:27,6 H_2SO_4: 2000 H_2O (Amostra M1);

666,7 ETG:30 Na_2O:1 Al_2O_3:100 SiO_2:22,08 H_2SO_4:2000 H_2O (Amostra M2);

45 PYR:30 Na_2O:1 Al_2O_3:100 SiO_2:27,58 H_2SO_4:2000 H_2O (Amostra M3);

67 DMF:36 Na_2O:1 Al_2O_3:100 SiO_2:3 H_2SO_4:3500 H_2O (Amostra M4).

Um procedimento típico de síntese consiste nas seguintes etapas:

(i) Adição do silicato de sódio em 30%H_2O;

(ii) Adição do sulfato de alumínio sódio em 30%H_2O, e posterior adição do H_2SO_4;

(iii) Adição de (ii) em (i), seguida de agitação até homogeneização da mistura;

(iv) Adição do orgânico (IPA, ETG, PYR e DMF) em 40 %H_2O;

(v) Adição de (iv) em (iii), com agitação até formar uma mistura homogênea.

A cristalização foi realizada em um reator Parr 4520, sob agitação de 400 rpm à 170 °C por 20 horas. O sólido resultante do processo de cristalização foi recuperado por filtração a vácuo, sendo lavado até pH neutro e seco em estufa a 120 °C por 12 horas.

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO E TROCA IÔNICA

As amostras obtidas foram submetidas a calcinação sob fluxo de ar de 100 $ml.min^{-1}$ com rampa de aquecimento de 2 $°C.min^{-1}$ até 550 °C por 6 horas. Posteriormente, os materiais foram submetidos a troca iônica utilizando solução de nitrato de amônia (Merck, 99%) de 1 $mol.L^{-1}$ sob agitação de 20 rpm por 2 horas à 80 °C, este procedimento sendo repetido por 3 vezes. Por fim, foi repetido o procedimento de calcinação.

2.3 CARACTERIZAÇÕES

As análises de difratometria de raios - X foram realizadas utilizando-se um difratômetro Shimadzu XRD-6000, com radiação CuKα (λ = 0,1542 nm), filtro de Ni, voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. A aquisição dos dados foi realizada no intervalo de 2θ entre 3 e 40º, com velocidade de goniômetro de $2º.min^{-1}$ e passo de 0,02º. Os perfis de DRX foram utilizados para estimar a cristalinidade dos materiais, usando os picos na região 2θ de 19,2 à 23,4º e o diâmetro médio de cristalito foi determinado usando a equação de Scherrer (24,80° plano hkl [006]). As medidas de adsorção/dessorção de nitrogênio à 196 ºC foram realizadas em um equipamento Micromeritics ASAP 2020 no intervalo de pressões

relativas P/P_0 entre 0,01 e 1,0. Os espectros de FTIR foram obtidos em um espectrômetro infravermelho por transformada de Fourier da VARIAN modelo 660-IR, na região do de 400-4000 cm^1. As curvas TG/DTA foram medidas em uma termobalança Shimadzu DTG-60H, com taxa de aquecimento de 10°C.min^{-1} sob atmosfera de ar com vazão de 50 mL.min^{-1}, de temperatura ambiente até 800 °C. Os perfis de TPD de NH_3 foram obtidos em um equipamento SAMP3 (Termolab, Brasil), com detector de condutividade térmica, na faixa de 100 a 800 °C, com uma taxa de aquecimento 10 °C.min^{-1} sob vazão de hélio de 30 mL.min^{-1}.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra o perfil de DRX das amostras sintetizadas. Nessa é possível verificar que há a formação de fases cristalinas em todas as sínteses. A partir das reflexões de Bragg da estrutura microporosa da ZSM-23 [24], constatou-se que os materiais obtidos apresentam uma difratograma típico dessa zeólita. Isso indica que os métodos de sínteses empregados foram efetivos para a obtenção da zeólita ZSM-23 altamente cristalina com os quatros compostos orgânicos utilizados nesse trabalho.

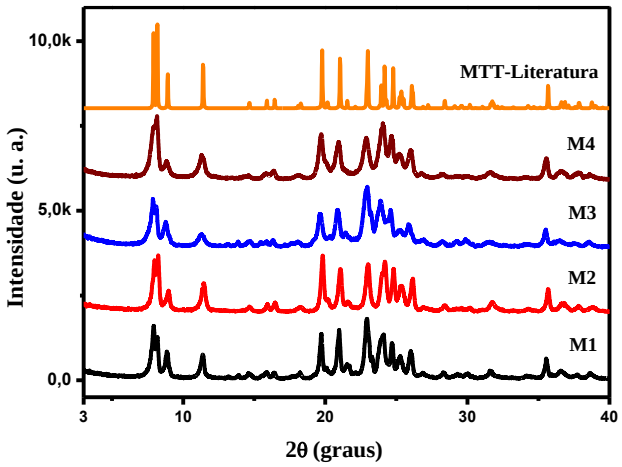


Figura 1. Perfis de DRX das amostras sintetizada e do padrão IZA da zeólita ZSM-23 (fase MTT).

A Tabela 1 apresenta os valores das cristalinidades relativas e diâmetro de cristalito obtidos a partir dos difratogramas das amostras de ZSM-23 sintetizadas. Esses resultados indicam que os materiais apresentam comportamento semelhantes, com grau de cristalinidade superior a 90% (comparado a amostra M1, que foi considerada 100% cristalina). Enquanto que o diâmetro dos cristalitos variou de 20 a 31 nm, dependendo do tipo orgânico usado na síntese da amostra.

Tabela 1. Resultados obtidos dos DRX.

Amostra	Cristalinidade (%)	Diâmetro de cristalito (nm)
M1	100*	25
M2	92	31
M3	95	21
M4	90	20

* Amostra Padrão

As curvas TG/DTA das amostras (Figura 2) mostram que durante o aquecimento é possível identificar cinco regiões principais de perda de massa: (I) dessorção de água superficial, (II) dessorção de água intracristalina, (III) decomposição do composto orgânico fisissorvida a estrutura, (IV) decomposição do composto orgânico quimissorvida a estrutura e saída dos fragmentos orgânicos (possivelmente compensando cargas na estrutura) e (V) remoção de coque e decomposição de fragmentos dos compostos orgânicos [25]. O percentual de perda de massa total das amostras, medidos em relação a massa inicial, foram: M1=8, M2=15, M3=13 e M4=13%.

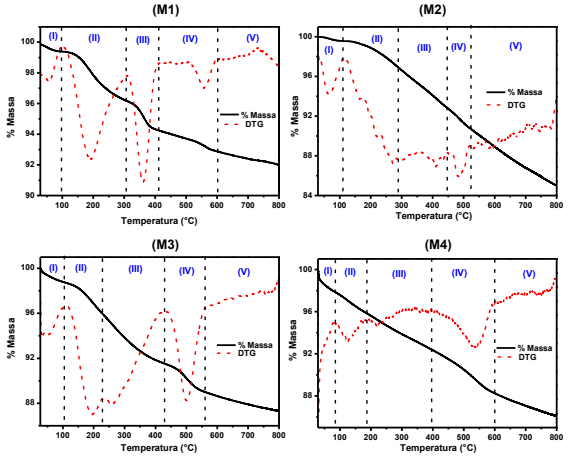


Figura 2. TG/DTA das amostras de ZSM-23.

Na Figura 3 são mostradas as isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio sobre as amostras de ZSM-23. Essas medidas mostram que todos os materiais sintetizados adsorvem o nitrogênio com uma isoterma do tipo I, segundo classificação da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), que é característica de materiais microporosos, como as zeólitas. A característica marcante desse tipo de isoterma principal é a adsorção de grandes quantidades de nitrogênio em baixas pressões relativas (próximas à zero). Adicionalmente, foram observadas histereses nas amostras M3 e M4, a partir de pressões relativas superiores a 0,4, que podem indicar a existência de mesoporosidade. A causa desse fenômeno não está clara, mas possivelmente é o resultado do preenchimento/esvaziamento de poros

irregulares formados pelo contato ou intercrescimento entre os cristais ou partículas que formam esses materiais.

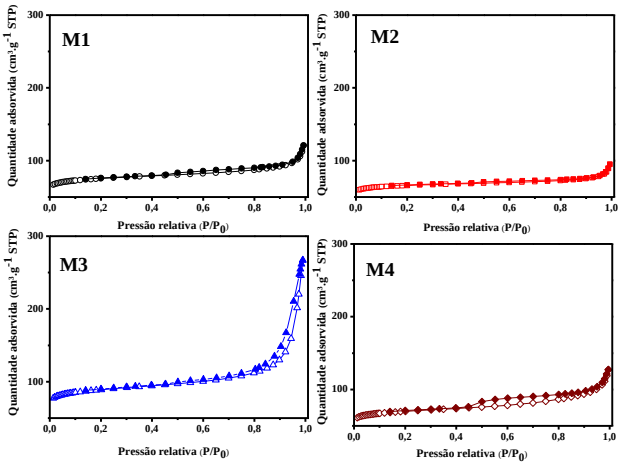


Figura 3. Isotermas de adsorção/dessorção de N_2 das amostras de ZSM-23.

Os valores reportados na literatura para as áreas superficiais da ZSM-23 variam drasticamente entre 101 à 273 $m^2.g^{-1}$ [26] ou moderadamente 295 a 335 $m^2.g^{-1}$ [27]. Esses valores de área resultaram em volume de microporos, que variam de 0,01 a 0,09 $cm^{-3}.g^{-1}$.

Ernst e colaboradores [28] mediram uma área superficial de 280 $m^2.g^{-1}$ para amostras de ZSM-23 preparadas com pirrolidina, enquanto que Parker e Bibby [29] reportaram valores de 160 $m^2.g^{-1}$. A patente da *Mobil Corporation* de 1978 que primeiro reivindica a síntese de ZSM-23 [30], apresenta o valor de 218 $m^2.g^{-1}$ para a área superficial de um material preparado com pirrolidina. Na Tabela 2 estão resumidos os dados obtidos a partir das curvas de adsorção/dessorção de N_2 a -196 °C. Valores semelhantes para microporosidade e área superficial foram obtidos para as amostras M1, M2 e M4, com A_{micro} = 207-225 $m^2.g^{-1}$, V_{total} = 0,13-0,16 $cm^3.g^{-1}$ e V_{micro}= 0,08-0,09 $cm^3.g^{-1}$. Observou-se uma maior diferença nos valores de área externa, onde as amostras M1 e M4 apresentaram valores próximos, de 59 e 56 $m^2.g^{-1}$, respectivamente, já a amostra M2 apresentou o valor de 37 $m^2.g^{-1}$, indicando que a utilização de etilenoglicol favorece a formação de cristais maiores em relação aos outros agentes orgânicos, pois é fácil inferir que, em materiais policristalinos, quanto menor a área externa total maior serão os cristais ou partículas que formam a amostra. Essa constatação é corroborada pelos valores de diâmetro médio de cristalitos apresentados na Tabela 2. A amostra M3 foi a que apresentou o maior valor de área externa, A_{EX} = 80 $m^2.g^{-1}$, além de valores de A_{micro} = 254 $m^2.g^{-1}$, V_{total} = 0,31 $cm^3.g^{-1}$ e V_{micro}= 0,10 $cm^3.g^{-1}$. Esses resultados indicam que o material apresenta uma porosidade secundária considerável na faixa de mesoporoso (V_{meso}= V_{total} - V_{micro} = 0,21 $cm^3.g^{-1}$).

Tabela 2. Resultados obtidos da adsorção e dessorção de N_2.

Amostra	A_{BET} m^2/g	A_{ex} m^2/g	A_{micro} m^2/g	V_{total} cm^3/g	V_{micro} cm^3/g
M1	284	59	225	0,16	0,09
M2	250	37	213	0,13	0,09
M3	334	80	254	0,31	0,10
M4	263	56	207	0,16	0,08

Na Figura 4 são mostrados os espectros de absorção no infravermelho das amostras de ZSM-23 na região de 400 a 4000 cm^{-1}. Todas as amostras analisadas apresentaram bandas de absorção típicas das estruturas dos aluminossilicatos. As vibrações observadas em torno de 790 e 1085 cm^{-1} correspondem respectivamente aos estiramentos simétrico e assimétrico das ligações externas entre os tetraedros TO_4, enquanto que a banda de absorção próximo a 1220 cm^{-1} está associada ao estiramento assimétrico das ligações internas dos tetraedros TO_4. De forma análoga, as bandas de absorção localizadas em torno de 560 e 630 cm^{-1} são atribuídas a vibrações simétricas internas aos tetraedros [31].

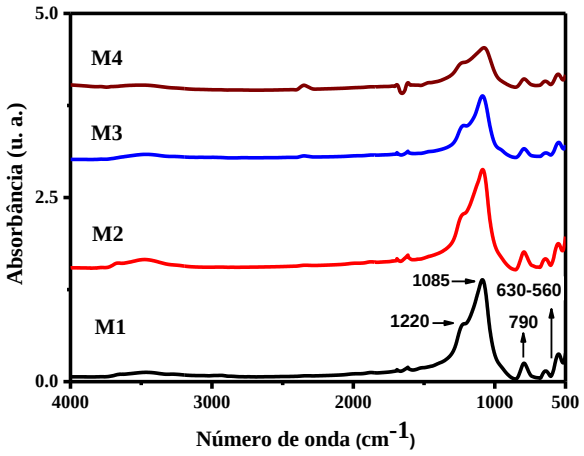


Figura 4. Espectros na região do infravermelho das amostras de ZSM-23 sintetizadas.

A Figura 5 mostra as curvas de TPD-NH_3 das amostras de ZSM-23, onde foi observado a presença de dois eventos de dessorção, o primeiro foi mais intenso, sendo localizado na faixa de temperatura de 100 à 350 °C, foi atribuído à dessorção de amônia proveniente de sítios ácidos de Brönsted fracos (≡Si(OH)Al≡) e/ou de sítios ácidos de Lewis de força moderada (≡Si-O-Al≡, íons Na^+). O segundo evento, de menor intensidade, localizado entre 350 e 600 °C, caracteriza a dessorção de amônia, principalmente, de sítios de forte acidez [32]. É possível inferir que a área abaixo da curva do evento

que ocorre em menor temperatura é maior do que a do pico de alta temperatura, indicando que as amostras de ZSM-23 possuem uma proporção maior de sítios de força ácida moderada.

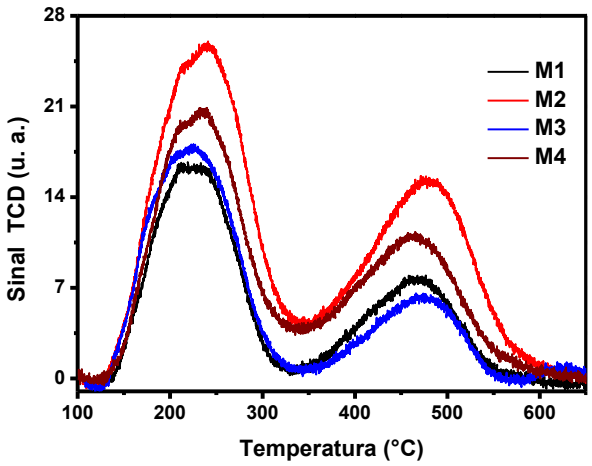


Figura 5. TPD-NH_3 das amostras de ZSM-23.

Assumindo a estequiometria de uma molécula de NH_3 por sítio ácido, o número total e a distribuição dos sítios ácidos podem ser obtidos a partir da contribuição de cada pico para o perfil total de TPD. Modelando os picos com uma curva gaussiana foi possível estimar a contribuição de cada evento na acidez total dos materiais. Esses dados estão listados na Tabela 3, onde se observa que a densidade total de sítios ácidos, segue a seguinte ordem: M2 > M4> M1 > M3. Essa ordem está relacionada inversamente ao SAR das amostras (concentração de Al), conforme indicado na Tabela 3, onde se observa que a amostra M2 apresenta o menor SAR e, portanto, a maior concentração de Al.

Tabela 3. Resultados obtidos dos TPD-NH_3.

Amostra	[a]SAR mol/mol	[b]S_1 µmol/g	[c]S_2 µmol/g	[d]S_{total} µmol/g
M1	79	237	139	376
M2	55	383	225	607
M3	85	272	94	367
M4	67	291	153	444

[a]Razão SiO_2/Al_2O_3 (estimada assumindo que todo o Al do gel foi incorporado na fase sólida (calculado como: SAR do gel x rendimento em sólidos)

[b]S_1 = Sítios de acidez moderada (T = 100 à 350 °C)

[c]S_2 = Sítios de acidez forte (T = 350 à 600 °C)

[d]S_{total} = Acidez total (S_1 + S_2)

Essa correlação entre a concentração de Al numa zeólita e a sua acidez é amplamente aceita na literatura [33], sendo que para cada alumínio em posição tetraédrica na rede uma zeólita, deve haver um cátion de compensação monovalente ou um próton para manter a eletroneutralidade da

estrutura. Implicando que a acidez de uma zeólita onde os cátions de compensação foram trocados por prótons é diretamente proporcional a quantidade de Al na rede.

4. CONCLUSÕES

No trabalho foram estudadas diferentes rotas para a cristalização da ZSM-23 utilizando isopropilamina, etilenoglicol, pirrolidina e N,N-dimetilformamida como agente orgânico direcionador de estrutura. Todas as sínteses resultaram em materiais com a estrutura MTT altamente cristalina (grau de cristalinidade superior a 90%).

A partir da Equação de Scherrer verificou-se que o diâmetro médio dos cristalitos quase não sofre influência do tipo de orgânico empregado, isto ocorre devido às grandes semelhanças nas condições de sínteses (géis de composição similar, temperatura e tempo de cristalização idênticos).

As curvas de TG/DTA apresentaram um comportamento semelhante com cinco regiões principais de perda de massa. Os FTIR apresentaram bandas de absorção típicas das estruturas dos aluminossilicatos com estrutura MTT.

Os resultados de adsorção/dessorção de N_2 à -196°C apresentaram valores semelhantes para microporosidade e área superficial para as amostras M1, M2 e M4, com A_{micro} = 207-225 $m^2.g^{-1}$, V_{total} = 0,13-0,16 $cm^3.g^{-1}$ e V_{micro}= 0,08-0,09 $cm^3.g^{-1}$. Observou-se uma maior diferença nos valores de área externa, onde as amostras M1 e M4 apresentaram valores próximos, de 59 e 56 $m^2.g^{-1}$, respectivamente, já a amostra M2 apresentou o valor de 37 m^2.g-1, indicando que a utilização de etilenoglicol favorece a formação de cristais maiores em relação aos outros agentes orgânicos. A amostra M3 foi a que apresentou o maior valor de área externa, AEX = 80 $m^2.g^{-1}$, além de valores de A_{micro} = 254 $m^2.g^{-1}$, V_{total} = 0,31 $cm^3.g^{-1}$ e V_{micro}= 0,10 $cm^3.g^{-1}$. Esses resultados indicam que o material apresenta uma porosidade secundária considerável na faixa de mesoporoso.

A partir dos perfis de TPD-NH_3. foi possível estimar a contribuição de cada evento na acidez total dos materiais. Observou-se que a densidade total de sítios ácidos, segue a seguinte ordem: M2 > M4> M1 > M3. Essa ordem está relacionada inversamente ao SAR das amostras (concentração de Al).

5. REFERÊNCIAS

[1] B. Wang, Q. Gao, J. Gao, D. Ji, X. Wang, J. Suo, Appl. Catal. A-Gen., 274 (2004) 167-172.

[2] C. J. Plank, E. J. Rosinski, M. K. Rubin, US Patent 4076842, 1978.

[3] W. Valyocsik, US Patent 4490342, 1984.

[4] M. Sugimoto, K. Takatsu, N. Kawata, T. Konishi, Stud. Surf. Sci. Catal., 28 (1986) 193–200.

[5] L. M. Parker, D.M. Bibby, Zeolites, 3 (1983) 8–11.

[6] S. I. Zones, US Patent 5053373, 1991.

[7] C. S. L. Narasimhan, J. W. Thybaut, G. B. Marin, P. A. Jacobs, J. A. Martens, J. F. Denayer, G. V. Baron, J. Catal., 220 (2003) 399.

[8] W. Huybrechts, G. Vanbutsele, K. J. Houthoofd, F. Bertinchamps, C. S. L. Narasimhan, E. M. Gaigneaux, J. W. Thybaut, G. B. Marin, J. F. M. Denayer, G. V. Baron, P. A. Jacobs, J. A. Martens, Catal. Lett., 100 (2005) 235.

[9] S. Ernst, G. T. Kokotailo, R. Kumar, J. Weitkamp, in: M. J. Philips, M. Ternan (Eds.), Proceedings of the Nineth International Congress on Catalysis, vol. 1, Calgary, Canada, and The Chemical Institute of Canada, Ottawa, 1998, p. 388.

[10] R. Kumar, P. Ratnasamy, J. Catal., 116 (1989) 440.

[11] S. J. Rane, D. K. Chakrabarty, Appl. Catal., 75 (1991) 281.

[12] S.V. Donk, J.H. Bitter, K.P. de Jong, Appl. Catal. A: Gen., 212 (2001) 97.

[13] B. Wang, Q. Gao, J. Gao, D. Ji, X. Wang, J. Suo, Appl. Catal. A: Gen., 274 (2004)

167.

[14] L. A. Chewter, M. J. F. M. Verhaak, J. Van Westrenen, US Patent 2009/0187057.

[15] J. E. Bauer, J. G. Moscoso, US Patent 2009/0155142 A1.

[16] T. L. M. Maesen, B. Smit, E. Beerdsen, US Patent 2007/0029229 A1.

[17] D. H. Powers, K. M. Webber, US Patent 2003/0181777 A1.

[18] A.W. Burton, Jr., US Patent 2007/0128106 A1.

[19] A.W. Burton, Jr., US Patent 7682600, 2010.

[20] A.W. Burton, Jr., S. Zones, US Patent 7157075, 2007.

[21] J. A. Biscardi, D. P. Fong, P. Marcantonio, US Patent 7390394, 2008.

[22] S. J. Miller, US Patent 6099820, 2000.

[23] S. J. Miller, US Patent 2008/0159953, 2008.

[24] TREACY, M. M. J.; HIGGINS, J. B. Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites, 5th edition, Amsterdam, Elsevier, 2007.

[25] R. Kumar, P. Ratnasamy, Journal of Catalysis, 121 (1990) 89-98. [26] W. Huybrechts, G. Vanbutsele, K.. J. Houthoofd, F. Bertinchamps, C. S. L. Narasimhan, E. M. Gaigneaux, J. W. Thybaut, G. B. Marin, J. F. M. Denayer, G. V. Baron, P. A. Jacobs, J. A. Martens, Catal. Lett. 100 (2005) 235–242.

[27] B. Wang, Q. Gao, J. Gao, D. Ji, X. Wang, J. Suo, Appl. Catal. A: Gen. 274 (2004) 167–172.

[28] S. Ernst, R. Kumar, J. Weitkamp, ACS Symp. Ser. 398 (1989) 560–573.

[29] L. M. Parker, D. M. Bibby, Zeolites 3 (1983) 8–11.

[30] C. J. Plank, E. J. Rosinski, M. K. Rubin, US Patent 4076842, 1978.

[31] E. M. Flanigen, H. Khatami, H. Szymanski, Zeolites 1 (1974) 201-229.

[32] B. M. Lok, B. K. Marcus, C. L. Angell, Zeolites, 6 (1986) 185-194.

[33] R. Szostak, Molecular sieves: principles of synthesis and identification, Van Nostrand Reinhold, 1989.

Capítulo 6

10.37423/240909313

WETLANDS NO TRATAMENTO DO EFLUENTE DE SUINOCULTURA: UMA AVALIAÇÃO NO DESEMPENHO DE REMOÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS UTILIZANDO DIFERENTES MACRÓFITAS

Fátima Luana Techy — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Guilherme Gavlak — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Kely Viviane de Souza — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Carlos Raphael Pedroso — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Bruna Barendrechte — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Emilly Giacobbo — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Robert William Florentino — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Erivelton César Stroparo — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Silvane Carolina Gonçalves da Rosa de Assis — *Universidade Estadual do Centro-Oeste*

Resumo: A suinocultura é uma atividade que vem ganhando destaque na economia do Brasil; porém, a intensificação dessa prática gera grandes quantidades de efluentes e impactos ambientais. Os sistemas *wetlands* construídos, ou sistemas alagados construídos, vêm se consolidando nos últimos anos como solução sustentável e de baixo custo no tratamento de efluentes domésticos, podendo ser uma tecnologia atrativa para efluentes de suinocultura, os quais apresentam elevado conteúdo orgânico, de nutrientes, cor e presença de sólidos. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de dois sistemas *wetlands* construídos, com duas espécies de macrófitas: *Canna indica* (biri), denomidado leito 1 e *Juncus effusus* (junco), leito 2, no tratamento de efluente real oriundo da atividade de suinocultura. Os sistemas foram avaliados quanto ao seu desempenho na remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, sólidos totais e sólidos suspensos totais. Nas condições testadas, ambos os leitos foram semelhantes na eficiência quanto à remoção de turbidez e cor verdadeira. No que se refere à cor aparente, o leito 1 foi superior ao leito 2 e, na remoção de sólidos totais e suspensos totais, ambos os leitos apresentaram eficiência de remoção semelhantes à testemunha (leito 3). De maneira geral, os resultados demonstraram o potencial das *wetlands* como alternativa viável para a mitigação dos impactos ambientais da suinocultura.

Palavras-chave: tratamento de efluente, remoção de poluentes, sistema alagados contruídos, tecnologia de baixo custo.

1. INTRODUÇÃO

A suinocultura no Brasil representa um dos cinco países mais importantes na economia mundial do ramo, segundo Panorama da Suinocultura (MIELE e SANDI, 2023). Atribuído a esse índice, a intensificação dessa atividade resulta em desafios ambientais significativos, principalmente sobre à gestão dos efluentes gerados. Ricos em matéria orgânica, nutrientes, sólidos suspensos e microrganismos patogênicos, os resíduos líquidos da suinocultura, normalmente se não tratados podendo gerar a contaminação de corpos d'água, solos, além de contribuir com a emissão de gases de efeito estufa, assim comprometendo a saúde pública e a qualidade ambiental (OLIVEIRA, 1997).

Com o intuito de diminuir a poluição causada, soluções sustentáveis no tratamento de efluentes suinícolas são desenvolvidas como aliadas nesse processo. Entre diversas tecnologias estudadas, as *wetlands* construídas têm apresentado grande destaque pela sua alta eficiência atrelada ao seu baixo custo operacional (MACHADO *et al*., 2017). As *wetlands* construídas ou sistemas alagados construídos, são sistemas onde o resíduo liquido a ser tratado é disposto no leito pela “zona de entrada” até atingir a “zona principal” escoando, verticalmente e lentamente, pelo material filtrante até atingia a zona oposta, sendo denominada como “zona de saída” imitam os processos de purificação de águas em zonas úmidas naturais (VON SPERLING SEZERINO, 2018). No melhor cenário é utilizando plantas aquáticas, substratos e a atividade microbiológica como aliados na remoção dos poluentes, baseando se na combinação dos processos físicos, químicos e biológicos, como sedimentação, filtração, adsorção e biodegradação (BRIX, 1997).

Para melhorar o desempenho das *wetland* é importante a escolha correta do uso das macrófitas, um grupo de plantas que auxiliam na remoção de poluentes. A função dessas plantas além de fornecer oxigênio melhorando a atividade microbiológica, elas atuam na absorção direta dos nutrientes nitrogênio e fósforo, criando condições ideais para a precipitação e sedimentação dos sólidos suspensos (UFSC, 2019). Algumas das espécies mais utilizadas ao redor do mundo são: *Azolla spp* (flutuante), *Juncus spp* (emergente), *Ceratophyllum spp* (submersa) e *Heliconia psittacorum* (ornamental), por apresentarem capacidade de adaptação a diferentes condições além de resultarem em uma boa eficiência na remoção dos poluentes (NORTE, ZANELLA e ALVES, 2015). Além disso é importante o cuidado com a escolha do substrato utilizado (como cascalho, areia ou solo) para gerar a interação perfeita entre o substrato, as plantas e a microbiota, obtendo um melhor resultado na remoção dos poluentes (SILVA *et al.,* 2022).

Contudo, apesar do avanço da tecnologia das *wetlands* construídas, ainda há questionamentos relacionados à otimização do sistema, principalmente na combinação das diferentes espécies de macrófitas e a eficiência de remoção. A escolha inadequada de plantas pode prejudicar o desempenho do sistema quando parte dos poluentes não são eficientemente removidos, ou quando a capacidade de tratamento do sistema é rapidamente saturada. Contudo, pesquisas envolvendo o desempenho de diferentes macrófitas ainda é incipiente, principalmente no que diz respeito ao tratamento real de efluentes oriundos de suinocultura, por isso o objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho de diferentes espécies de macrófitas na remoção de sólidos suspensos, turbidez e demanda bioquímica de oxigênio, parâmetros que são críticos para a qualidade dos efluentes tratados.

2. METODOLOGIA

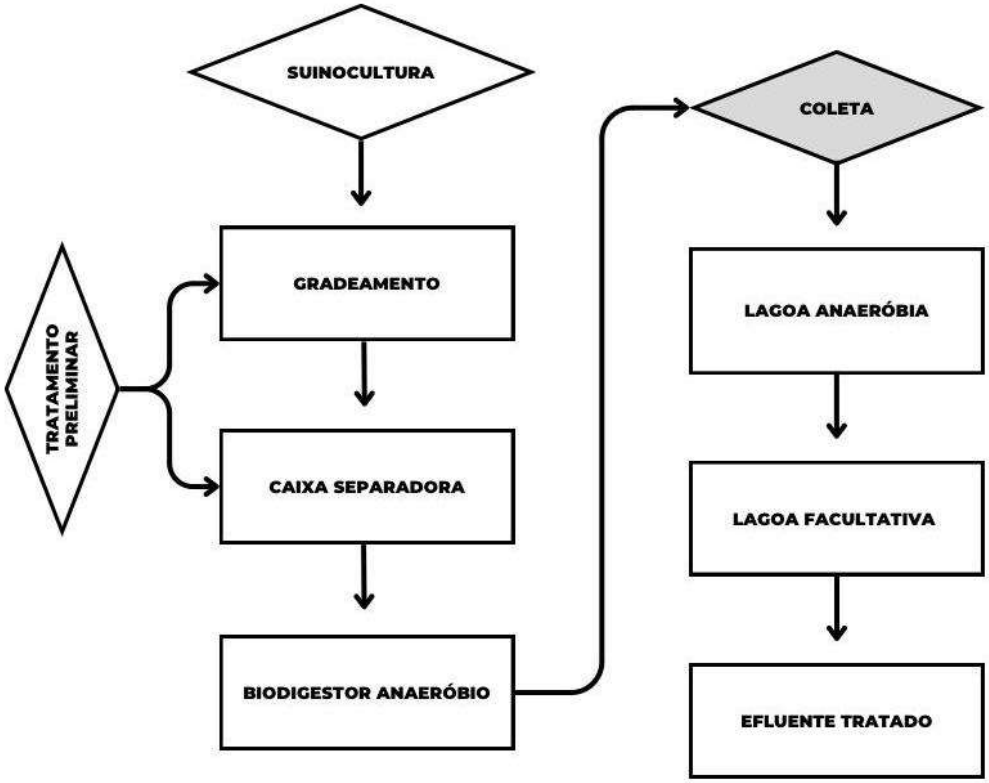
O presente estudo foi desenvolvido na Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), *campus* de Irati-PR, no departamento de Engenharia Ambiental, local onde o sistema *wetlands* foi implantado. As análises laboratoriais com fins de monitoramento do sistema foram realizadas nos laboratórios do mesmo departamento.

2.1 EFLUENTE UTILIZADO NA PESQUISA

O efluente analisado neste estudo foi coletado de uma instalação de suinocultura localizada no município de Irati, no estado do Paraná, Brasil. Esta instalação é voltada para a criação e reprodução de suínos, abrigando animais de diferentes portes, desde pequenos até grandes. O efluente é gerado nas baias a partir dos resíduos fisiológicos dos suínos, como fezes e urina, além da água utilizada na lavagem das mesmas.

A coleta do efluente foi realizada após um tratamento preliminar, que incluiu um sistema de gradeamento para a remoção de sólidos maiores e três caixas separadoras para a retenção de sólidos e gorduras, seguido de um biodigestor anaeróbio para a decomposição da matéria orgânica. A escolha do ponto de coleta foi determinada pela necessidade de pré-tratamento do efluente, uma vez que os sistemas de *wetlands* não são adequados para o tratamento de efluentes com altas concentrações de sólidos e material orgânico. Na Figura 1 está apresentado um fluxograma do processo de tratamento do efluente e o local de realização da coleta na suinocultura.

Figura 1 – Fluxograma do tratamento do efluente da suinocultura e o respectivo ponto de coleta adotado.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Após a realização da coleta, o efluente foi caracterizado mediante as metodologias dispostas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017, avaliando os parâmetros: turbidez (2130B), cor aparente e verdadeira (2120B), sólidos totais (2540B) e sólidos suspensos totais (2540 DE).

2.2 SISTEMA WETLANDS UTILIZADO

O sistema de *wetlands* utilizado no presente estudo consistiu em três unidades independentes, cada uma delas composta por um tanque com volume total de 100 litros e volume útil de 47 litros. Os tanques foram preenchidos com duas camadas, sendo de brita nº 1 e areia, em uma proporção de 1:1, o que resultou em uma porosidade de 45% no leito filtrante. O tempo de detenção hidráulica (TDH) estabelecido foi de 24 horas, com uma vazão de 23 litros por dia. O sistema operou em modo de fluxo em batelada: após cada ciclo de 24 horas, o tanque era completamente esvaziado e, em seguida, preenchido novamente, repetindo-se esse processo durante 5 dias consecutivos. Esse procedimento

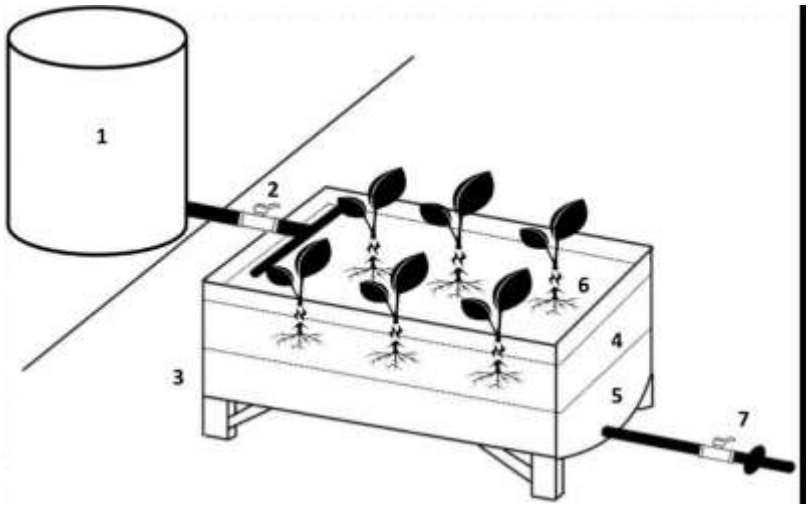
permitiu a obtenção de uma amostra representativa, devido às cinco repetições realizadas ao longo do experimento.

As três unidades independentes foram divididas da seguinte maneira:

- Leito 1: Leito filtrante de pedra brita, areia e macrófita *Canna indica* (biri)
- Leito 2: Leito filtrante de pedra brita, areia e macrófita *Juncus effusus* (junco)
- Leito 3: Apenas o leito filtrante contendo pedra brita e areia (controle)

Nos leitos 1 e 2, que continham macrófitas, foram plantadas 6 mudas de cada uma das espécies selecionadas, com espaçamento de 20x30 cm entre as plantas. A escolha dessas espécies foi baseada em sua estética visual atrativa, comumente utilizada em paisagismo, além de sua capacidade de tolerar ambientes com alta presença de água, como solos saturados e/ou alagados. As mudas utilizadas no experimento foram adquiridas de uma floricultura local. A representação esquemática do sistema *wetlands* utilizado está apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do sistema *wetlands* utilizado no tratamento do efluente da suinocultura.



**1: reservatório de efluente; 2: tubulação de entrada e registro; 3: estrutura do leito; 4: material filtrante areia; 5: material filtrante brita Nº1; 6: macrófitas; 7: tubulação de saída e registro.*

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Antes do início da coleta de dados, o sistema foi submetido a um período de aclimatação de 30 dias, durante o qual as unidades foram preenchidas com uma diluição de efluente na proporção de 1:2. Em seguida, o sistema foi mantido por mais 30 dias com efluente *in natura* para assegurar uma melhor

estabilização das macrófitas. O leito 3, que não continha plantas, também foi submetido ao mesmo processo de aclimatação.

Após esse período, amostras do efluente tratado foram coletadas diariamente de cada um dos leitos durante o esvaziamento. As amostras foram analisadas quanto à cor aparente, cor verdadeira, turbidez, sólidos totais e sólidos suspensos totais. Além disso, amostras do efluente *in natura*, sem qualquer tratamento, foram analisadas para comparação e monitoramento das eficiências de remoção proporcionadas pelos diferentes tratamentos. Cabe destacar que durante a operação do sistema não houve evento pluviométrico na região, portanto, não precisando considerar a diluição das amostras de efluente.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para avaliar os resultados dos experimentos, foi realizada uma análise estatística utilizando o software STATISTICA 7, em sua versão *Free Trial*. Primeiramente, foi aplicado o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade dos dados. Em seguida, uma análise de variância (ANOVA) foi conduzida para comparar as médias dos diferentes tratamentos, adotando um nível de significância de 95%. Caso houvesse diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos, o teste de Tukey HSD foi utilizado para identificar quais tratamentos diferiam entre si.

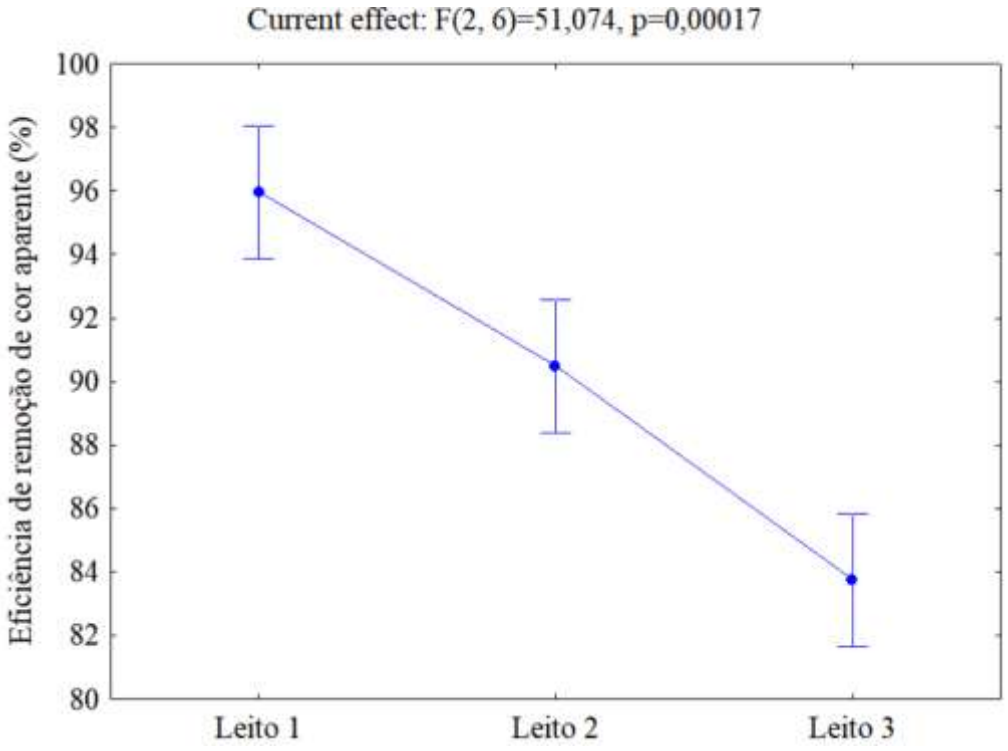
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 AVALIAÇÃO NA REMOÇÃO DE COR

Com os efluentes coletados durante a execução do experimento foi possível desenvolver as análises físicas para avaliação da eficiência do sistema.

Para a avaliação da remoção de cor foi realizada PROCESSO e através da estatística foi possível desenvolver o gráfico apresentado na figura 3.

Figura 3 – Avaliação da eficiência média de remoção de cor aparente do efluente da suinocultura nos respectivos tratamentos adotados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

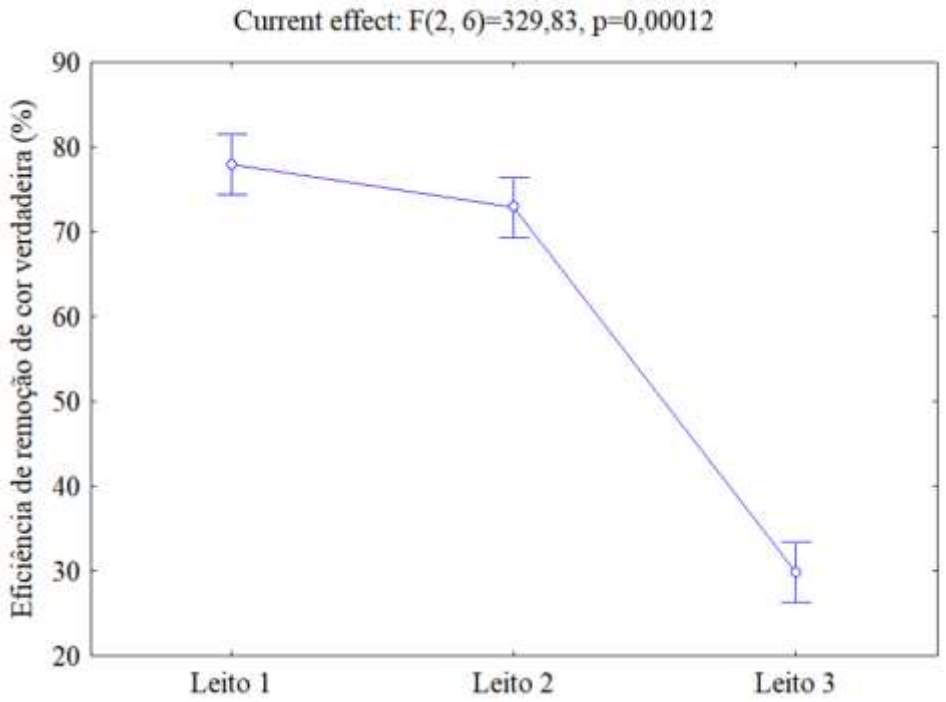
Através da Figura 3, observa-se que o leito 1 (biri) apresentou a melhor eficiência na remoção de cor aparente, seguida pelos leitos 2 e 3, respectivamente. O valor de eficiência média obtido para o leito 1 foi de 96±1,88%, leito 2 90,4±1,02% e leito 3 84±1,97%. Indicando assim, que a presença de macrófitas influenciam de forma significativa ($p < 0,05$) na remoção da cor aparente. Vieira *et al.* (2020) utilizando *wetlands* como tratamento secundário, encontraram em seus resultados que o sistema contribuiu na remoção da cor aparente em aproximadamente 55,1 e 56,6%, porém, estatisticamente não ocorreu diferenças significativas.

Oliveira e Costanzi (2014) também avaliaram a remoção de cor aparente um sistema de *wetland* contruído, em seus resultados a entrada de água cinza para o parâmetro cor aparente foi de 309,25, após a análise na saída do sistema, foi constatado valor de 19,67, indicando assim a eficiência na remoção desse parâmetro após a utilização do sistema de *wetland*.

Já a Figura 4 apresenta a avaliação da eficiência de remoção de cor verdadeira no efluente da suinocultura utilizando três diferentes leitos de tratamento e a partir da análise estatística é possível

indicar que há uma diferença significativa em pelo menos uma das médias dos tratamentos, conforme indicado pelo $p < 0,05$.

Figura 4 – Avaliação da eficiência média de remoção de cor verdadeira do efluente da suinocultura nos respectivos tratamentos adotados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Para a eficiência da remoção da cor verdadeira, os leitos 1 e 2 apresentam-se estaisticamente iguais ($p > 0.05$), mas uma das médias desses leitos diferem do leito 3. A eficiência média de remoção deste parâmetro do leito 1, 2 e 3 foram 77±6,55%, 73±6,44% e 30±5,1%, respectivamente. Os leitos 1 e 2 apresentaram eficiência na remoção da cor verdadeira acima de 70%, indicando ótima influência pela contribuição das macófitas. Kurpel (2021) utilizando a macrófita Syngonium podophyllum em duas bateladas encontrou em seus resultados média de remoção de 60% para a variável cor verdadeira. Tais resultados evidenciaram a grande importância das macrófitas na remoção de poluentes que contribuem na coloração desses efluentes. Nas condições testadas, os resultados foram superiores aos encontrados pelos autores, indicando que outras espécies podem apresentar diferentes contribuições na remoção desse contaminante.

Esse resultado positivo de remoção está vinculado aos processos de adsorção e absorção realizado pelas raízes das plantas presentes no sitema, as quais atuam como um sistema de filtração natural,

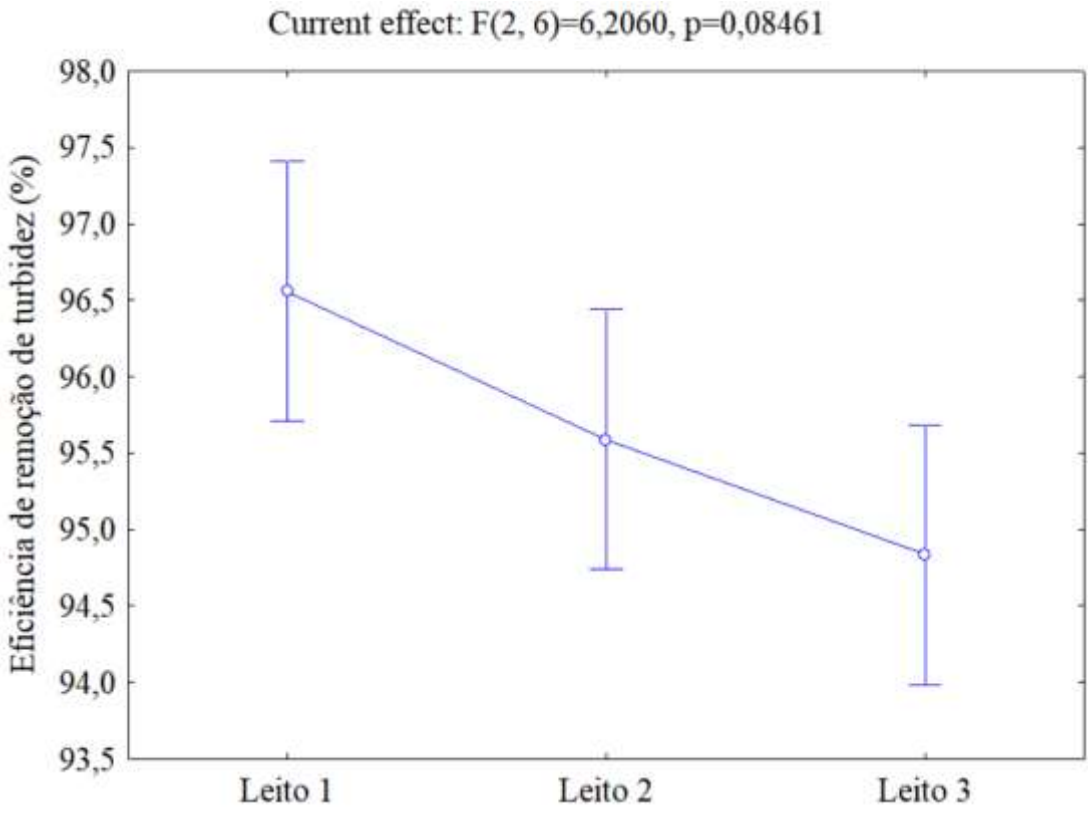
onde os compostos dissolvidos são adsorvidos ou absorvido, resultado no conhecido processo de fitorremediação (ROCK et al., 2000).

A presença desse processo no sistema através da remoção da cor verdadeira também atua na remoção de compostos dissolvidos, como contaminantes orgânicos e inorgânicos, nutrientes e metais, contribuindo positivamente para a melhoria da qualidade do efluente (PIRES et al., 2003).

3.2 AVALIAÇÃO NA REMOÇÃO DE TURBIDEZ

A Figura 5 apresenta a eficiência média de remoção de turbidez no efluente da suinocultura, considerando os três tratamentos aplicados nos leitos 1, 2 e 3.

Figura 5 – Avaliação da eficiência média de remoção de turbidez do efluente da suinocultura nos respectivos tratamentos adotados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Para a turbidez, os leitos 1 e 2 apresentaram maior eficiência de remoção quando comparados ao leito 3, porém, para essa variável, não ocorreu diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$). Quando avaliado a eficiência média de remoção de turbidez na presença do leito 1, o valor obtido foi de 96,65±0,7%, do leito 2 de 95,6±0,6% e leito 3 94,85±0,65%.

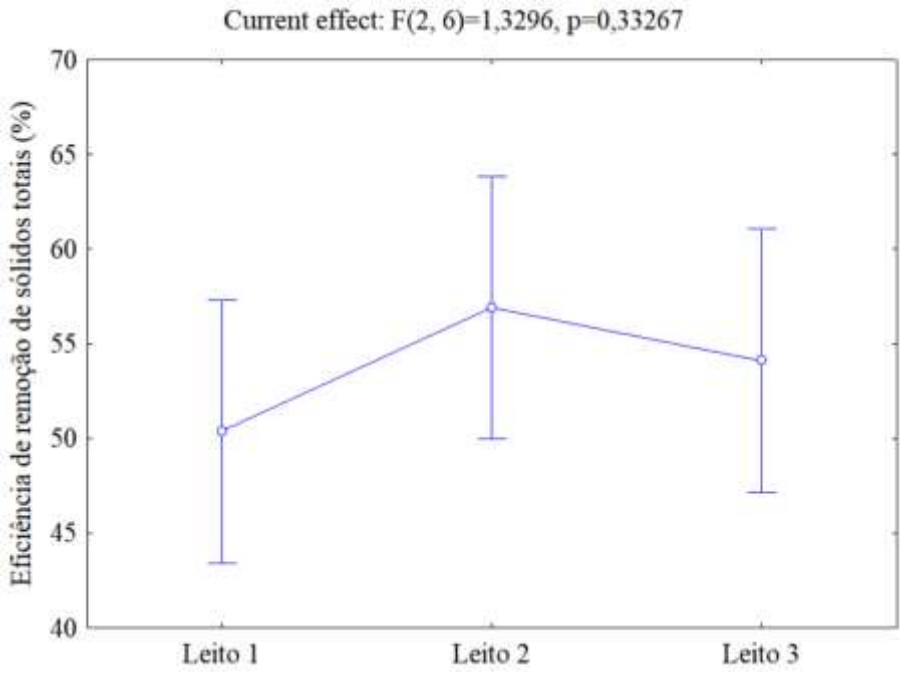
Vieira *et al*. (2020) encontraram redução média acima de 69% no parâmetro de turbidez, utilizando o sistema de *wetlands*. Kurpel (2021) encontrou uma média de eficiência de remoção para a turbidez de aproximadamente 35%, utilizando a macrófita junco (*Juncus effusus*).

Nagamati, Santos e Mendes (2018) utilizando a macrófita taboa (*Typha latifólia L*.) em um sistema de *wetland* de fluxo subsuperficial ascendente, em seus resultados encontraram média de eficiência da remoção de turbidez de aproximadamente 74% para três coletas, 1, 17 e 31 dias no sistema.

3.3 AVALIAÇÃO NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS

A Figura 6 apresenta os resultados da eficiência de remoção dos sólidos totais para os três leitos avaliados.

Figura 6 – Avaliação da eficiência média de remoção de sólidos totais do efluente da suinocultura nos respectivos tratamentos adotados.



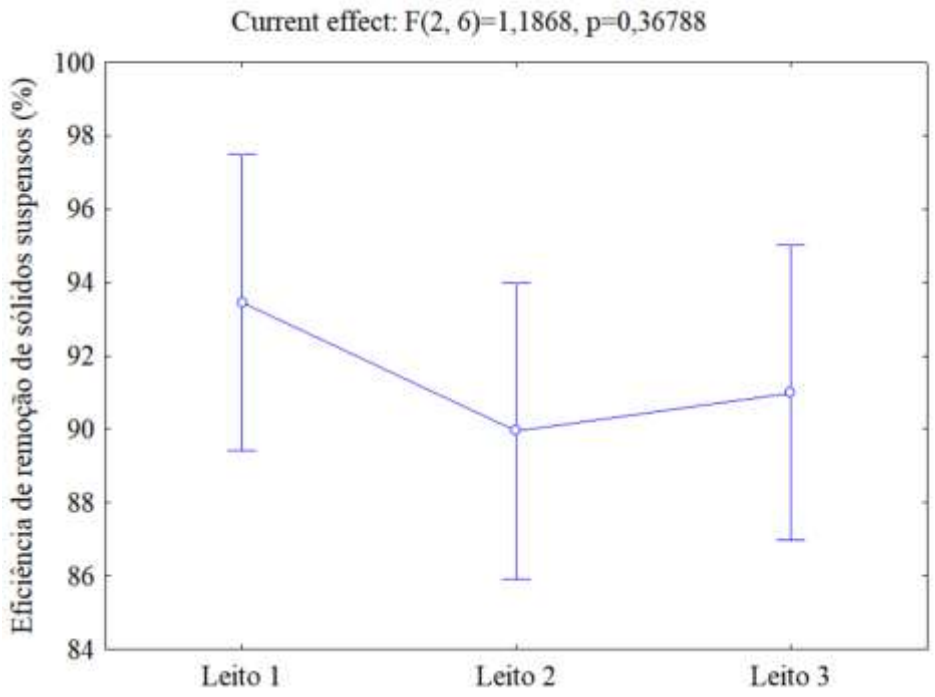
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

Com base nos dados apresentados sobre a remoção de sólidos totais, foi constatado que a presença de macrófitas não teve influência significativa na remoção desse parâmetro. As análises estatísticas indicaram que não houve diferença significativa entre as eficiências médias de remoção nos diferentes tratamentos ($p > 0,05$). As eficiências médias de remoção observadas foram de 50,1% no leito 1, 57,5%

no leito 2 e 54,5% no leito 3. Rodrigues *et al.* (2021) utilizaram a macrófita campim vetiver (*Chrysopogon zizanioide*) em um sistema de *wetland* com fluxo horizontal subsuperficial, para o parâmetro sólidos totais, o sistema apresentou eficiência de remoção de aproximadamente 32%.

A avaliação da eficiência de remoção dos sólidos suspensos utilizando o sistema de wetland está representada pela Figura 7.

Figura 7 – Avaliação da eficiência média de remoção de sólidos suspensos do efluente da suinocultura nos respectivos tratamentos adotados.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

De maneira análoga à remoção de sólidos totais no efluente da suinocultura, os resultados de eficiência na remoção de sólidos suspensos totais indicaram, por meio de análises estatísticas, que não houve diferença significativa entre as eficiências médias de remoção deste parâmetro (p-valor > 0,05). Os dados obtidos sugerem que o principal mecanismo responsável pela remoção das frações sólida e coloidal foi o leito filtrante composto por brita e areia, presente em todos os três tratamentos avaliados. A presença de macrófitas não demonstrou influência significativa nesse processo. As eficiências médias de remoção observadas para os leitos 1, 2 e 3 foram de 93,5%, 90,1% e 91,0%, respectivamente. Cabe destacar que a remoção para tal parâmetro foi elevada, em todos os tratamentos avaliados.

Mannarino *et al*. (2006) avaliaram a *wetland* de fluxo sub-superficial utilizando a macrófita taboa para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário, o sistema apresentou eficiência de remoção de 94,3% de sólidos suspensos totais. Calijuri *et al*. (2009) também avaliaram a remoção de sólidos suspensos totais em *wetlands* de fluxo horizontal, encontraram em seus resultados remoção média de 70% para esse parâmetro.

Oliveira e Costanzi (2014) analisaram sistema de wetland de fluxo subsuperficial horizontal, encontraram remoção de sólidos totais de 552,00 na entrada do sistema para 299,00 na saída. Já para o parâmetro de sólidos suspensos, foi contatada remoção de 36,00 para 6,00, após o tratamento por *wetland*. Sousa *et al.,* 2004, citam a importância de um sistema de *wetland* bem construído constituído de plantas aquáticas e substratos como areia e cascalho resultando em uma difusão de biofilme por reunir diversos microrganismos responsáveis pelo tratamento do efluente por meios biológicos, físicos e químicos. Segundo Brota (2018) a partir do desenvolvimento das macrófitas, ocorre a redução da velocidade de carregamento de partículas do sistema, diminuindo assim as cargas poluentes.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios remanescentes dos teores e concentrações dos parâmetros avaliados após os tratamentos propostos.

Parâmetros	Bruto	Leito 1	Leito 2	Leito 3
Cor aparente (uC)	4050,5±100,5	162,2±11,05	388,8±14,87	648,08±17,88
Cor verdadeira (uC)	841,2±30,85	193,47±8,64	227,12±	588,8±21,10
Turbidez (NTU)	847,13±19,65	28,37±3,89	37,27±2,91	46,62±3,22
Sólidos totais (g/L)	1,98±0,37	0,98±0,08	0,84±0,1	0,90±0,07
Sólidos suspensos totais (g/L)	0,98±0,12	0,06±0,012	0,09±0,01	0,08±0,011

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, observa-se uma redução expressiva nos teores e concentrações de todos os parâmetros analisados, indicando uma diminuição significativa no potencial poluente do efluente oriundo da suinocultura devido ao tratamento proposto.

4. CONCLUSÕES

Os sistemas *wetlands* apresentaram desempenho satisfatório na remoção dos poluentes nos leitos 1 e 2, atingindo eficiência média de cor aparente acima de 90%, cor verdadeira acima de 70% e turbidez acima de 95%.

Quando os leitos 1 e 2 são comparados ao controle (leito 3), a presença das macrófitas contribuíram de maneira significativa para as variáveis turbidez, cor verdadeira e aparente, entretanto, em ralação às macrófitas, apenas o leito 1 apresentou eficiência estatisticamente superior para a variável cor aparente. Os demais leitos apresentaram eficiências semelhantes.

Para as variáveis sólidos totais e sólidos suspensos totais, não foi observado contribuição de ambas as macrófitas na remoção destas variáveis, indicando que o principal mecanismo de remoção das frações destes suspensas e coloidais foi apenas a filtração. A operação dos *wetlands* com o TDH de 24 horas, resultaram em eficiências satisfatórias no tratamento de efluentes oriundo de suinocultura a partir da contribuição das macrófitas na remoção dos poluentes alvos deste estudo.

5. REFERÊNCIAS

BRIX, H. Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands? Water Science and Technology. v. 35, n. 5, p. 11-17, 1997. DOI: 10.1016 / S0273-1223 (97) 00047-4

BROTA, G. A. Avaliação de um sistema piloto de wetlands construidos para a remoção de compostos emergentes. 209 f. Tese (em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, 2018.

CALIJURI M. L.; BASTOS R. K. X.; MAGALHÃES T. B.; CAPELETE B. C.; DIAS E. H. O.; Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 3, p. 421–430, https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300016

KURPEL, K. Pós tratamento de efluentes da indústria de panificação e confeitaria por wetlands construídas considerando diferentes tempos de detenção hidráulica. 103 f. Mestrado (em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2021.

MACHADO, A. I.; BERETTA, M.; FRAGOSO, R.; DUARTE, E. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. Journal of Environmental Management, v. 187, p. 560-570, 2017. MIELE, M.; SANDI, A. J. Panorama da Suinocultura. Anuário 2024 da Suinocultura Industrial, Itu, ed. 315, ano 45, n. 06, p. 20-28, 2023.

MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; CAMPOS, J. C.; RITTER, E. Wetlands para tratamento de lixiviados de aterros sanitários: experiências no aterro sanitário de Piraí e no aterro metropolitano de Gramacho (RJ). Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 11, n. 2, p. 108–112, 2006. https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000200002

NAGAMATI, F. L.; SANTOS, J. J. F.; MENDES, T. A. Execução de wetland construído para tratamento de efluente doméstico em propriedade rural. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 7, n. 1, p. 418-446, 2018. http:// http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e12018418-446

NORTE, A. C. C., ZANELLA, L., ALVEZ, W. C. Espécies vegetais com potencial ornamental para utilização em wetlands construídos. 2º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos, Curitiba-Pr, 2015.

OLIVEIRA, P. A. V. SUINOCULTURA E IMPACTO NO SOLO DAÍ PRÀ. [s.l.] OLIVEIRA, 1997. Disponível em: <https://www.asemg.com.br/site/wp-content/uploads/2017/12/DEJETOS-SU%C3%8DNOS-E-IMPACTO-AMBIENTAL1.pdf>. Acesso em: 02 de setembro de 2024

PIRES, F. R., SOUZA, C. M., SILVA, A. A., PROCÓPIO, S. O., FERREIRA, L. R. PIRES, Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. Planta Daninha, v. 21, n. 2, p. 335–341, ago. 2003.

ROCK S.B.; PIVETZ K.; MADALINSKI, N.A.; WILSON T. Introduction to phytoremediation. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-99/107 (NTIS PB2000-106690), 2000.

RODRIGUES, E. B.; SCHLEGEL, R. M.; ZEFERINO, C. L. S.; LACH, C. E.; ROSA, O.; KOSLOWSKI, L. A. D. Avaliação de um Sistema Wetlands construído em uma propriedade rural no município de Ibirama (SC). Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 10, p. 305-313, 2021. http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0025

SILVA, J. R. R.; RIBEIRO, A. C.; SANTOS, L. F. O.; BERSANETTE, G. D.; CONTE, H.. Wetlands construídas para tratamento de efluentes industriais: revisão. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.4, p.232-248, 2022. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179- 6858.2022.004.0020

SOUSA, J. T., VAN HAANDEL, A., LIMA, E. P. C., HENRIQUE, I. N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 9, n. 4, p. 285–290, dez. 2004.

OLIVEIRA, D. M. C.; COSTANZI, R. N. Wetlands construídos para o tratamento de água cinza. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Belo Horizonte – MG, 2014.

UFSC. Aplicabilidade da ecotecnologia dos wetlands construídos no tratamento de esgoto de forma descentralizada nos campi da UFSC. Wetlands Brasil, 2019. Cartilha. Disponível em: https://gesad.ufsc.br/files/2019/09/CARTILHA-Wetlands-Constru%C3%ADdos-GESAD-2020.pdf. Acesso em: 02 de setembro de 2024.

VIEIRA, B. H. R.; PITALUGA, D. P. S.; SILVEIRA, J. R.; NEVES, J. P.; SANTOS, M. S. C. Tratamento de efluentes sépticos em wetlands construídos de uma unidade universitária. Revista Tecnia, v. 5, n. 1, p. 134–150, 2020.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Boletim Wetlands Brasil, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359- 0548. Disponível em: https://gesad.ufsc.br/boletins-tecnico-informativos/ >.

Capítulo 7

10.37423/240909320

HABITAÇÃO NO CEARÁ: PERFIL DE OCUPAÇÃO E CONDIÇÃO DOS IMÓVEIS ANÁLISE DESCRITIVA DE DADOS OFICIAIS.

José de Souza Alencar Junior — *Centro Universitário Paraíso*

Ana Milena Silva Feitosa — *Centro Universitário Paraíso*

Bruno Vinícius de Menezes Barros — *Universidade Federal da Paraíba*

Cicero Cezar Ferreira Dantas — *Universidade Federal do Ceará*

Raquel Colares Abreu — *Universidade Federal do Pará*

INTRODUÇÃO

Em acordo com pesquisa realizada no ano de 2018 pela Secretaria Nacional de Habitação, do Ministério das Cidades, a demanda por novas habitações no Ceará pode chegar a 987 mil unidades até 2040. O número de moradias deve passar dos atuais 2,9 milhões para 3,9 milhões, em 2040, principalmente pela tendência dos cidadãos a residirem sozinhos.

Observa-se que o estado do Ceará sofre com um déficit habitacional de cerca de 250 mil unidades residenciais e as famílias que são mais afetadas e menos favorecidas estão situadas nas zonas rurais do estado (IBGE, 2012).

Diante da relevância econômica e social do tema para o estado do Ceará, o presente trabalho objetivou realizar uma pesquisa quantitativa descritiva para entender e avaliar o crescimento habitacional e a evolução de renda da população do Ceará, a partir de dados secundários produzidos pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE).

Aferiu-se as médias anuais para os números de tipo de domicílio de casas, apartamentos e cômodos no período analisado são iguais a 2.461.966, 145.820 e 2.504, com desvios-padrão de 162.318, 24.507 e 1.070, respectivamente. Em relação ao tipo de ocupação as médias anuais para tipo próprio, alugado, cedido e outro forão, 1.926.214, 465.990, 232.124 e 11.308, com desvio-padrão 117.653, 33.132, 10.151 e 2.926, respectivamente. As médias anuais para os números foi de 2.625.130 e desvio-padrão de 149.023. As médias anuais para os números de classes de rendimento de até um salário, mais de um a dois salários, mais de dois a três, mais de três a cinco salários, mais de cinco a dez salários, mais de dez a vinte salários, mais de vinte salários, sem rendimento e sem declação são iguais a 660.640, 791.625, 474.329, 345.383, 185.609, 63.747, 24.507, 29.934 e 59.864 com desvios-padrão iguais a 75.732, 52.452, 23.187, 16.305, 7.091, 7.198, 5.995, 17.342, 22.710.

MATERIAIS E MÉTODOS

A produção deste trabalho teve início com um estudo bibliográfico sobre habitação no Ceará. Para Marconi & Lakatos (1996), a finalidade do estudo bibliográfico é deixar o pesquisador em contato direto com o que foi escrito sobre determinado tema, permitindo ao cientista o suporte na análise de suas pesquisas ou contextualização de suas informações.

Feitos a seleção e o estudo bibliográfico, partiu-se para a definição do método de pesquisa. Utilizou-se aqui o método quantitativo. Segundo Godoy (1995), nesse método há clara preocupação com a medição objetiva e a quantificação dos resultados.

Nesta pesquisa foram usados dados secundários relacionados a habitação, ocupação e classes de rendimentos no Ceará. Os dados foram retirados dos Anuários Estatísticos do Ceará dos anos 2010 a 2016, produzidos pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). De acordo com Mattar (2008), as vantagens da utilização de dados secundários são a economia de tempo, dinheiro e esforços.

Os dados coletados nesta pesquisa se dividem nas categorias: habitação, perfil de ocupação e condição dos imóveis. Para cada uma dessas foram obtidos dados para variáveis tipos de domicílios, condições de ocupação, iluminação elétrica e renda populacinal.

Para tipos de domicílios foram levantadas, anualmente, o número de casas, de apartamentos e de cômodos. Quanto aos dados relacionados a condições de ocupação, foram levantadas quantidades do tipo próprio, alugado, cedido e outro, também por ano. Em relação à renda populacional, foram analisados rendas até um salário, mais de um a dois, mais de dois a três, mais de cinco a dez e mais de dez a vinte salários mínimos, além de sem rendimento e sem declaração. Para iluminação elétrica foram analisados o número de residências que utilizavam energia elétrica.

Feita a coleta e separação inicial dos dados, os mesmos foram tabulados conforme a necessidade de pesquisa, bem como utilizados para a construção de gráficos auxiliares às análises. Procedeu-se, então, com o tratamento e com a análise estatística. De acordo com Merriam (1998), o processo de coleta e análise dos dados é recursivo e dinâmico, além de ser muito intuitivo. Já o tratamento, leva o pesquisador à elucubração sobre os dados, produzindo o conflito entre teoria anterior e a análise atual.

A análise estatística, enfim, foi realizada em duas etapas: descrição dos dados e a avaliação das generalizações obtidas com os dados por meio das medidas estatísticas. Essa análise foi feita com o auxílio do *software Microsoft® Office Excel.*

REFERENCIAL TEÓRICO

Em âmbito nacional, futuramente espera-se um Brasil diferente quanto às questões de moradias. Até 2040 haverá redução do compartilhamento de domicílios e mais cidadãos vivendo sozinhos. Por outro lado, a própria residência vai se tornar cada vez mais um local onde mais brasileiros irão trabalhar.

Projeta-se também que a busca por aluguéis tende a crescer proporcionalmente em relação à compra da casa própria. Para acompanhar essa projeção, o Brasil ainda precisa construir cerca de 30 milhões de moradias para equacionar a demanda, uma exigência anual de quase um milhão de domicílios (Ministério das Cidades, 2018).

Vale destacar que essa demanda por moradias guia as políticas públicas e também a forma como o setor privado precisa se organizar daqui por diante para suprir as principais necessidades dos brasileiros em relação ao lugar onde irão morar. Além disso, a falta de adequação habitacional, resultado de moradias sem mínimas condições de habitabilidade, também necessita ser combatida, em conjunto com ações complexas, como a busca pelo saneamento. Isso é o mínimo requerido para a produção de um país mais justo (Ministério das Cidades, 2018).

Na busca por uma definição formal, a casa (habitação unifamiliar) é vista como o produto humano que melhor representa os valores culturais, econômicos e sociais de uma sociedade. Ela exprime até a individualidade de cada proprietário, família ou pessoa nela residente. Tem como função principal o abrigo, e constitui para seus usuários um envoltório seletivo, moderador e corretivo das variações climáticas (LEMOS, 1996).

Nesse sentido, as abordagens sobre a questão habitacional agrega, logicamente, diferentes focos, como: apreender as contradições presentes no acesso e nas formas de morar nos diferentes espaços, pensar e criar a estética das habitações e a relação delas com o espaço intraurbano, entender como historicamente as diversas sociedades realizam seu morar, compreender as relações existentes entre as formas de morar com as condições de saúde e entender a atuação, entre outras (ASSIS, 2013).

Voltando-se para o cenário cearense, segundo dados do governo do estado do Ceará, o estado segue a demanda por habitação observada no país, e até de maneira mais acentuada, já que o número crescente de domicílios no estado supera índices do Nordeste e do Brasil (IPECE, 2020).

Para entender melhor essa demanda por habitação, destaca-se que os componentes do déficit habitacional são identificadas como: domicílios precários (improvisados e rústicos, inservíveis ou inadequados para a moradia ou localizados em áreas de risco), coabitação familiar (famílias conviventes em um mesmo domicílio, embora tendo intenção de constituir domicílio exclusivo), ônus excessivo (famílias com renda de até três salários mínimos despendendo valor igual ou superior a 30% da renda familiar com aluguel) e adensamento excessivo de domicílios alugados (número médio de moradores por dormitório acima de três). (RIBEIRO;VIANA;AZEVEDO,2014)

Essa demanada por habitação pode promover outras necessidades. De acordo com Rubin e Bofe (2014), o crescimento urbano aumenta a exigência de infraestrutura, afetando o funcionamento das cidades e a qualidade de vida da população. O problema habitacional e as condições não adequadas de moradia da população de baixa renda também são problemas gerados pela veloz urbanização.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da análise dos dados cearenses, no período de 2010 a 2016, houve aumento de 23,59 por cento nos números de domicílios do tipo casas, diminuição de 32,46 por cento para domicílios do tipo apartamentos e diminuição de 47,53 por cento para domicílios do tipo cômodos. Em valores totais, representaram crescimento de 2,172 milhão para 2,684 milhão de casas e 215 mil para 167 mil apartamentos e de 4,7 mil para 2,5 mil comôdos. Analisando ano a ano, a maior variação foi para casas foi em 2010 a 2011, com 11,13 por cento. As médias anuais para os números de tipo de domicílio de casas, apartamentos e cômodos no período analisado são iguais a 2.461.966, 145.820 e 2.504, com desvios-padrão de 162.318, 24.507 e 1.070, respectivamente. A análise dos quartis mostra que no ano de 2014 a quantidade de casas (2.598.258) foi maior que aproximadamente 50% dos dados analisados. A mesma análise pode ser feita para apartamentos no an de 2013 (165.788) e cômodo no ano de 2011 (3.278).

Em relação às condições de ocupação da população, analisando dados de 2010 a 2016, observou-se que obteve crescimento em ocupações do tipo próprias, com 21,41 por cento, ocupação do tipo alugado com 17,58 por cento, já a ocupação do tipo cedido houve diminuição de 2,14 por cento e ocupação do tipo outro houve diminuição de 2,27 por cento, podendo ser visto como bons resultados, em relação ao tipo de ocupação da população, em que aumentou imóveis próprios e alugados e diminui os valores de imóveis cedidos. Em valores totais para ocupações próprias o aumento foi de 1,7 milhão para 2,1 milhão, alugadas foi de 415 mil para 489 mil, cedidos de 224 mil para 222 mil e outro de 13.682 mil para 13.371 mil. Observando de ano a ano, temos 3,98 por cento para ocupações próprias, 3,40 para ocupações alugadas e diminuição de 0,29 por cento para cedidos e outro com aumento de 9,06 por cento, analisadas entre 2010 e 2016. As médias anuais para tipo próprio, alugado, cedido e outro forão, 1.926.214, 465.990, 232.124 e 11.308, com desvio-padrão 117.653, 33.132, 10.151 e 2.926, respectivamente. A análise dos quartis mostra que no ano de 2013 a quantidade de ocupações do tipo próprio (1.931.375) foi maior que aproximadamente 50% dos dados analisados. A mesma análise pode ser feita para alugado também em 2013 (476.347), para cedido em 2012 (241.272) e para outros em 2009 (13.682).

Também foi analisado números de iluminação elétrica, o crescimento foi de 19,31 por cento entre os anos analisados, com variação média anual de 3,16 por cento e números totais de 2,3 milhão para 2,8 milhão. As médias anuais para os números foi de 2.625.130 e desvio-padrão de 149.023. Analisando os quartis, observou-se que o ano de 2014 foi maior que aproximadamente 50% dos dados analisados.

Analisando as classes de rendimento de 2010 a 2016, foi possível compreender que houve um aumento de 38,49 por cento nos números pessoas com renda de até um salário mínimo, 22,85 por cento na classe de mais de um a dois salários, 10,46 por cento na classe de mais de dois a três salários e 12,57 por cento entre mais de três a cinco salários mínimos. Em termos absolutos, representam um crescimento de aproximadamente 583 mil para 807 mil de até um salário mínimo, 697 mil para 857 mil de mais de um a dois salários, 443 mil para 489 mil de mais de dois a três salários e de 329 mil para 370 mil de mais de três a cinco salários mínimos.Analisando ano a ano, as maiores variações nos números de até um salário mínimo e mais de dois e três salários ocorreu de 2013 para 2014, de 14,59 por cento e 8,77 por cento, respectivamente. Para mais de um a dois salários, o melhor período foi de 2010 a 2011, com 9,76 por cento e para mais de três a cinco salários, com 8,69 por cento, foi entre 2011 e 2012. As médias anuais para os números de classes de rendimento de até um salário, mais de um a dois salários, mais de dois a três, mais de três a cinco salários, mais de cinco a dez salários, mais de dez a vinte salários, mais de vinte salários, sem rendimento e sem declação são iguais a 660.640, 791.625, 474.329, 345.383, 185.609, 63.747, 24.507, 29.934 e 59.864 com desvios-padrão iguais a 75.732, 52.452, 23.187, 16.305, 7.091, 7.198, 5.995, 17.342, 22.710. Analisando os quartis, observou-se que para até um salário mínimo, o ano de 2011 (635.899) foi maior que 50% dos dados analisados. A mesma análise pode ser feita para mais de um a dois salários no ano de 2013 (819.313), para mais de dois a três salários no ano de 2013 (474.035), para mais de três a cinco salários no ano de 2012 (353.978), mais de cinco a dez salários foi no ano de 2011 (185.437), mais de dez a vinte no ano de 2012 (72.092), mais de vinte em 2009 (28.722), classe sem rendimento no ano de 2011 (40.889) e classe sem declaração em 2012 (71.880).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da análise dos dados foi possível observar que ocorreu um avanço nas categorias analisadas com a evolução de renda da população, houve um crescimento no números de condições de ocupação do tipo próprio, alugado e uma diminuição nos números de imóveis cedidos, além de uma evolução nos números de casas e do aumento do consumo de energia elétrica. Diante disso, podemos notar que a

evolução de renda da população gera melhores condições de moradia e qualidade de vida. Com isso, evidencia-se a importância de desenvolver estratégias que visem melhorias de renda da população.

Por fim, anota-se que essas análises são imprescindíveis para expor de maneira mais real qual o impacto do aumento dos salários na economia do estado do Ceará.

Palavras-chave: Habitação no Ceará; Rendimento populacional, Condição dos Imóveis.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Carlos Josué. O Programa de Arrendamento Residencial - PAR: Os agentes e sua materialização no espaço Metropolitano de Fortaleza. 2013. 202 f. Centro de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2013. CD-ROM.

GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de Administração de Empresas. São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, mar./abr., 1995a.

Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). Anuário Estatístico do Ceará. IPECE, 2018. Disponível em: < https://www.ipece.ce.gov.br/anuario-estatistico-do-ceara/>. Acesso em: 10 de jan. de 2020.

LAKATOS, E. M. E MARCONI, M. A. Técnicas de pesquisa. 3 ed. São Paulo: Editora Atlas, 1996.

LEMOS, Carlos. História da casa brasileira. Repensando a história. São Paulo: Contexto, 1996. 83 p

MATTAR, N. F. Pesquisa de marketing. 4. ed. Edição Compacta. São Paulo: Atlas,

2008.

MERRIAM, S. B. Qualitative research and case study applications in education. São Francisco (CA): Jossey-Bass, 1998.

Ministério das Cidades. Demanda por futuras moradias: democracia, habitação e mercado. 1 ed. Niteroi: UFF, 2018.

RIBEIRO; V. A . Déficit habitacional municipal em Minas Gerais/Housing deficit in Minas Gerais' municipalities. Caderno de Geografia, v.25, n.43, 2015

RUBIN G., R., E BOLFE, S., A. O desenvolvimento da habitação social no Brasil. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 36 n. 2 mai-ago. 2014, p. 201–213.

Capítulo 8

10.37423/240909323

MATHEMATICAL MODELLING OF A FIXED BED ADSORBER: PROCESS SIMULATION

Jornandes Dias da Silva *Universidade de Pernambuco-UPE*

1. INTRODUCTION

Hydrogen sulfide (H_2S) is a toxic and highly corrosive gas that poses risks to human health and the environment. It contributes to acid rain formation and the greenhouse effect. Additionally, H_2S can damage equipment and oil pipelines. Consequently, levels of H_2S in heavy oil that exceed safety standards can lead to increased logistics and maintenance costs in the petrochemical industry. Given the importance of controlling H_2S levels, this research aims to study the adsorption process for H_2S removal from heavy oil in a fixed-bed reactor using a mathematical model.

Various problems in engineering, mathematical physics, theoretical physics, chemical physics, and theoretical biology are modelled by initial value and boundary value problems. Over the last three decades, numerous works have focused on developing more advanced and efficient methods for stiff problems. The situation becomes more complicated when stiffness is coupled with nonlinearity. Recently, the inverse Laplace transform method (ILTM) and the hybrid Laplace transform method (HLTM) have been used to solve these types of problems, both linear and nonlinear. The main advantage of these methods is their ability to solve equations without linearization (Silva and Abreu, 2012).

Many transform methods often require complicated techniques to address mathematical difficulties in nonlinear transient problems (Sheng et al., 2011). The inverse Laplace transform method (ILTM) has been used to solve boundary value problems (Jin et al., 2003), including mathematical models in slurry bubble systems. The Laplace transform is also well-suited for combination with other numerical techniques. Ahn et al. (2010) studied a hybrid method for solving the Black-Scholes equation. This hybrid method transforms the proposed mathematical model from the time domain into the spectrum domain, followed by the use of finite difference or finite element methods. Notably, this method does not consume significant computer time when applied to nonlinear equations (Chen et al., 2006).

The present chapter aims to apply the ILTM to solve the adsorption process of H_2S in a catalytic three-phase fixed-bed reactor with nanoporous catalytic particles. Additionally, the solving algorithm was validated using literature data.

2. MATHEMATICAL MODELLING

2.1 PROCESS DETAIL

The process studied in this work involves the chemical transport of H_2S in a catalytic three-phase fixed-bed reactor with stationary catalytic adsorbent (NaX). The adsorption dynamics of this process include the development of mobile H_2S (concurrent-downward) over the stationary adsorbent phase. A one-dimensional mathematical model has been developed to analyze the adsorption process of H_2S. The adsorbent pellets are spherical, with a diameter of 0.156 cm and nanopores of 0.748 nm.

2.2 GOVERNING EQUATIONS

The proposed mathematical model is described by a system of partial differential equations and is based on the following assumptions: (i) the system is isothermal; (ii) all flow rates are constant throughout the reactor; (iii) intraparticle diffusion resistance is considered; and (iv) there is no radial concentration gradient. Based on these assumptions, the axial mass balance equation for H_2S can be written as follows.

$$\frac{\partial C_{H_2S}(z,t)}{\partial t} + V_{sg}\frac{\partial C_{H_2S}(z,t)}{\partial z} = D_{ax}\frac{\partial^2 C_{H_2S}(z,t)}{\partial z^2} - \frac{k_s a_s}{\varepsilon_{ex}}\left[C_{H_2S}(z,t) - C_s(r,t)\big|_{r=R}\right] \quad (1)$$

The initial and boundary conditions for Equation (1) are as follows:

$$C_{H_2S}(z,t)\big|_{t=0} = C_{H_2S,0}; \text{for } 0 \le z \le L \quad (2)$$

$$\left.\frac{\partial C_{H_2S}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=0^+} = \frac{V_{sg}}{D_{ax}}\left[C_{H_2S}(z,t)\big|_{z=0^+} - C_{H_2S}(t)\right]; \text{ for } t \ge 0 \quad (3)$$

$$\left.\frac{\partial C_{H_2S}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=L} = 0 \text{ ; for } t \ge 0 \quad (4)$$

The mathematical model developed to describe the intraparticle diffusional mass transfer (IDMT) of H_2S in the adsorbent has been considered. It is important to note that IDMT involves two phenomena: micropore diffusion (the adsorbate first diffuses in the gas filling the nanopores and then is adsorbed) and surface diffusion (the adsorbate is first adsorbed then diffuses from one site to another). Based on these assumptions, the intraparticle diffusional mass balance of H_2S is given as:

$$\varepsilon_s\frac{\partial C_s(r,t)}{\partial t} = D_s\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^2\frac{\partial C_s(r,t)}{\partial r}\right] + \rho_s\frac{\partial q(r,t)}{\partial t} + \rho_s k_r q(r,t) \quad (5)$$

The initial and boundary conditions for Equation (5) are presented as:

$$C_S(r,t)\big|_{t=0} = 0 \text{ ; for } 0 \le r \le R \tag{6}$$

$$D_S \frac{\partial C_S(r,t)}{\partial r}\bigg|_{r=R} = k_S\left[C_{H_2S}(z,t) - C_S(r,t)\big|_{r=R}\right] \text{; for } t \ge 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial C_S(r,t)}{\partial r}\bigg|_{r=0} = 0 \text{ ; for } t \ge 0 \tag{8}$$

Reversible adsorption occurs at the sites (σ) within an adsorbent solid particle according to the first-step mechanism below.

$$H_2S + \sigma \xleftarrow{k_a} H_2S.\sigma \tag{9}$$

Based on this first-step mechanism, the adsorption rate of H_2S can be written as follows:

$$\frac{\partial q(r,t)}{\partial t} = k_a\left[C_S(r,t) - \frac{q(r,t)}{K}\right] - k_r q(r,t) \tag{10}$$

The initial condition for Eq. (10) has been described as follows:

$$q(r,t)\big|_{t=0} = 0 \text{ ; for } 0 \le r \le R \tag{11}$$

2.3. SOLUTION IN THE LAPLACE DOMAIN

Laplace transforms are powerful tools used primarily for solving differential equations. The principal difficulty in using them is finding their inverses. The mathematical model given here by PDEs (1) to (11) and their initial and boundary conditions were easily transformed using the Laplace transformation according to the transformed Eq. (12) as follows.

$$\overline{C}_i(z,s) = \int_0^\infty C_i(z,t)e^{-st}dt;\ \overline{C}_i(z,s) = \overline{C}_{H_2S}(z,s), \overline{C}_S(r,s) \text{ and } \overline{q}(r,s) \tag{12}$$

Eqs. (1) to (11) and their initial and boundary conditions were obtained in the Laplace domain using Eq. (12) as follows.

- Mass balance for H_2S (gas phase) in the Laplace domain:

$$\frac{d^2\overline{C}_{H_2S}(z,s)}{dz^2} - \alpha_1 \frac{d\overline{C}_{H_2S}(z,s)}{dz} - \alpha_2(s)\overline{C}_{H_2S}(z,s) + \alpha_3\overline{C}_S(R,s) = -\frac{C_{H_2S,0}}{sD_{ax}} \tag{13}$$

The initial and boundary conditions of H_2S in the Laplace domain:

$$\overline{C}_S(r,s)\big|_{s=0} = 0 \text{ ; for } 0 < r \le R \tag{18}$$

$$\left.\frac{d\bar{C}_S(r,s)}{dr}\right|_{r=R} = \frac{k_S}{D_S}\left[\bar{C}_f(z,s) - \bar{C}_S(r,s)\big|_{r=R}\right]; \text{ for } s \geq 0 \tag{19}$$

$$\left.\frac{d\bar{C}_S(r,s)}{dr}\right|_{r=0} = 0; \text{ for } s \geq 0 \tag{20}$$

The adsorption rate of H_2S in the Laplace domain:

$$\bar{q}(r,s) = \alpha_5(s)\bar{C}_S(r,s) \tag{21}$$

The initial condition in the Laplace domain for Eq. (21) is described as:

$$\bar{q}(r,s)\big|_{s=0} = 0; \text{ for } 0 \leq r \leq R \tag{22}$$

The coefficients [α_1, $\alpha_2(s)$, α_3, $\alpha_5(s)$ and $\beta_5(s)$] of Eq. (13), Eq. (17) and Eq. (21) are defined in the appendix (A). The general solution for the concentration of H_2S in the gas phase is:

$$\bar{C}_{H_2S}(z,s) = exp(\eta_1 z)\left\{\frac{\omega_3(s)}{\omega_2(s)}cosh\left[\eta_2(s)z\right] + \frac{\omega_3(s)}{\omega_4(s)}sinh\left[\eta_2(s)z\right]\right\} + \frac{C_{H_2s,0}}{\omega_1(s)sD_{ax}} \tag{23}$$

2.4 NUMERICAL INVERSION OF LAPLACE TRANSFORM

The numerical inversion of the Laplace transform was used to obtain the concentration of H_2S in the gas phase at the exit of the fixed-bed reactor. Using the trapezoidal rule, the approximation for the numerical inversion of Eq. (23) can be described as follows:

$$C_{H_2S(t)} \approx \frac{exp(\gamma t)}{T}\left\{\frac{\bar{C}_{H_2S(s_0)}}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} Re\left[\bar{C}_{H_2S(s_K)}\right]exp\left(\frac{ik\pi t}{T}\right)\right\} \tag{24}$$

Where,

$$S_k = \gamma + \frac{ik\pi}{T}; k = 0,1,2,\ldots.0 < t < 2T. \tag{25}$$

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

A mathematical model has been developed to analyze the behavior of H_2S within a catalytic three-phase fixed-bed reactor. Numerical experiments were conducted to study the concentration of H_2S at the exit of the fixed bed. The parameters used in the computational code are shown in Table 1, which presents the operating conditions and the properties of the gas and solid phases. This analysis is crucial for optimizing reactor performance and ensuring efficient removal of H_2S in industrial applications.

Table 1: Input values of operating conditions, properties of the gas and solid phases used in the simulation

Categories	Properties	Numerical Values
Operation Conditions	Operation temperature of the gas phase, Tg, K	298
	Operation pressure, p_{op}, bar	1.01
	Initial superficial velocity, $V_{sg,0,}$ m/s	(5.47-2.67) x10^{-2}
	Initial conc. of H_2S in the gaseous phase, $C_{H2S,0}$, mol/m^3	0.12
	Initial concentration of H_2S in the nanopores space of solid particles, $C_{H2S,0}$, mol/m^3	0.00
	Initial adsorbed concentration of H_2S on the solid particles, $q_{H2S,0}$, mol/m^3	0.00
	Reaction constant, k_r, 1/s	0.2
Gas properties	Dispersion coefficient of H_2S, D_{ax}, m^2/s	1.43x10^{-2}
	Gas-solid mass transfer coefficient, k_s, m/s	2.53x10^{-3}
	Effective diffusivity coefficient of H_2S, D_s, m^2/s	3.19x10^{-3}
	Adsorption rate coefficient, k_a, 1/s	2.31x10^{-2}
	Adsorption equilibrium coefficient, K, m^3/mol	0.672
	External void fraction, ε_{ex}	0.39
Properties of the solid phase	Density of the solid phase, ρ_s, kg/m^3	1.125x10^3
	External area of particles per unit volume of reactor, a_s, m^{-1}	156.45
	Solid porosity, ε_s	0.59

Fig. 1 validates the solving algorithm by comparing the predicted adsorbed concentrations of H_2S obtained using one initial superficial velocity. Experimental data were employed for model adjustment, which confirmed good validation between the experimental data of H_2S and the model equation presented in Eq. (24), with parameter values expressed in Table 1.

Figs. 2a and 2b show simulations of H_2S concentrations in gas and solid phases at the exit of the catalytic trickle-bed reactor for four different initial superficial velocities. Figure 2a plots the gas phase concentration of H_2S versus time, while Figure 2b plots the solid phase concentration of H_2S versus time.

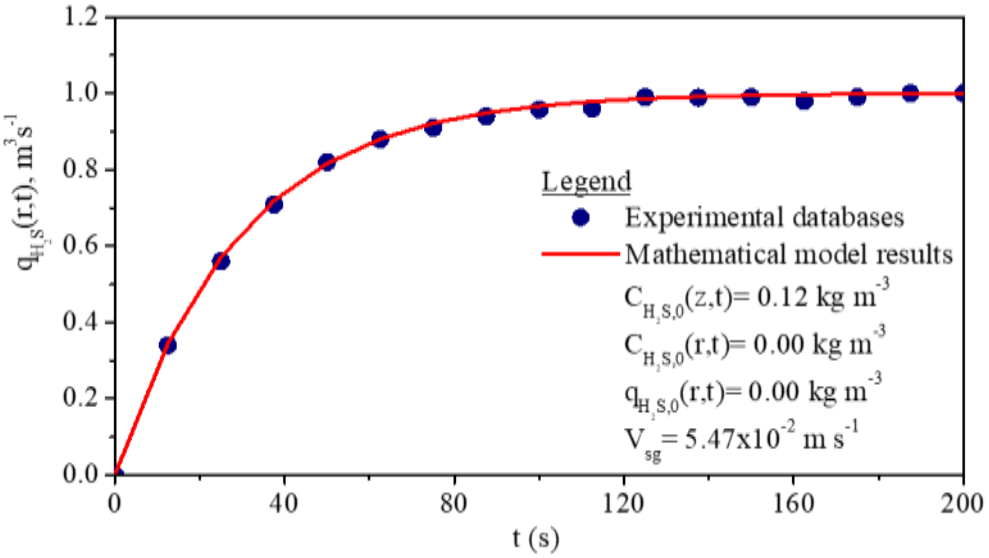


Fig. 1: Comparison between experimental databases of H_2S (adsorbed) obtained at the exit of the catalytic trickle-bed reactor for one different initial superficial velocity of gas.

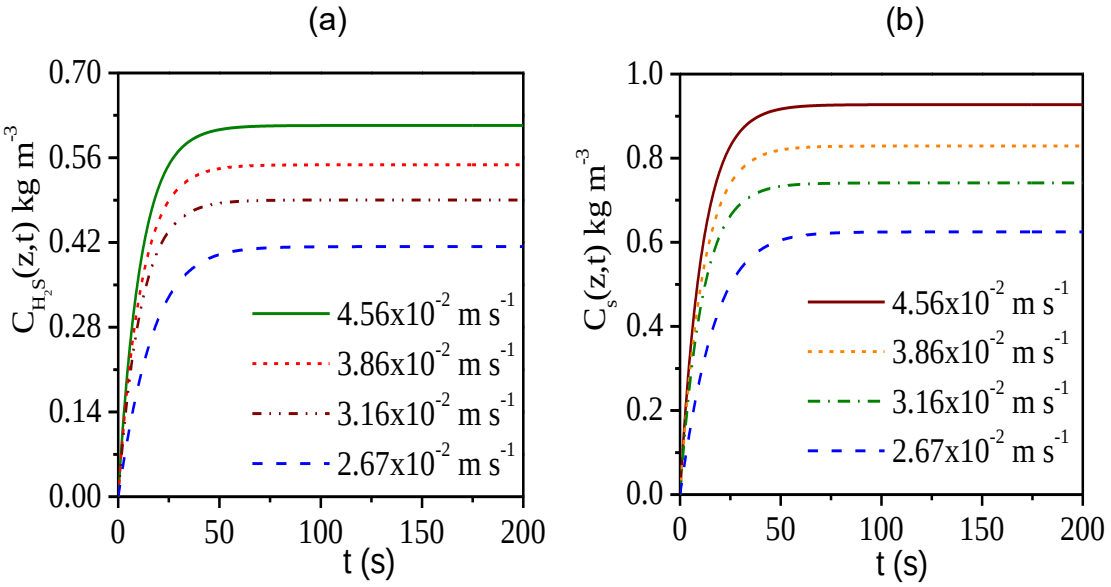


Fig. 2: Simulations for the concentrations in gas and solid phases of H_2S obtained at the exit of the catalytic trickle-bed reactor for four different initial superficial velocities of gas.

4. CONCLUSIONS

A catalytic trickle-bed system using a fixed bed of (N2/H2O-H2S/NaX) was evaluated through an experimental dynamic method and predictions from a phenomenological mathematical model. The system operated at 298 K and 1.01 bar, with the solid and gas phases flowing under a constant initial superficial liquid velocity ($Vs\ell$ = 6.17 x 10^{-3} m s^{-1}), and the gas superficial velocity varying between 5.47 x 10^{-2} m s^{-1} and 2.67 x 10^{-2} m s^{-1}. The concentration magnitudes increased as the initial superficial

gas velocities grew, as shown in Figures (2a) and (2b). Based on the parameters presented in Table 1, the model was validated by comparison with experimental data, yielding a mean relative error of 2.54%.

APPENDIX A

$$\alpha_{1=}\frac{V_{sg}}{D_{ax}} \tag{A.1}$$

$$\alpha_2(s)=\frac{1}{D_{ax}}\left(s+\frac{k_s a_s}{\varepsilon_{ex}}\right) \tag{A.2}$$

$$\alpha_3=\frac{k_s a_s}{\varepsilon_{ex} D_{ax}} \tag{A.3}$$

$$\alpha_5(s)=\frac{k_a}{\left(s+k_r+\frac{k_a}{k}\right)} \tag{A.4}$$

$$\beta_5(s)=\left(\frac{\varepsilon_s s}{D_s}-\frac{\left(\rho_s s+\rho_s k_r\right)}{D_s}\frac{k_a}{\left(s+k_r+\frac{k_a}{k}\right)}\right) \tag{A.5}$$

REFERENCES

Ahn J., Kang S., Kwon Y., 2010, A Laplace transform finite difference method for the Black-Scholes equation. Mathematical and Computer Modelling, 51, 247-255.

Chen J. S., Liang C. P., Gau H. S., Liu C.W., 2006, Mathematical model for formation decontamination by pumping with well bore mixing. Applied Mathematical Modelling, 30, 446-457.

Silva, J. D., Abreu, C. A. M., 2012, Mathematical modeling of a three-phase trickle bed reactor. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 29, 3, 567-576.

Sheng H., Li Y., Chen Y. Q., 2011, Application of numerical inverse Laplace transform algorithms in fractional calculus. Journal of the Franklin Institute, 348, 315-330.

Zhao B., Wang J., Yang W., Jin Y. Y., 2003, Gas–liquid mass transfer in slurry bubble systems I. Mathematical modeling based on a single bubble mechanism. Chemical Engineering Journal, 96, 23-27.

Capítulo 9

10.37423/240909324

NUMERICAL ANALYSIS OF A LUMPED-PARTICLE CATALYTIC TRICKLE-BED REACTOR USING THE LAPLACE TRANSFORM METHOD

Jornandes Dias da Silva — *Universidade de Pernambuco-UPE*

1. INTRODUCTION

Trickle-bed reactors (TBRs) are three-phase catalytic reactors where a liquid and gas phase flow concurrently downward through a fixed bed of solid catalyst particles. These reactors play a crucial role in three-phase gas-liquid-solid reaction systems encountered in various industrial processes. TBRs are extensively used in process industries, particularly in petroleum refineries for applications such as hydrotreating, hydrodemetalization, and hydrocracking. Additionally, they are widely employed in petrochemical, chemical, biochemical, and waste treatment processes (Silva and Abreu, 2012). Numerous studies in the literature model and describe the behavior of processes in TBRs, many of which use mathematical modeling to gain deeper insights (Wang et al., 2013)

Mathematical models of TBRs serve as valuable tools for reducing the experimental effort required to develop this critical equipment in industrial plants. While experimental and prototype development remain essential for accurate engineering design, mathematical modeling and numerical simulation continuously evolve to enhance the understanding of industrial processes (Janecki et al., 2014; Silva and Oliveira, 2013).

A fundamental understanding of the hydrodynamics of trickle-bed reactors (TBRs) is crucial for their design, scale-up, and process intensification. Mathematical models are influenced by different flow regimes, which are affected by the wettability of solid particles. Industry often focuses on trickle flow, which occurs at low liquid and gas superficial velocities. Various mathematical models address completely or partially wetted catalyst particles in TBRs (Silva, 2012). These models rely on simplifying assumptions to solve complex equation systems. Typically, TBR models incorporate mechanisms such as forced convection, axial dispersion, interphase heat and mass transfer, intraparticle diffusion, adsorption, and chemical reactions (Silva et al., 2003).

The main objective of this work is to estimate and describe the behavior of the axial dispersion coefficient of the liquid phase, Dax,ℓ, and the overall liquid-solid mass transfer coefficient, ka)ℓs, using a series of experiments conducted in a laboratory-scale trickle-bed reactor (TBR). A dynamic phenomenological mathematical model was proposed and validated with experimental data. Additionally, the behavior of the parameters Dax,ℓ and (ka)ℓs was analyzed as a function of the volumetric flow rate.

2. PHYSICAL MODELLING

2.1. SETUP DETAIL

An intensification schematic of the TBR was developed to investigate the tracer dynamics. The reactor has an internal diameter of 0.4 m and contains a fixed bed 1 m in length (as shown in Figure 1). The catalyst, □-Al2O3, is packed into the reactor, where the tracer is introduced. A sweep gas (nitrogen) is fed into the reactor in co-current flow with the liquid phase through a fixed bed of catalyst particles. The gas and liquid phases are uniformly distributed across the cross-section of the bed using a distributor with 58 equally spaced orifices.

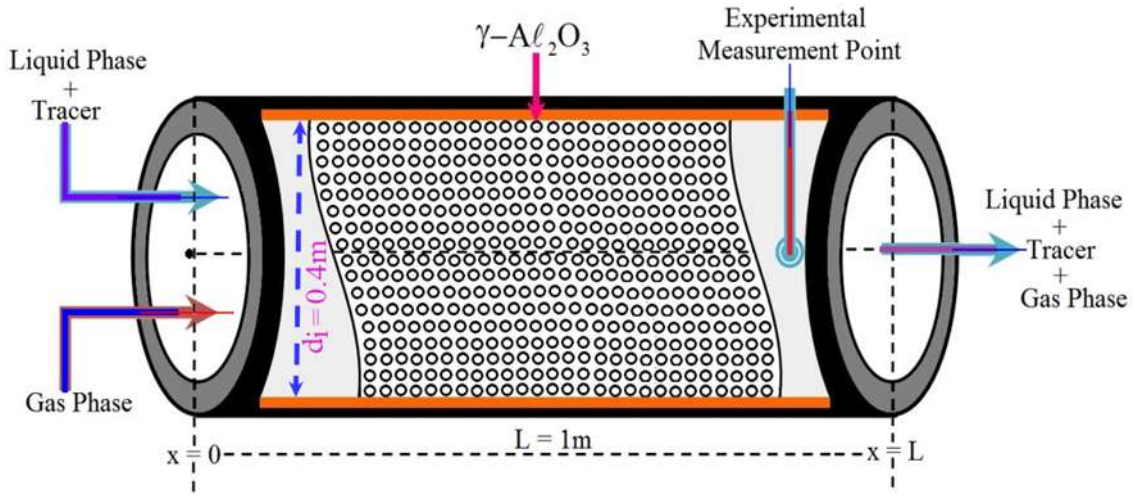


Figure 1: Schematic representation of the TBR for experimental measurements of liquid tracer at the exit of fixed bed

2.2. MATHEMATICAL MODELLING

The mathematical modelling and computer simulation of the TBR are continuously evolving to enhance the understanding of phenomenological processes and to promote process intensification. TBRs are widely used in the chemical, petrochemical, and oil refining industries. In this study, a one-dimensional mathematical model with axial dispersion was developed, incorporating diffusional limitations in the solid porous network. This model was applied to the liquid phase using sodium gluconate (NaC6H11O7) as a tracer, and operates under the following assumptions: (i) the system is isothermal; (ii) all flow rates are constant throughout the reactor; (iii) intraparticle diffusion resistance is neglected; (iv) at any position in the reactor, the chemical reaction rate within the solid is equal to the liquid-solid mass transfer rate. The mass balance equations are expressed as a system of partial differential equations.

– The mass balance for the liquid phase;

$$h_\ell \frac{\partial C_\ell(z,t)}{\partial t} + \frac{4Q_\ell}{\pi\, d_r^2} \frac{\partial C_\ell(z,t)}{\partial z} = D_{ax,\ell} \frac{\partial^2 C_\ell(z,t)}{\partial z^2} - (1-\varepsilon_s)\, f_e (ka)_{\ell s} [C_\ell(z,t) - C_s(z,t)] \quad (1)$$

– The initial and boundary conditions for Eq. (1) are as follows;

$$C_\ell(z,0) = C_{\ell,0}; C_\ell(z,0) \in (0,L) \text{ and } C_\ell(z,0) \in (t_0, t_{end}) \quad (2)$$

$$D_{ax,\ell} \left.\frac{\partial C_\ell(z,t)}{\partial z}\right|_{z=0^+} = \frac{4Q_\ell}{\pi\, d_r^2} \left[C_\ell(z,t)\big|_{z=0^+} - C_\ell(z,0) \right]; \textit{ for } t \geq 0 \quad (3)$$

$$\left.\frac{\partial C_\ell(z,t)}{\partial z}\right|_{z=L} = 0 \textit{ ; for } t \geq 0 \quad (4)$$

The equivalence between the mass transfer and reaction rates is represented by the following equations:

$$f_e (ka)_{\ell s} [C_\ell(z,t) - C_s(z,t)] = \eta\, \varepsilon_s\, r_{NaC_6H_{11}O_7} \quad (5)$$

The kinetic model for the reaction is based on first-order kinetics, as represented by the following expression:

$$r_{NaC_6H_{11}O_7} = k_r\, C_s(z,t) \quad (6)$$

By combining Eqs. (5) and (6), the rate of mass transfer is equal to the rate of reaction at the surface of the solid phase, as shown below:

$$f_e (ka)_{\ell s} [C_\ell(z,t) - C_s(z,t)] = \eta\, \varepsilon_s\, k_r\, C_s(z,t) \quad (7)$$

Equations (1) through (4) and (7) can be analyzed using the dimensionless variables as follows.

$$\vartheta_\ell(\xi,\tau) = \frac{C_\ell(z,t)}{C_{\ell,0}} \quad (8)$$

$$\vartheta_s(\xi,\tau) = \frac{C_s(z,t)}{C_{\ell,0}} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{4\, Q_\ell\, t}{L\, h_\ell\, \pi\, d_r^2} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{z}{L} \quad (11)$$

2.3. DIMENSIONLESS EQUATIONS

The dimensionless forms of Eqs. (1) to (4) and (7), along with the initial and boundary conditions, are presented as follows:

$$\frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi} = \frac{1}{P_e}\frac{\partial^2 \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi^2} - \alpha_{\ell s}\left[\vartheta_\ell(\xi,\tau) - \vartheta_s(\xi,\tau)\right] \quad (12)$$

$$\vartheta_\ell(\xi,0) = 1; \vartheta_\ell(z,0) \in (0,1) \text{ and } \vartheta_\ell(z,0) \in (t_0, t_{end}) \quad (13)$$

$$\left.\frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi}\right|_{\xi=0^+} = P_e\left[\left.\vartheta_\ell(\xi,\tau)\right|_{\xi=0^+} - 1\right]; \text{ for } \tau \geq 0 \quad (14)$$

$$\left.\frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi}\right|_{\xi=1} = 0; \text{ for } \tau \geq 0 \quad (15)$$

$$\vartheta_\ell(\xi,\tau) - \vartheta_s(\xi,\tau) = \beta_s\ \vartheta_s(\xi,\tau) \quad (16)$$

Equations (12) to (16) include the following dimensionless parameters:

$$\alpha_{\ell s} = \frac{(1-\varepsilon_s)\ f_e\,(ka)_{\ell s}\ L\ \pi\ d_r^2}{4Q_\ell} \quad (17)$$

$$P_e = \frac{4\ Q_\ell\ L}{D_{ax,\ell}\ \pi\ d_r^2} \quad (18)$$

$$\beta_s = \frac{k_r\ \eta\ \varepsilon_s}{(ka)_{\ell s}} \quad (19)$$

The dimensionless concentration, $\vartheta_s(\xi,\tau)$, was isolated in Equation (16) and introduced into Eq. (12), reducing it to:

$$\frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi} = \frac{1}{P_e}\frac{\partial^2 \vartheta_\ell(\xi,\tau)}{\partial \xi^2} - \gamma_{\ell s}\,\vartheta_\ell(\xi,\tau) \quad (20)$$

Where, $\gamma_{\ell s} = \dfrac{\alpha_{\ell s}\ \beta_s}{\beta_s + 1}$

3. APPLICATION OF THE LAPLACE TRANSFORM TO THE MATHEMATICAL MODEL

The Laplace transform method has been used to convert partial differential equations (PDEs) into ordinary differential equations (ODEs). Equation (20) and its initial and boundary conditions are transformed using the Laplace transform, as described in the following equation:

$$\overline{\vartheta}_\ell(\xi,s) = \int_0^\infty \vartheta_\ell(\xi,s)\, e^{-st}\, dt \quad (21)$$

Equation (20) is expressed in the Laplace domain based on Equation (21) as shown below:

$$\frac{d^2 \vartheta_\ell(\xi,s)}{d\xi^2} - P_e\frac{d\vartheta_\ell(\xi,s)}{d\xi} - P_e\left(s+\gamma_{\ell s}\right)\vartheta_\ell(\xi,s) = -\frac{P_e}{s} \quad (22)$$

The initial and boundary conditions presented by Equations (13) to (15) in the Laplace domain are given as

$$\vartheta_\ell(\xi,s)\big|_{s=0} = \frac{1}{s} \tag{23}$$

$$\left.\frac{d\vartheta_\ell(\xi,s)}{d\xi}\right|_{\xi=0^+} = P_e\left[\vartheta_\ell(\xi,s)\big|_{\xi=0^+} - \frac{1}{s}\right] \tag{24}$$

$$\left.\frac{d\vartheta_\ell(\xi,\tau)}{d\xi}\right|_{\xi=1} = 0 \tag{25}$$

For ξ = 1, it was possible to obtain the concentration of tracer (sodium gluconate) at the exit of the fixed bed as follows (Silva and Abreu, 2012).

$$\bar{\vartheta}_\ell(s_k) = \frac{exp(\beta_1)\left[s_k\,\bar{\vartheta}_\ell(0,s_k)-1\right]}{s_k\left[\beta_1^2-\beta_2^2(s_k)\right]}\left\{\beta_2(s_k)\left[cosh\,\beta_2(s_k)coth\,\beta_2(s_k) - sinh\,\beta_2(s_k)\right]\right\} + \frac{1}{s_k(s_k+\gamma_{\ell s})} \tag{26}$$

Where parameters (β_1 and β_2) are defined as:

$$\beta_1 = \frac{P_e}{2} \tag{27}$$

$$\beta_2(s_k) = \frac{1}{2}\left[(P_e)^2 + 4P_e(s_k+\gamma_{\ell s})\right]^{1/2} \tag{28}$$

3.1 NUMERICAL INVERSE LAPLACE APPROACHES

To obtain time dependent variable evolution of the variable $\bar{\vartheta}_\ell(s_k)$, we apply the numerical inverse Laplace transform. In the inverse Laplace transform process, the inverted approximation for $\bar{u}(s_k)$ is given on general form (Ahn et. Al. 2010). Usually speaking, we want to reconstruct a time-dependent function $u(t)$ from its image $\bar{u}(s_k)$ as follows.

$$u(t) = \frac{exp(\gamma t)}{\pi}\int_0^\infty Re\left[\bar{u}(s_k)exp(i\,\omega t)\right]d\omega \tag{29}$$

Applying the trapezoidal rule with step size ⍰/T to the integral presented in the Equation (19), we obtain the inverted concentration of sodium gluconate (Silva and Oliveira, 2012).

$$\vartheta_\ell(t) \cong \frac{\exp(\gamma t)}{T}\left\{\frac{\bar{\vartheta}_\ell(s_0=\gamma)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} Re\left[\bar{\vartheta}_\ell(s_k)\right]\exp\left(\frac{i\,k\,\pi\,t}{T}\right)\right\};\ s_k = \gamma + \frac{i\,k\,\pi}{T},\ k = 0,1,2,3,\ldots \tag{30}$$

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Mathematical modeling was used to compare with the experimental results for sodium gluconate (NaC6H11O7). Experiments were conducted at the exit of the fixed bed, using sodium gluconate as a tracer, as shown in Figure 1. Parameters for the computational code are provided in Table 2, which includes operating conditions, bed properties, liquid properties, and gas properties.

Table 2: Database for feeding the computational code

Categories	Properties	values	References
Operating c	Pressure, (P) atm	1.01	Silva et al. (2003)
	Temperature, (T) K	298.00	Silva et al. (2003)
	Flow of the liquid phase, (Q_ℓ) x 10^6 m^3s^{-1}	4.95-1.25	Silva et al. (2003)
	Flow of the liquid phase, (Q_g) x 10^5 m^3s^{-1}	2.86	Colombo et al. (1976)
	Initial conc. of $NaC_6H_{11}O_7$, (C_ℓ) mol m^{-3}	0.0357	Estimated
Bed properties	Bed porosity, (ε_s)	0.59	Colombo et al. (1976)
	Inner diameter of the reactor, (d_r) m	0.40	Estimated
	Total length of the reactor, (L) m	1.00	Estimated
	Diameter of particles, (d_p)x10^4 m	0.12	Silva et al. (2003)
	Density of particles, (ρ_s) x10^{-3} kg m^{-3}	3.00	Silva et al. (2003)
	Constant of the reaction rate, (k_r)x10^{-1} s^{-1}	5.41	Colombo et al. (1976)
Liquid	Holdup of the liq. phase, (h_ℓ)	0.49	Silva et al. (2003)
properties	Wetting factor, (f_e)	0.47	Silva et al. (2003)
	Axial Disp. of the liq. phase, ($D_{ax,\ell}$)x10^6 m^2 s^{-1}	1.07	Silva et al. (2003)
	Overall mass transf. coeffic., $(ka)_{\ell s}$x10^2s^{-1}	1.37	Silva et al. (2003)

The Equation (20) has been used to obtain the concentration evolution of the tracer at the exit of the trickle-bed reactor of fixed bed. The numerical optimization of the model parameters ($D_{ax,\ell}$ and $(ka)_{\ell s}$) was performed using the minimization of a quadratic objective function as follows.

$$F_{obj.}\left(D_{ax,\ell},(ka)_{\ell s}\right)=\sum_{k=1}^{N}\left\{\left[\vartheta_\ell(t)\right]_k^{Exp.}-\left[\vartheta_\ell(t)\right]_k^{Num.}\right\}^2 \tag{31}$$

To represent the behaviour of $D_{ax,\ell}$ and $(ka)_{\ell s}$, their optimized numerical values were employed and empirical correlations formulated as Equations (32) and (33) as follows.

$$D_{ax,\ell}=88.149\left(Q_\ell\right)^{1.248}\ R^2=0.9967 \tag{32}$$

$$\left(Ka\right)_{\ell s}=40.791\left(Q_\ell\right)^{2.127}\ R^2=0.9978 \tag{33}$$

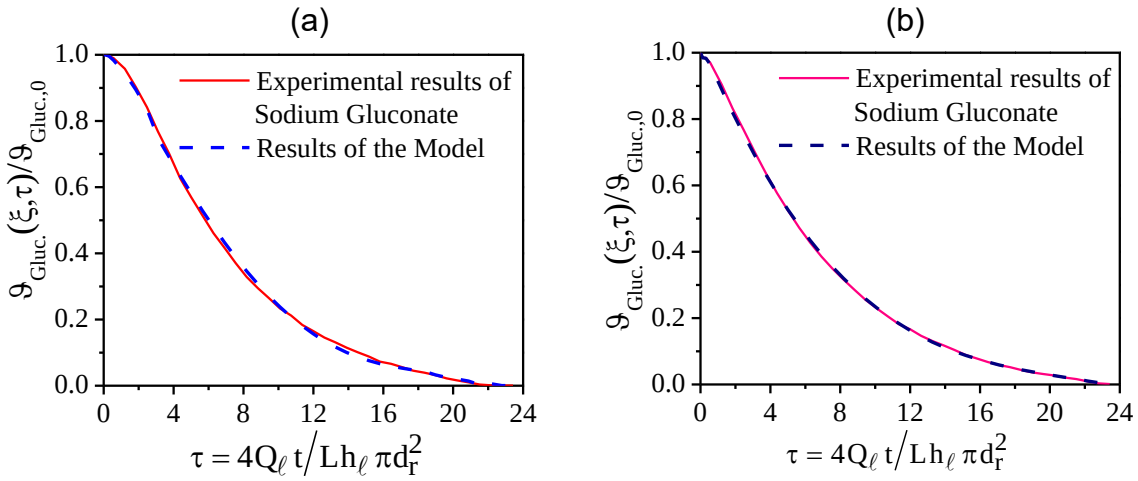


Figure 2: Comparison between experimental databases ($NaC_6H_{11}O_7$) obtained at the exit of the trickle-bed reactor of fixed bed to two different flows. Figure (2a), conditions: 298K, 1.01 bar, $Q_g = 2.86x10^{-5}$ m^3s^{-1} $Q_\ell = 2.26x10^{-6}$ m^3s^{-1}, $D_{ax,\ell} = 1.976x10^{-5}$ m^2s^{-1} and $(ka)_{\ell s} = 1.217x10^{-2}$ s^{-1}; Figure (2b), $Q_g = 2.86x10^{-5}$ m^3s^{-1} $Q_\ell = 3.45x10^{-6}$ m^3s^{-1}, $D_{ax,\ell} = 2.743x10^{-5}$ m^2s^{-1} and $(ka)_{\ell s} = 2.027x10^{-2}$ s^{-1}

Validations of the solution algorithm were established by comparing the predicted concentrations obtained with the values of the parameters from the proposed correlations (Equations (32) and (33)) and experimental data not employed in the model adjustment. Figures (2a) and (2b) represent the model validations for two different operating conditions, where the parameter values were obtained from Equations (32) and (33).

Figures (3a) and (3b) show the behavior of the parameters $D_{ax,\ell}$ and $(ka)_{\ell s}$ versus the flow rate (Q_ℓ) of the liquid phase. Results of the Figure (3c) present a plot more or less linear. On the other hand, results of the Figure (3d) show a plot with a nonlinear tendency. The nonlinear tendency in the Figure (3d) can be explained due to the Superscript (2.127) of the flow rate (Q_ℓ) in the Equation (33).

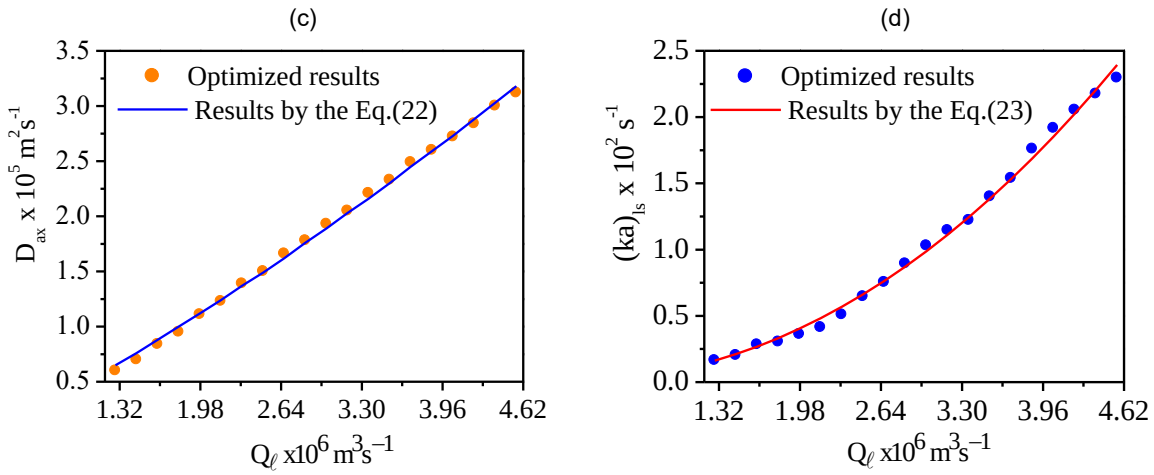


Figure 3: Comparison between optimized results and results obtained by Equations (32) and (33). Figure (3a), $(D_{ax,\ell})^{Opt.}$ and $(D_{ax,\ell})^{Cal.}$ by Equation (32); Figure (3b), $((ka)_{\ell s})^{Opt.}$ and $((ka)_{\ell s})^{Cal.}$ by Equation (33).

5. CONCLUSIONS

The three-phase trickle bed system (N_2/H_2O-$NaC_6H_{11}O_7/\gamma$-$A\ell_2O_3$) was evaluated using an experimental dynamic method and via predictions of a phenomenological mathematical model. Operating at 298 K under 1.01 bar with liquid and gas phases flowing downward under constant gas flow Q_g = 2.86 x 10^{-6} m^3 s^{-1} and the liquid phase flow Q_ℓ varying in the range from 4.95x10^{-6} m^3 s^{-1} to 1.25x10^{-6} m^3 s^{-1}. The magnitudes of the parameters were in the following ranges: $D_{ax,\ell}$ = 3.46 x 10^{-5} m^2 s^{-1} to 0.63 x 10^{-6} m^2 s^{-1} and $(ka)_{\ell s}$ = 2.39x10^{-6} s^{-1} to 0.22x10^{-6} s^{-1}. These results led to the proposal of two empirical correlations to quantify the influence of liquid phase flow rate changes on the axial dispersion and liquid-solid mass transfer in the low interaction regime. Based on the values of the parameters indicated by the correlations, the model was validated by comparing their predictions with those obtained in different two-phase operations with mean quadratic deviations between experimental and predicted concentrations on the order of 10^{-5}.

REFERENCES

Ahn J., Cho C., Kang S., 2010, An efficient numerical parameter estimation scheme for the space-dependent dispersion coefficient of a solute transport equation in porous media, Mathematical and Computer Modelling, 51, 167-176.

Janecki D., Burghardt A., Bartelmus G., 2014, Influence of the porosity profile and sets of Ergun constant on the main hydrodynamic parameters in the trickle-bed reactors. Chemical Engineering Journal, 237, 176-188.

Silva J. D.,2012, Dynamic modelling for a trickle-bed reactor using the numerical inverse Laplace transform technique. Procedia Engineering, 42, 454-470.

Silva, J. D., Abreu, C. A. M., 2012, Mathematical modeling of a three-phase trickle bed reactor. Brazilian Journal of Chemical. Engineering, 29, 3, 567-576.

Silva, J. D., Lima, F. R. A., Abreu, C. A. M., Knoechelmann A, 2003,Experimental analysis and evaluation of the mass transfer process in a trickle bed regime, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 20, 4, 375-390.

Silva J.D., Oliveira C.C.B., 2013, Mathematical modelling for the adsorption process CO_2 in nanopores of catalytic particles in a fixed bed reactor using numeral Laplace transform, Chemical Engineering Transactions, 35, 829-835.

Wang Y., Chen. J., Larachi F.,2013, Modelling and simulation of trickle-bed reactors using computational fluid dynamics: a state-of-the-art review. Chemical Engineering journal, 91, 136-180.

Silva J. D, Oliveira C. C. B.,2012, Fluidynamics modelling for a fixed bed gasifier using Laplace transform finite difference method, Procedia Engineering, 42,753-769.

Capítulo 10

10.37423/240909325

APPLICATION OF KINETIC MODEL FOR CATALYTIC HYDROGENATION-BASED BIOMASS CONVERSION IN SLURRY REACTOR

Jornandes Dias da Silva *Universidade de Pernambuco-UPE*

1. INTRODUCTION

Biomass conversion processes, including the pretreatment of hemicellulose and lignin, along with the acid hydrolysis of cellulose, are effective in breaking down the complex chemical structures of these polymers. The resulting saccharide molecules contain a variety of functional groups, enabling the formation of compounds with diverse chemical structures. This versatility, combined with their abundant availability from agricultural sources, positions saccharides as valuable intermediates for the production of high-value compounds.

The processing of saccharide-rich raw materials (such as sugarcane, starch, molasses, and bagasse) has been widely studied (Abreu et al., 1995; Baudel et al., 2005; Dussán et al., 2014; Oliveira et al., 2015) for producing industrially valuable products. Biomass conversion techniques involve hydrolysis and pre-treatments of hemicellulose, lignin, and cellulose to break down polymeric structures into their saccharide components (Aho et al., 2015; Kusserow et al., 2003; Yadav et al., 2012). Hemicellulose and cellulose can be depolymerized into xylose and glucose (Guan-Yu Pan et al., 2016; Mushrif et al., 2015). These oligomeric mixtures, when processed with catalysts, can yield valuable chemicals, including polyols via catalytic hydrogenation.

Nickel, chromium, and copper-based catalysts have long been used to hydrogenate mono- and disaccharides into polyols (Turek et al., 1983). Recently, ruthenium-based catalysts have been developed to further enhance hydrogenation efficiency (Mushrif et al., 2015). Experiments involving the hydrogenation of aqueous glucose solutions have been performed using both batch and continuous reactors. These studies utilized supported nickel and ruthenium catalysts to achieve improved conversion rates and product yields (Mikkola et al., 2000).

The sugar cane bagasse was subjected to acidic hydrolysis, which facilitated the release of xylose from hemicellulose and glucose from cellulose. Following this, the resulting solutions were processed through hydrogenation using a nickel catalyst to promote the production of polyols. A kinetic evaluation methodology was employed for the quantitative assessment of both hydrolysis and hydrogenation processes.

2. MATERIAL AND METHODS

The reaction operations, including alkaline delignification and acid hydrolysis, were carried out in a slurry reactor (VR = 1.5 L) using solid-liquid ratios of 1:3 and 1:1. Delignification was performed on

bagasse that had been pre-hydrolyzed. The residual material was filtered (m_{bag}), and the liquid phase was analyzed for total solids and lignin content. Hemicellulose extraction was conducted using an aqueous solution of H_2SO_4 (1.0 wt.%) at temperatures of 80°C, 90°C, and 100°C for 2 hours. After extraction, the material was analyzed for residual solid (cellulose) and saccharide content. The cellulosic fraction was then hydrolyzed at 140°C, 160°C, and 180°C under an inert atmosphere (Ar, 30 bar) for 3 hours using a HCl solution (20.0 wt.%) containing LiCl (8.0 wt.%). The resulting hydrolysates from both hemicellulose and cellulose were treated with $Ca(OH)_2$ and Pb to remove sulfur and chlorine, respectively.

The saccharide solutions were subjected to catalytic hydrogenation. The catalyst was prepared from nickel nitrate $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$, Sigma) and activated carbon (surface area = 890 m^2/g, particle diameter = 91 µm, Carbomer Co., Br) as the support. The preparation method involved incipient wetness impregnation, where the activated carbon was soaked with the nickel nitrate solution. The solid was then dried at 393 K for 12 hours and calcined at 500°C in an argon flow for 5 hours. To activate the catalyst, it was reduced in a hydrogen flow (1:1 v/v, 120 cm^3/min) at 700°C for 2 hours. The catalyst was characterized using several methods: metal content was determined by atomic absorption spectrophotometry (AAS, Model CGAA7BC), textural properties (surface area and pore volume) were analyzed using the BET method (BET, ASAP 2010), and solid phases were examined by X-ray diffraction (XRD, Cu-Kα source, Siemens D5000).

The hydrogenation experiments were conducted with 0.50 L saccharide solutions in a batch reactor (Parr Inst., USA, 1.0 L). The initial concentrations of xylose and glucose were 98.86 g/L and 102.32 g/L, respectively, and the catalyst concentration was 5.0 g/L. The reaction was initiated once the reaction temperature reached the set operating temperature, under a constant pressure of 30.0 bar, and the temperature was measured with an accuracy of ±1 K.

Analyses of saccharides and polyols in the liquid phases were performed using high-performance liquid chromatography (HPLC) with an Aminex HPX-87 column (BioRad, USA). The mobile phase was 0.001N H_2SO_4.

2.1 NUMERICAL OPTIMIZATION

Numerical optimization is a field of mathematics and computer science focused on finding the best possible solution to a problem within a given set of constraints. The goal is to optimize (minimize or maximize) an objective function, which is often subject to constraints. The objective function is central

to defining and solving optimization problems. Its formulation and properties directly influence the choice of optimization methods and the feasibility of finding optimal solutions. Understanding the nature of the objective function is crucial for selecting appropriate techniques and achieving effective results across various fields such as engineering, finance, and logistics. The objective function is defined as follows:

$$F_{ob.} = \sum_{i=0}^{n_p} \left(C_m^{\exp.} - C_m^{th} \right) \tag{2.1}$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

The fractionation of biomass involves the extraction of hemicellulose and cellulose, characterized by their degree of polymerization (PD_n). This is followed by the depolymerization of oligosaccharides, with a degree of polymerization denoted as (PND_{n-1}), and monosaccharides, denoted as (Mo). The process is formulated as follows:

$$PD_n + AcH \xrightarrow{k_{PDn}} PD_nH + Ac^- \tag{3.1}$$

$$PD_nH + H_2O \xrightarrow{k'_{PDn}} PD_{n-1} + Ac^- \tag{3.2}$$

Based on the reaction scheme and applying the steady-state approximation for the intermediate acidified oligomers (PD_nH, where n = 1,2,3,…), the rate of production of monosaccharides (r_{Mo}) is expressed as follows:

$$r_{Mo} = \frac{k_{PDn}\left(C^0_{PDn} - C_{Mo}\right)}{1 + \frac{k_{PDn}}{k'_{PDn}}\left(C^0_{PDn} - C_{Mo}\right)} C^0_{AcH} \tag{3.3}$$

Where k_{PDn} e k'_{PDn} are the rate constants of the steps of acidification and depolymerization, respectively. C^0_{PDn}, C_{Mo} and C^0_{AcH} are the initial concentrations of the components, polysaccharide, monosaccharide and acid.

3.1 HYDROLYSIS OF HEMICELLULOSE

The fractionation of biomass involved the extraction of hemicellulose (denoted as $PD_n = H_m$) followed by depolymerization. The biomass pulp, which is free of lignin, was subjected to dilute acid hydrolysis (represented by $AcH = H_2SO_4$), resulting in the effective decomposition and removal of hemicelluloses. Equation (2), which includes the production rate of monosaccharides (as described in Eq. (1)),

represents the mass balance in terms of concentrations for the batch operation of converting hemicellulose into xylose (denoted as Mo = XL).

$$\frac{dC_{XL}}{dt} = \frac{m_{bag.}}{V_L} \frac{k_{H_m}\left(C^0_{H_m} - C_{XL}\right)}{1 + \frac{k_{H_m}}{k'_{H_m}}\left(C^0_{H_m} - C_{XL}\right)} C^0_{H_2SO_4} \qquad (3.4)$$

The solution to the mass balance equation, which is part of the optimization procedure, was performed using data from each isothermal operation. The kinetic parameters were estimated at three different temperatures. Subsequently, the Arrhenius law was applied to determine the activation energy (denoted as E_{atHm}). Figure 1 shows the experimental and predicted concentrations of residual oligomers and produced xylose.

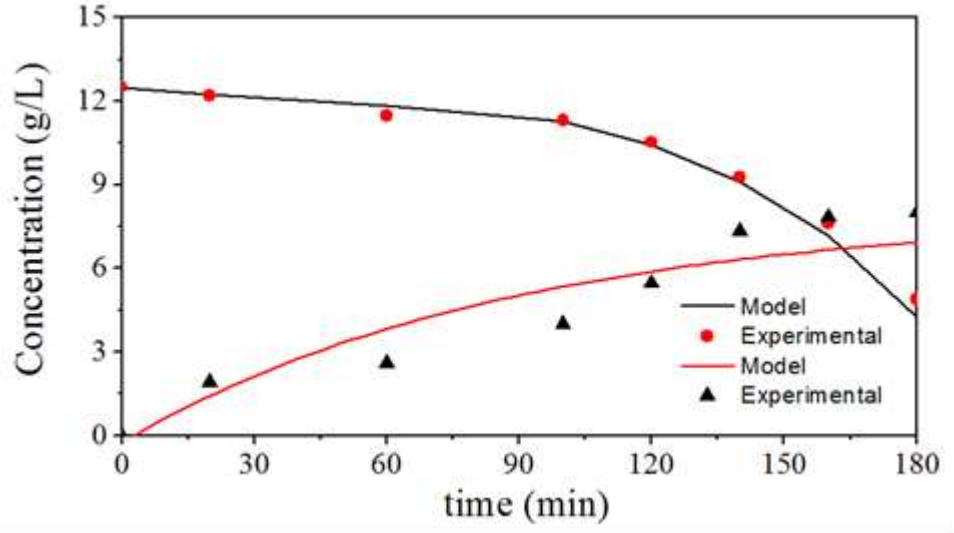


Fig. 1. Evolution of concentrations for hemicellulose oligomers and xylose under the following conditions: 100ºC, m_{bag} = 50.0 g, V_L = 1.50 L, HCl (5.0% wt.).

The evolution of concentrations indicates that xylose extraction (64% yield, [xylose/hemicellulose] x100) was very pronounced, accounting for 16.0 % wt./biomass at 100°C after 3 hours using 5.0 % by weight of sulfuric acid solution. The arabinose content was approximately 1.2 % wt./biomass, while the degradation product (furfural), produced via dehydration, was obtained in low concentrations (1.0 % wt./biomass).

From the constant reaction rate values in the operating temperatures ($k_{80ºC}$ = 8.13x10^{-3} min^{-1}, $k_{90ºC}$ = 9.87x10^{-3} min^{-1}, $k_{100ºC}$ = 10.23x10^{-3} min^{-1}) was estimated an order of magnitude of the activation energy for the hydrolytic conversion of hemicellulose, Eat_{Hm} = 12.92 kJ / mol.

3.2 HYDROLYSIS OF CELLULOSE

The cellulose pulp ($PD_n = C_{el}$), processed by acid hydrolysis (AcH = HCl) in presence of LiCl, was converted into oligomers (PD_{n-1}) and monosaccharide (Mo = GL). The mass balance, including the production rate of glucose r_{GL} (Eq. (1)), was formulated in Eq. (3) for the operation (batch) of cellulose conversion into glucose (GL).

$$\frac{dC_{GL}}{dt} = \frac{m_{bag}}{V_L} \frac{k_{Cel.}\left(C_{el}^0 - C_{GL}\right)}{1 + \frac{k_{Cel}}{k'_{Cel}}\left(C_{el}^0 - C_{GL}\right)} C_{LiCl}\, C_{HCl}^0 \qquad (3.5)$$

A similar procedure to that used for the hemicellulose-xylose process was employed to solve the mass balance equation for the cellulose-glucose process. Figure 2 illustrates the evolution of both experimental and predicted concentrations of residual oligomers and produced glucose.

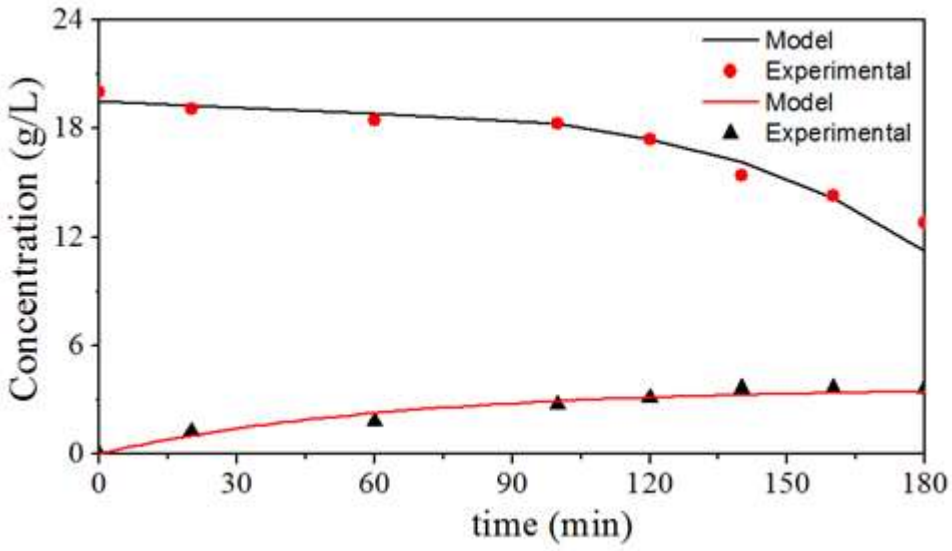


Fig. 2. Concentration evolutions of cellulose oligomers and glucose. Conditions: 180ºC, m_{bag} = 50.0 g, V_L= 1.50 L, HCl (25.0 % wt.), C_{LiCl} =10 g/L.

The cellulose conversion reached a level of 34 %, and lithium chloride was an effective promoter for the acid hydrolysis of cellulose. The evolution of concentrations indicates that glucose extraction (16.23 % yield, [glucose/cellulose]x100) accounting for 10.52 % wt./biomass at 100 °C after 180 minutes using 5.00 % by weight of sulfuric acid solution. The degradation product (hydroxylmethylfurfural), obtained via dehydration, was obtained in low concentrations (0.76 % wt./biomass).

The values of the kinetic parameters were estimated in three different temperatures (k_{Cel1}(40°C) = 18.44 x 10^{-4} min^{-1}, k_{Cel1}(60°C) = 22.31 x 10^{-4} min^{-1}, k_{Cel1}(80°C) = 36.87 x 10^{-4} min^{-1}). The activation energy value (Arrhenius' law) was obtained, Eat_{Cel} = 29.88 kJ/mol.

3.3 HYDROGENATION OF CARBOHYDRATES

Soluble carbohydrates obtained from biomass were hydrogenated in presence of Ni (9.6% wt.)/AC catalyst at 160ºC under H_2, 30.0 bar. The nickel content and its surface area, characterized by AAS and B.E.T.-N_2, were 9.65 % by weight and 578 m^2/g, respectively. The XRD analyses allowed identify the nickel oxide (2θ 37.7º, 63.7º) and nickel presences at 2θ 44.5º, 51.8º.

3.3.1 MODELING OF HYDROGENATION OPERATIONS

The hydrogenation of monosaccharides (No) originated from hemicellulose and cellulose, is represented by $H_{2\,(g)} + Mo_{(L)} \xrightarrow{Cat} Po_{(L)}$, where Po are the polyols (xylitol, arabitol, sorbitol). The monosaccharide production rate (Eq. 3) is expressed by a model of Langmuir-Hinshelwood type, dehydrogenation-hydrogenation. The model assumes adsorption of hydrogen on basic sites (activated carbon support), adsorption of glucose on metallic sites (nickel), through the aldehyde function, interaction hydrogen-aldehyde, and desorption of the formed polyol.

$$r_{Mo} = r_{Po} = \frac{k K_{H_2} K_{Mo} C_{H_2} C_{Mo}}{\left(1 + K_{H_2} C_{H_2}\right)\left(1 + K_{Mo} C_{MO} + K_{Po} C_{Po}\right)} \tag{3.6}$$

The mass balance of the components (j = Mo, Po), which describe the evolution of the processes are represented by Eq. 4, referring to the operation in the slurry reactor. It is assumed that hydrogen is retained surplus in the liquid phase under pressure, where there is strong mechanical agitation, ensuring chemical kinetic regime conditions. At the operating conditions, to confirm the rate-controlling regime in the catalytic reaction the mass transfer limitations through the Weisz criterion, $\dot{\Phi}_i$ ($\Phi_i' = r_i L_c^2 / D_{ei} C_i$), and the external mass transfer resistance fraction f_{ei} ($f_{ei} = r_i L_c / k_{im} C_i$) were quantified. The estimated values [Φ'_i = (0.85-3.85) x 10^{-3}; f_{ei} = (5.73-8.96) x 10^{-4}] show that the process was rate-controlling, indicating that there was no mass transfer limitations. The mass balance equations are expressed as:

$$V_L \frac{dC_j}{dt} = \pm M_c \left(\frac{K_{Mo} C_{MO}}{1 + K_{Mo} C_{MO} + K_{Po} C_{Po}} \right) \tag{3.7}$$

Where M_c is the catalyst mass, V_L is the liquid volume and $k_{Mo} = k\ K_{H2}\ K_{Mo}\ P_{H2}\ [H_{H2}\ (1+K_{H2}C_{H2})]^{-1}$; K_{H2}, P_{H2}, H_{H2} are the hydrogen parameters (adsorption equilibrium constant, partial pressure, Henry's constant). The initial condition is, t = 0; $C_{Mo} = C_{Mo,0}$ and $C_{Po} = 0$.

From the experimental concentrations of monosaccharides and polyols the proposed models were well adjusted (objective functions, $f_{o,XL-X} = 6.25x10^{-2}$, $f_{o,GL-G} = 3.08x10^{-2}$). In Figs. 3 and 4 are shown the concentration evolutions, experimental and predicted by the models.

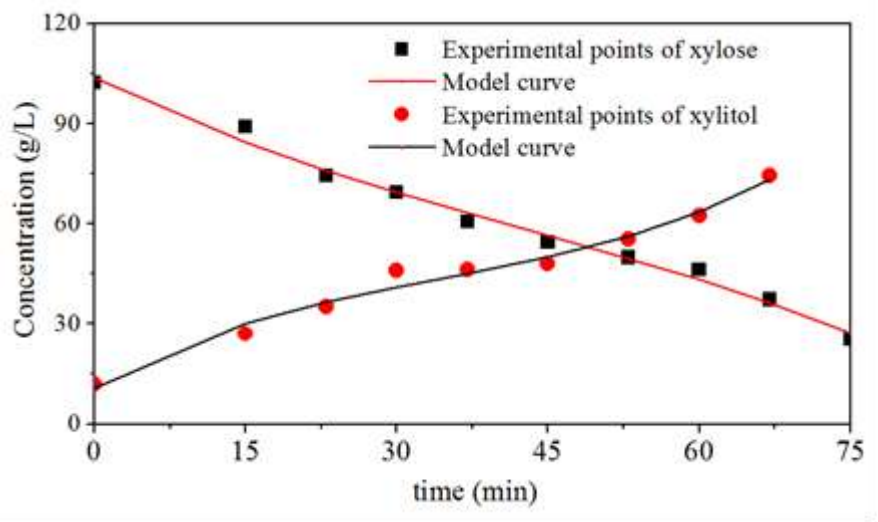


Fig. 3. Hydrogenation of carbohydrates and conversion of xylose into xylitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 160ºC, 30.0 bar.

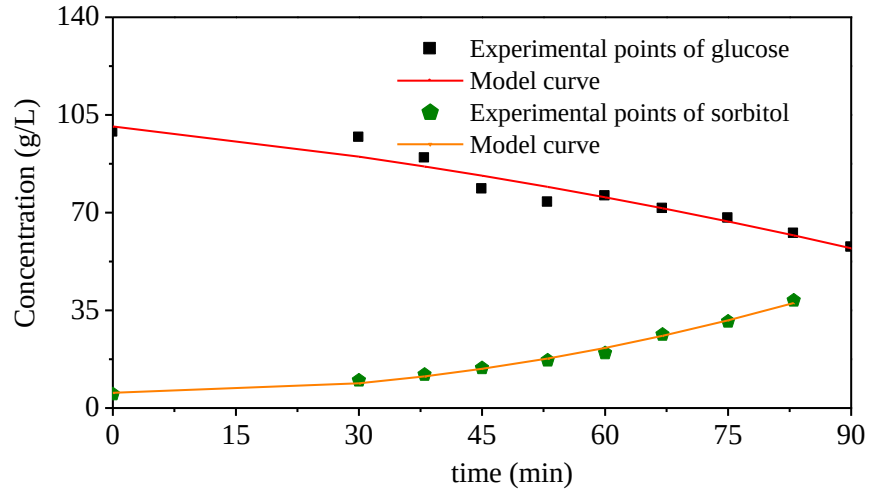


Fig. 4. Hydrogenation of carbohydrates and conversion of glucose into sorbitol. Conditions: cat. Ni (9.6% wt.)/AC, 160ºC, 30.0 bar.

Based on the model adjustment, were estimated values of the reaction rate constants ($k_{Mo} = k_X$, k_G), and the adsorption constants ($K_{Mo} = K_X$, K_G; $K_{Po} = K_{XL}$, K_S), (see Tables 3, 4).

Tab. 3. Parameters of hydrogenation of xylose into xylitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 120 - 160ºC, 30.0 bar.

Parameters	120 ºC	140 ºC	160 ºC
k_{XL} (mol/g.h)	1.76	2.85	5.92
K_{XL} (L/mol)	5.22	3.16	1.53
K_X10^2 (L/mol)	4.18	2.89	1.38

Tab. 4. Parameters of hydrogenation of glucose into sorbitol. Conditions: cat. Ni (9.62% wt.)/AC, 120 - 160ºC, 30.0 bar.

Parameters	120 ºC	140 ºC	160 ºC
k_{GL} (mol/g.h)	0.31	0.66	1.24
K_{GL} (L/mol)	2.41	2.09	1.88
K_S10^2 (L/mol)	7.06	5.56	2.24

Kinetic assessments at three temperatures with Ni catalyst (9.6% wt.)/AC, led to estimates of the activation energy values (Arrhenius'law) for the hydrogenation of glucose and xylose to xylitol and sorbitol, respectively. For xylose hydrogenation, the value of Eat_{XL} = 42.74 kJ/mol was lower to that found by Mikkola et al. (2000) (53.00 kJ/mol), with Raney Ni at 130ºC and 70.0 bar. For the glucose hydrogenation, Eat_{GL} = 49.08 kJ/mol was of an order of magnitude somewhat higher than that obtained by Turek et al. (1983) (38.54 kJ/mol), with nickel catalyst supported on sílica.

The values of the adsorption constants of monosaccharides were higher than the polyols. The estimated heats of adsorption for xylitol (ΔHad = 6.75kJ/mol) and sorbitol (ΔHad = 97.05kJ/mol) (vant 'Hoff equation) are consistent with the experimental evidences of their availability in the liquid phase due its weak adsorption suitable for your product conditions.

4. CONCLUSIONS

Hemicellulose and cellulose obtained from sugarcane bagasse were depolymerization by acid hydrolysis to produce xylose and glucose. The monosaccharides were produced with yields [(monosaccharide/polysaccharide) x 100] of 63.87% in xylose, and 21.05% in glucose. Based on mass of sugarcane bagasse, free of lignin, the saccharides were accounted for 21.67 % and 14.03 % wt./biomass.

The monosaccharide solutions (102.32 g xylose.L^{-1}, 98.86 g glucose.L^{-1}) were hydrogenated in the presence of nickel catalyst (Ni (9.6% wt.)/AC), with activities quantified by the activation energies of Eat_{XL} = 42.74 kJ/mol for xylose hydrogenation and Eat_{GL} = 49.08 kJ/mol for glucose hydrogenation. The valuable polyols were produced with yields of 78.62% in xylitol, and 39.64% in sorbitol.

NOMENCLATURE

AcH	Acid
AC	Activated carbon
d_p	Particle diameter
C_{mi}^{Exp}, C_{mi}^{Th}	Experimental and calculated concentrations
C_{PDn}	Concentration of polysaccharide
C_{PDn}, C_{Mo}	Concentrations of polysaccharide and monosaccharide
C^{o}_{PDn}, C^{0}_{Mo}	Initial concentrations of polysaccharide and monosaccharide
C^{0}_{AcH}	Initial concentration of acid
C^{0}_{Hm} , C^{0}_{Cel}	Initial concentration of hemicellulose and cellulose
Eat_{Hm}	Activation energy of hemicellulose
Eat_{Cel}	Activation energy of cellulose
f_o, f_{oi}	Objective functions
GL	Glucose
H_{H2}	Henry's constant of hydrogen
k_{PDn}, k'_{PDn}	Rate constants of acidification and depolymerization
k_{Hm}, k'_{Hm}	Rate constants of acidification and depolymerization of hemicellulose
k_{Cel}, k'_{Cel}	Rate constants of acidification and depolymerization of cellulose
K_{H2}	Adsorption equilibrium constant of hydrogen
m_{bag}	Mass of bagasse
Mo	Monosaccharide
M_C	Mass of catalyst
PD_n	Polysaccharide
PD_{n-1}	Oligosaccharide
PD_nH	Acidified oligosaccharide
P_{H2}	Partial pressure of hydrogen
r_{Mo}	rate of production of monosaccharides
X	Xylitol
XL	Xylose
V_L	Liquid volume

REFERENCES

Abreu, C. A. M., Lima Filho, N. M. and Zoulalian A., Biomass and Bioenergy, v. 9, pp. 487-492 (1995).

Aho A., Roggan S., Eränen K., Salmi T. and Murzin D. Y., Continuous hydrogenation of glucose with ruthenium on carbon nanotube catalysts Catalysis Science and Technology, v.5, pp. 953-959 (2015).

Baudel, H. Zaror, M., C. and Abreu, C. A. M., Improving the value of sugarcane bagasse wastes via integrated chemical production systems: an environmentally friendly approach. Industrial Crops and Products, v. 21, pp. 309-315 (2005).

Dussan, K. J., Silva, D. D. V., Moraes, E. J. C., Arruda P. V. and Felipe M. G. A., Acid hydrolysis of cellulose to glucose from sugarcane bagasse. Chemical Engineering Transactions, v. 38, pp.433-438 (2014).

Guan-Yu Pan, Yu-Long Ma, Xiao-Xia Ma, Yong-Gang Sun, Jun-Min Lv, Jian-Li Zhang., Catalytic hydrogenation of corn stalk into polyol over Ni–W/MCM-41 catalyst. Chemical Engineering Journal, v. 299, pp. 386-392 (2016).

Kusserow, B., Schimpf, S. and Claus P., Hydrogenation of Glucose to Sorbitol over Nickel and Ruthenium. Catalysts Advanced Synthesis and Catalysis, v. 345, pp. 289-299 (2003).

Mikkola, Jyri-Pekka, Vainio, H., Salmi, T., Sjöholm R., Ollonqvist T. and Väyrynen J., Deactivation kinetics of Mo-supported Raney Ni catalyst in the hydrogenation of xylose to xylitol. Applied Catalysis A: General, v. 196, 143-155 (2000).

Mushrif, S. H., Vasudevan, V., Krishnamurthy, C. B., Venkatesh, B., Multiscale molecular modeling can be an effective tool to aid the development of biomass conversion technology: A perspective. Chemical Engineering Science, v. 121, pp. 217-235 (2015).

Oliveira, C. C. B., Silva, D. J., Araújo, A. D. F., Raphael C. R. B., Abreu, C. A. M., Kinetic evaluation of carbohydrate biomass conversions. Chemical Engineering Transactions, v. 43, 949-954 (2015).

Turek, F., Chakrabarti, R. K., Lange, R., Geike, R. and Flock, W., Chemical Engineering Science, v.38, 275-281 (1983).Yadav, M., Mishra, D. K., Hwang, Jin-Soo., Catalytic hydrogenation of xylose to xylitol using ruthenium catalyst on NiO Modified TiO2 support. Applied Catalysis A: General, v. 425 - 426, PP. 110 - 116 (2012).

Capítulo 11

10.37423/240909326

HYDROGEN PRODUCTION VIA STEAM REFORMING OF METHANE IN A PD-BASED FIXED-BED MEMBRANE REFORMER

Jornandes Dias da Silva *Universidade de Pernambuco-UPE*

1. INTRODUCTION

Hydrogen (H_2) is widely used as an important chemical feedstock and is also considered a promising clean fuel for the future. It is well-regarded as a pollution-free primary energy carrier for transportation and electricity generation. Currently, the steam reforming of methane (SRM) is the primary method for industrial hydrogen production. Methane (CH_4), the main component of conventional natural gas (NG), can also be sourced from associated gas, stranded NG, and shale gas. Previous studies have identified three predominant reactions: steam reforming of methane (SRM), the water-gas shift reaction (WGS), and the overall steam reforming of methane (OSRM) (Xu and Froment, 1989).

- Reaction of the SRM;

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2;\ \Delta H^0_{298K} = 205.8\,kJ\,mol^{-1} \quad (1.1)$$

- Reaction of the WGS;

$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2;\ \Delta H^0_{298K} = -41.1\,kJ\,mol^{-1} \quad (1.2)$$

- Reaction of the OSRM.

$$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2;\ \Delta H^0_{298K} = 164.9\,kJ\,mol^{-1} \quad (1.3)$$

The steam reforming process of methane (SRPM) for hydrogen production can be studied using various reactor configurations, such as fixed-bed reactors, fluidized-bed reactors, and membrane reactors (including fixed-bed membrane reactors and fluidized-bed membrane reactors). The use of a permeable membrane reactor presents the advantage of combining both reaction and separation in a single, compact unit. Several studies have investigated SRPM for hydrogen separation using Pd-based membrane reactors, focusing on both experimental and numerical approaches to achieve high-temperature hydrogen production. Experimental studies primarily aimed at developing robust catalysts resistant to carbon deposition, while numerical simulations were used to model hydrogen production in Pd-based packed-bed membrane reformers

Catalytic fixed-bed membrane reactors (CFBMRs) can significantly enhance the production of reactions that are thermodynamically limited. These reactors utilize hydrogen-selective membranes that allow hydrogen to escape to the permeate side due to differences in partial pressures. An inert gas, such as nitrogen, can then be used to purge the hydrogen. CFBMRs are particularly promising for thermodynamically limited reactions like steam reforming. In these reactors, the effect of interphase transport is crucial, including diffusion within the catalyst pellets on both sides of the reactor. The

Fickian diffusion model is employed to describe the diffusion process through a stagnant bulk phase, considering the diffusivities of components in the reacting mixture along the radial direction within the catalyst pellets.

Commercial hydrogen separation using metallic membranes primarily focuses on palladium alloys. Palladium (Pd) membranes have been used for hydrogen separation for many years due to their exceptional selectivity for hydrogen. Pd is highly soluble in hydrogen and can handle hydrocarbon-containing streams. Additionally, Pd-based membranes offer the potential for hydrogen separation at high temperatures, allowing for the integration of separation and chemical reactions within a single unit. Recent reviews have examined the application of membranes in the chemical, petrochemical, and petroleum industries for both separation and reaction processes.

The objective of this study is to theoretically investigate the performance of steam reforming of methane (SRM) for hydrogen production in a circulating fluidized bed membrane reactor (CFBMR) at different exit temperatures of the system. This includes analyzing the effects on both the permeation side and the shell side of the reactor.

2. MATERIALS AND METHODS

A conceptual setup of the integrated circulating fluidized bed membrane reactor (CFBMR) was developed to investigate steam reforming of methane (SRM), as shown in Figure 1. The inner tube contains the supported membrane, while the outer layer is a non-permeable shell. The catalyst (Ni/□-Al2O3) is packed in the shell side where the reactants (methane and steam) are introduced. The sweep gas, which can be nitrogen or steam, is fed into the tube side in a co-current flow mode. In this system, three reforming reactions occur within the non-permeable shell, producing light gases including hydrogen (H_2), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO_2).

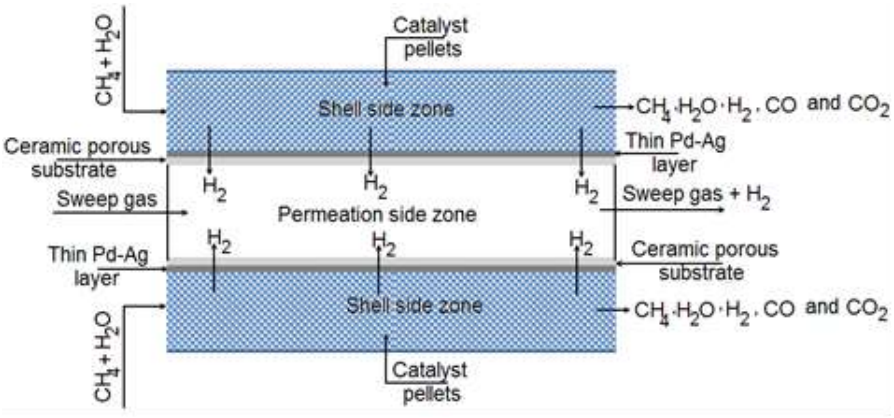


Fig.1. Schematic representation of the CFBMR for the SRM.

2.1 STEAM REFORMING OF METHANE

Kinetic models describe the mechanisms, reaction rates, and resulting species concentrations at any point in time and space within a circulating fluidized bed membrane reactor (CFBMR). These models are crucial for understanding specific processes, including reaction mechanisms and strategies for enhancing reaction rates. In this context, the primary reactions involved in steam reforming of methane (SRM) are as follows: Reaction (1) represents SRM, Reaction (2) corresponds to the water-gas shift reaction, and Reaction (3) depicts the overall SRM process. Reactions (1), (2), and (3) are reversible and reach equilibrium. Thermodynamically, Reactions (1) and (3) are strongly endothermic, while Reaction (2) is exothermic. The components involved in these reactions are methane (CH_4), water (H_2O), carbon monoxide (CO), hydrogen (H_2), and carbon dioxide (CO_2). The stoichiometric coefficients for these components are provided in Table 1 below.

Table 1: Stoichiometric coefficients σ_{ij} for components of reactions

Reactions	CH_4	H_2O	CO	H_2	CO_2
1	-1	-1	+1	+3	0
2	0	-1	-1	+1	+1
3	-1	-2	0	+4	+1

2.2 KINETIC MODELLING

The kinetic mathematical model applied here considers three homogeneous reactions (1), (2), and (3) based on the Langmuir-Hinshelwood concept (Xu and Froment, 1989). The reaction rate models for above reactions, as discussed in Section 1 (Introduction), are described as follows.

$$R_1 = \frac{\frac{k_1}{P_{H_2}^{2.5}}\left(P_{CH_4}\,P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3\,P_{CO}}{K_{eq.,1}}\right)}{\left(1 + \frac{F_{H_2O}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + \frac{F_{H_2}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + K_{CO}\,P_{CO} + K_{H_2}\,P_{H_2} + K_{CH_4}\,P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O}\,P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)^2} \tag{2.1}$$

$$R_2 = \frac{\frac{k_2}{P_{H_2}}\left(P_{CO}\,P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}\,P_{CO_2}}{K_{eq.,2}}\right)}{\left(1 + \frac{F_{H_2O}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + \frac{F_{H_2}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + K_{CO}\,P_{CO} + K_{H_2}\,P_{H_2} + K_{CH_4}\,P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O}\,P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)^2} \tag{2.2}$$

$$R_3 = \frac{\frac{k_3}{P_{H_2}^{3.5}}\left(P_{CH_4}\ P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^4\ P_{CO_2}}{K_{eq.,3}}\right)}{\left(1 + \frac{F_{H_2O}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + \frac{F_{H_2}^{in}}{F_{CH_4}^{in}} + K_{CO}\,P_{CO} + K_{H_2}\,P_{H_2} + K_{CH_4}\,P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O}\,P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)^2} \quad (2.3)$$

Where R_j (j = SRM, WGS, and OSRM) are the rates of reactions (1)-(3). The reaction rate coefficients (k_j, j = SRM, WGS and OSRM) and the adsorption constants of gases (K_{CH4}, K_{H2O}, K_{H2}, and K_{CO}) have an Arrhenius type dependence with temperature. On the other hand, P_i (i = CH_4, H_2O, CO, H_2 and CO_2) are the partial pressures of the respective components within the catalyst. The Arrhenius expressions for the reaction rate coefficients, adsorption constants for the components CH4, H2O, H2 and CO and the equilibrium constants are listed below and can be reported by Xu and Froment (1989).

- Arrhenius expressions;

$$k_1 = 9.490x10^{16}\ exp\left(-\frac{28.879\,K}{T_s}\right),\ \frac{kmol\,kPa^{0.5}}{kg\,h} \quad (2.4)$$

$$k_2 = 4.390x10^{4}\ exp\left(-\frac{8074.3\,K}{T_s}\right),\ \frac{kmol\,kPa^{0.5}}{kg\,h} \quad (2.5)$$

$$k_3 = 2.290x10^{16}\ exp\left(-\frac{29.336\,K}{T_s}\right),\ \frac{kmol\,kPa^{0.5}}{kg\,h} \quad (2.6)$$

- Adsorption coefficient constants;

$$K_{CH_4} = 6.650x10^{-4}\ exp\left(\frac{4604.20\,K}{T_s}\right),\ kPa^{-1} \quad (2.7)$$

$$K_{H_2O} = 1.770x10^{3}\ exp\left(-\frac{10666.35\,K}{T_s}\right),\ kPa^{-1} \quad (2.8)$$

$$K_{H_2} = 6.120x10^{-11}\ exp\left(\frac{9971.13\,K}{T_s}\right),\ kPa^{-1} \quad (2.9)$$

$$K_{CO} = 8.230x10^{-7}\ exp\left(\frac{8497.71\,K}{T_s}\right),\ kPa^{-1} \quad (2.10)$$

- Equilibrium constants.

$$K_{eq,1} = 10266.76\, exp\left(-\frac{26.830\,K}{T_s} + 30.11\right), kPa^2 \quad (2.11)$$

$$K_{eq,2} = exp\left(\frac{4400\,K}{T_s} - 4.063\right), kPa^2 \quad (2.12)$$

$$K_{eq,3} = \left\{10266.76\, exp\left(-\frac{26.830\,K}{T_s} + 30.11\right) exp\left(\frac{4400\,K}{T_s} - 4.063\right)\right\}, kPa^2 \quad (2.13)$$

The net rates of consumption and formation for each component in reactions (1.1), (1.2), and (1.3) were obtained using the following equation (Oliveira and Silva, 2012).

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} \sigma_{ij} R_j \quad (2.14)$$

Where r_i are the net rates of that species (i) in reactions (R_j), σ_{ij} are the stoichiometric coefficients of species and R_j are the reaction (1), (2) and (3) rates.

The effectiveness factors (η_i) are used to account for the intraparticle transport limitation. Thus, the Equation (2.14) was rewritten as given below.

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} \eta_j \sigma_{ij} R_j \quad (2.15)$$

The Equation (2.15) can be used to obtain r_{CH_4}, r_{H_2O}, r_{H_2}, r_{CO} and r_{CO2}. The details of these net rates have given by Oliveira and Silva (2012).

2.3 MATHEMATICAL MODELLING OF THE MEMBRANE REFORMER

The mathematical modelling and computer simulation for the CFBMR are in continuous development aiming to improve the knowledge of the phenomenological processes for this simple unit (combining both the reaction and separation). According to its applications, the CFBMRs are applied in the chemical, petrochemical and oil refining industries. For this work, an one-dimensional mathematical model without axial dispersion taking into account diffusional limitations in the solid porous network was developed. This model has been projected like isothermal dynamic pseudo-homogeneous model. The mass balance equations are given by the following partial differential equation system.

2.3.1 BALANCE EQUATIONS FOR THE SHELL SIDE

The differential balances of the molar flow rates (F_i) for the model components i (i = CH_4, H_2O, H_2, CO and CO_2) in the reaction side (shell side) are given as follows.

$$\frac{u_s}{g}\frac{\partial F_i}{\partial t}+\frac{4\tau Q_g}{4d_{shell}^2}\frac{\partial F_i}{\partial z}=\pi R_{Shell}^2\rho_s L\frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b}\sum_{j=1}^{3}\eta_j\sigma_{ij}R_j-2\pi R_{Shell}J_i^s\ ;\ when\ i\neq H_2, thus\ J_{i\neq H_2}^s=0 \quad (2.16)$$

– The initial and boundary conditions for the Equation (12a) are given as:

$$F_i\big|_{t=0}=F_{i,0}\ ;\ for\ all\ z\ ;F_i\big|_{t=0}=F_{i,0}\ \ for\ reactants\ and\ F_i\big|_{t=0}=0\ \ for\ products \quad (2.17)$$

$$F_i\big|_{z=0^+}=F_{i,Ent.}\ ;\ for\ t\geq 0 \quad (2.18)$$

$$\left.\frac{\partial F_i}{\partial z}\right|_{z=L}=0\ ;\ for\ t\geq 0 \quad (2.19)$$

2.3.2. BALANCE EQUATION FOR THE PERMEATION SIDE

The mass balance equation for the molar flow rate (FH2) of H2 in the permeation side zone (inner tube of CFBMR) is written as follows:

$$\frac{u_s}{g}\frac{\partial F_{H_2}}{\partial t}+\frac{4\tau Q_g}{4d_{inner\,tube}^2}\frac{\partial F_{H_2}}{\partial z}=1.0061x10^{-12}\,exp\left(-\frac{767.38}{T}\right)\left(\frac{A}{\delta}\right)\left[\left(P_{H_2}^s\right)^{0.5}-\left(P_{H_2}^t\right)^{0.5}\right] \quad (2.20)$$

– The initial and boundary conditions for the Equation (13a) are given as:

$$F_{H_2}\big|_{t=0}=0\ ;\ for\ all\ z \quad (2.21)$$

$$F_{H_2}\big|_{z=0^+}=F_{H_2,Ent.}\ ;\ for\ t\geq 0 \quad (2.22)$$

$$\left.\frac{\partial F_{H_2}}{\partial z}\right|_{z=L}=0\ ;\ for\ t\geq 0 \quad (2.22)$$

2.3.3 SOLUTION OF THE MODEL EQUATIONS

The Laplace transform methodology was applied for changing the set of the partial differential equations (PDFs) into a set of ordinary differential equations (EDOs). Then, the new set of EDOs has been integrated by a subroutine based on the Runge-Kutta Gill with automatic step size and double precision to ensure accuracy (Silva and Oliveira, 2013).

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The mathematical modelling was developed to analyze the molar flow rates of chemical species (CH_4, H_2O, H_2, CO and CO_2) on the shell side zone as well as the molar flow rate of H_2 into the permeation side zone. The proposed model for this work has been used to relate the evolution of the molar flow rates over space (z) along the CFBMR (shell side zone and permeation side zone). For this simulation, the computational code was fed with parameters shown in Table 2 as follows.

Table 3: Parameters for the modelling involved in steam reforming of methane.

Categories	Properties	Nu. values	References
Oper. conditions	Shell side feed inlet temp.,T_{shell} (K)	800	Ji et al., (2003)
	Per. side feed inlet temp., $T_{per.}$ (K)	800	Ji et al., (2003)
	Shell side pressure P_{shell}, (kPa)	1250	Ji et al., (2003)
	Permeation side pressure, (kPa)	300	Ji et al., (2003)
Feed compositions	Inlet flow rate of CH_4, F_{CH4} (kmol s^{-1})	$2.5x10^{-6}$	Ji et al., (2003)
	Inlet flow rate of H_2O, F_{H2O} (kmol s^{-1})	$3.5x10^{-6}$	Ji et al., (2003)
	Inlet flow rate of H_2, F_{H2} (kmol s^{-1})	0	Ji et al., (2003)
	Inlet flow rate of CO, F_{CO} (kmol s^{-1})	0	Ji et al., (2003)
	Inlet flow rate of CO_2, F_{CO2} (kmol s^{-1})	0	Ji et al., (2003)
	CH_4/H_2O ratio	2.5	Ji et al., (2003)
	Inlet partial pres. of CH_4, p_{CH4} (kPa)	5.46	Pantoleontos et al.,(2012)
	Inlet partial pres. of H_2O, p_{H2O} (kPa)	18.34	Pantoleontos et al.,(2012)
	Inlet partial pres. of H_2, p_{H2} (kPa)	0.68	Pantoleontos et al.,(2012)
	Inlet partial pres. of CO, p_{co} (kPa)	0.00	Pantoleontos et al.,(2012)
	Inlet partial pres. of CO_2, p_{CO2} (kPa)	0.31	Pantoleontos et al.,(2012)
Gas solid	Porosity of catalyst bed, ε_b (-)	0.43	Ji et al., (2003)
	Catalyst density, ρ_B (kg m^{-3})	2100	Ji et al., (2003)
	Effect. Factors (η_i) for Eqs. 1, 2, 3	0.07, 0.07, 0.57	Xu and Froment, (1989)
	Shell side radius, R_{shell} (m)	$3.00x10^{-3}$	Ji et al., (2003)
	Thickness of dense membrane,δ (m)	$5.0x10^{-5}$	Ji et al., (2003)

3.1. VALIDATION AND SIMULATION

Figure (2a) shows a validation before simulating the CFBMR, the main program which is used to simulate the conventional CFBMR has been checked with data of the literature. The simulation results for conversion of CH4 and data for different authors were validated by comparison (Tong and Matsumura, 2006). Figure (2b) reports the profiles of CH4, H2O, H2, CO and CO2 versus the space variable along the CFBMR (shell side zone).

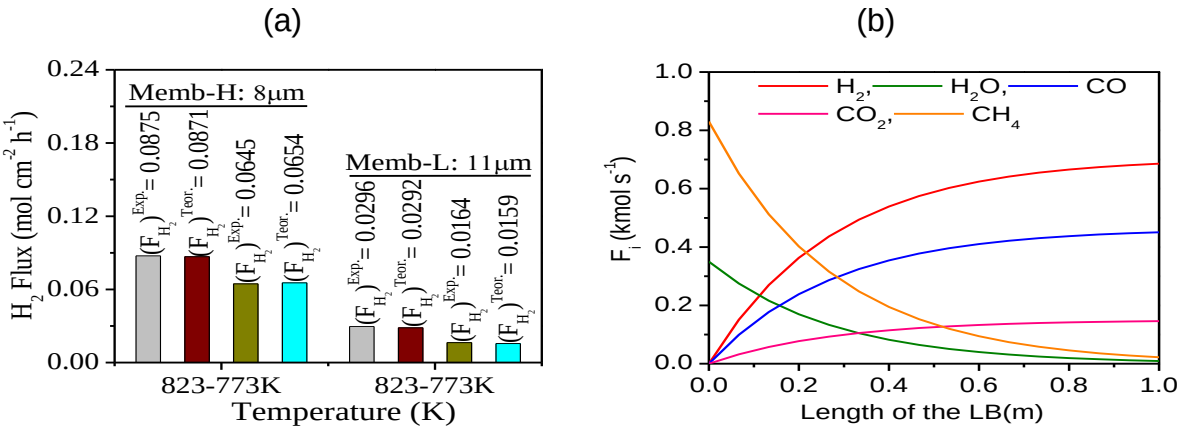


Figure 2: (a) Validation of the model, (b) Profiles of chemical species (CH_4, H_2O, H_2, CO and CO_2) along the CFBMR

3.2. EVOLUTION OF THE MOLAR FLOW RATES IN PERMEATION REGION

Figure (c) shows the evolution of the molar flow rates in the permeation side and shell side zones versus the time variable at the exit of the CFBMR. Figure (d) presents the evolutions of the molar flow rates of H2 at different temperatures (1250K, 1150K and 950K) in the permeation side and shell side zones.

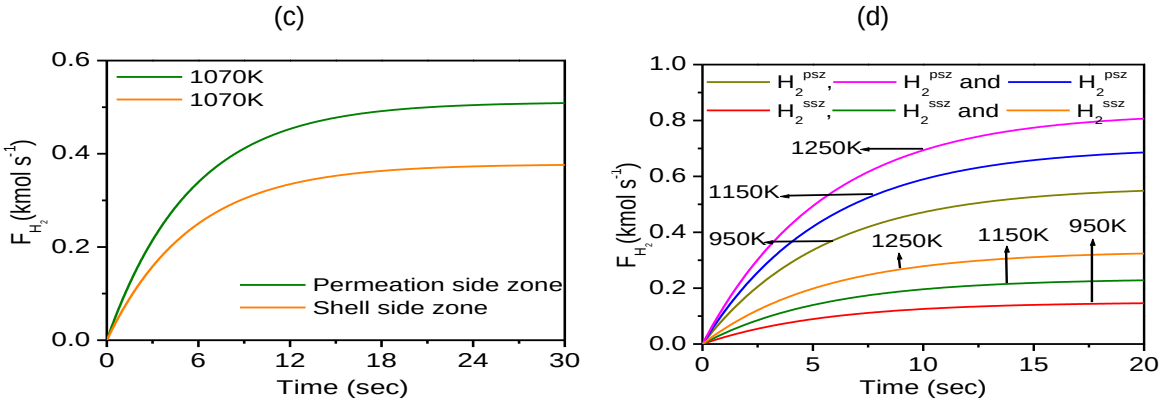


Figure 3: (c) Evolutions of molar flow rates in the permeation side and shell side zones and (d) Evolutions of molar flow rates in the permeation side and shell side zones at different temperatures.

4. CONCLUSIONS

Conducted in the context of reforming of the line of chemical components, this research will resort numerical methodology in order to carry out the process development in an isothermal catalytic membrane reactor dynamics of fixed bed. In conditions allowed for this research, the method of

Runge-Kutta Gill was used to predict the model components (CH_4, H_2O, H_2, CO and CO_2). The development of computer code to process and analyze the behavior of the variables in this research allowed the lead the following conclusions:

- The validation confirmed by comparing which the results of this research and the results obtained by different authors are good agreement;
- Consumption and production have shown the profiles of chemical species (CH_4, H_2O, H_2, CO and CO_2) along the CFBMR;
- The molar flow rates of H_2 at 1070K shown an evolution with the time. Once, The amount of H_2 is most in the permeation side zone than in the shell side zone;
- The molar flow rates of H_2 at different temperatures (1250K, 1150K and 950K) have shown a evolution with the time. Once, the amount of H_2 is most in the permeation side zone than in the shell side zone.

REFERENCES

Ji P., Van Der Kooi H.J., De Swaan Arons J., 2003, Simulation and thermodynamic of an integrated process with H2 membrane CPO reactor for pure H2 production, 58, 3901-3911.

Oliveira C. C. B., Silva J. D., 2012, Dynamic modelling of the gasification region of a bubbling fluidized bed gasifier, Chemical Engineering Transactions, 29, 841-846. doi: 10.3303/CET1229141.

Pantoleontos G., Kikkinides, E. S., Georgiadis, M.C., 2012, A heterogeneous dynamic model for the simulation and optimisation of the steam methane reforming reactor, 37, 16346 - 16358.

Silva J. D., Oliveira C. C. B., 2013, Mathematical modelling for the adsorption process CO2 in nanopores of catalytic particles in a fixed bed reactor using numeral Laplace transform, Chemical Engineering Transactions, 35, 829-835, doi: 10.3303/CET1335138.

Tong, J. and Matsumura, Y., 2006, Pure hydrogen production by methane steam reforming with hydrogen-permeable membrane reactor, Catalysis Today, 111, 147-152.

Xu J, Froment G. F., 1989, Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics, Aiche Journal, 35, 88-96.

Capítulo 12

10.37423/240909327

A THERMOCHEMICAL EVALUATION FOR BIOMASS-DERIVED CARBOHYDRATE CONVERSION: MONOSACCHARAIDE PRODUCTION

Jornandes Dias da Silva *Universidade de Pernambuco-UPE*

1. INTRODUCTION

Lignocellulosic biomass sources, such as energy crops and agro-industrial residues, have been extensively studied over the past decades for their potential in the sustainable production of a wide range of chemicals. LCB is primarily composed of three major components: cellulose, hemicellulose, and lignin, which together account for approximately 90% of the dry material, with the remainder consisting of ash, soluble phenolics, fatty acids, and other minor constituents.

The remarkable strength of plants is largely due to cellulose, the most abundant organic substance in the biosphere. Cellulose is a high-molecular-weight, linear, unbranched homopolymer of D-glucose molecules. The glucose units are linked by β-1,4-glucosidic bonds, forming chains of up to 15,000 glucose units. These polymers associate through hydrogen bonds, resulting in the aggregation of parallel chains to form microfibrils, which combine into larger subunits, creating a fibrous crystalline structure. Although cellulose is highly ordered, certain regions are less crystalline-known as amorphous regions-which are more susceptible to degradation (Fan et al., 1980)

Hemicellulose is the polysaccharide that links cellulose and lignin within plant cell walls. It consists of various sugars, including xylose, arabinose, and mannose, arranged in shorter molecular chains. The type and ratio of sugars in hemicellulose depend on the plant source. Chemically, hemicelluloses are defined as cell wall polysaccharides homologous to cellulose, with a backbone of 1,4-linked β-D-pyranosyl residues. Unlike cellulose, hemicellulose molecules are often branched and highly hydrophilic, forming gels when hydrated. While different plants share the basic xylan structure, they feature distinct sugar arrangements, including L-arabinose, D-glucuronic acid, and 4-methyl-glucuronic acid. Hemicelluloses include xyloglucan, glucomannan, mannan, xylan, arabinoxylan, and arabinogalactan. Those primarily composed of xylose and arabinose are classified as xyloglucans, arabinoglucans, and arabinoxylans (Selvendran and O'Neill, 1985; Wilkie, 1979).

Lignin is a complex, three-dimensional, cross-linked macromolecule composed of phenylpropane units, held together by ether and carbon-carbon bonds. Its main building blocks are guaiacyl, syringyl, and p-hydroxyphenylpropane. Lignin serves to cement and anchor the cellulose and hemicellulose fibers, while simultaneously stiffening and protecting them from physical and chemical damage. In its natural form, lignin's chemical structure is highly aromatic, containing methoxyl, hydroxyl, phenolic, and aliphatic groups.

Carbohydrates and lignin from vegetable biomass can be depolymerized into oligosaccharides and lignin compounds that are soluble in aqueous media. In the presence of homogeneous or heterogeneous catalysts, the selected oligomeric mixtures can be processed to produce value-added chemicals. Through catalytic hydrogenation, hydrogenolysis, or oxidation, these mixtures can be converted into polyols, glycols, monoalcohols, aldehydes, and organic acids (Araújo et al., 2010; Sales et al., 2006). The saccharide molecules contain a wide variety of functional groups, enabling the formation of compounds with diverse chemical structures.

Aiming to develop technologies for the valorization of vegetal biomass in the energy and industrial sectors, a hemicellulose extraction process was applied to sugarcane bagasse to convert xylose and arabinose (Baudel et al., 2005). By leveraging the phenolic components in lignin, many heterogeneous catalysts have been employed for treating effluents from pulp and paper mills. Catalytic oxidation with air and supported catalysts has also been proposed as an alternative for effluent treatment, as well as for managing the by-products of biomass processing (Zhang et al., 1998; Hamoudi et al., 1999; Fargues et al., 1996; Lee et al., 2012). The valorization of lignin-rich effluents through catalytic oxidation or hydrogenolysis has emerged as a promising alternative technology.

2. CARBOHYDRATES FROM BIOMASS

Biomass processing of plants for chemical valorization utilizes the structural characteristics of different plant species. This process involves functional and degrading reactions to produce intermediate products with industrial applications.

The main components of plant tissue, such as cellulose, hemicellulose, lignin, and starch, consist primarily of carbon, hydrogen, and oxygen, along with minor components like minerals and other trace elements. These oxygen-rich natural polymers can also be converted into oxygenated compounds through catalytic hydrogenation, which, under more extreme conditions of temperature and pressure, leads to the cleavage of carbon chains.

The processing of raw materials rich in saccharides, such as sugarcane and starch, and their derivatives, such as molasses and sugarcane bagasse, to produce industrially applicable products like polyols and organic acids has been the subject of several studies (Lichtenthaler, 1991; Baudel et al., 2005).

Hydrogenation of carbohydrates (saccharides → monosaccharides → polyols) has been extensively studied using nickel catalysts with various supports, including kieselguhr, alumina, and activated carbon. Several heterogeneous processes have employed supported catalysts based on nickel,

chromium, and copper to hydrogenate glucose, fructose, and sucrose into sorbitol and mannitol (Abreu et al., 1995; Maranhão et al., 2004). Industrial production of polyols from carbohydrates predominantly uses nickel or Raney nickel as the catalyst; however, this incurs additional costs for separating the dispersed catalyst from the solution. Turek et al. (1983) also investigated nickel catalysts for carbohydrate hydrogenation with silica as the support. Although ruthenium catalysts offer higher yields, nickel remains a more economical choice.

The development of the saccharide hydrogenation process was aimed at polyol production in a batch three-phase reactor (Sales et al., 2006). The nickel catalyst (14.75% by weight) on activated carbon demonstrated significant activity, achieving a conversion rate of 85% with a selectivity for sorbitol of 99.05% at 413 K, under 24 bar, after 3 hours of reaction in the slurry reactor. Under the same conditions, sucrose was processed, producing glucose and fructose as well as sorbitol and mannitol, with a conversion rate of 52% after 3 hours of reaction time.

Based on surface interactions at different sites of a catalyst for the production of glucose, fructose, sucrose, and polyols in relation to hydrogen, the following assumptions were made to formulate a heterogeneous mechanism for carbohydrate hydrogenations: the presence of acidic (metal) and basic (support) sites on the catalyst surface; hydrogen adsorption on the basic sites of the support, where it is dissociated; saccharide adsorption at the acidic sites through the C=O bond; and interactions of dissociated hydrogen with monosaccharides, leading to polyol production, or the action of hydrogen on the glucosidic bond of sucrose, resulting in monosaccharide production. Under more extreme temperature and hydrogen pressure conditions, polyols obtained from hydrogenations can be hydrogenolysed to produce other polyols, glycols, and alcohols. In hydrogenolysis processes with metal catalysts, very low selectivities were observed. Supported catalysts based on noble metals (Pt, Pd, Ru) can selectively convert saccharides into various mixtures of polyols, glycols, and monoalcohols. Hydrogenolysis of saccharidic mixtures from biomass over noble metal catalysts (Ru, Pd) results in the cleavage of carbon-carbon and carbon-oxygen bonds, generating polyols and alcohols.

2.1 HETEROGENEOUS HYDROGENATION KINETICS

The use of solid catalysts promotes the solubilization of oligosaccharides in the aqueous phase, facilitating their hydrolysis into monosaccharides. This approach offers an alternative to homogeneous hydrolytic processes, with solid catalysts providing favorable conditions as the phases are processed separately. Experimental evidence shows that oligosaccharide hydrolysis (OL) occurs only in the

presence of hydrogen in the liquid medium (OL (l) + H2 (g) + Cat. (S) → Mo (l) + Cat. (s)). This suggests that the gas-liquid-catalyst interaction involves hydrogen adsorbed onto the solid catalyst, which then acts on the glycosidic linkages of the saccharides to produce monosaccharides. These observations lead to the application of the Langmuir-Hinshelwood model for the kinetic representation of the consecutive hydrolysis and hydrogenation processes.

$$r_{Sac_{(S)}} = \frac{k'_{Sac} K_{H_2} K_{Sac} C_{H_{2(S)}} C_{Sac_{(S)}}}{\left(1 + K_{H_2} C_{H_{2(S)}}\right)} \quad (2.1)$$

Monosaccharides available from biomass can undergo chemical transformations for valuation through catalytic hydrogenation. This process involves a heterogeneous mechanism, and a proposal based on this mechanism is presented, showing the kinetics of catalytic hydrogenation of monosaccharides (Mo (l) + H2 (g) + Cat. (s) → E (g) + Cat. (s)). The formulation of a Langmuir-Hinshelwood type model, with mechanistic foundations, was undertaken to represent a typical hydrogenation-dehydrogenation mechanism. This model considers the following assumptions: the presence of metallic and basic sites (support) on the catalyst surface; saccharide adsorption at metallic sites through the C=O bond; and hydrogen adsorption at basic sites, which interacts to form polyols. Given the different adsorptive interactions on the catalyst surface for monosaccharides (glucose, fructose, xylose, arabinose) and hydrogen, the rate of reagent consumption can be expressed accordingly.

$$r_{Mo_{(S)}} = \frac{k'_{Mo} K_{H_2} K_{Mo} C_{H_{2(S)}} C_{Mo_{(S)}}}{\left(1 + K_{H_2} C_{H_{2(S)}}\right)\left(1 + K_{Mo} C_{Mo_{(S)}} + K_{Po} C_{Po_{(S)}}\right)} \quad (2.2)$$

Where r_{MO} catalytic reaction rate, ka constant speed, NH_2, KMO, KPO and the equilibrium constants for adsorption of hydrogen, the monosaccharides and polyols, respectively, and CH_2 (S), BMC (s) and DMF (S) concentrations on the surface of the solid.

3. MATERIAL AND METHODS

Delignification and alkaline hydrolysis were performed in a 3000 ml glass slurry bed reactor, with magnetic stirring, using 50 grams of dry pulp and maintaining a solid-to-liquid ratio of 1:25. The liquid phases were analyzed for carbohydrate levels using liquid chromatography with an Aminex HPX-87 column from BioRad, with 0.001 N H_2SO_4 as the mobile phase. For pre-hydrolysis, a 1% hydrochloric acid solution was used at a temperature of 70ºC. The liquid phase (filtered or hydrolysis liquor) was analyzed for total reducing sugars and other components via liquid chromatography. The solid phase

(residual or pre-hydrolyzed bagasse) was analyzed for pentosans and degradation products, such as furfural.

Delignification was performed on bagasse obtained from the pre-hydrolysis process using a 1 mass% NaOH solution at temperatures between 70°C and 80°C for 3 hours. The final material was vacuum filtered, and the residual mass was measured. The liquid phase (filtered or black liquor) was analyzed for total solids and soluble lignins. The solid phase was analyzed to determine the amount of insoluble lignin. Additionally, samples were treated with 37 wt% hydrochloric acid to precipitate the solubilized lignin, which was then quantified.

The extraction of solid hemicelluloses was carried out using a 1% by weight H_2SO_4 solution at 90°C for 2 hours. After extraction, the material was vacuum-filtered, and the solid was quantified. The solid phase was analyzed for pentosan content and furfural. The liquid phase was analyzed using high-performance liquid chromatography (HPLC) to determine the concentrations of monosaccharides (xylose and arabinose) and decomposition products (furfural).

The cellulosic fraction obtained from the previous procedure was subjected to hydrolysis using a 20 mass% HCl solution with 8 wt% LiCl2 as a catalyst-additive at 160°C for 3 hours. After the reaction, the material was vacuum-filtered, and the solid was quantified. The liquid phase was analyzed and quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC) to determine the concentration of extracted carbohydrates. The solid phase was analyzed to determine the solid content for completing the mass balanc

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The evolution of hydrolytic processing techniques has led to the breakdown of biomass into its macro structures, revealing the distribution of monosaccharides and oligosaccharides. During the biorefinery process, aqueous solutions of these saccharides are hydrogenated to form polyols. Pre-hydrolysis aims to alter the structure of biomass, particularly lignin, making it more susceptible to attack by alkalis in the subsequent delignification process. This pre-hydrolysis step, particularly in the context of processing bagasse, has semi-quantitative implications for the biorefining process.

Figures 1a and 1b show the changes in the concentrations of xylose and arabinose produced at 80 °C using three different concentrations of hydrochloric acid. The hemicellulose in the plant tissue was prepared using two methods: one for easy hydrolysis and one for difficult hydrolysis. The results indicate that the amount of xylose and arabinose produced from easy hydrolysis was predominant.

Under mild conditions, the deterioration of arabinose and xylose, particularly through dehydration, occurred at low levels.

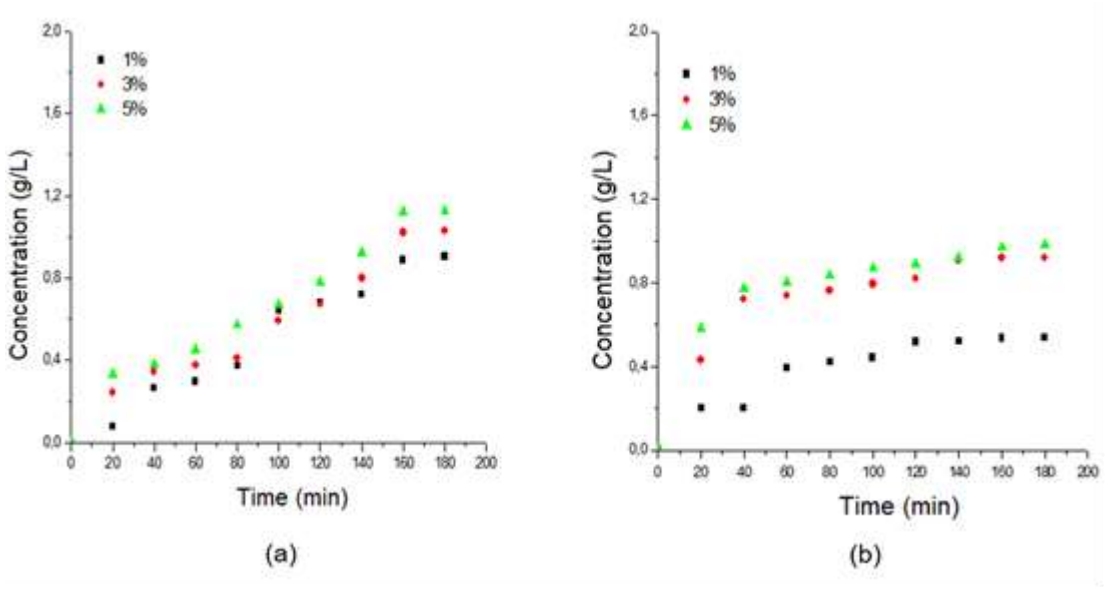


Figure 1. Developments concentrations of xylose (a) and arabinose (b) pre-hydrolysis of biomass. Influence of the acid concentration. Conditions: 80 ° C, 50g mb = VL = 1.5 L.

4.1 DELIGNIFICATION OF BIOMASS PRE-HYDROLYZED

Following the fractionation of biomass, bagasse from the pre-hydrolysis step with hydrochloric acid was treated with sodium hydroxide at three different temperatures (70°C, 80°C, and 90°C). The sodium hydroxide acts on lignin, which serves as a protective barrier for the saccharide fraction, thereby reducing its resistance. For each experiment, isotherm tests were conducted over a duration of 180 minutes.

The evolution of the mass fractions of soluble bagasse, holocellulose, and lignin were measured over time during the delignification process. The measurements revealed the removal of holocellulose (glucan + xylan) and lignin (both soluble and insoluble Klason). It was found that weight loss in bagasse increased with temperature and time. After 180 minutes, the maximum amount of solubilized material was approximately 30 wt% of the initial value exposed to the alkaline solution. While increasing the temperature from 70 °C to 90 °C favored delignification, it had less effect on the loss of glucans and xylans. Kinetic evaluations of delignification at 80 °C are shown in Figure 2, detailing the removal of the two types of lignin.

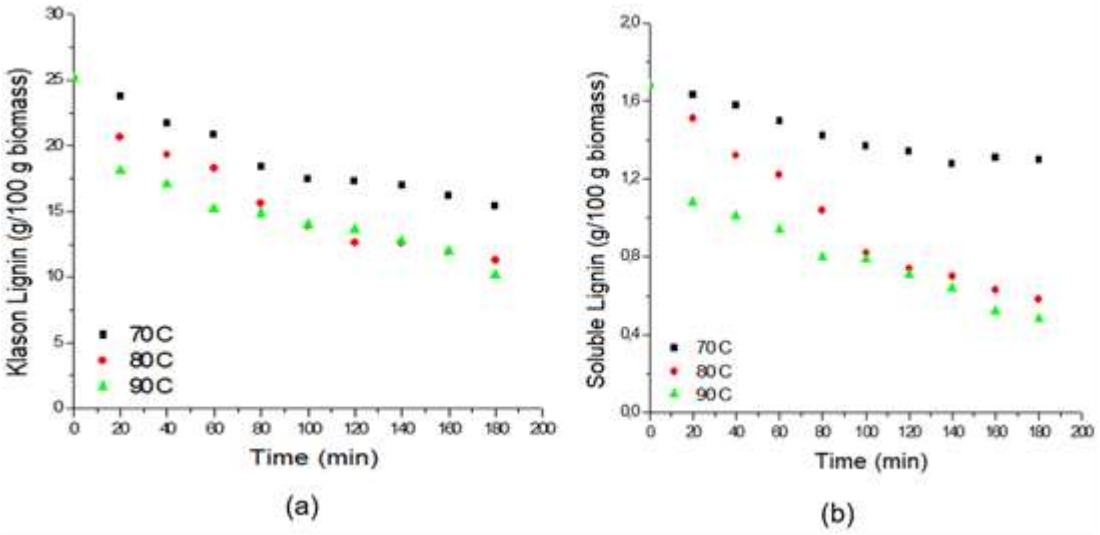


Figure 2. Trends in Klason lignin content of (a) and soluble (b) of pre-hydrolyzed biomass. Influence of temperature. Conditions: NaOH (1% by weight) = mb 50g, VL = 1.5L.

4.2 ACID HYDROLYSIS OF HEMICELLULOSE

To fractionate biomass and isolate the hemicellulose fraction while minimizing saccharide degradation, the delignified pulp was subjected to acid hydrolysis at low concentrations. This approach ensured that the hydrolyzing agents effectively targeted the saccharide fraction, leading to efficient decomposition and removal of hemicelluloses. The effects of temperature and acid concentration on the process were then evaluated.

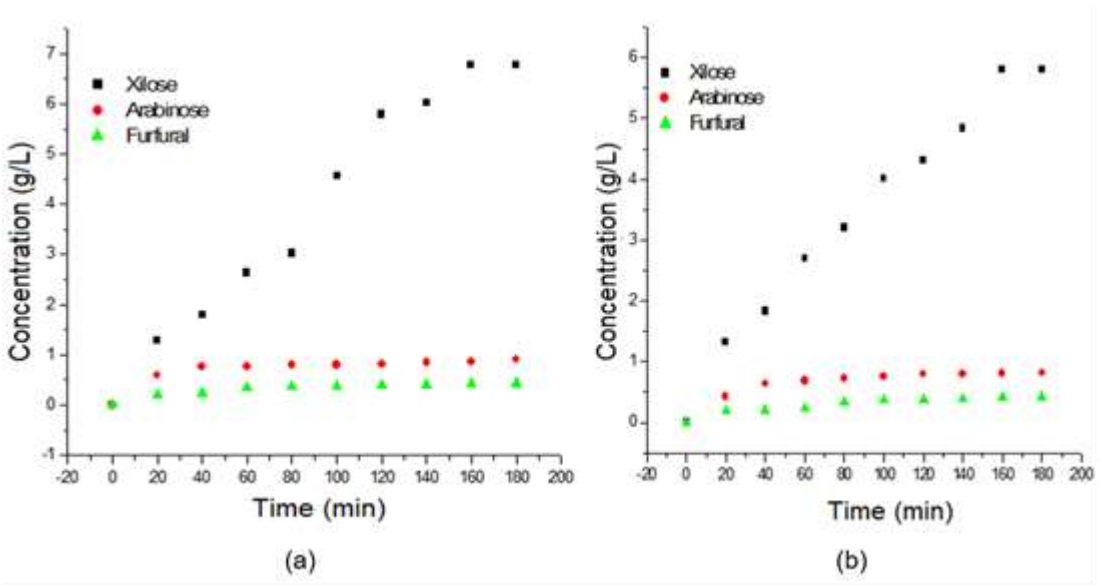


Figure 3. Evolutions of the concentrations of monosaccharides and derivatives of the hydrolytic processing of delignified biomass. Effect of temperature. Conditions: mb = 50g, (a) 90 ° C, (b) 100 ° C H_2SO_4 (1 wt%).

5. CONCLUSIONS

The biomass fractionation process involved pre-hydrolysis, alkaline delignification, and acid-diluted hydrolysis to produce fractions of lignin, hemicellulose, and cellulose, including their derivative saccharides. Following this, the cellulosic fraction was subjected to moderate acid hydrolysis using hydrochloric acid with lithium chloride as a metal ion additive. This hydrolysis process promoted the swelling of cellulosic fibers, facilitating the breakdown of oligosaccharide fractions.

REFERENCES

Abreu, C. A. M., N. M. Lima Filho and A. Zoulalian (1995) “Catalytic hydrogenolysis of Starch: kinetic evaluation of selectivity in polyol and monoalcohol formation”. Biomass and Bioenergy Vol 9, No. 6, 487-492.

Baudel, H. M.; Zaror, C.; Abreu, C. A. M. (2005) “Improving the value of sugarcane bagasse wastes via integrated chemical production systems: an environmentally friendly approach”. Industrial Crops and Products. v. 21, n. 3, p. 309-315.

Cho Rim Lee Ji Sun Yoon, Young-Woong Suh, Jae-Wook Choi, Jeong-Myeong Ha, Dong Jin Suh, Young-Kwon Park (2012) ´´Catalytic roles of metals and supports on hydrodeoxygenation of lignin monomer guaiacol`` Catalysis Communications v.17, p.54-58.

Fan, L.T., Lee, Y-H., Beardmore, D.H. (1980) “Major chemical and physical features of cellulosic materials as substrates for enzymatic hydrolysis”. Adv. Biochem. Eng. 14:101-117.

Fargues. C.; Mathias, A. E Rodrigues, A. (1996) “Kinetics of Vanilin Production from Kraft Lignin Oxidation”. Industrial Engineering and Chemistry Research. v.35, p.28-36.

F. W. Lichtenthaler:(1991) Carbohydrates as Organic Materials, vol. I, VCH, Weinheim.

José D.P. Araújo, Carlos A. Grande, Alírio E. Rodrigues (2010).´´Vanillin production from lignin oxidation in a batch reactor`` Chemical Engineering Research and Design. Vol 88, 1024-1032.

Hamoudi, S., Belkacemi, K. E Larachi, F. (1999) “Catalytic oxidation of aqueous phenolic solutions catalyst deactivation and kinetics”. Chemical Engineering Science, v.54, p.3568-3576.

L. C. A. Maranhão, F. G. Sales, J. A. F. R. Pereira, C. A. M. Abreu (2004) “Evaluation of polyol production by three-phase catalytic hydrogenation of saccharides”. React. Kinet. Catal. Lett. 81, 169-175.

Sales, F. G., Maranhão, L. A., Lima Filho, N. M., Abreu, C. A. M. (2006) “Kinetic evaluation and modeling of lignin catalytic wet oxidation to selective production of aromatic aldehydes”. Industrial & Engineering Chemistry Research. v. 45, p. 6627-6631.

Selvendran and O'Neill (1985). “Isolation and analysis of cell walls from plant material”. In: Methods of Biochemical Analysis, Volume 32, 25-123 (D Glick Ed.), John Wiley & Sons, N. Y.

Wilkie, K.C.B. (1979) “The hemicelluloses of grasses and cereals”. Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry. 36, 215-264.

Zhang, Q. E Chuang, K. T. (1998) “Kinetics of wet oxidation of black liquor over a Pt-Pd-Ce/alumina catalyst”. Applied Catalysis B: Environmental. v.17, p.321-332.

Turek, F., Chakrabarti, R. K., Lange, R., Geike, R. and Flock, W. (1983) “On the experimental study and scale-up of three-phase catalytic reactors. Hydrogenation of glucose on nickel catalyst”. Chemical Engineering Science vol. 38, pp. 275-281.

Capítulo 13

10.37423/240909330

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CIRCUITO ELÉTRICO RLC PARALELO POR MEIO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE A PARTIR DOS SOFTWARES MATLAB® E LTSPICE®

Ayan Gustavo Nakamura Yoshida — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Eriko Vinicius Vieira do Nascimento — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Guilherme dos Santos Proença — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Leonildo Hilton Alves Junior — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Lucas Carmona de Oliveira — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Flávio Luiz Rossini — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão*

Resumo: Este artigo apresenta a modelagem e análise de um circuito RLC (resistor, indutor e capacitor) paralelo, a partir da aplicação da Transformada de Laplace e a valiação da solução por meio da simulação nos *softwares* MATLAB® e LTspice®**.** A transformada permite a mudação de domínio de equações diferenciais no tempo contínuo para equações algébricas no domínio de Laplace. Essa passagem, diminui o grau de dificuldade, de diferencial para algébrico, respectivamente. Dessa forma, realizou-se a modelagem e a solução no domínio da frequência; em seguida, aplicou-se a Transformada de Laplace Inversa para obter a solução no domínio do tempo; e desenvolveram-se as simulações nos *softwares* MATLAB® e LTspice® para obtenção dos resultados numéricos respectivas e comparações.

Palavras-chave: Modelagem e Análise de Circuitos, Solução no Domínio da Frequência, *Software* LTspice® *Software* MATLAB®.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresenta-se a fundamentação teórica, juntamente com o conjunto referencial bibliográfico.

1.1 TRANSFORMADA DE LAPLACE E A REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES ELÉTRICOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Em circuitos elétricos, a Transformada de Laplace tem grande valor, pois com ela é possível analisar sistemas lineares no domínio da frequência [1]. Dessa forma, o tratamento desses sistemas é simplificado, principalmente quanto a resolução de equações diferenciais [2]. A seguir é possível observar a forma como os componentes de um circuito RLC são representados, após a aplicação da Transformada de Laplace.

1.1.1 RESISTOR

No resistor a relação entre tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ é dada por [3]

$$v(t) = Ri(t) \tag{1}$$

sendo R a resistência e t o tempo contínuo.

Aplicou-se a Transformada de Laplace nos dois lados da Eq. (1)

$$\mathcal{L}\{v(t)\} = R\mathcal{L}\{i(t)\} \tag{2}$$

Resultou em

$$V(s) = RI(s) \tag{3}$$

sendo a variável complexa.

Dessa forma, verificou-se que a relação entre a tensão $v(t)$ e a corrente $i(t)$ permanece linear no domínio da frequencia, sendo assim a impedância, Z_R, de um resistor é constante igual ao valor da resistência R

$$Z_R(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = R \tag{4}$$

1.1.2 CAPACITOR

No capacitor a relação entre tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ é dada por [4]

$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt} \tag{5}$$

sendo C a capacitância e d/dt o operação diferencial.

Aplicou-se a Transformada de Laplace nos dois lados da Eq. (5)

$$\mathcal{L}\{i(t)\} = C\mathcal{L}\left\{\frac{dv(t)}{dt}\right\} \tag{6}$$

Eq. (6) resultou em

$$I(s) = C[sV(s) - v(0)] \tag{7}$$

sendo $v(0)$ a condição inicial da tensão no capacitor.

Expandiu-se a Eq. (7)

$$I(s) = CsV(s) - Cv(0) \tag{8}$$

Rearranjou-se a Eq. (8)

$$V(s) = \frac{I(s)}{Cs} - \frac{v(0)}{s} \tag{9}$$

Para as condições iniciais são nulas, logo $v(0) = 0$ obtem-se

$$V(s) = \frac{I(s)}{Cs} \tag{10}$$

Dessa forma, a impedância no capacitor, Z_c, resultou em

$$Z_c(s) = \frac{1}{Cs} \tag{11}$$

1.1.3 INDUTOR

No indutor a relação entre tensão v(t) e corrente i(t) é dada por [5]

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt} \tag{12}$$

sendo L o valor da indutância.

Aplicou-se a Transformada de Laplace nos dois lados da Eq. (12)

$$\mathcal{L}\{v(t)\} = L\mathcal{L}\left\{\frac{di(t)}{dt}\right\} \tag{13}$$

Eq. (13) resultou em

$$V(s) = L[sI(s) - i(0)] \quad (14)$$

Sendo $i(0)$ a condição inicial de corrente para o indutor.

Expandiu-se a Eq. (14)

$$V(s) = LsI(s) - Li(0) \quad (15)$$

Para as condições iniciais são nulas, logo $i(0) = 0$

$$V(s) = LsI(s) \quad (16)$$

Dessa forma, a impedância no indutor, Z_i, resultou em

$$Z_i(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = Ls \quad (17)$$

1.2 ANÁLISE DAS MALHAS E LEI DE KIRCHHOFF DAS TENSÕES

A análise das malhas é um método eficaz para resolução de circuitos elétricos, a partir dela é possível encontrar as correntes presentes em cada malha do circuito.

1.2.1 SENTIDO DAS CORRENTES

Arbitra-se um mesmo sentido para as correntes em cada uma das malhas do circuito, esse pode ser no sentido horário ou anti-horário, o que implicará apenas na interpretação do resultado final [6].

1.2.2 LEI DE KIRCHHOFF DAS TENSÕES

Após aplicação da Lei de Kirchhoff das Tensões em cada malha do circuito, tal lei indica que a soma algébrica das tensões na malha fechada é nula [7]

$$\sum V_i = 0 \quad (188)$$

sendo V_i a queda de tensão no componente i.

Após a aplicação da Lei de Kirchhoff são obtidas as equações para cada malha, com isso constitui-se um sistema de equações que quando solucionado resulta nas correntes que buscam-se obter [8].

1.3 METODO DE CRAMER

Este é um método de resolução de sistemas de equações que pode ser utilizado em conjunto com a análise das malhas, para obter os valores das correntes no circuito [9].

A partir da representação o sistema de equações na forma matricial

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (199)$$

sendo a_{11}, a_{12}, a_{21} e a_{22} as impedâncias das respetivas malhas.

Para se obter as correntes i_1e i_2, torna-se necessário obter o determinante da matriz principal Δ

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (20)$$

E o mesmo deve ser feito para as matrizes Δ_1 e Δ_2, em que os termos independentes da Eq. (19) são substituídos das colunas da matriz principal, da forma

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} V_1 & a_{12} \\ V_2 & a_{22} \end{vmatrix} \quad (211)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & V_1 \\ a_{21} & V_2 \end{vmatrix} \quad (222)$$

Por fim, as correntes i_1 e i_2 poderão ser obtidas da seguinte forma

$$i_1(t) = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (233)$$

$$i_2(t) = \frac{\Delta_2}{\Delta} \quad (244)$$

1.4 FRAÇÕES PARCIAIS

Uma técnica matemática para simplificar a divisão de polinômios possibilita separar essa divisão em uma soma de frações mais simples de resolução. Tal técnica torna-se importante na resolução dos circuitos, pois após aplicar o método de Cramer, a expressão da corrente será [10]

$$\frac{P(s)}{Q(s)} \quad (255)$$

onde o grau do polinômio do numerador $P(s)$ dever ser menor do que o grau do denominador $Q(s)$, isso possibilita que a expressão seja reescrita desta maneira

$$\frac{A_1}{s-a} + \frac{A_2}{(s-a)^2} + \cdots + \frac{A_n}{(s-a)^n} \quad (266)$$

sendo A_1, A_2 e A_n são os residuos das frações parciais.

Para que então sejam obtidos esses residuos, e por fim aplicar a transformada inversa de Laplace.

1.5 TRANSFORMADA INVERSA DE LAPLACE

Esta é a ferramenta inversa da Transformada de Laplace, a partir da Eq. (26), obtém-se a resposta no tempo. A transformada inversa é representada por

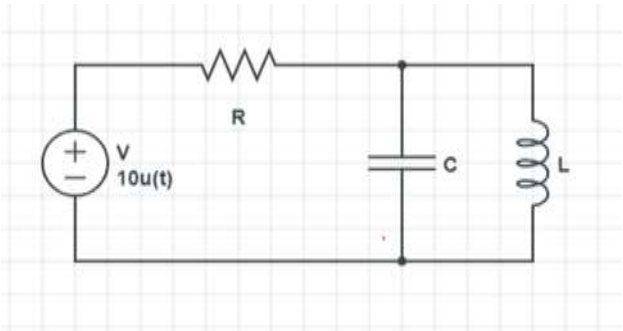
$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} \tag{277}$$

Esse é o último passo na solução do circuito, após manipular a expressão das correntes por frações parciais e substituir seus resíduos, de modo a obter um formato cujo a transforma inversa é conhecida, basta apenas realizar a transformação a partir tabela da Transformada de Laplace [10].

2 MEMORIAL DE CÁLCULO

Na Figura 1, apresenta-se o circuito analisado.

Figura 1 - Circuito no domínio do tempo.



Fonte: Plataforma Circuitlab®.

Reescreveram-se os componentes do circuito apresentado na Figura 1, para suas formas no domínio da frequência, as equações da fonte e das impedâncias

$$10u(t) \rightarrow \frac{10}{s} \tag{288}$$

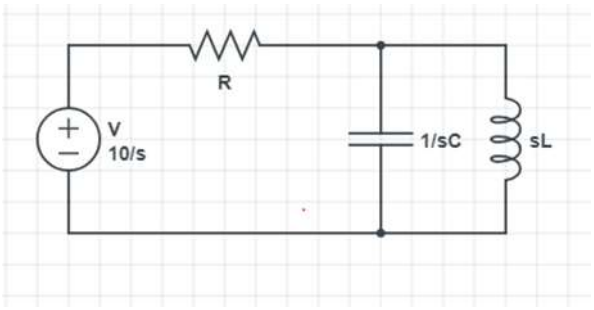
$$R \rightarrow R \tag{299}$$

$$C \rightarrow \frac{1}{sC} \tag{300}$$

$$L \rightarrow sL \tag{311}$$

Na Figura 2, apresenta-se o circuito transformado.

Figura 2: Circuito transformado.



Fonte: Plataforma Circuitlab®

A partir da Lei de Kirchhoff das tensões, obtiveram-se as equações das malhas do circuito (Figura 2), adotou-se o sentido horário para as correntes.

Malha esquerda:

$$RI_1(s) + \frac{1}{sC}[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{10}{s} \tag{322}$$

Malha direita:

$$\frac{1}{sC}[I_2(s) - I_1(s)] + sLI_2(s) = 0 \tag{333}$$

Que resultou no seguinte sistema de equações

$$\begin{cases} RI_1(s) + \frac{1}{sC}[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{10}{s} \\ \frac{1}{sC}[I_2(s) - I_1(s)] + sLI_2(s) = 0 \end{cases} \tag{344}$$

Realizou-se o MMC (mínimo múltiplo comum) do Sistema (34), da forma

$$\begin{cases} RI_1(s)s + \frac{1}{sC}s[I_1(s) - I_2(s)] = \frac{10}{s}s \\ \frac{1}{sC}s[I_2(s) - I_1(s)] + sLI_2(s)s = 0 \end{cases} \tag{355}$$

Simplificou-se o Sistema (35)

$$\begin{cases} R_s\, I_1(s) + \dfrac{1}{C}[I_1(s) - I_2(s)] = 10 \\ \dfrac{1}{C}[I_2(s) - I_1(s)] + s^2 L I_2(s) = 0 \end{cases} \tag{366}$$

Substituiu-se os valores de R, C e L nas equações do Sistema (36)

$$\begin{cases} 3s\, I_1(s) + \dfrac{1}{1/18}[I1(s) - I_2(s)] = 10 \\ \dfrac{1}{1/18}[I_2(s) - I_1(s)] + 2s^2 I_2(s) = 0 \end{cases} \tag{377}$$

Rearrnjou-se as equações do Sistema (37)

$$\begin{cases} 3s\, I_1(s) + 18 I_1(s) - 18 I_2(s) = 10 \\ -18 I_1 + 18 I_2(s) + 2s^2 I_2(s) = 0 \end{cases} \tag{388}$$

Evidenciaram-se os termos I_1 e I_2 do Sist. (38)

$$\begin{cases} (3s + 18) I_1(s) - 18 I_2(s) = 10 \\ -18 I_1 + (2s^2 + 18) I_2(s) = 0 \end{cases} \tag{399}$$

A partir do Sistema de Equações (39), reescreveu-se na forma matricial, conforme a Eq. (19), da forma

$$\begin{bmatrix} (3s + 18) & -18 \\ -18 & (2s^2 + 18) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{400}$$

Primeiramente, calculou-se a corrente I_1 pelo método de Cramer, Eq.(23), como

$$I_1(s) = \frac{\begin{bmatrix} 10 & -18 \\ 0 & (2s^2 + 18) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} (3s + 18) & -18 \\ -18 & (2s^2 + 18) \end{bmatrix}} \tag{41}$$

A partir da Eq. (41), obteve-se

$$I_1(s) = \frac{10(2s^2 + 18)}{(3s + 18)(2s^2 + 18) - 324} \tag{422}$$

Desenvolveram-se as multiplicações na Eq. (42) e reescreveu-se

$$I_1(s) = \frac{20s^2 + 180}{6s^3 + 54s + 36s^2 + 324 - 324} \tag{433}$$

Realizou-se a soma dos valores semelhantes no denominador da Eq. (43), como

$$I_1(s) = \frac{20s^2 + 180}{6s^3 + 36s^2 + 54s} \tag{444}$$

Evidenciaram-se as constantes na Eq. (44) que acompanham as variáveis de maior ordem

$$I_1(s) = \frac{20(s^2 + 9)}{6(s^3 + 6s^2 + 9s)} \tag{455}$$

Destacou-se o ganho da função de transferência (FT), Eq. (45), expressa por

$$I_1(s) = \frac{10}{3}\left[\frac{s^2 + 9}{s^3 + 6s^2 + 9s}\right] \tag{466}$$

Fatorou-se o denominador da Eq. (46)

$$I_1(s) = \frac{10}{3}\left[\frac{s^2 + 9}{s(s + 3)^2}\right] \tag{477}$$

Dessa forma, obteve-se a expressão simplificada para corrente I_1 no domínio da frequência

$$I_1(s) = \frac{s^2 + 9}{s(s + 3)^2}$$

(488)

Em seguida, tomou-se a Eq. (48) e expandiou-se em frações parciais, conforme a Eq. (26)

$$\frac{s^2+9}{s(s+3)^2} = \frac{a}{s} + \frac{b}{(s+3)} + \frac{c}{(s+3)^2} \tag{49}$$

Obteve-se o MMC da Eq. (49), afim de simplificá-la

$$\frac{s^2+9}{s(s+3)^2} = \frac{a(s+3)^2 + bs(s+3) + cs}{s(s+3)^2} \tag{50}$$

Que resultou em

$$s^2+9 = a(s+3)^2 + bs(s+3) + cs \tag{51}$$

Efetuou-se a expansão da Eq. (51)

$$s^2+9 = a(s^2+6s+9) + bs^2 + 3bs + cs \tag{522}$$

Obteve-se

$$s^2+9 = as^2 + 6as + 9a + bs^2 + 3bs + cs \tag{533}$$

Evidenciou-se os termos na Eq. (53) em função das potências da variável complexa

$$s^2+9 = (a+b)s^2 + (6a+3b+c)s + 9a \tag{54}$$

Dessa forma, constitui-se o sistema de equações, a fim de obter os resíduos (a, b e c)

$$\begin{cases} a+b=1 \\ 6a+3b+c=0 \\ 9a=9 \end{cases} \quad (55)$$

Camputou-se o valor do residuo a da terceira equação do Sistema (55)

$$9a=9 \quad (56)$$

Isolou-se o resíduo a

$$a=\frac{9}{9} \quad (57)$$

Determinou-se o resultado da Eq. (57)

$$a=1 \quad (58)$$

A partir do resultado, Eq. (58), substituiu-se na primeira equação do Sistema (55)

$$a+b=1 \quad (599)$$

Substitui-se em Eq. (59) o valor do residuo $a=1$

$$1+b=1 \quad (60)$$

Isolou-se o residuo b

$$b=1-1 \quad (61)$$

Resultou em

$$b=0 \quad (62)$$

Por fim, substituíram-se os valores dos resíduos a e b, Eqs. (58) e (62), na segunda equação do Sistema (55)

$$6a+3b+c=0 \quad (63)$$

Substituiram-se os valores dos resíduos a e b na Eq. (63)

$$6(1)+3(0)+c=0 \quad (64)$$

Simplificou-se a Eq. (64)

$$6 + c = 0 \tag{655}$$

Resultou em

$$c = -6 \tag{666}$$

Após obter os valores de todos os resíduos, substituiram-se na Eq. (49), a qual representa a primeira corrente

$$I_1(s) = \frac{10}{3}\left[\frac{s^2+9}{s(s+3)^2}\right] = \frac{a}{s} + \frac{b}{(s+3)} + \frac{c}{(s+3)^2} \tag{67}$$

Da forma

$$I_1(s) = \frac{10}{3}\left[\frac{s^2+9}{s(s+3)^2}\right] = \frac{1}{s} + \frac{0}{(s+3)} - \frac{6}{(s+3)^2} \tag{68}$$

Reescreveu-se Eq. (68)

$$I_1(s) = \frac{10}{3}\left[\frac{s^2+9}{s(s+3)^2}\right] = \frac{1}{s} - \frac{6}{(s+3)^2} \tag{699}$$

Realizou-se a transformada inversa de Laplace, conforme a Eq. ((277), primeira parcela da direita da Eq. (69)

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1 \tag{70}$$

Segunda parcela da direita da Eq. (69)

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{-\frac{6}{(s+3)^2}\right\} = -6\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+3)^2}\right\} = -6te^{-3t} \tag{71}$$

Reuniram-se as Eqs. (70) e (71)

$$i_1(t) = \frac{10}{3}[1 - 6te^{-3t}]$$

(722)

Multiplicou-se a Eq. (72) pela constante $\frac{10}{3}$, que resultou em

$$i_1(t) = \frac{10}{3} - 20te^{-3t} \tag{73}$$

Realizou-se o mesmo processo para obter a equação da corrente I_2.

A partir do método de Cramer, obteve-se a expressão da corrente I_2 no domínio da frequência, conforme a Eq. (24)

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix}(3s+18) & 10\\ -18 & 0\end{bmatrix}}{\begin{bmatrix}(3s+18) & -18\\ -18 & (2s^2+18)\end{bmatrix}} \tag{744}$$

Efetuou-se as operações na Eq. (74) e resultou em

$$I_2(s) = \frac{180}{(3s+18)(2s^2+18) - 324} \tag{755}$$

Realizou-se a expansão das expressões no denominador da Eq. (75)

$$I_2(s) = \frac{180}{6s^3 + 54s + 36s^2 + 324 - 324} \tag{766}$$

Executou-se a soma dos valores semelhantes no denominador da Eq. (76)

$$I_2(s) = \frac{180}{6s^3 + 36s^2 + 54s} \tag{77}$$

Simplificou-se a Eq. (77), da forma

$$I_2(s) = \frac{30}{(s^3 + 6s^2 + 9s)} \tag{788}$$

Fatorou-se a Eq. (78)

$$I_2(s) = \frac{30}{s(s+3)^2} \tag{79}$$

Dessa forma, obteve-se a expressão simplificada para corrente i_2 no domínio da frequência

$$I_2(s) = \frac{30}{s(s+3)^2} \tag{80}$$

Após obtida a Eq. (80), expandiu-se em funções parciais, conforme a Eq. (26), da forma

$$\frac{30}{s(s+3)^2} = \frac{a}{s} + \frac{b}{(s+3)} + \frac{c}{(s+3)^2} \tag{81}$$

Computou-se o MMC da Eq. (81), afim de simplificá-la

$$\frac{30}{s(s+3)^2} = \frac{a\,(s+3)^2 + bs(s+3) + cs}{s(s+3)^2} \tag{82}$$

Simplificou-se a Eq. (82), da forma

$$30 = a(s+3)^2 + bs(s+3) + cs \tag{83}$$

Expandirram-se as mutiplicações da Eq. (83)

$$30 = a(s^2 + 6s + 9) + bs^2 + 3bs + cs \tag{84}$$

Obteve-se

$$30 = as^2 + 6as + 9a + bs^2 + 3bs + cs \tag{85}$$

Evidenciaram-se os termos na Eq. (85) em função das potências da variável complexa

$$30 = (a + b)s^2 + (6a + 3b + c)s + 9a \quad (866)$$

A partir da Eq. (86), constituiu-se o seguinte sistema de equações

$$\begin{cases} a + b = 0 \\ 6a + 3b + c = 0 \\ 9a = 30 \end{cases} \quad (877)$$

Primeiramente, determinou-se o valor do residuo a na terceira equação do Sistema (87)

$$9a = 30 \quad (888)$$

Isolou-se o resíduo a

$$a = \frac{30}{9} \quad (899)$$

Simplificou-se o resultado da Eq. (89)

$$a = \frac{10}{3} \quad (900)$$

Subtituiu-se o valor da Eq. (90) na primeira equação do Sistema (87)

$$a + b = 0 \quad (911)$$

Da forma

$$\frac{10}{3} + b = 0 \quad (922)$$

Resultou em

$$b = -\frac{10}{3} \tag{933}$$

Por fim, substituiram-se os valores dos resíduos a e b, Eqs. (90) e (93), na segunda equação do Sistema (87), da forma

$$6\left(\frac{10}{3}\right) + 3\left(-\frac{10}{3}\right) + c = 0 \tag{94}$$

Simplificou-se a Eq. (94)

$$20 - 10 + c = 0 \tag{955}$$

Isolou o resíduo c.

$$c = -20 + 10 \tag{96}$$

Determinou-se que

$$c = -10 \tag{977}$$

A partir dos resíduos, tomou-se a Eq. (81)

$$I_2(s) = \frac{30}{s(s+3)^2} = \frac{a}{s} + \frac{b}{(s+3)} + \frac{c}{(s+3)^2} \tag{98}$$

Substituíram-se os resíduos Eqs. (90), (93) e (97) na Eq. (98), como

$$I_2(s) = \frac{30}{s(s+3)^2} = \frac{\frac{10}{3}}{s} + \frac{-\frac{10}{3}}{(s+3)} + \frac{-10}{(s+3)^2} \tag{99}$$

Computou-se a transformada inversa de Laplace da Eq. (99), conforme a Eq. (27)

$$\mathcal{L}^{-1}\{I_2(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{\frac{10}{3}}{s} + \frac{-\frac{10}{3}}{(s+3)} + \frac{-10}{(s+3)^2}\right\} \quad (10000)$$

A transformada inversa da soma é a soma das transformadas inversas

$$i_2(t) = \frac{10}{3}\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} - \frac{10}{3}\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+3)}\right\} - 10\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+3)^2}\right\} \quad (101)$$

Resultou em

$$i_2(t) = \frac{10}{3} - \frac{10}{3}e^{-3t} - 10te^{-3t} \quad (102)$$

Obtidas as equações para as correntes i_1 e i_2, Eqs. (73) e (102), computou-se a tensão no capacitor. Integrou-se ambos os lados da Eq. (5), da forma

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt \quad (103)$$

Para obter a tensão no capacitor Eq. (103), calculou-se a diferença entre as correntes i_1e i_2

$$v_c(t) = \frac{1}{C}\int_0^t [i_1(t) - i_2(t)]dt \quad (104)$$

Substituiram-se a capacitância e as Eqs. (73) e (102) na Eq. (104), como

$$v_c(t) = \frac{1}{\frac{1}{18}}\int_0^t \left[\left(\frac{10}{3} - 20te^{-3t}\right) - \left(\frac{10}{3} - \frac{10}{3}e^{-3t} - 10te^{-3t}\right)\right]dt \quad (105)$$

Rearranjou-se a Eq. (105)

$$v_c(t) = 18\int_0^t \left[-10te^{-3t} + \frac{10}{3}e^{-3t}\right]dt \quad (1066)$$

Multiplicou-se a constante em cada parcela da integral

$$v_c(t) = \int_0^t [-180te^{-3t} + 60e^{-3t}]dt \quad (10707)$$

Separou-se a Eq. (107) na soma e evidênciaram-se as contantes

$$v_c(t) = -180\int_0^t te^{-3t}dt + 60\int_0^t e^{-3t}dt \quad (108)$$

A primeira integral da Eq. (108), revolveu-se por integração por partes

$$\int udv = uv - \int vdu \quad (109)$$

onde

$$u = t, du = dt, dv = e^{-3t} \text{ e } v = -\frac{1}{3}e^{-3t} \quad (110)$$

Resultou em

$$V_C(t) = -180\left[-\frac{t}{3}e^{-3t}\Big|_0^t - \int_0^t -\frac{1}{3}e^{-3t}dt\right] + 60\left(\frac{1}{3}e^{-3t}\right)\Big|_0^t \quad (1111)$$

A integral restante, última da direita da Eq. (108), revolveu-se diretamente pela seguinte propriedade

$$\int e^{kt}dt = \frac{1}{k}e^{kt} \quad (11212)$$

Que resultou em

$$v_c(t) = -180\left[-\frac{te^{-3t}}{3} + \frac{1}{3}\left(\frac{1}{3}e^{-3t}\right)\Big|_0^t\right] - 20e^{-3t}|_0^t \quad (113)$$

Aplicaram-se os limites de integração na Eq. (113) e obteve-se

$$v_c(t) = -180\left[-\frac{te^{-3t}}{3} - \frac{1}{9}(e^{-3t} - 1)\right] - 20(e^{-3t} - 1) \quad (1144)$$

Multiplicaram-se as contantes na Eq. (114)

$$v_c(t) = 60te^{-3t} + 20(e^{-3t} - 1) - 20(e^{-3t} - 1) \quad (115)$$

Por fim, realizaram-se as simplicações na Eq. (115) e obteve-se a expressão para o comportamento da tensão no capacitor da Figura 1, dada por

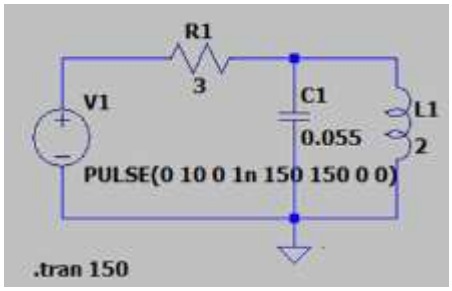
$$v_c(t) = 60te^{-3t} \quad (116)$$

O método apresentado nesta seção, pode ser aplicado a outros problemas relacionados, uma vez que o sistema seja linear invariante em tempo contínuo, tais como: (i) controle adaptativo [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]; (ii) sistema de identificação e filtragem [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25]; e (iii) controle modo deslizante [9] [10] [26].

CIRCUITO SIMULADO NO LTSPICE®

Simulou-se o circuito no *software* LTspice® com a seguinte configuração dos parâmetros para a fonte de tensão, ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Circuito simulado no *software* LTspice®.



Fonte: *software* LTspice®

A fonte de tensão do circuito possui comportanento expresso por $10u(t)$, sendo $u(t)$ a função degrau unitário. Para representar esta fonte na simulação, utilizou-se uma fonte de tensão *Voltage* e selecionou-se o tipo *Pulse*. Os parâmetros da fonte, **PULSE**$(\boldsymbol{p_1\ p_2\ p_3\ p_4\ p_5\ p_6\ p_7\ p_8})$, que estão entre os parênteses são respectivamente:

- $\boldsymbol{p_1}$ ➔ *Vinitial*: Tensão inicial, que neste caso é zero;
- $\boldsymbol{p_2}$ ➔ *Von*: Tensão após o degrau, que é igual a dez;
- $\boldsymbol{p_3}$ ➔ *Tdelay*: Tempo antes do pulso começar, que é igual a zero;
- $\boldsymbol{p_4}$ ➔ *Trise*: Tempo de subida do pulso, deve ser um valor suficientemente pequeno, utilizou-se um nanossegundo;
- $\boldsymbol{p_5}$ ➔ *Tfall*: Tempo de queda do pulso, neste caso é zero, pois o valor fica constante em 10;
- $\boldsymbol{p_6}$ ➔ *Ton*: Tempo em que a tensão do pulso permanecerá em 10, neste caso é igual ao tempo da simulação do circuito, já que este valor permanece constante o tempo todo;
- $\boldsymbol{p_7}$ ➔ *Tperiod*: Tempo de repetição do pulso, neste caso como não ocorre repetição o valor pode ser o mesmo que o tempo de simulação do circuito; e

- $\boldsymbol{p_8}$ ➔ *Ncycles*: Número de vezes que o pulso repete, neste caso como é um pulso constante este valor pode ser desconsiderado (igual a zero) ou igual a um.

Dessa forma, utilizaram-se as Eqs. (73), (102) e (116) para construir o código no MATLAB® e em seguinda a configuração para simulação do circuito no LTspice®, conforme a Figura 3. Assim, tornou-se possível obter as formas de ondas das correntes Eqs. (73) e (102) e da tensão no capacitor Eq. (116), a fim de validar as respostas analíticas.

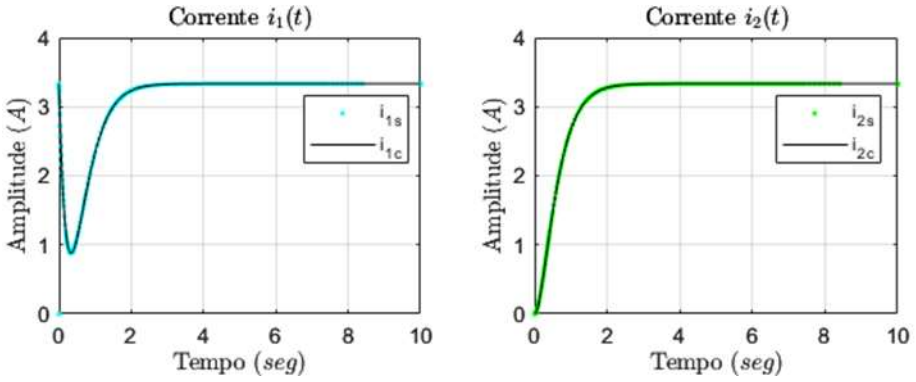
4. RESULTADOS

Validaram-se os resultados obtidos para as correntes das malhas e a tensão no capacitor, utilizou-se o *software* MATLAB® para representar numericamente as curvas de tensão e de corrente. Usaram-se os valores simulados no *software* LTspice® e sobrepostas as formas de ondas de ambos os *softwares*.

4.1 CORRENTES DAS MALHAS

Representaram-se graficamente as formas de onda das correntes i_1 e i_2, assim tornou-se possível validar as Equações (73) e (102), obtidas através dos cálculos, uma vez que as curvas se sobrepõem, conforme observa-se na Figura 4.

Figura 4 - Correntes das malhas.



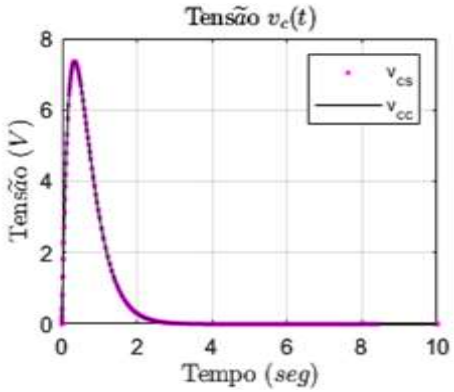
Fonte: *software* MATLAB®

Na Fig 4, as legendas apresentam i_{1s} e i_{2s} para correntes simuladas no *software* Ltspice®, Fig. 3. Na mesma figura, as legendas apresentam i_{1c} e i_{2c} para correntes calculadas numericamente no *software* MATLAB®.

4.2 TENSÃO NO CAPACITOR

Assim como nas correntes, as curvas de tensão no capacitor Eq. (116) também se sobrepõem, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Comparação das curvas de tensão no capacitor



Fonte: software MATLAB®

Na Fig 5, a legenda apresenta v_{cs} para tensão simulada no capacitor, por meio do *software* Ltspic®Fig. 3. Na mesma figura, a legenda mostra v_{cc} para tensão no capacitor calculada numericamente no *software* MATLAB®.

5. CONCLUSÃO

No presente artigo, analisou-se um circuito RLC de duas malhas, modelou-se e aplicou-se a Transformada de Laplace para obtenção dos resultados analíticos, Eqs. (73), (102) e (116). Em seguinda, simularam-se as equações analítícas no *software* MATLAB® e compararam-se as formas de ondas obtidas para o circuito em questão no *software* Ltspice®, mostrado na Figura 3.

A Transformada de Laplace, mostrou-se uma ferramenta eficaz quanto a metodologia de análise para a resolução de circuitos elétricos, além de ser um meio para facilitar este processo, já que com ela é possível simplificar Equações Diferenciais Ordinárias, transformando-as em equações algébricas com operações de menor complexidade quanto a manipulação. As ferramentas de simulação também foram de grande importância para auxiliar na análise dos resultados, pois ao concluir a resolução do circuito, tornaram possível validar as equações por meio das formas de onda obtidas nos *softwares* MATLAB® e Ltspice®. Tal abordagem é uma metodologia de ensino valiosa para engenheiros, pois essa é uma das maneiras de checar a solução de problemas nas indústrias ou nas fábricas.

Por fim, tanto a ferramenta matemática da Transformada de Laplace, quanto os *softwares* de simulação Ltspice® e MATLAB®, mostraram-se muito eficazes na análise de circuitos elétricos.

6 REFERÊNCIAS

[1] SEIFERT, N.; ROSSINI, F. L.. Modelagem Dinâmica de Circuito Elétrico Passivo no Domínio do Tempo Contínuo e Análise por meio dos Softwares Matlab® e Multisim®. In: BARBOSA, F.C.. Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 17ª ed. Piracanjuba-GO: Editora Conhecimento Livre, 2023. p.211-239. Disponível em: https://doi.org/10.37423/231208523. Acesso em: 16 set. 2024.

[2] SILVA, V. A.; PONTIM, F. M.; OLIVEIRA, J. M. S.; OLIVEIRA, L.; ROSSINI, F. L.. Aplicação da Transformada de Laplace para a Modelagem a Análise de um Circuito RLC de Três Malhas. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/770-607f58f687b73453929fe56d0ac9d9ac034ab042bc0e64072b8b90768db27802.pdf. Acesso em: 16 set. 2024.

[3] ANDRADE, P. A.; SILVA, L. E. C.; ROSSINI, F. L.. Análise de Circuito Elétrico RLC de Três Malhas via Transformada de Laplace com Softwares Matlab® e LTspice®. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1385-555f8de349bbc8aa7c8bc5fe5621a7bdcf369b3d4e555e681528449d05d62fed.pdf. Acesso em: 16 set. 2024.

[4] SEIFERT, N.; ROSSINI, F. L.. Modelagem no Domínio do Tempo e Solução no Domínio da Frequência de Circuito Passivo Chaveado de Três Malhas. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/431-2c8e0637c263042c2cda7279ab9152729265528f16adf19a312676ceb5a58469.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

[5] SANTOS, O. A. P.; BEZERRA, M. S.; ROSSINI, F. L.. Modelagem no Domínio do Tempo, Solução via Transformada de Laplace e Análise das Formas de Onda de Circuito Elétrico RLC Chaveado. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1119-273fdd50d70f957c2049c4cb733bbfbc3a3ac140015f5ccc37511e31b541e501.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

[6] LUZ, E. C.; ROSSINI, F. L.. Modelagem, Solução e Análise de Circuito RLC Paralelo via Transformada de Laplace e uso dos Softwares Matlab® e LTspice®. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1378-62571b21cf94861b1535847e22286c433bfddd7073015dfa8d932782d128a7b9.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

[7] SILVA, V. A.; OLIVEIRA, L.; SEIFERT, N.; OLIVEIRA, J. M. S.; PONTIM, F. M.; ROSSINI, F. L.. Modelagem no Domínio do Tempo e Aplicação da Transformada de Laplace na Solução e Análise de um Circuitos RLC com Três Malhas. In: FONTGALLAND, I.L.. Cidades inteligentes e novos modelos industriais - Vol. 2. Campina Grande: Amplla Editora, 2023. p. 62-84. Disponível em: https://doi.org/10.51859/amplla.cin3224-5. Acesso em: 17 set. 2024.

[8] SANTOS, O. A. P.; BEZERRA, M. S.; ROSSINI, F. L.. Modelagem no Domínio do Tempo, Solução via Transformada de Laplace e Análise das Formas de Onda de Circuito Elétrico RLC Chaveado. In: BARBOSA, F.C.. Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 15ª ed. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2023. p. 89-114. Disponível em: https://doi.org/10.37423/230808076. Acesso em: 17 set. 2024.

[9] DONDA, R. A.; VIGLUS, F. J.; ROSSINI, F. L.. Modelagem Matemática, Simulação e Validação Experimental de um Conversor CC-CC Buck Síncrono. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1368-4f5963266936d32a9fd58d4dbcf5227a84b94e421695baaabf6971de590ee982.pdf. Acesso em: 17 set. 2024.

[10] DONDA, R. A.; ROSSINI, F. L.. Projeto, simulação e análise de um sistema de controle por modo deslizante aplicado ao conversor cc-cc buck: estudo de caso. In: DALLAMUTA, J.; HOLZMANN, H. A. Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2. Ponta Grossa: Atena, 2022. p. 14-24. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112. Acesso em: 17 set. 2024.

[11] CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Projeto e Análise de Desempenho de Algoritmos de Estimação Paramétrica Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: SOARES, A. M. Tópicos Especiais em Engenharia: inovações e avanços tecnológicos 6. Ponta Grossa: Aya, 2023. p. 42-54. Disponível em: https://doi.org/10.47573/aya.5379.2.186.3. Acesso em: 18 set. 2024.

[12] COLDEBELLA, H.; ROSSINI, F. L.. Design and Simulation of a Model Reference Adaptive Control System Using the Recursive Least Squares Method with Forgetting Factor for Gain Adjustment. In: Seven Editora. Development and Its Applications in Scientific Knowledge. São José dos Pinhais: Seven Editora, 2023. p. 3499-3515. Disponível em: https://doi.org/10.56238/devopinterscie-287. Acesso em: 18 set. 2024.

[13] CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Design, simulation and analysis of challenges of parametric estimation algorithms applied to adaptive control by reference model.

In: Seven Editora. Development and its applications in scientific knowledge. São José dos Pinhais: Seven Editora, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.56238/devopinterscie-247. Acesso em: 18 set. 2024.

[14] COLDEBELLA, H.; ROSSINI, F. L.. Desenvolvimento e Implementação do Método dos MQR-FE Acoplado a um Sistema de CAMR. In: BARBOSA, F. C.. Engenharia de Controle e Automação: estudos fundamentais. Piracanjuba: Editora Conhecimento Livre, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.37423/230107095. Acesso em: 18 set. 2024.

[15] CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Comparação entre Estimadores Paramétricos Aplicados ao Controle Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548540-comparacao-entre-estimadores-parametricos-aplicados-ao-controle-adaptativo-por-modelo-de-referencia/. Acesso em: 18 set. 2024.

[16] COLDEBELLA, H.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Comparação entre Algoritmos de Adaptação Paramétrica aplicados ao Projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548802-comparacao-entre-algoritmos-de-adaptacao-parametrica-aplicados-ao-projeto-de-controlador-adaptativo-por-modelo-de/. Acesso em: 18 set. 2024.

[17] COLDEBELLA, H.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L.. Análise de algoritmos de estimação paramétrica aplicados ao projeto de controlador adaptativo por modelo de referência. In: DALLAMUTA, J.; HOLZMANN, H. A. Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2. Ponta Grossa: Atena, 2022. p. 47-58. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114. Acesso em: 18 set. 2024.

[18] CANHAN, D. C.; BROLIN, L. C.; ROSSINI, F. L. Aplicação do método do gradiente e do método dos mínimos quadrados recursivo para análise de desempenho do controle adaptativo por modelo de referência. In: DALLAMUTA, J.; HOLZMANN, H. A. Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2. Ponta Grossa: Atena, 2022. p. 91-100. Disponível em: https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211118. Acesso em: 18 set. 2024.

[19] ROSSINI, F. L.; OLIVEIRA, L. F. P.; GIESBRECHT, M.. Identificação recursiva de sistemas dinâmicos contínuos variantes no tempo através do filtro de kalman estendido e da filtragem de variáveis de estado pelo método dos mínimos quadrados recursivos. In: AYOUB, J. P.; OLIVEIRA, M. R. N. Desvendando a Engenharia: sua abrangência e multidisciplinaridade - Volume 2. Guarujá: Científica Digital, 2021. p. 284-302. Disponível em: https://doi.org/10.37885/210404090. Acesso em: 19 set. 2024.

[20] ROSSINI, F. L.. Métodos de Filtragem, Estimação e Controle Adaptativo Indireto Aplicados a Sistemas de Teleoperação Bilateral. pt. PhD thesis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas, 2020, p. 92. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_a4357c8ea5602bb2b5b0d556e8c3a91e. Acesso em: 19 set. 2024.

[21] LUIZ ROSSINI, F.; SANTOS MARTINS, G.; PAULO SILVA GONÇALVES, J.; GIESBRECHT, M.. Recursive identification of continuous time variant dynamical systems with the extended kalman filter and the recursive least squares state-variable filter. In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS IN CONTROL, AUTOMATION AND ROBOTICS, 2018, Porto, Portugal. 15th international conference on informatics in control, automation and robotics. [S. l.]: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.5220/0006865504680475. Acesso em: 19 set. 2024.

[22] ROSSINI, F. L.; GIESBRECHT, M.. Identificação recursiva de sistemas dinâmicos contínuos variantes no tempo através do filtro de kalman estendido e da filtragem de variáveis de estado pelo método dos mínimos quadrados recursivos. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2018, João Pessoa, Paraíba, Brasil. XXII Congresso Brasileiro de Automática. Joao Pessoa, Paraíba, Brasil: SBA Sociedade Brasileira de Automática, 2018.

Disponível em: https://doi.org/10.20906/cps/cba2018-0169. Acesso em: 19 set. 2024.

[23] PRADELA, W. G. L.; MARAN, M. E. S.; ROSSINI, F. L.. Estimação de Parâmetros em Tempo Real Aplicado a um Sistema em Tempo Discreto. In: BARBOSA, F.C.. Engenharia: a máquina que constrói o futuro. 17ª ed. Piracanjuba-GO: Editora Conhecimento Livre, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.37423/231208520. Acesso em: 19 set. 2024.

[24] PRADELA, W. G. L.; MARAN, M. E. S.; ROSSINI, F. L.. Estimação de Parâmetros Online pelo Método dos Mínimos Quadrados Recursivos com Fator de Esquecimento em Tempo Discretos. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/566-7a30b4c4ff56003875f7209138121cfa7d289c8743efdf7071b3c994865c2dbc.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

[25] MARAN, M. E. S.; PRADELA, W. G. L.; ROSSINI, F. L.. Modelagem no Domínio do Tempo, Discretização com Segurador de Ordem Zero e Simulação Computacional de um Circuito Passivo. In: Anais do XIII Seminário de Extensão e Inovação & XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/554-15241c3f7833f712d1aef527331266986fdec801538fed9005ecb5bd0b909d2c.pdf. Acesso em: 19 set. 2024.

[26] DONDA, R. A.; ROSSINI, F. L.. Projeto, Simulação e Análise de um Sistema de Controle por Modo Deslizante Aplicado ao Conversor CC-CC Buck: estudo de caso. In: Anais do XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Anais...Santa Helena(PR) UTFPR Santa Helena, 2022. Disponível em:

https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548919-projeto-simulacao-e-analise-de-um-sistema-de-controle-por-modo-deslizante-aplicado-ao-conversor-cc-cc-buck--estu/. Acesso em: 19 set. 2024.

Capítulo 14

10.37423/241009359

ANÁLISE ERGONÔMICA DO POSTO DE TRABALHO DE UM ESTOQUISTA EM UMA DISTRIBUIDORA DE ALIMENTOS UTILIZANDO OS MÉTODOS NIOSH E REBA

André Luis da Silva — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Maria Carolina Rizola — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Resumo: Este trabalho teve como objetivo verificar a demanda ergonômica e avaliar carga e postura na função de estoquista de uma Empresa de Pequeno Porte (EPP), no segmento de distribuição de alimentos situada na cidade de Marília no interior do estado de São Paulo. Foi realizada a observação da atividade, conversas com o próprio funcionário e com o diretor da empresa para se definir o produto que mais tem rotatividade na empresa e, portanto, o que o trabalhador mais tem contato, bem como constatar a postura em que o estoquista sente algum desconforto físico, a fim de serem aplicados os métodos de análise. Para analisar a questão de levantamento de cargas foi utilizado o método NIOSH que apontou excesso de carga para o movimento, indicando risco moderado e por este motivo, havendo necessidade de adequação para a atividade. Para analisar o tipo de postura adotado pelo funcionário foi utilizado o método REBA que apontou risco muito alto para a atividade, devendo ser tomadas providências imediatamente.

Palavras chave: Ergonomia, Análise Ergonômica, Carga, Postura.

1. INTRODUÇÃO

Os ambientes de trabalho em geral podem não ser adaptados às necessidades ergonômicas dos usuários, ocasionando problemas de saúde que estão relacionados ao modo como os trabalhadores executam suas atividades diárias, situações que podem ser resolvidas com atitudes simples, baseadas em análises e definições de estratégias.

Esse cuidado por parte da empresa em relação ao bem-estar do colaborador está relacionado subjetivamente à produtividade que este terá durante as tarefas desempenhadas. Esse conforto durante a execução do trabalho garante a qualidade da saúde do funcionário, evitando que ele se afaste por motivo de danos causados pela atividade laboral (FERREIRA, at al., 2015).

Profissionais capacitados conseguem aplicar soluções ergonômicas com a intensão de melhorar a qualidade e a condição de trabalho de maneira viável dentro de uma empresa, apresentando e discutindo conceitos referentes à cada posto específico (IIDA, 2016).

A Norma Regulamentadora NR-17, determina parâmetros que possibilitam a adequação das condições de trabalho de acordo com as características psicofisiológicas dos trabalhadores, para que se possa obter a máxima qualidade em conforto, segurança e desempenho eficiente durante o desenvolvimento ocupacional. Para que isso seja possível, é necessário que seja realizada uma Análise Ergonômica do Trabalho (AET), devendo abordar as condições de trabalho, conforme a NR-17 estabelece.

A AET é um método desenvolvido para a ergonomia de correção, no caso de um processo que esteja sendo executado de forma inadequada. Este método se divide em cinco etapas: Análise da demanda; Análise da tarefa; Análise da atividade; Formulação do diagnóstico; Recomendações ergonômicas (IIDA, 2016).

O presente artigo tem como principal objetivo aplicar uma Análise Ergonômica, estudando o posto de trabalho de um estoquista em uma Empresa de Pequeno Porte (EPP), no segmento de distribuição de alimentos situada na cidade de Marília, no interior de São Paulo.

O transporte manual de cargas faz com que o trabalhador utilize o próprio corpo como máquina de trabalho, o que muitas vezes é a causa de lesões decorrentes do processo de levantamento, transporte e deslocamento de materiais.

Deste modo, pretende-se com este trabalho chegar até a etapa de formulação de diagnóstico dentro da análise ergonômica do posto de trabalho em questão, buscando a melhoria da qualidade no

ambiente de trabalho do colaborador, sendo possível recomendar ergonomicamente intervenções e estratégias para que se tenha um melhor aproveitamento das atividades, eliminando danos à saúde do trabalhador.

2. BIOMECÂNICA OCUPACIONAL

A biomecânica ocupacional é uma parte da biomecânica geral, que se ocupa dos movimentos corporais e forças relacionados ao trabalho. Assim, preocupa-se com as interações físicas do trabalhador, com o seu posto de trabalho, máquinas, ferramentas e materiais, visando reduzir os riscos de distúrbios músculo-esqueléticos. Analisa basicamente a questão das posturas corporais no trabalho, a aplicação de forças, bem como as suas consequências (IIDA, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em uma EPP, no segmento de distribuição de alimentos situada na cidade de Marília, no interior de São Paulo, com o funcionário que trabalha como estoquista. Esse funcionário em questão é do sexo masculino, possui estatura de 1,72m de altura e tem 25 anos de idade, sua jornada de trabalho é de 8 horas diárias de segunda a sexta feira e 4 horas diárias aos sábados. O estoquista tem como tarefa desenvolver atividades relacionadas ao estoque da empresa.

3.2 ANÁLISE ERGONÔMICA DO TRABALHO (AET)

Segundo Fialho e Santos (1997), as três primeiras fases da metodologia é que formam a Análise Ergonômica do Trabalho (AET) em si:

a) **Análise da demanda** é a definição do problema a ser analisado, a partir de uma negociação com os diversos atores sociais envolvidos;

b) **Análise da tarefa** é o que o trabalhador deve realizar e as condições ambientais, técnicas e organizacionais desta realização;

c) **Análise das atividades** é o que o trabalhador, efetivamente, realiza para executar a tarefa. É a análise do comportamento do homem no trabalho.

A partir daí é possível realizar o diagnóstico para formular as recomendações ergonômicas.

Para o desenvolvimento da análise ergonômica do posto de trabalho de estoquista, foi feita uma coleta de dado através de fotografias e vídeos da postura do colaborador durante o período de trabalho, ao levantar, transportar e deslocar materiais.

Também foram utilizados os métodos NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health dos Estados Unidos) e REBA (Rapid Entire Body Assessment) para a análise.

3.2.1. ANÁLISE DA DEMANDA

A demanda ergonômica no setor de estoque da empresa em estudo relaciona-se com o transporte e levantamento de cargas. No decorrer do trabalho, o funcionário recebe os produtos, empilha conforme a ordem de chegada, distribui e organiza em prateleiras, conforme o sistema de estoque estabelecido e retira novamente os produtos requisitados para revenda e distribuição. Considerando a chegada e saída de produtos ao longo de todo o dia, são muitos os momentos em que o colaborador precisa realizar levantamento de carga.

A partir de uma entrevista com o trabalhador estudado, constatou-se a demanda ergonômica: O funcionário sente dores na região lombar, membros superiores e inferiores, devido à quantidade de vezes em que são realizadas as tarefas de guardar e principalmente retirar os produtos das prateleiras.

O estoque possui equipamentos que auxiliam no transporte e levantamento de cargas, como paleteira manual elétrica (usada para guardar os produtos nas prateleiras de estoque) e escada (usada para apanhar as caixas de produtos individualmente, conforme a demanda). Apesar disso, ocorre uma demanda ergonômica relacionada com as pegas inapropriadas das mercadorias e o fato de que precisam ser apanhadas manualmente de maneira inadequada, apenas com o uso da escada, o que dificulta o levantamento e transporte.

3.2.2. ANÁLISE DA TAREFA E DAS ATIVIDADES

A análise da tarefa consiste em observar o que está prescrito como dever para a realização da função. A AET analisa se há muita divergência entre o está prescrito e o que realmente o funcionário executa.

A análise das atividades desenvolvidas pelos trabalhadores, face às condições e aos meios que lhes são colocados à disposição, é a análise dos comportamentos de trabalho: posturas, ações, gestos, comunicações, direção do olhar, movimentos, verbalizações, raciocínios, estratégias, resoluções de problemas, modos operativos, enfim, tudo que pode ser observado ou inferido das condutas dos indivíduos (FIALHO e SANTOS,1995)

No caso do estoquista analisado, foram realizadas entrevistas com o funcionário em questão e com o diretor da empresa. A prescrição da tarefa e atividades é descrita a seguir:

a) No momento da chegada de mercadorias, o funcionário deve receber os produtos e organizá-los separadamente, após esse processo deve levar os produtos para as prateleiras destinadas.

Figura 1 – Organização de produtos manual

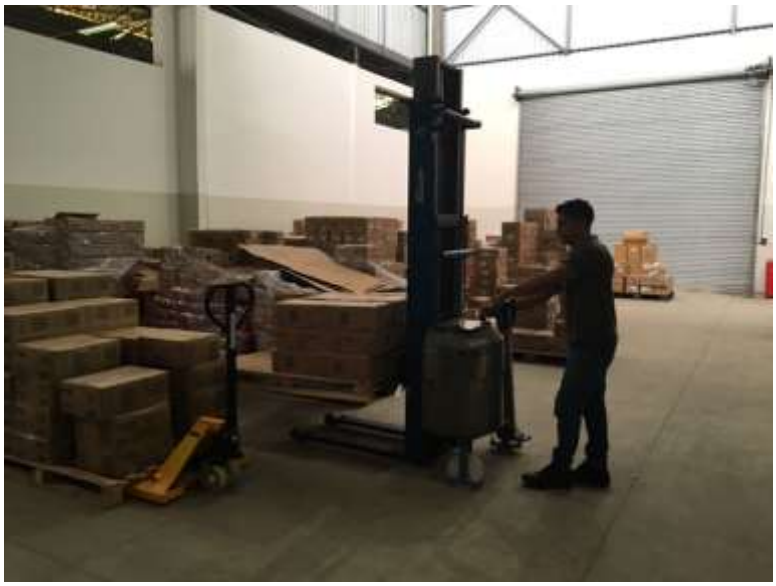


Figura 2 – Organização de produtos com paleteira manual elétrica

b) O trabalhador é responsável por guardar qualquer mercadoria que for descarregada no setor e preservar o estoque limpo e organizado.

c) O estoquista organiza os produtos da melhor forma, para que tenha fácil acesso e visualização dos itens armazenados.

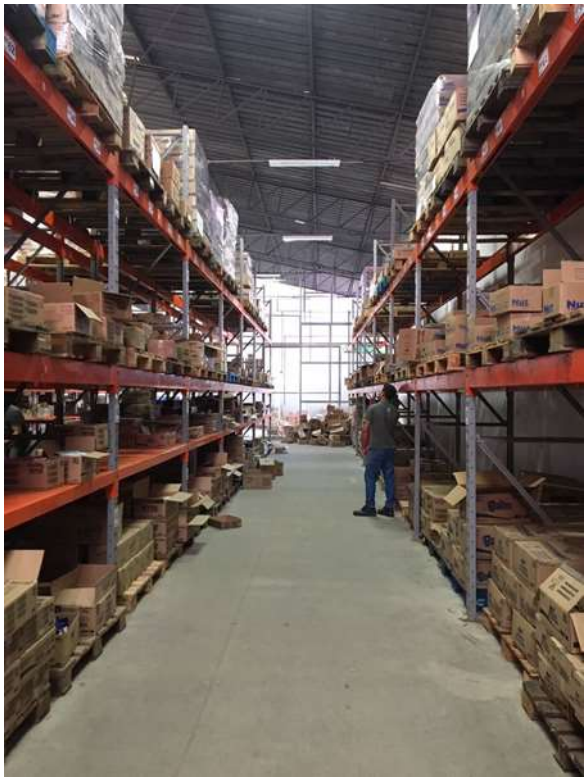


Figura 3 - Estoque

d) É de responsabilidade desse funcionário ter o controle de entrada e saída de cada produto, para que possa se ter a contagem de mercadorias e o controle do estoque sempre atualizado.

e) O trabalhador deve separar os produtos assim que forem solicitados para entrega e fazer a conferência para que seja dado baixa no sistema.

Figura 4 – Separação de produtos

3.3. MÉTODO NIOSH

O método NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health dos Estados Unidos) tem como objetivo, desenvolver uma ferramenta para que seja possível identificar os riscos de lombalgia associados à carga física que um trabalhado recebe durante a jornada de trabalho. Para isso, foi criada uma equação que calcula o peso máximo recomendável para tarefas repetitivas de levantamento de carga. Essa equação desenvolvida estabelece o valor ideal de 23kg para carga levantadas adequadamente, sem oferecer riscos ao trabalhador. Porém, cada situação de trabalho apresenta necessidades especiais e por este motivo na maioria das vezes mão é possível encontrar as características ideais definidas por este método para o limite de 23kg. Sendo assim, é necessário que sejam consideradas características individuais de cada posto de trabalho, como: características da carga, embalagem, tipo de pega, peso real, posição da carga no espaço, distancia de alcance, tempo e frequência de trabalho.

Aplicando esse método é possível entender se o tipo de esforço feito pelo funcionário oferece risco à sua coluna vertebral, além de definir qual a carga ideal para a situação estudada.

Segundo Iida (2016), o cálculo da equação de NIOSH é estabelecido pela variável LPR (limite de peso recomendado) que é feito em função dos fatores:

LPR= L x [25/H] x [0,003 x (V-75)] x [0,82 + (4,5/D)] x [1-(0,0032 x A)] x F x C

LPR= limite de peso recomendado.

L= constante de carga igual a 23kg.

H= distância horizontal entre o indivíduo e a carga (posição das mãos), em cm.

V= distância vertical na origem da carga (posição das mãos), em cm.

D= deslocamento vertical, entre a origem e o destino, em cm.

A= ângulo de assimetria, medido a partir do plano sagital, em graus.

F= frequência média de levantamento em levantamento/min.

C= qualidade da pega.

O valor final da equação NIOSH é o limite de peso recomendado para o levantamento de carga em determinada situação. Sendo assim, o peso com o qual o colaborador trabalha não deve ultrapassar o

LPR. Além do peso limite, também deve ser calculado o índice de levantamento (IL), relacionando a massa da carga levantada e o LPR. Em uma situação ideal, o valor de IL deve ser menor ou igual a 1.

3.3.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO NIOSH

Com ajuda do próprio funcionário e do diretor da empresa, definiu-se por usar o produto “Gomets” para estudo, o motivo foi que dentre todas as mercadorias que passam pelo estoque, esta é a que tem mais rotatividade.

Também foi definida para estudo a posição em que o trabalhador está sobre a escada retirando o produto da prateleira, pois para o estoquista este é o momento em que ele sente algum tipo de desconforto físico.

Figura 5 – Retirada dos produtos

As medidas calculadas foram:

L= 23kg (constante)

H= 40 cm

V= 175 cm

D= 10 cm

A= 30º

F= 0,85

C= 0,9

P (peso da carga)= 11,5kg

Para a aplicação do método foi utilizado o software Ergolândia 6.0. O valor encontrado para LPR foi de 6,959kg, isso mostra que a carga levantada pelo estoquista está acima do recomendado e o IL foi de 1,653, sendo este índice maior que 1, isso significa que há um risco moderado e essa atividade deve ser redesenhada ou atribuída apenas à trabalhadores selecionados que serão submetidos a controle.

3.4. MÉTODO REBA

O método REBA (Rapid Entire Body Assessment) visa avaliar as posturas corporais como um todo, levando em conta fatores como força aplicada, tipo de pega e atividade muscular. (Almeida, 2007)

Segundo Iida, o protocolo é aplicado para ambos os lados do corpo e para todas as posturas identificadas como importantes para a avaliação de risco que deve ser feita considerando três grupos:

Grupo A – Posturas do tronco, pescoço e perna braço , antebraço e punho.

Grupo B – Para os lados direito e esquerdo, separadamente.

Grupo C – Pontuação para carga/força e tipo de pega.

O método utiliza um sistema de pontuação, onde a soma desses pontos gera uma pontuação global, que define cinco níveis de risco de ação.

a) Nível de ação 0- Pontuação 1. Risco inexistente. A postura é aceitável, não sendo necessárias providências;
b) Nível de ação 1 – Pontuação 2 ou 3. Risco baixo, podendo ser necessárias providências futuras;
c) Nível de ação 2 – Pontuação 4 a 7. Risco médio, sendo necessárias providências a médio prazo;
d) Nível de ação 3 – Pontuação entre 8 e 10. Risco alto, sendo necessárias providências a curto prazo;
e) Nível de ação 4 – Pontuação entre 11 e 15. Risco muito alto, sendo necessárias providências imediatas.

3.4.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO REBA

Para a aplicação deste método também foi utilizado o software Ergolândia 6.0.

A posição escolhida para aplicação do método foi a mesma indicada anteriormente, onde o funcionário está sobre a escada retirando o produto da prateleira.

O software disponibiliza situações para que sejam apontandos os detalhes da posição em estudo para realizar a avaliação. As situações escolhidas para a posição do estoquita foram:

a) Pescoço: em extensão, apresentando certa inclinação para o lado;

b) Tronco: Ereto, apresentando rotação;

c) Pernas: Suporte em uma das pernas;

d) Carga: Maior que 10kg

e) Braço: Movimentação maior que 90 graus com ombro elevado;

f) Antebraço: Movimentação de 0 a 60 graus ou maior que 100 graus;

g) Punho: Movimentação entre 15 graus para cima e 15 graus para baixo;

h) Pega: Pobre;

i) Atividade: Movimentos repetitivos (mais que 4 vezes por minuto).

A partir dessa observação, o software calculou uma pontuação final de 12. Sendo assim, como é possível perceber na figura 6, o método concluiu que a postura adotada pelo estoquista durante a atividade analisada é de risco muito alto. Por este motivo, é necessário que sejam tomadas providências imediatamente.

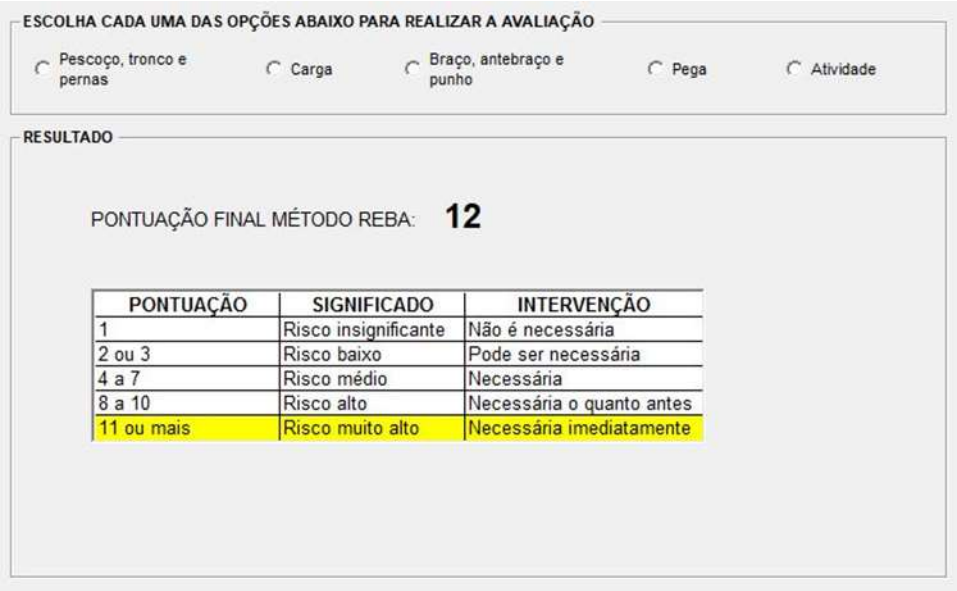


Figura 6 – Aplicação do Método REBA em Pontuação Final

4. CONCLUSÃO

Posturas inadequadas de execução das atividades relacionadas ao trabalho são comuns e podem produzir danos consideráveis aos funcionários a longo prazo, como por exemplo, doenças ocupacionais como a LER/DORT, comuns em trabalhos repetitivos e executados por longas horas seguidas, aumentando a indência de invalidez em danos irreversíveis.

Sobrecargas de peso, má postura e diversos outros fatores de risco potencializam as lesões, sendo de vital importância que as empresas se adequem à legislação tendo em vista a redução do *turnover*, ou seja, a rotatividade de funcionários, problema comum em atividades que exijam um certo esforço físico.

Desta maneira, tendo por base a análise deste trabalhador, pode-se concluir que o trabalho analisado no estoque, realizado predominantemente em pé e com carregamento e levantamento de cargas, apresenta fortes indícios de riscos fisiológicos e que essa questão deve ser corrigida imediatamente para que seja possível evitar tais danos, mesmo que haja uma tolerância no curto prazo através de mecanismos de adaptação da musculatura, a longo prazo poderá ocorrer danos irreversíveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Wanderson A. O. Utilização do método rapid entire body assecement (reba), associado a diagrama de localização de sintomas e aspectos organizacionais do trabalho, para avaliação de riscos ocupacionais em funcionários da Rádio Rural de Santarém. Monografia de Pós-Graduação em Especialização em Ort. e traumato. com ênfase em terapia manual. Faculdade Ávila, 2012.

CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO. NR 17: Ergonomia. Portaria Nº 3.214, de 08 de Junho de 1978. Brasilia, 1978.

DOS SANTOS, M.H.R.; et al. Análise de postura e carga através dos métodos Owas e Niosh em uma fábrica de sorvetes no sul do brasil. XXXIII Encontro Nacional De Engenharia De Producao. Salvador, BA. 2013.

DUTRA, A.RA.: KUERTEN, G.R.: NIEHUES JR, E.: Avaliação Ergonômica Da Fabricação De Baldes Plásticos: Aplicação Do Método Niosh Nas Atividades De Levantamento De Cargas. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba, PR. 2002.

FERREIRA, A. C. O.; et al. Análise ergonômica do almoxarifado do centro tecnológico de uma universidade federal. XXII Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, SP. 2015.

FIALHO, Francisco.: DOS SANTOS, Neri.: Manual de Análise Ergonômica no trabalho. 2. Ed – Curitiba: Genises, 1995.

FILHO, G. I. R. Ergonomia aplicada à odontologia: As doenças de caráter ocupacional e o cirurgião-dentista – Produtividade com qualidade de vida no trabalho. Curitiba: Ed. Maio, 1ª ed., 2004

HERNANDEZ, A.R.G.; et al. ANÁLISE ERGONÔMICA DO LEVANTAMENTO DE CARGA E POSTURA EM UM RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO. VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, PR. 2016.

IIDA, Itiro.: BUARQUE, Lia.: ERGONOMIA: Projeto e Produção. 3. Ed – São Paulo: Blucher, 2016.

MÁSCULO, F. S.; VIDAL, M. C. Ergonomia: Trabalho adequado e eficiente. Rio de Janeiro: Ed Elsevier Ltda, 2011.

PAVANI, R.A.: QUELHAS, O.L.G.: A avaliação dos riscos ergonômicos como ferramenta gerencial em saúde ocupacional. XIII Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, SP. 2006.

PORTAL EDUCAÇÃO. A importância da ergonomia nas empresas. Educação Física e Esporte, 2013. Acesso em 17/08/2017. Disponível em: <https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/idiomas/a-importancia-da-ergonomia-nas-empresas/52417>

ENGENHARIA: SOLUÇÕES E INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO

VOLUME XII

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE