

João Dallamuta  
(Organizador)

**Estudos Transdisciplinares  
nas Engenharias 2**

**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**João Dallamuta**

(Organizador)

# Estudos Transdisciplinares nas Engenharias 2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de  
Oliveira Diagramação: Karine de Lima  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

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

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E82	Estudos transdisciplinares nas engenharias 2 [recurso eletrônico] / Organizador João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Estudos Transdisciplinares nas Engenharias; v. 2)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-356-9 DOI 10.22533/at.ed.569102905  1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Transdisciplinaridade. I. Dallamuta, João. II. Série.  CDD 620
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná - Brasil

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

Caro(a) leitor(a),

Nesta obra temos um compendio de pesquisas realizadas por alunos e professores atuantes em ciências exatas, engenharia e tecnologia. São apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de simulação, projetos e caracterização no âmbito da engenharia e aplicação de tecnologia.

Tecnologia e pesquisa de base são os pilares do desenvolvimento tecnológico e da inovação. Uma visão ampla destes temas é portanda fundamental. É esta amplitude de áreas e temas que procuramos reunir neste livro.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Optamos pela divisão da obra em dois volumes, como forma de organização e praticidade a você leitor. Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura.

João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ESTUDO SEMI PROBABILÍSTICO E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO APLICADO AO PROBLEMA DE FLEXÃO DE UMA VIGA	
Ana Carolina Carius Bruna Teixeira Silveira Ricardo Franciss Leonardo de Souza Corrêa João Vitor Curioni de Miranda Bruna Nogueira da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029051</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
EVOLUÇÃO DIFERENCIAL APLICADA NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE UM SISTEMA OSCILATÓRIO	
Iolanda Ortiz Bernardes Marcelo Favoretto Castoldi Alessandro Goedel	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029052</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>20</b>
GERAÇÃO DE UM ACELEROGRAMA SÍSMICO ARTIFICIAL A PARTIR DE UMA FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA COMPATÍVEL COM UM ESPECTRO DE RESPOSTA DE PROJETO	
Daniela Dalla Chiesa Letícia Fleck Fadel Miguel	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029053</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>25</b>
GRUPO DE ESTUDOS E INTERVENÇÕES SOCIOAMBIENTAIS ENQUANTO PRÁTICA EDUCATIVA PARA A ENGENHARIA AMBIENTAL: CICLOS QUE SE RETROALIMENTAM	
Gabriela de Souza Carvalho Julia Dedini Felício Lara Ramos Monteiro Silva Rhennan Mecca Bontempi	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029054</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>43</b>
MAPEAMENTO DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS E ESTUDO DA POTENCIALIDADE HÍDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA BACIA DO RIBEIRÃO CAMBÉ EM LONDRINA, PR	
Giselly Peterlini Maurício Moreira dos Santos Thiago Henrique da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029055</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>49</b>
MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE UM INVERSOR FONTE DE TENSÃO PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO	
Lucas Niquele Endrice Jakson Paulo Bonaldo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5691029056</b>	

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>67</b>
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DE LEITE EM PÓ INTEGRAL: ÊNFASE NA ETAPA DE SECAGEM POR <i>SPRAY DRYING</i> Gustavo Storte Tonin Régis da Silva Pereira <b>DOI 10.22533/at.ed.5691029057</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>83</b>
NÍVEIS DE RUÍDO DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM CONDIÇÃO ESTÁTICA Maria Rosa Alferes da Silva Letícia Rodrigues da Silva Rônega Boa Sorte Vargas Beethoven Gabriel Xavier Alves <b>DOI 10.22533/at.ed.5691029058</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>88</b>
O MÉTODO SORM DG E SUAS APLICAÇÕES NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PROBLEMAS DE ENGENHARIA Emmanoel Guasti Ferreira Marcílio Sousa da Rocha Freitas José Antônio da Rocha Pinto Geraldo Rossoni Sisquini <b>DOI 10.22533/at.ed.5691029059</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>106</b>
PROPOSTA DE INTERVENÇÃO PARA CRIAÇÃO DA ZONA DE SEGURANÇA HÍDRICA DO MUNICÍPIO DE CUIABÁ, MATO GROSSO Ibraim Fantin-Cruz Maria Ivoneide Vital Rodrigues Leandro Obadowiski Bruno Marcel Medinas de Campos <b>DOI 10.22533/at.ed.56910290510</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>123</b>
PROSPECÇÃO QUÍMICA DA CASCA DO FRUTO E DA SEMENTE DA <i>MAGONIA PUBENSCENS</i> A. ST.-HIL Amanda Silva Oliveira Arnaldo Ferreira Ribeiro Júnior Bruna Lane Malkut Fábio Gramani Saliba Júnior Maria Perpétua Oliveira Ramos <b>DOI 10.22533/at.ed.56910290511</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>128</b>
REÚSO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO NO CULTIVO DO PIMENTÃO AMARELO EM SOLO DO CERRADO Delvio Sandri Waltoíres Reis da Silva Júnior Cícero Célio de Figueiredo Rodrigo Moura Pereira <b>DOI 10.22533/at.ed.56910290512</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>140</b>
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICO	
Camila Dias de Jesus	
Márcio da Silva Vilela	
Leonardo Nazário Silva dos Santos	
Clarissa Vitória Borges dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.56910290513</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>144</b>
SISTEMA RADICULAR DA CULTIVAR 'GOLD JEWEL' DE KALANCHOE BLOSSFELDIANA POELLN CULTIVADA EM SUBSTRATO COMERCIAL E EM DIFERENTES DOSAGENS DE IRRIGAÇÃO	
Fátima Cibele Soares	
Jumar Luís Russi	
Andressa Fernandes Leal	
Carine Brum Duran	
Francieli Ribeiro Corrêa	
Giordana Trindade de Abreu	
<b>DOI 10.22533/at.ed.56910290514</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>151</b>
UMA ABORDAGEM DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS PARA AUXÍLIO NO PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO	
Jéfter Mateus de Oliveira Rezende	
Gustavo de Assis Costa	
Camila Dias de Jesus	
<b>DOI 10.22533/at.ed.56910290515</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>164</b>
UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) PARA OBTENÇÃO DO MAPA DE DEFORMAÇÕES EM PAINÉIS DE MADEIRA DE <i>PINUS OOCARPA</i>	
Eduardo Hélio de Novais Miranda	
Rodrigo Allan Pereira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.56910290516</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>170</b>
UTILIZAÇÃO DE AGENTE DE SECAGEM NA PRODUÇÃO DE PAPEL CARTÃO	
Crivian Pelisser	
Márcio Antônio Fiori	
Josiane Maria Muneron de Mello	
Jaqueline Scapinello	
<b>DOI 10.22533/at.ed.56910290517</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>184</b>

## ESTUDO SEMI PROBABILÍSTICO E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO APLICADO AO PROBLEMA DE FLEXÃO DE UMA VIGA

### **Ana Carolina Carius**

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação  
Petrópolis, Rio de Janeiro

### **Bruna Teixeira Silveira**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Instituto Tecgraf  
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

### **Ricardo Franciss**

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação  
Petrópolis, Rio de Janeiro

### **Leonardo de Souza Corrêa**

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação  
Petrópolis, Rio de Janeiro

### **João Vitor Curioni de Miranda**

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação  
Petrópolis, Rio de Janeiro

### **Bruna Nogueira da Silva**

Universidade Católica de Petrópolis, Colégio de Aplicação  
Petrópolis, Rio de Janeiro

forma homogênea não podendo, portanto, ser considerado uma constante. Realizou-se um estudo da resistência à compressão do concreto, considerando que este é um material compósito e, sendo assim, admite variabilidade significativa e comportamento semi probabilístico. A partir desta conclusão, conjectura-se que o módulo de elasticidade do concreto possui, também, um comportamento semi probabilístico, assim como prevê a norma NBR 12655 (ABNT, 2006) para a resistência à compressão. No entanto o módulo de elasticidade é considerado, pela NBR 6118 (2007), como um valor determinístico. A metodologia da pesquisa desenvolveu-se com um traço de concreto de resistência característica ( $f_{ck}$ ) 40 MPa, com o qual foram realizados ensaios para determinação do módulo de elasticidade tangente ( $E_{ci}$ ). A partir dos resultados experimentais obtidos, desenvolveu-se um método de elementos finitos estocástico para a obtenção da linha elástica para a viga de concreto bi apoiada. Concluiu-se, através das simulações numéricas realizadas que, em virtude do caráter compósito do concreto, a hipótese na qual se considera o módulo de elasticidade de forma probabilística influencia, diretamente, na função que determina o valor da linha elástica que descreve o comportamento da viga bi apoiada, exigindo-se, portanto, um cuidado maior no que diz respeito às hipóteses nas quais o módulo de elasticidade é

**RESUMO:** O presente trabalho objetivou estudar o comportamento de uma viga de concreto bi apoiada, sujeita à carregamento pontual, partindo-se da hipótese de que o módulo de elasticidade do concreto não se comporta de

considerado um valor constante ou determinístico.

**PALAVRAS-CHAVE:** deflexão; semi probabilístico; módulo de elasticidade; método de elementos finitos.

## SEMI PROBABILISTIC STUDY FOR THE CONCRETE ELASTICITY MODULUS APPLIED TO THE FLEXION PROBLEM OF A BEAM

**ABSTRACT:** The present work aimed to study the behavior of a bi-supported concrete beam, subject to point loading, starting from the hypothesis that the concrete modulus of elasticity does not behave homogeneously and therefore can not be considered a constant. A study of the compressive strength of the concrete was carried out, considering that this is a composite material and, thus, it admits significant variability and semi-probabilistic behavior. From this conclusion, it is conjectured that the modulus of elasticity of the concrete also has a semi-probabilistic behavior, as foreseen by the norm NBR 12655 (ABNT, 2006) for the compressive strength. However, the modulus of elasticity is considered by NBR 6118 (2007) as a deterministic value. The research methodology was developed with a characteristic concrete characteristic ( $f_{ck}$ ) 40 MPa, with which tests were performed to determine the tangent modulus of elasticity ( $E_{ci}$ ). From the experimental results obtained, a stochastic finite element method was developed to obtain the elastic line for the bi-supported concrete beam. It was concluded, through numerical simulations, that, due to the composite character of the concrete, the hypothesis in which the modulus of elasticity is considered in a probabilistic way directly influences the function that determines the value of the elastic line that describes the behavior of the beam supported, requiring, therefore, a greater care with respect to the hypotheses in which the modulus of elasticity is considered a constant or deterministic value.

**KEYWORDS:** deflection; semi probabilistic; elasticity modulus; finite element method.

### 1 | INTRODUÇÃO

Estruturas apoiadas são amplamente utilizadas na engenharia civil, sobretudo na engenharia de estruturas. A posição e o comportamento mecânico dos suportes são determinantes na resposta mecânica do conjunto (HIDALGO, 2014). Devida à simplicidade geométrica, estruturas podem ser adequadamente avaliadas utilizando-se modelos lineares. Nesse sentido, para efeitos de estudo, destacam-se as vigas de Euler-Bernoulli, objeto de estudo deste trabalho.

As vigas podem ser classificadas de acordo com o modo como as mesmas são apoiadas. Dentre os principais tipos de apoio, destacamos: **viga simplesmente apoiada**, que é aquela suportada por um apoio fixo em uma extremidade e um apoio móvel na outra extremidade; **viga em balanço**, que é engastada em uma extremidade e livre na outra e **viga apoiada com extremidade em balanço**, que é a viga na qual uma ou ambas as extremidades ultrapassam livremente os apoios (HIBBELER,

2010). Neste trabalho considerou-se, por questões relacionadas aos experimentos laboratoriais que poderiam ser realizados no laboratório da universidade, apenas as vigas simplesmente apoiadas como modelo.

Considerando como ponto de partida para este estudo uma viga bi apoiada, o objetivo deste trabalho foi analisar a deflexão desta viga. Para tanto, define-se o conceito de linha elástica. Para Hibbeler (2010), **linha elástica** corresponde ao diagrama da deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centroide de cada área da seção transversal da viga.

O modelo matemático que descreve a linha elástica inclui, em sua formulação, a contribuição do módulo de elasticidade ou módulo de Young. Por definição, o módulo de elasticidade é a razão entre a tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica sobre o corpo. Para os materiais idealizados por Robert Hooke, verifica-se uma proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação verificada. No entanto, o concreto não mantém esta proporcionalidade, variando-se o módulo de elasticidade de acordo com a carga aplicada (PACHECO et. al, 2014). Desta forma, considera-se dois tipos de módulo de elasticidade: módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico. Em geral, o módulo de elasticidade é obtido através de métodos experimentais, uma vez que diversos fatores afetam o valor para o mesmo, tais como: o tempo de cura do concreto, a temperatura da cura, proporções da mistura e propriedades dos agregados, destacando-se a proporção água/cimento, tamanho e forma do corpo de prova, entre outros (DIÓGENES et. al, 2011).

Um dos maiores desafios atualmente para a construção civil é diminuir a intensidade de uso de recursos materiais, que deve ser feita selecionando-se os materiais mais adequados para cada necessidade. A otimização do uso de materiais e recursos só é possível com a redução da variabilidade, como é percebida hoje para o controle da resistência à compressão, onde trabalha-se com valores característicos, baseados na teoria de probabilidades (DE MARCHI, 2011).

Apesar de considerar para o parâmetro de resistência à compressão a variabilidade intrínseca do concreto, não se considera, para o módulo de elasticidade, as mesmas hipóteses, sendo este tratado como uma grandeza determinística definida com fórmulas pré-estabelecidas nas normas ABNT vigentes. Entretanto, valores determinísticos para o módulo de elasticidade nem sempre são confirmados pelo controle tecnológico realizado em campo, fato que pode acarretar situações problemáticas nas obras. Nesse sentido destaca-se a importância do controle de qualidade, pois irá fornecer os dados para análise e decisão sobre o atendimento às especificações de projeto, de forma a garantir a otimização no uso de materiais e recursos, gerando menores custos financeiros e ambientais (DE MARCHI, 2011).

Baseados na hipótese de não consideração do módulo de elasticidade para o concreto como um parâmetro determinístico, obtido através de fórmulas matemáticas pré-determinadas pelas normas vigentes, estudou-se a influência desta hipótese na formulação matemática para o problema da viga bi apoiada.

A fim de estudar o comportamento da linha elástica de uma viga, considerando-se contribuições, no modelo, das diferentes formas com as quais o módulo de elasticidade pode ser obtido, propôs-se a seguinte equação diferencial de quarta ordem para o problema de deflexão de uma viga de comprimento  $L$ , submetida a uma carga pontual, bi apoiada em suas extremidades:

Encontrar  $C^4(0,L)$  tal que

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dx^2} \left[ EI \left( \frac{d^2 u}{dx^2} \right) \right] &= f(x), \\ u(0) = u(L) &= 0, \\ \frac{d^2 u}{dx^2} (0) = \frac{d^2 u}{dx^2} (L) &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

onde  $f$  representa o carregamento desta viga e  $u$  representa a função que define a linha elástica para a viga.

Observa-se que, caso considerássemos que os parâmetros de rigidez  $EI$  fossem constantes, obteríamos uma equação diferencial de quarta ordem, a qual seria resolvida analiticamente através de integrações sucessivas. No entanto pretende-se, a partir da formulação acima, avaliar as soluções obtidas através de métodos numéricos para a Eq. (1).

A partir do estudo realizado por Hidalgo (2014) para uma viga de Euler-Bernoulli, apoiada em fundação de Pasternak com o método de Galerkin estocástico, desenvolveu-se o método de Galerkin tradicional aplicado ao problema de flexão de uma viga, considerando-se que os parâmetros de rigidez não fossem constantes. Incluiu-se, na formulação parametrizada para o módulo de elasticidade do concreto, valores experimentais obtidos através de experimentos laboratoriais no Laboratório de construção Civil da Universidade Católica de Petrópolis. A partir das simulações realizadas, comparou-se os resultados clássicos da literatura, apresentados por Hibbeler (2010), com os resultados das simulações numéricas, discutindo-se as diferenças entre eles.

Por fim, este trabalho está dividido da seguinte forma: na Seção 2 discute-se a formulação variacional para a Eq. (1), objetivando-se obter as soluções aproximadas para o problema de flexão da viga. Na Seção 3 descreve-se as diferentes formas de cálculo para o módulo de elasticidade de forma determinística e a apresenta-se a forma parametrizada para o mesmo, que será usada nas simulações numéricas. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações numéricas para o problema de flexão da viga. A Seção 5 discute as conclusões obtidas a partir dos resultados até o presente e apresenta perspectivas futuras na mesma linha de pesquisa.

## 2 | FORMULAÇÃO VARIACIONAL

Conforme discutido na Seção 1, ao caracterizar-se os parâmetros de rigidez  $EI$  como elementos probabilísticos no problema de flexão da viga de Euler-Bernoulli, a solução para o problema deve ocorrer de forma numérica, uma vez que não há possibilidade de cálculo, sob estas hipóteses, para solução analítica. Nessa perspectiva, é necessária a formulação variacional, a fim de realizar-se a discretização do problema contínuo e consequente obtenção da solução aproximada para a Eq. (1).

Desta forma, a fim de obter-se a formulação variacional para a Eq. (1), escolheu-se o seguinte espaço para as funções teste

$$V = \{v \in H^2(0, L) | v(0) = v(L) = 0 \text{ e } v''(0) = v''(L) = 0\} \quad (2)$$

O espaço de Hilbert  $H^2(0, L)$  é o espaço de Hilbert cujas funções, suas primeiras e também segundas derivadas são quadrado integráveis.

Multiplicando ambos os lados da Eq. (1) pela função teste, utilizando integração por partes e as condições de contorno do problema, define-se a seguinte formulação variacional para a Eq. (1)

Encontrar  $u \in V$ , tal que

$$a(u, v) = f(v), \quad \text{para todo } v \in V, \quad (3)$$

no qual  $a: V \times V \rightarrow R$  é uma forma bilinear e  $f$  é um funcional linear, definidos como

$$a(u, v) = \int_0^L EI \frac{d^2u}{dx^2} \cdot \frac{d^2v}{dx^2} dx$$

e

$$f(v) = \int_0^L f \cdot v dx.$$

Uma vez que a formulação variacional é obtida, é necessário avaliar se as soluções para a Eq. (1) e a Eq. (3) são equivalentes. A fim de validar essa relação solução para o problema forte, correspondente à solução para a Eq. (1) e solução para o problema variacional, correspondente à Eq. (3), considera-se o Lema de Lax-Milgram desde que a forma bilinear  $a(u, v)$  e o funcional linear  $f(v)$  satisfaçam às hipóteses do mesmo. É possível, considerando que os parâmetros de rigidez  $EI$  sejam limitados e que as condições de contorno para o problema da viga bi apoiada satisfaz condições de regularidade para o espaço de Hilbert  $H^2(0, L)$ , como de fato ocorre para a Eq. (1), pode-se afirmar, a partir do Lema de Lax-Milgram, a equivalência entre as

formulações forte e variacional, permitindo, então a discretização da Eq. (1) através de um método numérico.

### 3 | MÓDULO DE ELASTICIDADE E PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Módulo de elasticidade: variabilidade intrínseca, extrínseca e cálculo tangencial

De acordo com De Marchi (2011) descrevem-se três tipos de módulo de elasticidade do concreto quando sujeito à compressão:

**Módulo tangente:** é calculado através do coeficiente angular da reta tangente a qualquer ponto da curva tensão X deformação na compressão, mas quando não for especificado o ponto da curva, refere-se à origem, ou seja, ao módulo tangente inicial  $E_{ci}$ .

**Módulo secante:** é dado pela relação entre uma tensão qualquer e a deformação a ela correspondente, ou seja, o coeficiente angular da reta que liga os pontos da curva tensão X deformação correspondente a essa tensão e à tensão igual a zero. Quando a tensão não é mencionada, infere-se que o módulo secante seja relativo a uma tensão entre 40 e 50 % da resistência à compressão.

**Módulo cordal:** É definido pela reta que liga dois pontos quaisquer da curva tensão X deformação.

Adotou-se, para este trabalho, o cálculo do módulo de elasticidade tangente, de acordo com o previsto pela ABNT NBR 8522 (2017). Existem, contudo, alguns modelos matemáticos que tentam prever o comportamento do módulo de elasticidade sem levar em consideração toda a variabilidade intrínseca, discutida na Seção 1. De acordo com De Marchi (2011), as abordagens teóricas não possuem muita aplicabilidade e se restringem ao uso do ponto de vista acadêmico. No entanto, é possível verificar algumas fórmulas para o cálculo do módulo de elasticidade, obtidas de forma empírica, que estão presentes em normas e recomendações técnicas internacionais de projetos de estruturas de concreto, conforme a Tabela 1.

Do ponto de vista experimental, diversos fatores intrínsecos contribuem para a variabilidade do concreto. Dentre estes fatores destacamos os agregados, os quais ocupam, em média, 75 % do volume do concreto, impactando diretamente na variabilidade do mesmo e alterando significativamente o valor do módulo de elasticidade (DE MARCHI, 2011).

Autor	Expressão
NBR 6118/2007	$E_{ci} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
EUROCODE 2/2004	$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$ $E_c(t) = 1,05 \cdot \left( e^{[s + [1 - (\frac{28}{t})^{0,5}]]} \right)^{0,3} \cdot E_{cm}$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$E_{ci}(t) = \left( e^{(s+1-\left(\frac{2t}{t}\right)^{0,5})} \right)^{0,5} \cdot E_{ci}$$

Tabela 1: Diferentes formas para o cálculo do módulo de elasticidade tangencial (PACHECO et. al, 2014).

Assim como para os agregados graúdos, a porosidade desempenha um papel fundamental no módulo de elasticidade da pasta de cimento endurecida. Esse fenômeno está diretamente atrelado à relação água/cimento, teor de ar incorporado, adições minerais e grau de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Os vários tipos de vazios na pasta de cimento são classificados como porosidade gel e porosidade capilar. O volume da porosidade diminui durante a hidratação.

A zona de transição entre a matriz da pasta de cimento e o agregado é normalmente considerada como a parte mais fraca do concreto de resistência normal. Para o concreto de alta resistência, a resistência da argamassa e da zona de transição pode ser comparável com a resistência do agregado graúdo (DE MARCHI, 2011).

METHA e MONTEIRO (2008) descrevem o comportamento do concreto a partir de seu lançamento: primeiro forma-se um filme de água ao redor das partículas dos agregados graúdos, podendo formar uma relação água/cimento mais elevada nas proximidades do agregado graúdo do que na matriz da pasta de cimento. Os íons de cálcio, sulfato, hidroxila e aluminatos formados pela dissolução dos compostos de sulfato de cálcio e de aluminato de cálcio, combinam-se para formar etringita e hidróxido de cálcio. Devido à relação água/cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado graúdo consistem de cristais relativamente grandes e, conseqüentemente, formam uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta de cimento ou na matriz da argamassa.

Além dos fatores que contribuem para a variabilidade intrínseca, destacam-se os fatores responsáveis pela variabilidade extrínseca do concreto como os parâmetros do ensaio e as variáveis envolvidas no ensaio em si, incluindo a precisão do aparato utilizado para a fixação dos corpos-de prova, bem como a calibração dos extensômetros associados ao aparato.

Entre os parâmetros influenciadores para o módulo de elasticidade relacionados aos corpos-de-prova, encontram-se a forma e a dimensão da seção transversal, a relação entre o comprimento e essa dimensão e a direção de concretagem (SHEHATA, 2005). Já os parâmetros relacionados ao procedimento de ensaio estão o teor de umidade do corpo-de-prova, a velocidade de aplicação da tensão, a restrição à deformação nas extremidades do corpo-de-prova causada pela placa de carregamento, o comprimento ao longo do qual se mede a deformação, o diâmetro do prato transmissor de carga e

a rigidez da prensa.

De Marchi (2011) apud Montija (2007) sinaliza que o uso de uma fórmula que exige uma aproximação matemática contribui para a interpretação do resultado de ensaio do módulo de deformação do concreto. Desta forma, é necessário garantir que os limites do trecho retilíneo estejam bem definidos e confiáveis. Também são citados pelo autor como fontes de variabilidade inerentes ao ensaio, a velocidade de aplicação da carga, a definição do plano de carga e o tipo de instrumentação para a medição das deformações.

Para os ensaios do módulo de elasticidade, segue-se as recomendações da norma ABNT NBR 8522 (2017). São indicados 5 corpos-de-prova cilíndricos, de forma que a altura do corpo-de-prova seja o dobro do diâmetro do mesmo corpo de prova. O diâmetro deve ser dado de acordo com o tamanho do agregado graúdo, de forma que o diâmetro seja, no mínimo, 4 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo. Primeiramente deve ser feito um ensaio de resistência à compressão para dois corpos de prova, de acordo a ABNT NBR 5739 (2007). Este ensaio tem por objetivo determinar o nível de carregamento a ser aplicado no ensaio de módulo.

A fim de determinar o módulo de elasticidade através da tangente inicial, posiciona-se o corpo de prova corretamente em relação aos medidores que serão usados e aplica-se o carregamento até uma tensão de 30% da resistência à compressão obtida no ensaio anterior ( $\sigma_b$ ), a uma velocidade de 0,25 MPa/s, podendo-se variar esta velocidade em 0,05 MPa/s, tanto positivamente quanto negativamente. Esse nível de carregamento deve ser mantido por 60 segundos e, em seguida, reduzido à mesma velocidade do processo de carregamento até o nível de tensão básica (considerado  $\sigma_a = 0,5$  MPa, com variação de 0,1 MPa, tanto positivamente quanto negativamente). Devem ser realizados mais ciclos de carregamento adicionais, entre  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ , mantendo essas tensões por 60 segundos. Depois do último ciclo de carga são medidas as deformações específicas.

Após o término das leituras de deformação, o corpo de prova deve ser carregado até a sua ruptura. Se a resistência efetiva à compressão do corpo de prova diferir de  $f_{ci}$  em mais de 20 %, os resultados do corpo de prova devem ser descartados.

O módulo de elasticidade, com tensão fixa, pode ser calculado pela seguinte equação

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3},$$

onde

$\sigma_b$  é a tensão maior, em MPa ( ou outra tensão especificada em projeto, de até 40 % de  $f_{ck}$ ;

0,5 é a tensão básica em MPa;

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média, sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média, sob a tensão básica de 0,5 MPa.

### 3.2 Programa experimental

O objetivo deste programa experimental foi investigar o comportamento do módulo de elasticidade do concreto. A seguir, foram realizados ensaios para a medir a deformação e cálculo do módulo de elasticidade para o método da tangente inicial, descrito na Seção 3.1.

A primeira etapa da pesquisa foi realizada durante um período de sessenta dias. A partir de um traço calculado para um concreto convencional de 40 MPa, foram confeccionados 10 corpos-de-prova, dos quais 7 foram ensaiados à compressão e 3 foram ensaiados para cálculo do módulo de elasticidade.

A segunda etapa da pesquisa objetivou o uso dos dados obtidos nos ensaios experimentais para o módulo de elasticidade em um programa computacional, desenvolvido a partir do método de Galerkin para o problema de flexão de uma viga bi apoiada.

Em virtude de condições externas à pesquisa, foram ensaiados apenas três corpos-de-prova para o módulo de elasticidade, cujos resultados podem ser indicados na Tabela 2.

Variável	Valor obtido
Número de amostras	3
Eci previsto segundo NBR 6118 (GPa)	35,417
Eci médio	39,37
Desvio padrão Eci	2,6777
Coefficiente de variação (%)	6,8

Tabela 2: Resumo da análise estatística para o módulo de elasticidade do traço de 40 MPa.

## 4 | SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA O PROBLEMA DE FLEXÃO DE UMA VIGA

### 4.1 Problema discreto

Conforme descrito na Seção 3, a primeira etapa do trabalho objetivou o estudo dos fatores experimentais, intrínsecos e extrínsecos ao cálculo do módulo de elasticidade para o concreto. Além disso, discutiu-se a validade de alguns modelos de formulações determinísticas para o cálculo do módulo de elasticidade, especificado em diversas normas, incluindo na ABNT NBR 6118 (2014). A partir da formulação variacional para o problema, descrita na Seção 2, foi possível obter uma discretização para o problema variacional.

O primeiro passo descrito na aproximação para o problema variacional, descrito pela Eq. (3), se refere à construção de aproximações de dimensão finita para o problema

Seja  $V_h$  uma coleção de dimensão finita para as funções  $u$  e  $v$ , ou seja,  $V_h \subset V$ .

Portanto  $V_h$  é um subespaço, de dimensão finita, de  $V$ . O método de Galerkin para a aproximação da solução de tal problema consiste em definir problemas similares em subespaço de dimensão finita de  $V$ . Assim, com qualquer subespaço de dimensão finita de  $V$ , associa-se ao problema discreto (CIARLET, 2002).

Encontrar  $u_h \in V_h$  tal que

$$a(u_h, v_h) = f(v_h), \text{ para todo } v_h \in V_h. \quad (4)$$

Observa-se que, como a forma bilinear  $a(\cdot, \cdot)$  é simétrica, a solução discreta é também caracterizada pela propriedade

$$J(u_h) = \inf_{v_h \in V_h} J(v_h),$$

onde o funcional  $J$  é dado por

$$J(v) = \frac{1}{2} a(v, v) - f(v).$$

Essa forma alternativa para a solução discreta é chamada método de Ritz.

Seja  $(w_k)_{k=1}^M$  uma base no espaço  $V_h$ . Então a solução  $u_h = \sum_{k=1}^M u_k w_k$  do problema aproximado é tal que os coeficientes são soluções do sistema linear  $a(u_h, v_h) = (f, v_h)$

$$a\left(\sum_{k=1}^M u_k w_k, \sum_{l=1}^M v_l w_l\right) = \left(f, \sum_{l=1}^M v_l w_l\right).$$

Para cada  $K$ , onde  $K$  é um elemento do intervalo  $(0, L)$ , temos

$$a\left(\sum_{k=1}^M u_k w_k, v_l w_l\right) = (f, v_l w_l).$$

Define-se

$$a\left(\sum_{k=1}^M u_k w_k, v_l w_l\right) = \int_K EI \frac{d^2}{dx^2} \left(\sum_{k=1}^M u_k w_k\right) \frac{d^2}{dx^2} (v_l w_l) dx,$$

donde escreve-se

$$\sum_{k=1}^M a(w_k, w_l) u_k = f(w_l), \quad 1 \leq l \leq M,$$

cuja matriz é sempre invertível, desde que a forma bilinear seja coerciva.

A matriz  $a(w_k, w_l)$  é chamada matriz de rigidez e o vetor  $f(w_l)$  é chamado de vetor força.

Uma vez que  $(w_k)_{k=1}^M$  é uma base para  $V_h$ , então  $u_h = \sum_{k=1}^M u_k w_k$ , onde  $w_k(x)$ ,  $x \in [0, L]$ ,  $k = 1, 2, \dots, M$  são as funções de interpolação. A fim de garantir as condições de existência e unicidade para o problema, as funções de interpolação  $w_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, k$  devem satisfazer às condições de contorno do problema inicial. Desta forma

$$w_k(0) = w_k(L) = 0, \quad 1 \leq k \leq M$$

$$\frac{d^2 w_k}{dx^2}(0) = \frac{d^2 w_k}{dx^2}(L) = 0, \quad 1 \leq k \leq M$$

A partir da formulação variacional local, é possível observar que todos os elementos da igualdade são conhecidos, exceto  $u_k$ . Logo

$$A_{kl} = a(w_k, w_l) \text{ e } F_l = (f, w_l),$$

temos o seguinte sistema linear a ser resolvido

$$\sum_{k=1}^M A_{kl} u_k = F_l, \quad 1 \leq l \leq M.$$

Como a forma bilinear para o problema inicial envolve derivadas de segunda ordem para as funções de interpolação, utilizou-se, para a implementação do mesmo, os polinômios de Hermite.

Portanto os elementos da matriz de rigidez A podem ser dados por

$$A_{kl} = \int_{x_k}^{x_{k+1}} EI \frac{d^2 H_k}{dx^2} \frac{d^2 H_l}{dx^2} dx,$$

assim como os elementos do vetor  $\vec{F}$ ,

$$F_l = \int_{x_k}^{x_{k+1}} f H_l dx,$$

onde  $H_i, i = 1,2,3,4$  são os polinômios de Hermite.

## 4.2 Simulações numéricas

De acordo com a discretização descrita na Seção 4.1, realizou-se simulações numéricas para o problema (1). Conforme descrito na Seção 3, este trabalho pretendeu analisar as contribuições da caracterização semi probabilística para o módulo de elasticidade. A fim de incorporar tal hipótese nas simulações numéricas, a exemplo de Hidalgo (2014), considerou-se a seguinte parametrização para o módulo de elasticidade  $E(x, \xi(\omega)) = \mu + \sqrt{3}\sigma \sum_{n=1}^N [\xi_{2n-1}(\omega) \cos(\frac{x}{nL}) + \xi_{2n}(\omega) \text{sen}(\frac{x}{nL})]$ , (5)

onde o vetor  $\xi(\omega)$  representa um vetor de variáveis aleatórias,  $\mu$  representa a média aritmética para os valores do módulo de elasticidade experimental, obtidos a partir dos ensaios descritos na Seção 3, assim como o desvio padrão  $\sigma$ .

Desta forma, realizou-se simulações numéricas com o método de Galerkin clássico, substituindo-se o módulo de elasticidade constante pela Eq. (5). O código foi desenvolvido em MATLAB, na versão R2016b.

A seguir, apresenta-se os resultados para a função que descreve a linha elástica, obtido numericamente a partir da formulação variacional, com a discretização definida na Seção 4.1 e incluindo-se a parametrização para o módulo de elasticidade, dado pela Eq. (5). Os valores para a média e o desvio padrão encontram-se na Tabela 2 da Seção 3.2. O vetor de valores aleatórios  $\xi(\omega)$  foi gerado pela função rand do MATLAB, considerando-se, na Eq. (5),  $N= 1000$ .

A função para a linha elástica foi calculada para uma viga bi apoiada de comprimento 20 m, submetida a uma carga pontual  $P=1$  kN, no centro da viga, ou seja, a 10 m de cada extremidade.

A Figura 1 mostra a função que define a linha elástica aproximada, utilizando o módulo de elasticidade parametrizado pela Eq. (5) dada acima e o método de Galerkin clássico, comparado com a solução exata, obtida de Hibbeler (2010) para o módulo de

elasticidade constante.

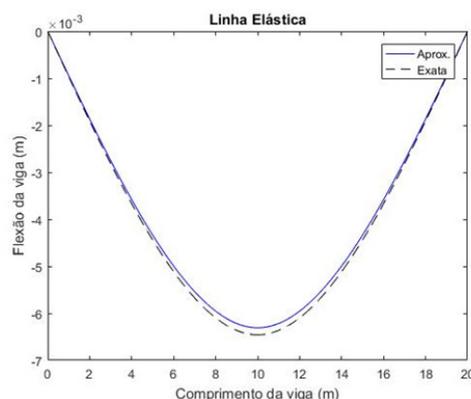


Figura 1: Gráficos das funções que descrevem a linha elástica.

Observa-se que os gráficos da linha elástica, apresentados na Figura 1, estão próximos, destacando-se o fato das soluções serem distintas em virtude da contribuição do módulo de elasticidade parametrizado, incluindo em sua constituição parâmetros obtidos experimentalmente para o concreto, provenientes da Seção 3.

## 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste primeiro estudo, pretende-se ampliar as simulações numéricas, introduzindo-se métodos de elementos finitos estocásticos. Acredita-se que tais modelos refletirão melhor as influências da variabilidade do concreto nas simulações computacionais. Do ponto de vista laboratorial, pretende-se ampliar a quantidade de corpos-de-prova para os ensaios e cálculos do módulo de elasticidade realizando, de forma plena, o estudo do comportamento semi probabilístico para o módulo de elasticidade, bem como pretende-se simular uma viga bi apoiada com carregamento pontual, a fim de comparar os resultados para a linha elástica sob três aspectos: simulações computacionais, soluções exatas extraídas de Hibbeler (2010) e ensaios laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8522 (2017): determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739 (2007): ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118 (2014): projeto de estruturas de concreto – procedimento.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655 (2006): concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.**

Ciarlet, P.G., 2002 **The Finite Element Method for Elliptic Problems**, Classics in Applied Mathematics; 40. North-Holland, Amsterdam: Society for Industrial and Applied Mathematics.

De Marchi, R. D. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado). 2011. 121 p.

Diógenes, H. J. F.; Cossolino, L. C.; Pereira, A. H. A.; El Debs M.K.; El Debs, A. L. H. C., 2011 **Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica**, Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 4, n. 5, pp. 803-813.

Hibbeler, R.C., 2010 **Resistência dos materiais**. São Paulo: Editora Pearson.

Hidalgo, F. L. C. 2014 **Quantificação da incerteza do problema de flexão estocástica de uma viga de Euler-Bernoulli, apoiada em fundação de Pasternak, utilizando o método estocástico de Galerkin e o método de elementos finitos estocástico**. Dissertação (Mestrado). Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Metha, P.K.; Monteiro, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**, Ed. PINI, São Paulo, 2008.

Montija, F. C. 2007 **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo.

Pacheco, J.; Bilesky, P.; Moraes, T.R.; Grando, F.; Helene, P., 2014 **Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto**, Anais do 56<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto, Natal: Rio Grande do Norte.

Shehata, L.D., In Isaia, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, vol. 1, cap. 21, IBRACON. São Paulo, 2005.

## EVOLUÇÃO DIFERENCIAL APLICADA NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE UM SISTEMA OSCILATÓRIO

### Iolanda Ortiz Bernardes

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR)

Cornélio Procópio – Paraná

### Marcelo Favoretto Castoldi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR)

Cornélio Procópio – Paraná

### Alessandro Goedel

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR)

Cornélio Procópio – Paraná

**RESUMO:** OBJETIVO: Este trabalho consiste no estudo sobre métodos de otimização baseados em sistemas inteligentes que, posteriormente, serão aplicados na estimação de parâmetros de um motor de indução trifásico (MIT). O método específico escolhido para o estudo foi a evolução diferencial (ED), utilizada na resolução de um problema de minimização, através da estimação de quatro parâmetros de um sistema oscilatório fornecido. MÉTODOS: A simulação foi realizada seguindo a estrutura da evolução diferencial e com o uso do software MATLAB®, versão 2014b, no notebook Acer Aspire com processador Intel® Core™ i5-3337U e sistema operacional de 64 bits. RESULTADOS: Os valores obtidos para os parâmetros  $\theta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\delta$  foram 4,2154, -3,7089, 34,9949 e 0,3131, obtendo um

erro relativo máximo de 1% para o parâmetro  $\theta$ . CONCLUSÕES: O sucesso dos resultados obtidos é evidenciado pela sobreposição da curva fornecida com a curva estimada do sistema oscilatório analisado. Ou seja, os parâmetros estimados via evolução diferencial, através da minimização de uma função objetivo, foram satisfatórios.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estimação de parâmetros. Evolução Diferencial. Sistema oscilatório.

**ABSTRACT:** OBJECTIVE: This work consists in a study about optimization methods based on intelligent systems that, later, will be applied in the estimation of parameters in a three-phase induction motor (MIT). The specific method chosen for the study was a differential evolution (ED), used in solving a minimization problem, through the estimation of four parameters of the oscillating system. METHODS: The simulation was performed following the differential evolution framework and with the use of MATLAB® software, version 2014b, in Acer Aspire notebook with Intel® Core™ i5-3337U processor and 64-bit operating system. RESULTS: The values obtained for the parameters  $\theta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  and  $\delta$  were 4.2154, -3.7089, 34.9949 and 0.3131, obtaining a maximum relative error of 1% for the parameter  $\theta$ . CONCLUSIONS: The success of the results obtained is evidenced by the overlap of the provided curve with the estimated curve of the

oscillatory system analyzed. That is, the parameters estimated by way of the differential evolution, through the minimization of an objective function, were satisfactory.

**KEYWORDS:** Parameter estimation. Differential Evolution. Oscillatory system.

## 1 | INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) pode ser considerado, em muitos setores industriais, como a principal máquina de conversão de energia elétrica em mecânica motriz (KOSOW, 2005; GUEDES et al., 2016). Isso ocorre devido ao seu baixo custo, robustez e alto grau de confiabilidade (DOS SANTOS et al., 2014), além da capacidade de adotar diretamente a corrente alternada como fonte de alimentação (FITZGERALD et al., 2006).

Além disso, os MITs são responsáveis por uma grande parte do consumo de energia elétrica no Brasil, aproximadamente 35% do consumo total de eletricidade (SAUER et al., 2015). Estes motores podem apresentar elevada eficiência, em torno de 90%. No entanto, em algumas situações, este número pode ser bem menor, afirma Garcia (2003). Uma das causas principais de baixa eficiência é o dimensionamento inadequado do MIT. Assim, para que um motor funcione corretamente são necessários controle e acionamento adequados e, para isso, seus parâmetros devem ser levados em conta.

Dessa maneira, o objetivo principal do trabalho foi desenvolver o algoritmo de evolução diferencial (ED) para estimar os parâmetros de um sistema oscilatório, a fim de que este, futuramente, possa ser utilizado na estimação dos parâmetros elétricos de um MIT operando em regime permanente.

## 2 | EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A Evolução Diferencial (ED), do inglês *Differential Evolution*, é um algoritmo de otimização evolucionária baseado em teorias darwinianas sobre a evolução de espécies e conceitos relacionados à genética (STORN e PRICE, 1997). De acordo com Lopes e Takahashi (2011), se configura como uma das estratégias mais utilizadas para a resolução de problemas da ciência e engenharia. Na identificação de parâmetros de dois motores de indução, usados nas bombas de circulação de casas produzidas pelo fabricante dinamarquês de bombas Grundfos AIS, tem-se como exemplo o uso da ED (URSEM e VADSTRUP, 2003).

Na evolução diferencial, uma população de cromossomos (vetores de soluções candidatas ao problema) evolui através da aplicação de três operadores genéticos: mutação, cruzamento e seleção, seguindo esta ordem (COSTA, 2015). A Figura 1 exemplifica a estrutura da ED.

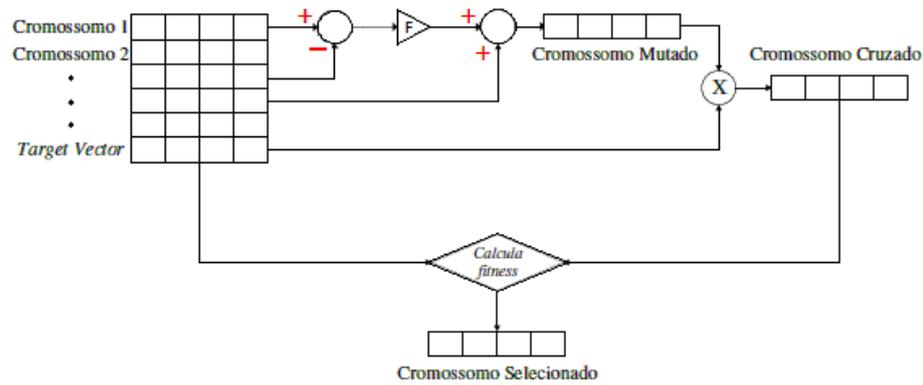


Figura 1 – Processo de mutação, cruzamento e seleção.

Fonte: Adaptado de Guedes (2016).

As equações (1), (2), (3) e (4) descrevem a dinâmica do algoritmo e são utilizadas para a elaboração do mesmo. Na equação (1), representa o vetor população inicial, o limite superior e o inferior. Na equação (2), é o vetor mutado, é o fator de ponderação e , e são vetores escolhidos aleatoriamente da população para que a mutação possa ser realizada. A equação (3) resume o operador cruzamento, onde é o vetor cruzado e é a probabilidade de cruzamento definida pelo usuário e contida no intervalo [0,1], atuando como controlador na transmissão das informações dos vetores pais aos filhos. A equação (4) exemplifica a seleção, sendo que é o novo vetor população inicial que pode ser composto pelo vetor cruzado , se o valor da sua função objetivo for menor que o valor da função objetivo do vetor população inicial , caso contrário quem ocupa a posição é , mas isso acontece apenas para o caso de minimização. Dessa maneira, todo o processo é repetido até ser estabelecido um critério de parada, dado, normalmente, pelo número máximo de gerações.

$$x_{i,j} = x_{i,L} + \text{rand}(x_{i,U} - x_{i,L}) \quad (1)$$

$$v_{i,g} = x_{r1,g} + F(x_{r2,g} - x_{r3,g}) \quad (2)$$

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_{i,g} & \text{se } \text{rand} \leq CR \text{ ou } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{se } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

### 3 | MÉTODOS

A implementação consistiu em um algoritmo de evolução diferencial aplicado na estimação de parâmetros de um sistema oscilatório proposto, representado pela equação (5).

$$\text{resp}(t) = xe^{yt} + \cos(zt + k) \quad (5)$$

Para determinar os parâmetros  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$  do sistema oscilatório, a função objetivo proposta foi minimizada. Tal função consiste na diferença entre as curvas (fornecida e estimada), ponto a ponto. A comparação é feita pelo do método dos mínimos quadrados, apresentado na equação (6).

$$FO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\text{resp}_i - \text{resp}1_i}{\text{resp}_i} \right)^2 \quad (6)$$

As curvas possuem  $n=1001$  pontos atribuídos no mesmo intervalo de tempo. Os valores de F e CR foram 0,8 e 0,5, respectivamente.

### 4 | RESULTADOS

Os limites definidos para cada parâmetro foram:

- $0 \leq x \leq 5$ ;
- $-5 \leq y \leq 0$ ;
- $30 \leq z \leq 40$ ;
- $0,1 \leq k \leq 0,5$ .

A população inicial foi constituída por 30 cromossomos com 4 genes cada correspondendo, respectivamente, a  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$ . Esta foi submetida aos operadores genéticos da ED, considerando um número máximo de 1000 gerações. A Figura 2 apresenta a curva estimada sobreposta à curva fornecida.

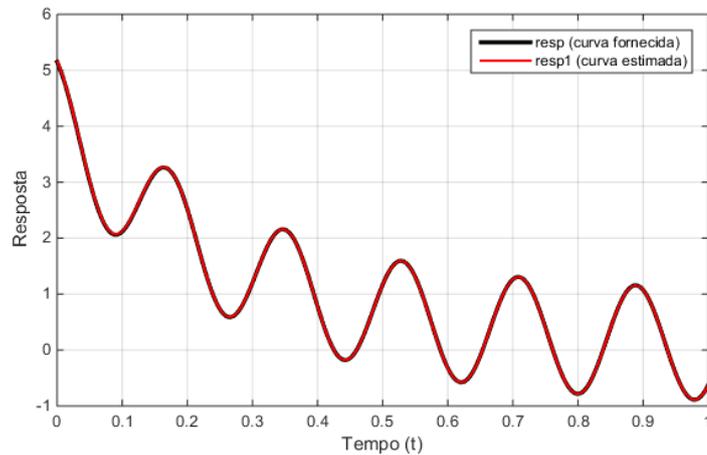


Figura 2 - Representação gráfica das funções  $resp(t)$  e  $resp1(t)$ .

Fonte: Autoria própria via MATLAB®.

Os valores obtidos para os parâmetros  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$  foram 4,2154, -3,7089, 34,9949 e 0,3131, respectivamente, sendo os valores reais 4,2, -3,7, 35 e 0,31, resultando em um erro relativo máximo de 1% para o parâmetro  $k$ . O tempo total de execução foi igual a 69,681 segundos e o erro da minimização da função objetivo foi de  $4,7683 \cdot 10^{-5}$ .

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou resultados satisfatórios via evolução diferencial (ED) para a estimação dos parâmetros  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$  do sistema proposto. Esse fato pôde ser comprovado pelo gráfico da Figura 2, no qual, a curva estimada ficou muito próxima da curva fornecida, como também pelo erro relativo máximo de 1% para o parâmetro  $k$ , pelo intervalo de tempo de execução justo, o baixo custo operacional e o erro para a minimização relativamente pequeno. Por isso, a ED está sendo um algoritmo evolucionário muito estudado na determinação de parâmetros, principalmente de máquinas elétricas, muito utilizadas no setor industrial, local, este, que deve buscar sempre a maior eficiência energética. Portanto, a pesquisa terá continuidade e, futuramente, será voltada para a aplicação do algoritmo de evolução diferencial na estimação dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico.

## REFERÊNCIAS

COSTA, B. L. G. **Metaheurísticas de otimização aplicadas na sintonia de controladores PI de um acionamento DTC-SVM para motores de indução trifásicos**. 2015. 127 f. Dissertação de Mestrado. PPGEE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

DOS SANTOS, T. H. et al. Scalar control of an induction motor using a neural sensorless technique. **Electric power systems research**, v. 108, p. 322-330, 2014. ISSN 0378-7796.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 139 f. Dissertação de Mestrado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GUEDES, J. J. **Identificação de falhas de curto-circuito de estator em motores de indução trifásicos utilizando evolução diferencial**. 2016. 69 f. Dissertação de Mestrado. PPGEE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio.

GUEDES, J. J.; CASTOLDI, M. F.; GOEDEL, A. Temperature influence analysis on parameter estimation of induction motors using differential evolution. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, p. 4097-4105, 2016. ISSN 1548-0992.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15 ed. São Paulo: Globo, 2005.

LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. **Computação evolucionária em problemas de engenharia**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011.

SAUER, I. L. et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 308-318, 2015. ISSN 1364-0321.

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341-359, December 01 1997. ISSN 1573-2916.

URSEM, R. K.; VADSTRUP, P. Parameter identification of induction motors using differential evolution. **Evolutionary Computation, 2003. CEC'03. The 2003 Congress on**, 2003, IEEE. p.790-796.

## GERAÇÃO DE UM ACELEROGRAMA SÍSMICO ARTIFICIAL A PARTIR DE UMA FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA COMPATÍVEL COM UM ESPECTRO DE RESPOSTA DE PROJETO

**Daniela Dalla Chiesa**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Depto. de Engenharia Mecânica  
Porto Alegre – Rio Grande do Sul

**Letícia Fleck Fadel Miguel**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Depto. de Engenharia Mecânica  
Porto Alegre – Rio Grande do Sul

**RESUMO:** A necessidade da geração de acelerogramas sísmicos artificiais, compatíveis com um determinado espectro de resposta de projeto, tem sido reconhecida há alguns anos, um exemplo disso é a sua utilização na elaboração de projetos sismo-resistentes. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo utilizar uma nova metodologia, proposta por Barone et al. (2015), para a geração de uma função densidade espectral de potência compatível com um espectro de resposta de pseudo-aceleração e, a partir dessa função, proceder à geração de um acelerograma sísmico artificial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acelerograma sísmico artificial; Espectro de resposta; Função densidade espectral de potência.

**ABSTRACT:** The need to generate artificial seismic accelerograms, compatible with a given spectrum of design response, has been recognized for some years, an example of this

is its use in the development of earthquake resistant design. In this context, the present work aims to use a new methodology, proposed by Barone et al. (2015) for the generation of a power spectral density function compatible with a pseudo-acceleration response spectrum and, from this function, to generate an artificial seismic accelerogram.

**KEYWORDS:** Artificial seismic accelerogram; Response spectrum; Power spectral density function.

### 1 | INTRODUÇÃO

A maioria dos códigos sísmicos retrata a ação sísmica através de um espectro de resposta (ER), contudo, alguns deles, como o Eurocódigo 8 (EUROCODE8, 2004), permitem que o movimento do solo seja representado através de acelerogramas artificiais, de duração finita  $T_s$ , gerados a partir de amostras de um processo estocástico estacionário gaussiano de média zero, caracterizado por uma função densidade espectral de potência (FDEP) de aceleração do solo compatível com um ER (CACCIOLA; COLAIANNI; MUSCOLINO, 2004) (NAVARRA; BARONE; IACOMO, 2013). Em virtude disso, o grande desafio que se apresenta a pesquisadores da área é a elaboração de procedimentos que sejam capazes de definir,

da melhor forma possível, uma FDEP compatível com o ER em questão. Com essa finalidade, inúmeras técnicas foram desenvolvidas ou aperfeiçoadas ao longo dos anos e estão disponíveis na literatura para a utilização, os trabalhos de Unruh (1981), Pfaffinger (1983), Cacciola, Colaianni e Muscolino (2004), Preumont (2008), Navarra, Barone e Iacomo (2013) e Barone et al. (2015) ilustram algumas dessas propostas, entretanto, dentre as várias alternativas, o método desenvolvido por Navarra, Barone e Iacomo (2013) e aprimorado, recentemente, por Barone et al. (2015) ganha destaque por não utilizar procedimentos iterativos e avaliações numéricas e dessa maneira contribuir para diminuir consideravelmente o custo computacional.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo utilizar o método proposto por Barone et al. (2015) para a geração de uma FDEP compatível com um espectro de resposta de pseudo-aceleração e, a partir dessa FDEP, proceder à geração de um acelerograma sísmico artificial. Para ilustrar os efeitos do acelerograma sobre uma estrutura são, então, calculados os seus espectros de resposta. Todos os procedimentos são realizados no programa MATLAB.

## 2 | FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA COMPATÍVEL COM UM ESPECTRO DE RESPOSTA DE PROJETO

O método de Navarra, Barone e Iacomo (2013) e Barone et al. (2015) propõem a criação de uma função analítica para definir uma FDEP compatível com um ER e pode ser utilizada em substituição ao ER de alguns códigos sísmicos, como o Código Internacional de Construção (Estados Unidos da América), Eurocódigo 8 (União Européia), NRS10 (Colômbia), INEN-5 (Equador), entre outros.

Para a definição de uma FDEP analítica foi observado que os espectros de potência resultantes, a partir da definição de um processo estocástico estacionário, retornavam a uma FDEP cuja estrutura matemática é relativamente simples e totalmente definida pelo conhecimento de poucos parâmetros. Partindo dessas constatações Barone et al. (2015) propuseram a seguinte função analítica para a FDEP  $G(\omega)$ :

$$G(\omega) = \begin{cases} G_0 \left( \frac{\omega_D}{\omega_C} \right)^{\epsilon_2} \left( \frac{\omega}{\omega_D} \right)^{\epsilon_1}, & 0 \leq \omega \leq \omega_D \\ G_0 \left( \frac{\omega}{\omega_C} \right)^{\epsilon_2}, & 0 < \omega \leq \omega_C \\ G_0 \left( \frac{\omega}{\omega_C} \right)^{\epsilon_3}, & 0 < \omega \leq \omega_B \\ G_0 \left( \frac{\omega_B}{\omega_C} \right)^{\epsilon_3} \left( \frac{\omega}{\omega_B} \right)^{\epsilon_4}, & \omega > \omega_B \end{cases}$$

em que  $G_0$  é o valor de pico da função em  $\omega = \omega_c$ ,  $\omega$  representa a frequência circular,  $\omega_B$ ,  $\omega_C$  e  $\omega_D$  são as frequências circulares que delimitam cada trecho do espectro e  $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$  e  $e4$  são parâmetros a serem determinados (para mais detalhes consultar Barone et al. (2015)). A equação acima foi desenvolvida para um ER de 4 trechos, mas a metodologia é estendida considerando ER de 2 e 3 trechos.

A Figura 1a mostra a FDEP obtida, considerando um solo do tipo B e sismicidade do Tipo 1 do Eurocódigo 8. O valor da máxima aceleração do solo é  $0,4g$  ( $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ) e a razão de amortecimento corresponde a  $0,05$ .

### 3 | GERAÇÃO DO ACELEROGRAMA SÍSMICO ARTIFICIAL

Um acelerograma sísmico artificial  $\ddot{U}_g(t)$  pode ser gerado a partir da superposição de  $N$  harmônicas com ângulo de fase  $\varphi_j$ , cujos valores são escolhidos de forma aleatória e uniformemente distribuídos entre  $0$  e  $2\pi$ :

$$\ddot{U}_g(t) = \psi(t) \sum_{j=1}^N \sqrt{2G(\omega)\Delta\omega} \cos(\omega_j t + \varphi_j),$$

onde  $t$  é o tempo,  $\Delta\omega$  é o incremento de frequência e  $\psi(t)$  é a função modulação, definida neste trabalho por Jennings, Housner e Tsa (1969).

A geração de acelerogramas artificiais pode resultar em velocidades e deslocamentos do solo que não condizem com a realidade, portanto, é necessário proceder com a correção do acelerograma. Com o objetivo de evitar esse tipo de fenômeno uma correção polinomial da linha de base da aceleração do solo proposta no trabalho de Cacciola, 2010 é adotada. A Figura 1b mostra o acelerograma sísmico artificial gerado e a função modulação adotada.

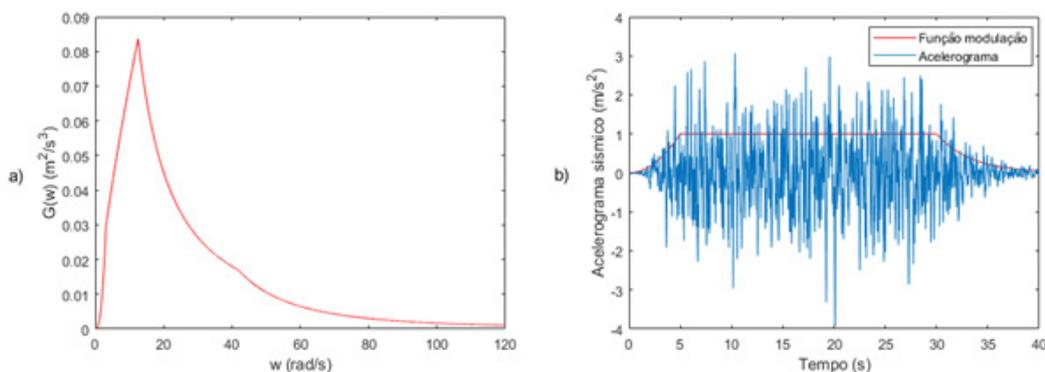


Figura 1: Espectro de potência (esquerda) e acelerograma sísmico artificial (direita).

Com o objetivo de ilustrar os efeitos do acelerograma sísmico artificial sobre uma estrutura, são apresentados, na Figura 2, os espectros de resposta de deslocamento, Figura 2a, pseudo-velocidade, Figura 2b, e pseudo-aceleração, Figura 2c.

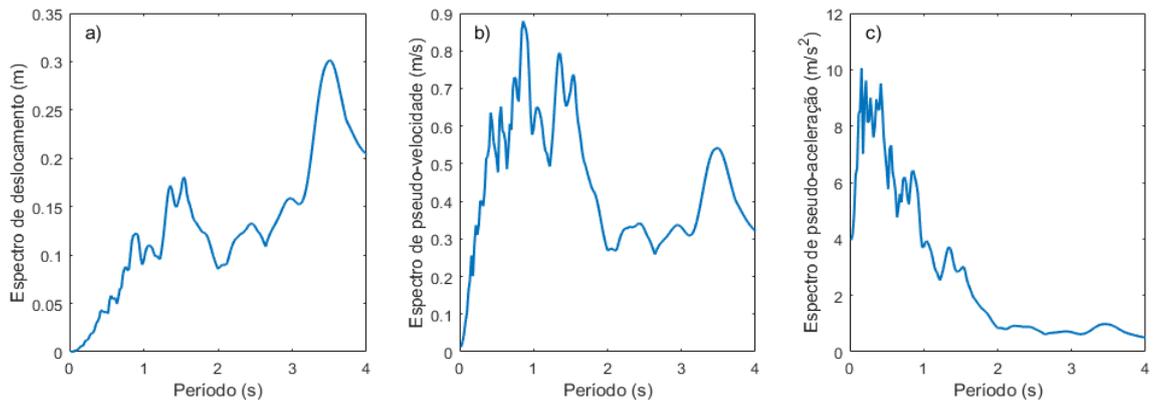


Figura 2: Espectros de respostas referentes ao sinal gerado.

## 4 | CONCLUSÕES

Este estudo mostra como é possível gerar acelerogramas sísmicos artificiais que possam ser utilizados em substituição ao ER de vários códigos de construções. A geração do acelerograma, a partir de um espectro de potência compatível com um espectro de resposta de pseudo-aceleração, representa um avanço em termos de elaboração de projetos estruturais. Entretanto, é importante destacar que uma correção na sua linha de base é necessária a fim de se obter um sismo com características reais.

O estudo apresentado corresponde a um dos primeiros passos para a simulação de eventos sísmicos. Objetiva-se, ainda, a melhora do modelo para a geração do acelerograma, considerando um processo estocástico não estacionário, que é o objetivo principal a ser alcançado.

## 5 | AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a CAPES e o CNPq pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- BARONE, G. et al. **A novel analytical model of power spectral density function coherent with earthquake response spectra**. In: PROCEEDINGS OF UNCECOMP 2015: THE 1ST ECCOMAS THEMATIC CONFERENCE ON UNCERTAINTY QUANTIFICATION IN COMPUTATIONAL SCIENCES AND ENGINEERING. Crete, Greece: 2015. p. 1–13.
- CACCIOLA, P.; COLAIANNI, P.; MUSCOLINO, G. **Combination of modal responses consistent with seismic input representation**. Journal of Structural Engineering, v. 1, n. 130, p. 47–55, 2004.
- CACCIOLA, P. **A stochastic approach for generating spectrum compatible fully nonstationary earthquakes**. Computers and Structures, v. 88, n. 15-16, p. 889–901, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARD, EUROCODE8: **Design of structures for earthquake resistance Part1: General rules, seismic actions and rules for buildings**. Brussels, Belgium: 2004.

JENNINGS, P.; HOUSNER, G.; TSA, C. **Simulated earthquake motions for design purpose**. In: Proceedings of the 4th world conference on earthquake engineering. Santiago, Chile: 1969. p. 145–160.

PFAFFINGER, D. D. **Calculation of power spectra from response spectra**. Journal of Engineering Mechanics, v. 109, n. 1, p. 357–372, 1983.

PREUMONT, A. **A method for the generation of artificial earthquake accelerograms**. Nuclear Engineering and Design, v. 59, n. 2, p. 357–368, 1980.

NAVARRA, G.; BARONE, G.; IACOMO, F. L. **Stochastic seismic analysis by using an analytical model of PSD consistent with response spectra**. In: Vienna congress on recent advances in earthquake engineering and structural dynamics 2013 (VEESD 2013). Vienna, Austria: 2013. A-1, p. 1–10.

UNRUH, J. F.; KANA, D. D. **An iterative procedure for the generation of consistent power/response spectrum**. Nuclear Engineering and Design, v. 66, n. 3, p. 427–435, 1981.

## GRUPO DE ESTUDOS E INTERVENÇÕES SOCIOAMBIENTAIS ENQUANTO PRÁTICA EDUCATIVA PARA A ENGENHARIA AMBIENTAL: CICLOS QUE SE RETROALIMENTAM

### **Gabriela de Souza Carvalho**

Universidade de Brasília  
Brasília (DF)

### **Julia Dedini Felício**

Universidade de São Paulo  
São Carlos (SP)

### **Lara Ramos Monteiro Silva**

Universidade de São Paulo  
São Carlos (SP)

### **Rhennan Mecca Bontempi**

Universidade de São Paulo  
São Carlos (SP)

**RESUMO:** Compreendendo a extensão universitária como um instrumento que busca dialogar com a realidade, aproximando a universidade pública do cumprimento de sua função social, o propósito deste trabalho é investigar o papel da extensão enquanto prática educativa acadêmica. Para isso, foi feito um estudo de caso do Grupo de Estudos e Intervenções Socioambientais (GEISA), atuante na cidade de São Carlos, interior do estado de São Paulo, no âmbito do curso de Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo (USP). A partir de um resgate histórico, buscou-se compreender as distintas formas de atuação do grupo, seus objetivos e como foi criado. Além disso, foram coletados relatos de membros

atuais e egressos do grupo a fim de investigar qual influência o GEISA teve na sua formação estudantil e profissional. Constatou-se que a influência do grupo reflete no amadurecimento pessoal e profissional, politização do debate acerca da questão ambiental e estímulo à atuação para a transformação social.

**PALAVRAS-CHAVE:** Universidade Pública. Extensão. Educação. Engenharia Ambiental.

**ABSTRACT:** Understanding university extension as an instrument that seeks to dialogue with reality, bringing the public university closer to fulfilling its social function, the purpose of this work is to investigate the role of extension as an academic educational practice. A study of the Socio-environmental Studies and Interventions Group was carried out in the city of São Carlos, in the state of São Paulo, in the Environmental Engineering course of the University of São Paulo (USP). From a historical rescue, it was seek to understand the different forms of performance of the group, its objectives and how it was created. In addition, reports were collected from current and former members of the group in order to investigate what influence the group had in its student and professional training. It was verified that the influence of the group reflects in the personal and professional maturation, politicization of the debate about the environmental question and

stimulus to the action for the social transformation.

**KEYWORDS:** Public University. Extension. Education. Environmental engineering.

## 1 | INTRODUÇÃO

Antes de entrar na USP trabalhei por dois anos numa pequena fábrica, entre as coisas que produzíamos havia uma peça de metal utilizada em coleiras de cachorro. Um dia meu patrão pediu para criar um protótipo dessa mesma peça mas com o formato de um ossinho nas bordas, rapidamente peguei uma peça e comecei a usiná-la esculpindo as curvas pedidas. E foi nesse momento, vendo o formato de ossinho aparecendo que comecei a me questionar: O que é isto que estou fazendo? Há tantos problemas no mundo, tantas coisas erradas e o que estou fazendo de útil? O que estou fazendo de bom? Coleiras de ossinho?

Nada contra a coleira (...), mas produzir o formato de um ossinho numa peça que ninguém nem percebe era algo totalmente sem sentido para mim.

(...) Quis começar este livro contando esta história porque na vida universitária há muitos momentos semelhantes em que paramos pra fazer reflexões como essas: Será que estou no curso certo? Por que vou fazer isso? Pra quem? O que estou fazendo de bom para o mundo? Como é frustrante olhar para as coisas que produzimos e não nos enxergarmos nelas, quantos trabalhos, relatórios feitos por fazer sem nos identificarmos com eles.

O GEISA muitas vezes serviu para ajudar as pessoas que fizeram essa reflexão, serviu como uma esperança para aqueles que não queriam mais ficar na inércia do sistema produzindo “coleiras de ossinho”. Um grupo que faz sentido na demanda da sociedade, na demanda da universidade e, principalmente, faz sentido nos sonhos de seus membros (ANDREOLI, 2014, p. 2).

O trecho que inicia este trabalho foi retirado do livro “A história do GEISA segundo o Manutchal”, escrito por Fernando César Andreoli em 2014. Fernando, o “Manutchal”, como era conhecido pelos colegas de curso, é hoje engenheiro ambiental formado e foi um dos “fundadores” do Grupo de Estudos e Intervenções Socioambientais, o GEISA. O termo “fundadores” aparece entre aspas pelo fato de que o GEISA, grupo de extensão da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), foi e é uma construção coletiva de diversas pessoas e está em constante transformação, por isso não houve necessidade de registro de quem de fato fundou o grupo, mas sim de quem participou e participa dessa construção.

Para iniciar as discussões do GEISA enquanto prática educativa, acredita-se que é fundamental, primeiramente, refletir sobre o que seria a extensão universitária para, posteriormente, discutir as potencialidades de um grupo de extensão universitária. Dedini (2018) levanta esse questionamento em seu trabalho “A Extensão Universitária no Campus de São Carlos - USP”.

Compreende-se, segundo a autora, que a extensão universitária é, antes de tudo, um instrumento pelo qual a universidade busca diminuir as crises sociais, ambientais, políticas e econômicas que assolam o cenário nacional e internacional. Ela afirma que “para alguns autores – cita-se Faria (2001), Nogueira (2001) e Tavares (1998) -, a extensão universitária não deveria ser entendida como uma entidade, tripé ou atividade à parte da Universidade, pois ela estaria indissociada de ensino e pesquisa,

de maneira que a Extensão é o Ensino e é a Pesquisa” (DEDINI, 2018, p. 50).

Partindo dessa reflexão e entendendo a extensão universitária como um instrumento que busca dialogar com a realidade e, assim, auxiliar a universidade pública no cumprimento de sua função social, um grupo de extensão se consolida como tal, a partir do momento em que se coloca como um agente de mudança, que fundamenta a sua atuação de acordo com as demandas apresentadas a partir do diálogo com a sociedade.

A compreensão de quais seriam as funções desse agente de mudança, considerando o contexto do Campus Universitário da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, é um processo que permeia a atuação do GEISA ao longo de 10 anos.

A busca por essa compreensão, atrelada à construção dos projetos e articulação externa, possibilita a formação holística dos participantes do grupo, futuros engenheiros e engenheiras ambientais. Mais do que isso, possibilita, paralelamente, o questionamento do projeto político pedagógico do curso e do projeto de universidade do qual fazem parte.

O presente artigo, portanto, pretende identificar e analisar o papel que o GEISA cumpre enquanto prática educacional no curso de Engenharia Ambiental da EESC - USP. A partir de um resgate histórico, busca compreender as diversas formas de atuação do grupo (ciclos de projetos, ciclos de pesquisas e ciclos de pessoas), seus objetivos e como foi criado, além de refletir sobre a influência na formação dos estudantes durante e após a graduação, na atuação profissional. Por fim, busca-se trazer contribuições sobre qual o papel da Engenharia Ambiental e da universidade pública na sociedade em que estão inseridas.

## 2 | METODOLOGIA

A realização do resgate histórico fundamentou-se em análise documental. Os materiais analisados foram fotos, relatórios de projetos, reportagens de jornais locais e um livro sobre a história do GEISA, escrito em 2014 pelo membro do grupo e estudante egresso do curso de Engenharia Ambiental, Fernando César Andreoli, e intitulado “A história do GEISA segundo o Manutchal”.

Para compreender a influência do grupo na formação educativa e atuação profissional dos membros atuais e egressos, assim como o papel que o GEISA cumpre no curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP), foram coletados depoimentos escritos de participantes atuais e egressos baseados em três perguntas:

- O que te motivou a participar do GEISA?
- Qual foi a influência que a participação no GEISA teve na sua formação e atuação profissional?

- Que papel acha que o GEISA cumpre no curso de Engenharia Ambiental da EESC - USP?

O critério de seleção dos participantes da pesquisa se deu pelo aspecto temporal de ingresso no curso, pelo menos um por turma, ou seja, pelo menos um participante por ano, desde o ano de criação do grupo, em 2009, até 2018. Assim, foram contatados diversos participantes atuais e egressos a fim de obter no mínimo 10 respostas. O critério foi pensado de maneira a abarcar percepções das diversas fases pelas quais o grupo passou desde o ano de criação. Alguns depoimentos puderam ser também utilizados para a reconstrução histórica do momento de criação do grupo.

Posteriormente, foram analisados os trabalhos de iniciação científica e de conclusão de curso realizados por participantes do GEISA, para assim relacionar a influência que os debates e projetos desenvolvidos no âmbito do grupo de extensão tiveram na produção científica.

### **3 | DESENVOLVIMENTO (RESULTADOS E DISCUSSÕES)**

#### **3.1 Reconstrução histórica**

O campus da Universidade de São Paulo em São Carlos teve início com a criação da Escola de Engenharia de São Carlos, em 1948. As primeiras aulas tiveram início em 1953, no prédio que hoje abriga o Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC), no centro da cidade de São Carlos. Conforme a universidade foi crescendo, com o oferecimento de novos cursos, houve a necessidade de criação do chamado Campus I, inaugurado em 1956 e também localizado na região central do município.

A partir dos anos 1970 a ampliação continuou com a chegada de novos institutos e novos cursos. Algumas décadas depois a limitação física do campus novamente passou a ser um obstáculo, então superado com a criação do chamado Campus II, localizado em uma área em expansão do centro urbano. Com sua implementação a partir de 2001 e inaugurado oficialmente em 4 de novembro de 2005, o Campus II abriga os cursos mais recentes, como as Engenharias Aeronáutica, Ambiental e de Computação, além de novos laboratórios e blocos didáticos.

Destaca-se que nas diretrizes gerais de implantação do Campus II havia: a) a disposição de construir um campus sustentável, preservar as matas existentes e eliminar todos os tipos de barreiras arquitetônicas; b) desenvolver um processo de planejamento aberto, participativo e continuado que seria construído graças à interlocução com a comunidade universitária e a população da cidade, em especial a vizinhança do Campus; e c) redefinir a relação Campus- Cidade (e essa intenção passava pela proposição de um lugar que se tornaria um parque público com equipamentos para o uso pela comunidade).

Nesse contexto da implementação recente do Campus II da USP na cidade de

São Carlos, a Secretaria Acadêmica Pró-Ambiental (SAPA) do curso de Engenharia Ambiental, promoveu junto aos estudantes uma série de atividades que estimulavam o questionamento acerca do papel social da universidade pública e dos cursos de engenharia. Assim, inspirados por essas atividades, um grupo de estudantes do curso de Engenharia Ambiental decidiu criar, em 2009, o Grupo de Estudos e Intervenções Socioambientais (GEISA). O processo de criação do grupo é relatado por um estudante egresso que participou do GEISA:

O que me chamou atenção no início foram atividades de extensão com enfoque em tecnologias sociais, propostas pela SAPA e por estudantes. A casa sustentável foi uma intervenção que a SAPA organizou algumas vezes na praça central da USP São Carlos onde se construía um espaço de demonstração de tecnologias sociais e de práticas ecológicas que se poderia tomar como mudança de hábitos domésticos. A apresentação contava com a montagem de um banheiro seco, módulo para coleta de água de chuva, discussões sobre autonomia, e algumas oficinas que promoviam a transmissão de alguns saberes. O campus 2 da USP São Carlos tem fronteira com área pertencente a Faber Castell. Esta área era ocupada por plantação de pinus. Para composição da área do campus 2, a Faber Castell doou um terreno na região de um rio que nasce dentro do campus, a área de APP do rio, que se encontrava em desacordo ao código florestal. Até 2008 ainda havia plantação de pinus nesta APP que está dentro do campus 2, localizada próxima ao prédio do curso de Engenharia Ambiental. Após o corte desses pinus, alguns estudantes se organizaram para promover plantios a fim de praticar um reflorestamento a partir de uma agrofloresta, ainda de forma bastante pontual e precária. Neste momento ainda não havia sido formado o GEISA, mas acredito que estas atividades e as pessoas que as desenvolveram foram as inspirações necessárias para que o grupo fosse criado. Tive a oportunidade de participar de algumas reuniões do grupo que iniciou os trabalhos e posteriormente passou a se chamar GEISA (ZANETTE, 2018).

O grupo intensificou as discussões acerca do tema da extensão nas aulas da antiga disciplina “Cultura, Ambiente e Desenvolvimento” – hoje “Cultura, Ambiente e Sustentabilidade”. Segundo Fernando Andreoli, foi nessa disciplina “que pela primeira vez pisei no entorno do Campus II” (ANDREOLI, 2013, p. 5).

Em 2010, o grupo se envolveu com a Escola Estadual Bento da Silva César, promovendo atividades de educação ambiental voltadas ao Córrego do Mineirinho – cuja nascente se encontra perto da escola e que atravessa o Campus II da USP. O mote para as atividades iniciais na escola era “Agir localmente pensando globalmente” (Andreoli, 2014, p. 7) e a nascente do Mineirinho se tornou a peça-chave para o desenvolvimento das atividades de educação ambiental na Escola Bento da Silva César.

Andreoli (2014) também explica parte do processo de formação do grupo e o andamento das atividades nos anos seguintes:

Quando entrei no GEISA de uma forma ingênua, tudo se resumia em: praticar na comunidade do entorno aquilo que aprendemos na teoria em sala de aula. Um alento no meio da rotina de aulas cansativas, um espaço onde pudéssemos fazer a diferença no mundo em vez de esperar nos formarmos pra agir. (...) eu colocaria

o GEISA como o grupo que (...) conseguia manter aquele pensamento 'ingênuo' sonhador trazendo a extensão como porta da salvação invés do tecnicismo. E foi nesse começar a brincar de ser Engenheiro Ambiental que a ingenuidade foi aos poucos se dissolvendo. 'Aplicar na comunidade o que se aprende em teoria na universidade' - E o que se aprende na sala de aula? Logo vemos que a universidade não está referenciada com toda a sociedade, há uma bolha, um buraco que nos separa. Nesse sentido chegamos a um tema que virou uma de nossas bases: A distância entre a comunidade e a universidade. E o que seria 'aplicar na comunidade'? Primeiro o que precisa ser aplicado? O que a comunidade de fato precisa?

A partir de então, com uma base teórica sustentada pelas ideias de Paulo Freire e pelos princípios da Educação Popular, uma série de discussões internas e intervenções nos campi começaram a ser organizadas pelo grupo, inaugurados com o debate "A distância entre Universidade e a Comunidade" realizado em 2011, no "palquinho" (espaço de convivência) do Centro Acadêmico Armando de Salles Oliveira (CAASO) (ANDREOLI, 2014, p. 7).

### 3.2 Os ciclos de projetos

Desde sua concepção, como contam alguns dos "fundadores", o plano para o GEISA era de que se tornasse uma "incubadora de projetos". O estabelecimento da relação com a Escola Bento da Silva César, em 2010, por exemplo, marca o início de um projeto contínuo de educação ambiental e de uma relação duradoura com a escola, que constituiu o primeiro projeto desenvolvido pelo GEISA e que dura até hoje.



Figura 01. Localização Campus 02

Fonte: Elaboração própria.

Além do chamado "projeto escola", que denota o início das atividades de diálogo

para além dos muros universitários, ainda em 2010 o GEISA mantinha atividades constantes no pequeno sistema agroflorestal mencionado anteriormente. Nos anos seguintes, o grupo avançou também no debate teórico e nas práticas de compostagem de resíduos do restaurante universitário e saneamento rural no Assentamento Nova São Carlos, localizado no limite do perímetro urbano do município de São Carlos.

Em 2011 o GEISA decidiu partir para uma estratégia um tanto mais institucional e passou a escrever e enviar projetos, com o auxílio de alguns professores do curso, ao Programa Aprender com Cultura e Extensão – antigo programa de fomento às atividades de extensão da USP, hoje Programa Unificado de Bolsas, que contempla bolsas de ensino, pesquisa e extensão. A partir de então, o grupo aumentou e, além dos alunos de engenharia ambiental, já contou com a participação de estudantes de outros cursos de engenharia, arquitetura e até mesmo da Universidade Federal de São Carlos. Também expandiu sua frente de trabalho, com vários projetos contemplados com bolsas nos mais variados enfoques, como diagnósticos socioambientais, educação ambiental, compostagem de resíduos orgânicos, saneamento rural, tecnologias sociais, bioconstrução, técnicas agroflorestais para reflorestamento, horta comunitária, etc. A seguir estão enumerados os projetos institucionais desenvolvidos pelo GEISA de acordo com cada edital e programa:

- 2012 a 2015: Edital Aprender com Cultura e Extensão, vinculado à Pró Reitoria de Cultura e Extensão

Projetos: “Educação ambiental e recursos hídricos na micro-bacia do córrego do Mineirinho” (2012 e 2013), “Educação ambiental no Horto Municipal de São Carlos” (2012 e 2013), “Estudo e aplicação de técnicas agroecológicas para reflorestamento de matas ciliares” (2012 e 2014), “Integrando Campus e Bairro - Caracterização socioambiental do entorno da área 2 do campus da USP São Carlos” (2013), “Compostagem dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário da USP - São Carlos e Sensibilização Ambiental” (2015), “Implementação de projeto-piloto de saneamento rural no assentamento Nova São Carlos” (2015).

- 2016 a 2018: Programa Unificado de Bolsas de Estudos para Apoio e Formação de Estudantes de Graduação (PUB-USP), integra a Política de Apoio à Permanência e Formação Estudantil

Projetos: “Compostagem dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário da USP - São Carlos e aplicações de outras tecnologias sociais” (2016 e 2018); “Educação ambiental e Gestão de Resíduos Sólidos da Escola Estadual Bento da Silva César, Santa Felícia - São Carlos, SP” (2016, 2017 e 2018); “Implementação de tecnologia de saneamento rural no Assentamento Nova São Carlos, São Carlos SP” (2016, 2017 e 2018); “Aplicação de metodologia para diagnóstico socioambiental em comunidades

assentadas: o caso do Assentamento Nova São Carlos - São Carlos (SP)” (2016, 2017 e 2018); “Bioconstrução: arquitetura vernacular e meio ambiente aplicadas à sede do GEISA” (2018).

O gráfico abaixo ilustra o crescimento do número de bolsistas do GEISA, entre 2012 e 2018:

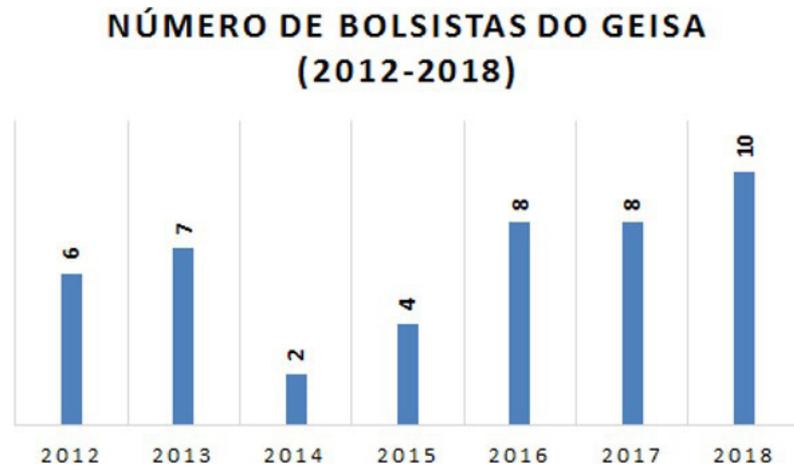


Gráfico 01. Evolução do número de bolsistas do GEISA

Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se que a conquista das bolsas por meio dos editais internos da Universidade de São Paulo significou um avanço para o grupo, uma vez que esse processo estimula o reconhecimento institucional dos projetos, incentiva novos participantes e contribui para a permanência estudantil de maneira conjugada à extensão. No entanto, é importante observar que os membros do GEISA como um todo sempre se dividiram em torno de cada um dos projetos, ou seja, os bolsistas não trabalham sozinhos. Existe um trabalho de acompanhamento tanto no planejamento quanto na prática de suas atividades por um grupo de pessoas que compõem o GEISA, os núcleos de projeto, assim como o debate coletivo de demandas de cada projeto apresentadas nos momentos de reunião semanal do grupo todo.

### 3.3 Os ciclos de pessoas



Figura 02. Atividade de recepção dos ingressantes no Curso de Engenharia Ambiental (Março)

Fica bastante evidente nos depoimentos coletados a grande influência do GEISA tanto na formação quanto no direcionamento acadêmico e profissional dos membros do grupo, além do próprio amadurecimento e crescimento pessoal, que aparece em todos os relatos. A compreensão da função social da universidade pública e da importância do seu tripé de sustentação que é o ensino, a pesquisa e a extensão, são atribuídas à participação no GEISA por diversos membros. O entendimento de como a prática da extensão é essencial para a criação de vínculo entre a universidade e o entorno e, assim, para a percepção e incidência nas questões socioambientais do território onde o campus universitário está inserido também aparecem. Fica claro que tanto no aspecto teórico quanto no prático os participantes desenvolvem uma compreensão ampla do debate acerca da responsabilidade que a universidade pública e que os próprios estudantes têm e devem assumir perante a sociedade e a construção do conhecimento científico. Os fragmentos a seguir refletem essas questões.

“Meus olhos se abriram para outras realidades e possibilidades, estar em contato com a população além do campus é fundamental para se tornar um profissional consciente” diz Beatriz de Paula (2018), ingressante no curso no ano de 2017.

“Apesar de todas as dificuldades que a extensão tem dentro da universidade, o Geisa procura sempre debater esse papel e se apropria muito bem de cumprir essa função. E o Geisa é um grupo que mostra essa ‘resistência’ da extensão dentro do meio acadêmico” diz SALERNO (2018), ingressante no curso no ano de 2015.

“O grupo consegue debater muitos assuntos esquecidos ou deixados de lado na nossa grade curricular e potencializar muito a capacidade dos participantes em se mobilizarem e melhorarem um pouco a relação da universidade com a sociedade ao redor” diz BUGELLI (2018), ingressante do ano de 2014.

O preenchimento de vácuos temáticos da grade de disciplinas da graduação também é apontado por muitos participantes como um dos papéis que o GEISA cumpre no curso de engenharia ambiental. Os temas listados são: educação popular e educação ambiental crítica, sistemas agroflorestais e saneamento rural. Os temas abordados pelo grupo refletem o próprio direcionamento profissional que o GEISA realiza na trajetória de alguns participantes, abrindo novos caminhos e perspectivas profissionais que o curso em si não revela. Isso pode ser verificado a partir de seus próprios relatos e áreas de atuação de participantes egressos, como fica evidente nos trechos a seguir:

(...) ao irmos além da grade horária e da sala de aula, para debatermos o saneamento básico na zona rural, fomos abrindo caminhos de atuação profissional historicamente invisibilizados (...) Hoje, já formada, trabalho em uma consultoria ambiental, com princípios bem claros construídos coletivamente durante a minha graduação (RAMOS, 2018).

O currículo formal do curso, na época, não englobava de maneira prática conceitos como educação popular, sistemas agroflorestais e saneamento rural (os quais acredito serem fundamentais não apenas à formação deste profissional, como também a uma vida mais sustentável). Hoje, posso afirmar com segurança que estas e outras imersões teóricas e práticas foram fundamentais à minha atuação como profissional, na área de gestão social de resíduos (VALENTE, 2018).

(...) a influência foi determinante para minha formação e para os rumos profissionais da minha vida. Depois do GEISA, me encontrei como educadora e passei a coordenar um movimento social nacional de Educação Popular (a Rede Emancipa); trabalho como educador ambiental da equipe do Projeto Escola da Floresta no Sítio São João em São Carlos e estou finalizando o curso de especialização em Educação Ambiental também pela USP de São Carlos (BECO, 2018).

No âmbito do ensino, há diversos relatos que abordam o fato do grupo ter proporcionado aprofundamento tanto teórico quanto prático de temas diversos, inclusive os abordados em sala de aula. A prática é descrita como fundamental para a consolidação do aprendizado e formação profissional. O trabalho em grupo e a responsabilidade assumida nos projetos também são citados como aspectos importantíssimos da formação, assim como os “desafios do trabalho continuado”.

“O percurso vivido durante os 2 anos que participei do Geisa me trouxe muita conscientização sobre os problemas reais, que nenhum livro aborda” diz MESSAGE (2018), ingressante no curso no ano de 2010.

Trabalhar e aprender com os estudantes desta escola foi o que me motivou a continuar no curso de engenharia ambiental, me mostrou os desafios do trabalho continuado e das responsabilidades que carregaremos enquanto profissionais. Eu não tenho dúvidas que eu aprendi muito mais com as crianças do que elas comigo, e espero carregar esses ensinamentos para o resto de minha vida (FERRÃO, 2018)

“É um desafio porque coloca a galera do grupo com uma autonomia que a gente não tem na sala de aula” diz SALERNO (2018), ingressante no curso no ano de 2015.

Minha participação no grupo com toda certeza esclareceu diversos temas que são abordados no curso, mas principalmente os que não são trabalhados, uma vez que existe uma falha grande da parte prática dentro do Ensino, mas que é abrangida pelos grupos de extensão, como o Geisa (TAVER, 2018).

O incentivo, preparo e direcionamento para a prática acadêmica também é uma atribuição feita ao GEISA em uma série de depoimentos, inclusive para o ingresso na pós-graduação. Isso se verifica nos trechos a seguir.

No ambiente acadêmico, onde continuo agora como mestranda, utilizo a experiência do GEISA como um grande exemplo de prática da extensão universitária e os estudos, debates e ações que vivenciei me ajudaram, inclusive, a obter um bom resultado na prova escrita do processo seletivo da pós-graduação (...). Agora, enquanto alguém que está aprendendo a fazer pesquisa acadêmica, vejo o quanto o GEISA me preparou e me direcionou para estar onde estou. A temática do trabalho de conclusão de curso, a escolha do mestrado em outra universidade, a compreensão da escrita acadêmica e a forma de atuação enquanto pesquisadora,

tudo tem grande influência do GEISA, por isso sempre serei grata ao grupo (CARVALHO, 2018).

Minha formação hoje se deve muito ao GEISA, onde as ações no campo de tecnologias sociais de cunho ambiental me estimularam a realizar uma iniciação científica. O projeto da compostagem dos resíduos orgânicos é hoje base para o meu trabalho de conclusão de curso, onde planejo estudar a recuperação de áreas degradadas com o uso do composto, área a qual planejo seguir como engenheiro formado (LUPION, 2018).

“Foi a partir das experiências que tive como ‘geiser’, que escrevi meus artigos, meu trabalho de pesquisa e meu trabalho de conclusão de curso(...) O GEISA pra mim foi ensino, pesquisa e extensão” diz DEDINI (2018), ingressante no curso no ano de 2013.

Outros aspectos pontuados em alguns relatos é o sentimento de pertencimento e a motivação de permanecer no curso de engenharia ambiental principalmente em função da participação no GEISA. Além disso, a politização do debate acerca da questão ambiental, a politização da própria atuação profissional no campo da engenharia ambiental e o reconhecimento pessoal e coletivo enquanto agentes de transformação social são atribuições feitas também ao grupo de extensão. Os trechos a seguir evidenciam os aspectos tratados neste parágrafo.

“O que me motivou a entrar no GEISA foi a oportunidade de fazer parte de algo e assim preencher aquele vazio no coração de um jovem, aquele desejo de se sentir útil para os outros e para o mundo” diz ANDREOLI (2018), ingressante no curso no ano de 2009.

“Eu me sentia motivada a continuar no curso muito mais pelo GEISA do que pela maioria das matérias que cursei e minha formação sem o GEISA seria incompleta” diz CARVALHO (2018), ingressante no curso no ano de 2011.

Foi no GEISA que iniciei minha atuação na extensão universitária, o que possibilitou a compreensão sobre a relevância da atuação dos universitários e universitárias para além da universidade, assim como acreditar em nosso potencial de transformação enquanto sociedade. Se mais grupos estudantis fossem como o GEISA, as universidades brasileiras estariam melhores, mais conectadas com a sociedade e produzindo ciência e profissionais para os interesses comuns da população (FERRÃO, 2018).

Durante os 3 anos que participei do grupo, foi o GEISA que ajudou a desconstruir e reconstruir minha maneira de pensar (...) O grupo me mostrava nossos caminhos, novas maneiras de pensar e de construir uma sociedade. Ele me fez perceber o meu papel ali dentro - de uma Universidade pública - e me fez questionar o que realmente acontecia ali dentro, em um curso tão engessado de engenharia (...) Ele me inspirou, e ainda me inspira, a buscar sempre ser uma profissional melhor, que escute quem realmente precisa ser ouvido e não viva apenas em função do grande mercado (DEDINI, 2018).

“(...) o grupo, ao cumprir sua função de questionar o papel da Universidade Pública, dialoga com outras realidades. Ao dialogar com outras realidades, questiona o papel da Engenharia Ambiental” diz RAMOS, ingressante no curso no ano de 2013.

A atuação do grupo, a meu ver, caminha à operacionalização de uma extensão universitária preocupada com a realidade brasileira. Contribui-se à formação de engenheiros e engenheiras ambientais não por respondê-los, mas por questioná-los em sua prática e apontar que, diferentemente do que se divulga, a ciência e a tecnologia não são neutras e que o mundo é assim não por uma fatalidade do destino. O GEISA nos dá disposição para descobrirmos que podemos ser incendiários (RODRIGUES, 2018).

“Hoje o GEISA é o combustível que alimenta a minha graduação, é o lugar onde fiz amigos incríveis, lugar que me proporcionou descobertas importantíssimas para minha formação profissional e pessoal e o lugar que frequentemente me desafia das mais diversas formas” diz NEGRO (2018), ingressante no curso no ano de 2016.

“(...) a vontade, o clima, tudo te instiga a ficar e querer aprender mais, e com certeza os projetos são ferramentas fundamentais nisso. O projeto escola no qual participo me anima a cada semana, com vontade de aprender e mudar a realidade (...)” diz Lucas Cavalcante (2018), ingressante no curso no ano de 2018

Por fim, são feitas algumas sugestões a respeito da prática extensionista universitária:

GEISA é um grupo exemplo de desenvolvimento de extensão universitária e projetos sociais, as universidades além de incentivarem grupos assim, devem buscar maneiras de integrá-los com a graduação pensando em uma formação prática, dinâmica e transdisciplinar (BONTEMPI, 2018).

Para a realização deste trabalho foram coletados majoritariamente relatos de estudantes e egressos da universidade que participaram do grupo durante o período da graduação, todos do curso de Engenharia Ambiental, assim como proposto na metodologia. No entanto, o Ciro, funcionário da biblioteca que acompanha o trabalho do GEISA de compostagem dos resíduos do restaurante universitário do campus II fez questão de contribuir. Segue o seu relato:

18 horas e sigo de volta a caminho de casa, logo na primeira curva saindo do estacionamento eu me deparo com um barracão, algo incomum para um campus moderno, típico barracão de fazenda que me remete mais uma vez ao passado, trazendo aquele meu lado caipira à tona. Quando fui saciar minha curiosidade, descobri que o Barracão faz parte do Projeto GEISA, onde um grupo de alunos aqui da Universidade de São Paulo (USP) de São Carlos realizam projetos ambientais de saneamento básico, transformando e reaproveitando todos os resíduos que o homem deixa pelo caminho; eles buscam soluções rápidas e concretas para salvar o meio ambiente. Aqui no campus eles trabalham transformando os restos de comida do Restaurante Universitário. Enquanto tudo na sociedade é pensado em transformar e subtrair o máximo da natureza, gerando luxo, eles fazem o contrário, reaproveitam o lixo deixado pelo luxo e devolvem para a natureza, agora tratado e limpo (CELLURALE, 2018).

Ciro Júlio Cellurale funcionário da biblioteca do campus 2 da USP - São Carlos.  
Assim, a análise do papel que o GEISA cumpre parte principalmente do ponto de

vista estudantil e profissional da área. Em próximos trabalhos seria importante coletar depoimentos dos estudantes da Escola Bento da Silva Cesar, do Assentamento Nova São Carlos e dos demais envolvidos nos projetos para verificar qual a percepção destes sujeitos a respeito do papel que o grupo cumpre para fora dos muros da universidade e, dessa forma, enriquecer a análise.

### 3.4 Os ciclos de pesquisas

Ao longo do desenvolvimento dos projetos de extensão, atividades dentro e fora do campus e oficinas diversas, um outro caminho aberto para os ingressantes do grupo foi a pesquisa acadêmica. Um caminho que se mostrou e se mostra fundamental ao concretizar o diálogo entre o “ensino” e a “extensão”.

Em termos de “grandes temáticas” abordadas, inicia-se pelos trabalhos relacionados à gestão de resíduos sólidos, educação ambiental e agroecologia, desenvolvidos entre 2013 e 2015, e que dialogaram diretamente com a construção do barracão de compostagem, com as atividades de educação ambiental e com a manutenção da agrofloresta.

Em 2013, o trabalho de conclusão de curso de Renato Oliveira, intitulado “Análise do processo de implantação de uma Unidade Descentralizada de Compostagem no Campus II da USP São Carlos”, discute:

Este trabalho se propõe a fazer uma análise do processo de desenvolvimento e construção do Projeto de Compostagem dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário do Campus II da USP São Carlos tomando como base a educação ambiental e a compostagem como solução técnica para o gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos da universidade (OLIVEIRA, 2013, p. 12).

Após dois anos de implementação e apropriação do “Projeto de Compostagem” pelo GEISA, Pedro Zanette apresenta seu trabalho de conclusão de curso: “Compostagem dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário do Campus 2 da USP São Carlos - Balanço do funcionamento inicial e propostas de melhorias”. Entre suas conclusões, destaca:

A construção de uma Unidade Descentralizada de Compostagem (UDC) consiste em um espaço de aprendizagem em gestão e gerenciamento de resíduos orgânicos, que provoca a mudança de hábitos em relação a separação de resíduos na fonte (...)A compostagem de fato é um processo versátil, eficiente e de baixo custo, facilmente replicado até na escala de um grande restaurante, como o Restaurante Universitário (ZANETTE, 2015, p. 62).

No âmbito da agroecologia, Taísa Baldassa, ingressante no curso em 2013, tem seu trabalho de iniciação científica apresentado no Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, em 2014. Intitulado “Avaliação do solo de um sistema agroflorestal localizado na área II da USP, São Carlos: subsídios para a manutenção e ampliação do sistema”, o trabalho discute como o modelo agroecológico, enquanto alternativa de

reflorestamento comprometida com a saúde ambiental, social e econômica, é positivo para a área estudada.

Em relação à temática do saneamento rural e o trabalho desenvolvido pelo GEISA no Assentamento Nova São Carlos no período de 2013 a 2017, destaca-se o trabalho de conclusão de curso de Aline Costa, intitulado “Estudo de tecnologias sociais visando o tratamento do esgoto doméstico de unidade unifamiliar – Assentamento Nova São Carlos – São Carlos/SP”. Trabalho fruto do primeiro ano de reuniões e grupos de estudos acerca do saneamento na zona rural, COSTA (2014) agradece “ao GEISA, por ter fomentado esse trabalho e ter trazido a discussão de tecnologias de saneamento para a área rural para os estudantes de Engenharia Ambiental da EESC” (COSTA, 2014, p. 7).

E inicia:

As comunidades rurais e tradicionais são aquelas menos atendidas pelos sistemas convencionais de saneamento. Sabendo que estes locais apresentam uma diversidade cultural e costumes diferenciados, faz-se necessário o estudo de tecnologias sociais que respeitem a tradição da população em questão (COSTA, 2014, p. 18).

Trazendo um levantamento bibliográfico acerca da legislação nacional, estadual e municipal de saneamento básico, das tecnologias de tratamento de esgoto doméstico aplicáveis às áreas rurais e com um estudo de caso de um lote do Assentamento Nova São Carlos, consegue concretizar grande parte do aprendizado do grupo no primeiro ano de projeto. Destaca-se, portanto, um aprendizado central e que guiou os trabalhos subsequentes:

É importante ressaltar que a participação dos assentados no processo foi fundamental, evitando soluções impositivas e “caixas pretas”, possibilitando escolher sistemas de tratamento pelos quais a família demonstrou interesse, o que aumenta a chance de apropriação desta na construção e manutenção do sistema (COSTA, 2014. p. 52).

Em suas recomendações finais, destaca a importância de monitorar os sistemas implementados, com apoio de alunos de iniciação científica, cultura e extensão ou pós-graduação, que possam analisar a eficiência e a vida útil (COSTA, 2014).

Em suas recomendações finais, destaca a importância de monitorar os sistemas implementados, com apoio de alunos de iniciação científica, cultura e extensão ou pós-graduação, que possam analisar a eficiência e a vida útil (COSTA, 2014).

Seguindo as recomendações de COSTA (2014) e o fluxo do “Projeto do Assentamento”, LOTFI (2016), apresenta seu trabalho de conclusão de curso com o título: “Avaliação preliminar da eficiência de fossas biodigestoras no tratamento de esgoto unidomiciliar – Assentamento Nova São Carlos e Santa Helena, São Carlos (SP)”. Ampliando a área de estudo, Lotfi (2016) realizou coleta em sete fossas

biodigestoras (tecnologia social desenvolvida pela EMBRAPA) do Assentamento Nova São Carlos e do Santa Helena, ambos no município de São Carlos.

Assim como COSTA (2014), traz recomendações, como a necessidade de realização de estudos mais aprofundados em relação à utilização do efluente para irrigação na agricultura, e destaca o processo de abertura de um grande campo de estudos de tecnologias sociais que possibilita a aproximação dos estudantes e dos assentados (LOTFI, 2016).

Gabriela Carvalho, em 2016, explora esse campo de estudos e traz em sua dissertação “Identificação e análise dos elementos essenciais da rede institucional de suporte à promoção do saneamento básico nos assentamentos rurais: estudo de caso do Projeto de Assentamento Comunidade Agrária Nova São Carlos (São Carlos - SP)” a discussão de conceitos que englobam o saneamento rural, entre eles reforma agrária e políticas públicas. Conceitos fundamentais que possibilitam a apropriação do grupo de outras dimensões do trabalho no assentamento.

Com uma revisão bibliográfica que parte de um breve histórico da reforma agrária no Brasil e as principais políticas públicas associadas ao território, saneamento e licenciamento ambiental, consegue sintetizar, por meio da construção de um mapa conceitual, a rede institucional que deveria dar suporte à gestão ambiental do Assentamento Nova São Carlos. Ela conclui:

O estudo de caso apresentado constitui mais uma evidência de que a estrutura definida pela legislação não garante a prática adequada, fazendo com que a mobilização por parte dos assentados e assentadas seja necessária para a obtenção de avanços concretos. Assim, é necessário que sejam criados mecanismos que favoreçam a democracia nestes espaços e estimulem e facilitem o cumprimento das normas e leis estabelecidas (CARVALHO, 2016, p. 91).

A metodologia de CARVALHO (2016), ao propor o diálogo entre o contexto local e a rede institucional, deu base para o trabalho de Lara Ramos e Júlia Dedini, intitulado “Saúde e Saneamento em Comunidades Tradicionais e os Aspectos Socioambientais relacionados: O Estudo de Caso de Cambury, Ubatuba (SP)”. Com o recorte para os territórios tradicionalmente ocupados, abordam os obstáculos para prestação continuada dos serviços de saneamento básico, decorrentes da relação entre território e cultura.

Para além das mudanças necessárias no âmbito legislativo, constatou-se que os entraves para a garantia dos serviços de saneamento e saúde também são decorrentes do contexto socioambiental e territorial em que a comunidade está inserida (...) A regularização fundiária, portanto, se mostra essencial para a garantia dos direitos constitucionais, devendo ser concretizada para todos os segmentos tradicionais, assegurando assim a diversidade sociocultural do Brasil (DEDINI e SILVA, 2017, p. 104).

Observa-se, portanto, que a pesquisa acadêmica foi sendo retroalimentada pelas

temáticas construídas pelos projetos e pelas aspirações individuais dos participantes do Grupo. É importante destacar que optou-se por selecionar aquelas que elucidam, de forma mais didática, as “grandes temáticas” trabalhadas pelo GEISA. Outros trabalhos já foram feitos e apresentados, mas não se encontram no presente artigo.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

As reflexões que o processo de criação e atuação do Grupo de Estudos e Intervenções Socioambientais propõem, evidenciam o grande potencial da ferramenta da extensão enquanto prática educativa acadêmica. A autonomia estudantil, responsabilidade e desenvolvimento da prática em grupo que a atuação no grupo exige faz com que os estudantes amadureçam tanto pessoalmente quanto profissionalmente. Esse aspecto, aliado à consolidação do conhecimento tanto na teoria quanto na prática e ao contato com temas que não são trabalhados na grade curricular do curso em questão, abre novas perspectivas de atuação profissional e acaba preparando, estimulando e direcionando os estudantes tanto para a prática acadêmica, com o desenvolvimento de trabalhos de iniciação científica até projetos de mestrado, quanto para a atuação profissional.

O GEISA atua também na politização do debate acerca da questão ambiental como um todo, questiona o papel do profissional de Engenharia Ambiental na sociedade e demonstra ao estudante o seu potencial de agente transformador através do trabalho coletivo, estimulando a transformação social como cumprimento do papel da universidade pública.

Por fim, o GEISA avança na formação de sujeitos a partir de outros sujeitos que buscam transformar-se e transformar a realidade conjuntamente. São ciclos de pessoas que alimentam ciclos de projetos e ciclos de pesquisa. São ciclos que se retroalimentam e contribuem diretamente para a formação pessoal e profissional dos que constroem o grupo e, indiretamente, para todos e todas, além da universidade, que construíram e constroem todos esses ciclos.

#### REFERÊNCIAS

ANDREOLI, F. C. **A história do GEISA segundo o Manutchal**, 2014.

ANDREOLI, F. C. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

BECO, L. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

BONTEMPI, R. M. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

BUGELLI, C. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

CARVALHO, G. S. **Identificação e análise dos elementos essenciais da rede institucional de suporte à promoção do saneamento básico nos assentamentos rurais: estudo de caso do Projeto de Assentamento Comunidade Agrária Nova São Carlos** (São Carlos - SP). Monografia.

Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CARVALHO, G. de S. **Entrevista** concedida a Lara Ramos, 2018.

CELLULARE, C. J. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

COSTA, A. P. **Estudo de tecnologias sociais visando o tratamento do esgoto doméstico de unidade unifamiliar - Assentamento Nova São Carlos/SP**. Monografia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

DEDINI, J. e SILVA, L. R. M. **Saúde e saneamento em comunidades tradicionais e os aspectos socioambientais relacionados: Estudo de Caso de Cambury, Ubatuba (SP)**. Monografia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

DEDINI, J. **A Extensão Universitária no Campus de São Carlos - USP**. Relatório Final de Iniciação Científica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

DEDINI, J. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

FARIA, D. S. (org.). **Construção conceitual da extensão universitária na América Latina**. Brasília: Editora UnB, 2001.

FERRÃO, P. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

LOTFI, P. C. S. **Avaliação preliminar da eficiência de fossas biodigestoras no tratamento de esgoto unidomiciliar - Assentamento Nova São Carlos e Santa Helena, São Carlos (SP)**. Monografia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

LUPION, R. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

MESSAGE, L. B. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

NEGRO, G. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

NOGUEIRA, M. D. P. (org.). **Extensão Universitária no Brasil: uma Revisão Conceitual**. In: FARIA, D. S. (org). Construção Conceitual da Extensão na América Latina. Brasília. Editora UNB. 2001.

OLIVEIRA, R. A. V. **Análise do processo de implantação de uma Unidade Descentralizada de Compostagem no Campus II da USP São Carlos**. Monografia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

RAMOS, L. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho, 2018.

RODRIGUES, E. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

SALERNO, L. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

TAVARES, M. G. M. **Os Múltiplos Conceitos de Extensão**. 1998. In: FARIA, D. S. (org). Construção Conceitual da Extensão na América Latina. Brasília. Editora UNB. 2001.

TAVER, L. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

VALENTE, C. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

ZANETTE, P. H. O. **Compostagem dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário do Campus 2 da USP São Carlos - Balanço do funcionamento inicial e propostas de melhorias.** Monografia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ZANETTE, P. **Entrevista** concedida a Gabriela Carvalho e Lara Ramos, 2018.

## MAPEAMENTO DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS E ESTUDO DA POTENCIALIDADE HÍDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA BACIA DO RIBEIRÃO CAMBÉ EM LONDRINA, PR

**Giselly Peterlini**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Londrina – PR

**Maurício Moreira dos Santos**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Londrina – PR

**Thiago Henrique da Silva**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Londrina – PR

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi identificar e mapear os principais lineamentos estruturais do SASG e avaliar a produtividade hídrica de poços tubulares presentes na bacia do Ribeirão Cambé em Londrina-PR por meio de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Para a identificação e mapeamento dos lineamentos estruturais foram utilizadas e processadas imagens do tipo radar (SRTM) e do satélite Landsat 8-OLI. Foi aplicada a técnica de relevo sombreado à imagem SRTM, utilizando quatro diferentes tipos de ângulos de iluminação. Já na imagem de satélite, foi feito o fusão das bandas multiespectrais com a banda pancromática e realizada a composição colorida RGB utilizando as bandas 1, 2 e 3 respectivamente. Para a análise de dados foi feita a estatística descritiva aplicada aos dados dos poços. Dos resultados obtidos,

foram identificados 22 lineamentos estruturais através da imagem SRTM e 14 lineamentos por meio da imagem Landsat 8-OLI. A melhor identificação de lineamentos foi observada na imagem STRM. Através da estatística descritiva foi constatado que o SASG na situação atual apresenta poços, em sua maioria, com baixas vazões e capacidades específicas, bem como uma grande variabilidade dos dados estudados. Foi possível demonstrar a importância que os estudos hidrogeológicos trazem para a gestão de recursos hídricos no município, relacionados tanto aos aspectos ambientais quanto econômicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lineamentos Estruturais. Produtividade de Poços Tubulares. Gestão de Recursos Hídricos.

**ABSTRACT:** The objective of this work was to identify and map the main structural lineaments of the SASG and evaluate the water productivity of tubular wells in the Ribeirão Cambé basin in Londrina-PR using geoprocessing and remote sensing tools. Radar-type images (SRTM) and the Landsat 8-OLI satellite were used and processed for the identification and mapping of the structural lineaments. The shaded relief technique was applied to the SRTM image, using four different types of lighting angles. In the satellite image, the multispectral bands were merged with the panchromatic band and

the RGB color composition was realized using bands 1, 2 and 3, respectively. For the data analysis, descriptive statistics were applied to the well data. From the results obtained, 22 structural lineaments were identified through the SRTM image and 14 lineaments through the Landsat 8-OLI image. The best identification of lineaments was observed in the STRM image. Through the descriptive statistics it was verified that the SASG in the current situation presents wells, for the most part, with low outflows and specific capacities, as well as a great variability of the studied data. It was possible to demonstrate the importance that hydrogeological studies bring to the management of water resources in the municipality, related to both environmental and economic aspects.

**KEYWORDS:** Structural Lineaments. Tubular Well Productivity. Management of Water Resources.

## 1 | INTRODUÇÃO

Frente ao cenário do aumento da demanda por recursos hídricos para o desenvolvimento das mais diversas atividades humanas, é também crescente a utilização das águas subterrâneas. Isto já é uma realidade no município de Londrina-PR, que está localizado sobre o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), aquífero do tipo fissural ou fraturado, em que a circulação e o armazenamento de água estão condicionados às descontinuidades físicas da rocha (juntas, falhas e fraturas) constituindo-se em um meio heterogêneo e anisotrópico (ROSA FILHO et al., 2006). As fraturas, apresentam-se como feições retilíneas no relevo e quando mapeáveis na superfície terrestre, são chamadas de lineamentos estruturais (O'LEARY et al., 1987).

Neste sentido, o presente estudo tem por finalidade a identificação e o mapeamento de lineamentos estruturais pertencentes ao SASG e a avaliação da influência que estes lineamentos conferem à produtividade de poços tubulares presentes na bacia do Ribeirão Cambé, em Londrina-PR utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

## 2 | MÉTODOS

Para a identificação e mapeamento dos lineamentos estruturais foi utilizado o software ArcGIS versão 10.3.1, em que foram utilizadas e processadas imagens do tipo radar/SRTM e do satélite Landsat 8-OLI. Foi aplicada a técnica de relevo sombreado à imagem SRTM, utilizando quatro tipos de ângulos de iluminação, sendo eles 45°, 135°, 225° e 315° afim de ressaltar as principais feições do terreno. Já na imagem de satélite, foi feito o fusionamento das bandas multiespectrais (30m de resolução espacial) com a banda pancromática (15m) e realizada a composição colorida RGB utilizando as bandas 1, 2 e 3 respectivamente. Após o tratamento das imagens, foi realizada a identificação dos lineamentos por meio da observação de feições retilíneas do relevo e dos padrões de drenagem da bacia do Ribeirão Cambé.

Para uma melhor compreensão do comportamento do SASG na bacia em estudo, foram aplicadas análises estatísticas aos dados de poços tubulares (variáveis), sendo estes a vazão, capacidade específica, profundidade, nível estático (NE) e nível dinâmico (ND). Através dos dados fornecidos pelo Sistema de Informação das Águas Subterrâneas (SIAGAS) e utilizando o software Excel, foram calculados os valores de mínimo, máximo, médias, medianas, desvio padrão e frequência relativa dos poços.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi possível identificar 22 lineamentos estruturais utilizando a imagem SRTM e 14 lineamentos na imagem Landsat-8 OLI. As imagens SRTM com relevo sombreado permitiram interpretar os lineamentos com maior facilidade devido às mudanças de ângulo de iluminação. As imagens de relevo sombreado se mostram mais adequadas para a identificação de lineamentos também pelo fato de apresentarem ausência de feições superficiais como a cobertura vegetal e estradas (RIBEIRO et al., 2011). Os mapas dos lineamentos estruturais identificados pela imagem SRTM e Landsat 8-OLI são apresentados nas Figuras 1 e 2.

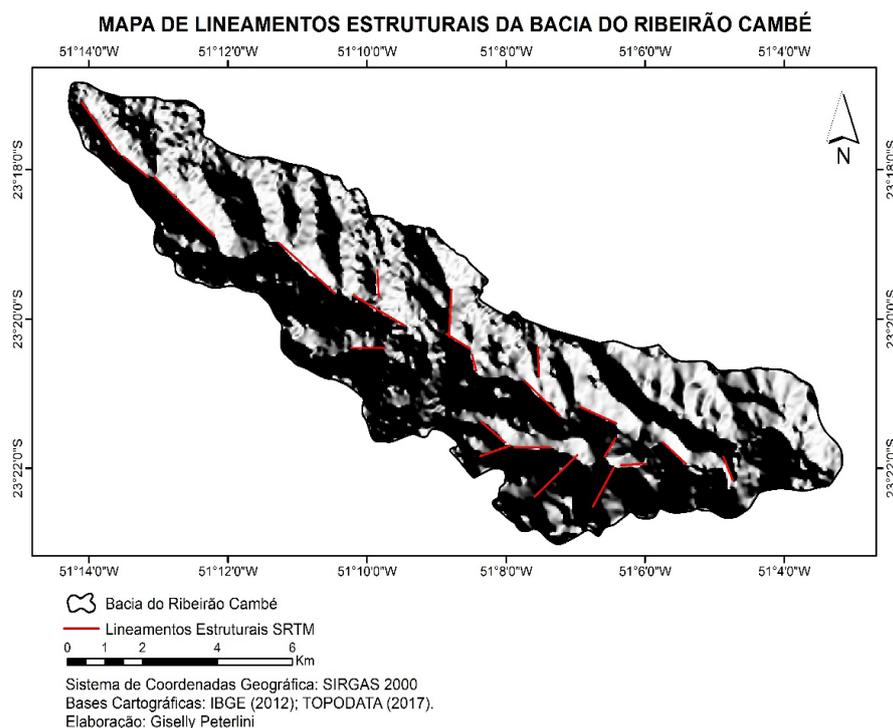


Figura 1. Mapa de Lineamentos Estruturais interpretados utilizando a imagem SRTM

Fonte: Autoria Própria (2017)

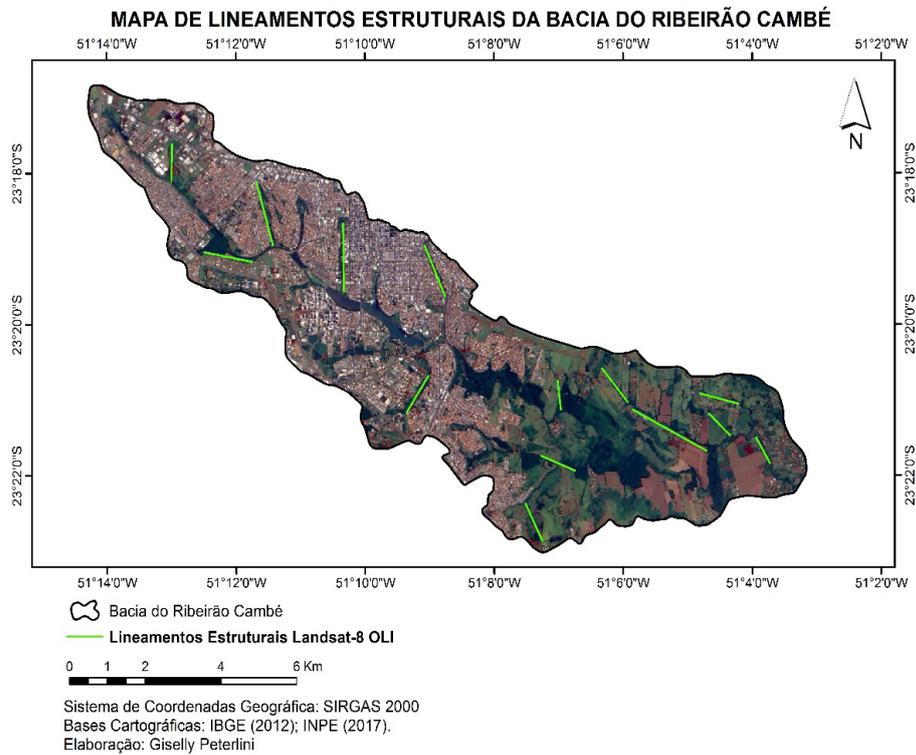


Figura 2 - Mapa de lineamentos estruturais interpretados utilizando a imagens do satélite Landsat-8 OLI

Fonte: Autoria Própria (2017)

Da tabela de dados dos poços tubulares obtida do SIAGAS apenas 87 poços puderam ser utilizados na análise. Obteve-se assim os valores de média, mediana e desvio padrão, apresentados na Tabela 1.

	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Capacidade Específica (m <sup>3</sup> /h/m)	Profundidade (m)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)
<b>Média</b>	9,44	0,76	150,54	49,44	83,45
<b>Mediana</b>	6,0	0,26	150	36,6	73
<b>Desvio Padrão</b>	11,28	1,44	53,10	36,77	40,75

Tabela 1. Estatística descritiva aplicada às variáveis dos poços tubulares cadastrados na bacia do Ribeirão Cambé.

Fonte: Autoria própria (2017)

Ao observar o alto valor do desvio padrão calculado constata-se que há grande variabilidade entre os dados. Abreu et al. (2016) e Lastoria et al. (2006) afirmam que isto ocorre devido à forte heterogeneidade e anisotropia características dos sistemas aquíferos fraturados e que, desta forma, os valores das medianas são mais representativos que os valores das médias.

Após observar os baixos valores das medianas de vazão e capacidade específica,

parâmetros que determinam a produtividade dos poços, foi realizada a análise de frequência relativa destes parâmetros. Assim como na vazão (que apresentou poços que variam de 1 m<sup>3</sup>/h a 56,5 m<sup>3</sup>/h), a distribuição de frequência de capacidade específica apresenta que um maior número de poços se concentram em intervalos de vazões e capacidades específicas menores (entre 1 a 7,17 m<sup>3</sup>/h para a vazão e 0,009 a 1,03 m<sup>3</sup>/h/m para a capacidade específica) e, conforme os valores destes parâmetros aumentam, o número de poços diminui, o que é semelhante aos resultados de Celligoi (1993), que identificou que 68,3% dos poços na região possuíam capacidades específicas menores que 1 m<sup>3</sup>/h/m.

Com relação à profundidade, a análise aponta que os valores de máximo e mínimo observados variam de 78,4 m a 304 m, em que maior parte dos poços cadastrados se encontram nos intervalos de 103,47 m a 153,60 m. A profundidade do NE dos poços estudados possui uma variação entre o mínimo e o máximo de 4,95 m a 152,13 m respectivamente, visto que maior parte dos poços (33,3%) possui o NE com profundidade entre 21,3 m e 37,66 m. Quanto ao ND, estes apresentam profundidades que se encontram entre 27 m e 220,06 m. A distribuição de frequência apresentou que maior parte dos poços, 29,89% (26 poços) possuem profundidades de ND entre 48,45 m e 69,9 m. Foi possível observar que o ND apresenta profundidades maiores que o NE e isso ocorre devido ao bombeamento pelo qual o poço está sendo submetido.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento dos lineamentos estruturais presentes na bacia do Ribeirão Cambé mostrou-se mais significativo ao utilizar as imagens SRTM com aplicação da técnica de relevo sombreado. Da análise estatística descritiva foi possível observar grande variabilidade nos resultados, o que pode ser explicado pela forte heterogeneidade e anisotropia do SASG. Por meio da estatística descritiva foi identificado que o SASG na situação atual apresenta poços, em sua maioria, com baixas vazões e capacidades específicas.

Por fim, constatou-se a importância que os estudos hidrogeológicos trazem à gestão de recursos hídricos em Londrina, visto que estes podem vir a contribuir para a exploração sustentável e eficiente do SASG. A diminuição dos impactos ambientais em locais que podem apresentar menores reservas de água subterrânea como reduções das descargas de base dos rios, o esgotamento de nascentes, bem como redução da pressão existente sobre os mananciais superficiais já explorados em Londrina, são mais algumas vantagens que podem ser citadas com os avanços dos estudos do SASG. Além disso os estudos podem trazer benefícios econômicos para o município, como a redução de custos com tratamentos de água e menores dispêndios financeiros em perfurações de poços.

## REFERÊNCIAS

ABREU, M. C.; CONICELLI, B. P.; PEÑARANDA, J. R. Avaliação da produtividade dos poços tubulares na sub-bacia do Juqueri-Cantareira/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIX., 2016, Campinas. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, 2016.

CELLIGOI, A. **Recursos hídricos subterrâneos da formação Serra Geral em Londrina – PR**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1993.

LASTORIA, G.; SINELLI, O.; KIANG, C. H.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A. C.; GASTMANS, D. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.1, p.139-150, 2006.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**, v. 87, p. 1463-1469, 1976.

RIBEIRO, D. D. M.; ROCHA, W. J. S. F.; GARCIA, A. J. V.; ARAÚJO, W. B. Técnicas de Sensoriamento Remoto com foco na identificação de lineamentos estruturais: aplicação na sub-bacia do rio Siriri, estado de Sergipe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. XV, 2011. Curitiba. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. Paraná: Curitiba, 2011.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. A importância do Sistema Aquífero Serra Geral para a cultura da soja no estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 49-56, 2006.

## MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DE UM INVERSOR FONTE DE TENSÃO PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

**Lucas Niquele Endrice**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campo Mourão – Paraná

**Jakson Paulo Bonaldo**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campo Mourão – Paraná

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento e simulação de um sistema de controle escalar de velocidade para motores de indução monofásicos. A técnica utilizada é conhecida como controle V/F. Para um melhor entendimento do projeto foi realizada uma revisão de literatura sobre modulação PWM, conversores CC/CA, e métodos de controle de velocidade e motores de indução. Para alcançar os objetivos do trabalho foi desenvolvido um inversor monofásico, para servir como fonte de tensão e frequência variáveis para o motor, seguido pela aplicação do método de controle de velocidade V/F através de controladores digitais. No trabalho são apresentados os resultados das simulações, para visualização e demonstração de sua validade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle escalar; Inversor monofásico; Modelagem de Conversores.

**ABSTRACT:** The current work presents the development and simulation of a scalar speed

control system for single-phase induction motor. The used technique is called V/F control. For a better understanding of the project, a literature review was made on PWM modulation, DC/AC converters, speed control methods and induction motors. To achieve the work goals, a single-phase inverter was developed and operated as a variable voltage and frequency power supply. The proposed method was applied for speed control of the induction motor based on the scalar V/F method using digital controllers. Simulation results are presented supporting the validity of the proposed work.

**KEYWORDS:** Modeling of power converters; Scalar control; Single-phase inverter.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os conversores CC-CA, também conhecidos como inversores, podem ser considerados um grupo recente de circuitos de chaveamento de potência. Os inversores CC-CA convertem uma tensão de entrada contínua em alternada, e sua estrutura básica é mostrada na Figura 1 (Luo, Ye, Rashid, 2005).

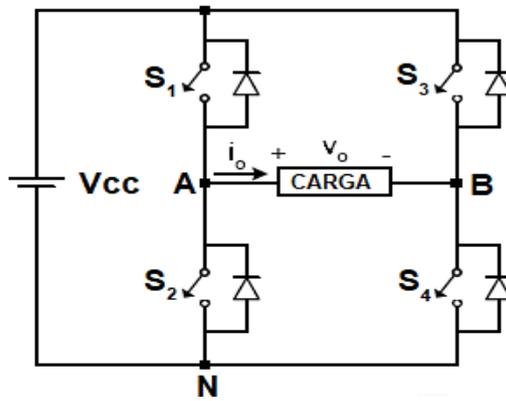


Figura 1 - Conversor CC-CA em ponte completa.

Fonte: Luo, Ye, Rashid (2005).

O princípio de operação do inversor consiste no acionamento das chaves S1, S2, S3 e S4. Sendo que as chaves S1 e S3 devem trabalhar de forma complementar às chaves S2 e S4, pois, se dois interruptores de um mesmo braço estiverem conduzindo num mesmo instante, a fonte de tensão,  $V_{cc}$ , será curto-circuitada. Quando S1 e S4 estiverem conduzindo a tensão  $V_{cc}$  é aplicada sobre a carga. Quando S2 e S3 conduzirem, será aplicada uma tensão  $-V_{cc}$  (Rashid, 1999).

Os inversores CC-CA são geralmente utilizados como (Luo, Ye, Rashid, 2005):

- Fonte de tensão/frequência variável para controle de velocidade de motores;
- Fonte de tensão CA constante;
- Filtros ativos de potência;
- Fontes ininterruptas de energia (*no-breaks*), entre outros.

Neste trabalho, o inversor de frequência será utilizado no controle de velocidade de um motor de indução monofásico. Estes motores são largamente utilizados em razão de sua construção simples, baixo custo de manutenção e baixo custo de aquisição se comparados a outros tipos de motores, como os de corrente contínua (Iorgulescu, 2016; Niu, et al, 2016).

Dessa forma, o controle de velocidade dos motores de indução inversores tem se tornado cada vez mais desejado pelas facilidades no processo de controle. Com o avanço das tecnologias da eletrônica de potência e das teorias de controle, surgiram uma variedade de estratégias de controle para uso geral ou para alta *performance*. Algumas estratégias representativas são: constante V/F, controle vetorial, controle de torque direto, controle inteligente, etc. Cada uma das técnicas possui suas vantagens e desvantagens, e a utilização de uma ou de outra técnica depende dos requisitos da aplicação (Guay Salmon, 2006; Hayakwong, Kinnares, Bunlaksananusorn, 2016; Niu, et al, 2016).

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de realizar o controle de forma digital, sabe-se que o modulador PWM digital gera um atraso em função da sua dinâmica de funcionamento, visto que a atualização do sinal modulante ocorre apenas no início de cada período ( $T_s$ ). Todavia este comportamento pode ser modelado como um efeito de atraso *sample and hold* (Buso, Mattavelli, 2006).

Segundo os mesmos autores, em uma aproximação por pequenos sinais é possível encontrar a função de transferência entre o sinal modulante,  $m(t)$ , e o sinal de controle,  $V_{MO}(t)$ . Aplicando a aproximação de Padé de primeira ordem obtém-se a equação (1).

$$PWM(s) = \frac{V_{MO}(s)}{M(s)} = \frac{e^{-sDT_s}}{c_{PK}} \approx \frac{1 - s \frac{T_s}{4}}{1 + s \frac{T_s}{4}} \quad (1)$$

Desta forma, o sinal PWM deve ser arranjado de maneira adequada para o correto chaveamento dos interruptores, e conseqüentemente obter o resultado esperado para frequência e amplitude da tensão de saída do conversor. Entretanto, o sinal obtido logo após as chaves, isto é, entre cada um dos braços do inversor, é modulado em alta frequência, sendo necessário a inserção de um filtro passa-baixas na saída do conversor para eliminar as harmônicas de alta frequência.

Portanto foi projetado um filtro passa-baixas de segunda ordem considerando a carga como uma resistência (R) e a ponte inversora como uma fonte de tensão variável ( $V_{INV}$ ). Dado que a frequência de chaveamento do inversor é de 13 kHz, a frequência de corte do filtro passa-baixas foi ajustada aproximadamente uma década abaixo, em 1,2 kHz. Os parâmetros do filtro são listados na Tabela 1.

Neste modelo foi considerada a resistência interna do indutor, mas não a do capacitor, pois é desprezível. Assim, utilizando o domínio de Laplace, pode-se definir a função de transferência do filtro como sendo a equação (2).

$$\frac{V_o(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{1}{CL} \frac{1}{s^2 + s \left( \frac{R_L}{L} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{CL} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)} \quad (2)$$

Os valores dos componentes utilizados para o desenvolvimento do trabalho são descritos na Tabela 1.

Descrição	Símbolo	Valor
Frequência de chaveamento	$f_s$	13 kHz

Tensão de entrada	$V_{cc}$	300 V
Ganho do transdutor de corrente	$K_{st}$	0,05 V/A
Ganho do transdutor de tensão	$K_{sv}$	0,0033 V/V
Indutância	L	1 mH
Capacitância	C	40 $\mu$ F
Resistencia interna do indutor	$R_L$	100 m $\Omega$
Carga	R	16 $\Omega$

Tabela 1 - Parâmetros do inversor

O método de controle de velocidade utilizado será o método de constante V/F. O princípio de funcionamento desse método consiste em aplicar uma frequência e uma tensão variáveis ao motor, porém mantendo constante a relação entre a tensão e a frequência. Desta forma é possível obter o máximo torque em uma faixa que vai de uma frequência mínima até a frequência nominal de operação do motor (Singh, et al, 2016).

Quando se deseja operar o motor com velocidades muito baixas, uma tensão com pequena amplitude e baixa frequência é aplicada ao motor. Entretanto, nesta condição o torque máximo disponível diminui, mesmo mantendo constante a relação V/F (Diyoke, Okeke, Aniagwu, 2016).

Isso acontece, pois, o fluxo do entreferro é reduzido em função das perdas na impedância do estator, enquanto o motor opera em baixas velocidades. Para compensar as perdas e para que se tenha um maior torque de partida, mantém-se uma tensão com uma amplitude mínima (Figura 2). Por isso, em baixas frequências a relação V/F é maior que a relação V/F nominal (Bose, 2002).

Em frequências maiores que a nominal o motor opera com velocidade maior que a nominal. Entretanto, o torque diminui, pois a amplitude da tensão é mantida constante ao passo que a frequência aumenta. Neste caso, tem-se uma redução da relação V/F, levando a uma redução do fluxo e conseqüentemente do torque máximo (Pomílio, 2016).

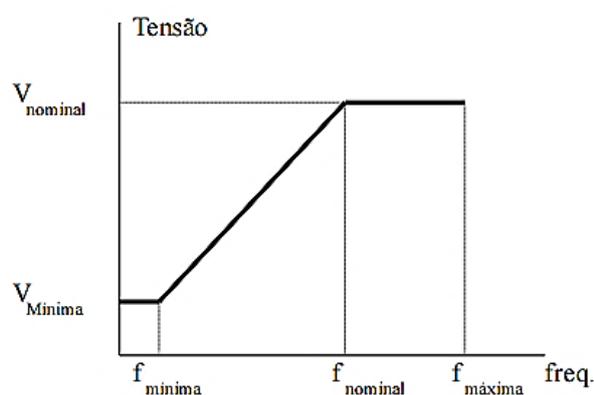


Figura 2 - Curva V/F típica para acionamentos de motores CA .

Fonte: Pomílio (2016).

### 3 | DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Modelagem da malha de controle de corrente

Primeiramente, é necessário definir a função de transferência da planta do sistema. Como a carga que estamos adotando está relacionada ao filtro de saída, a planta será a função de transferência do filtro passa-baixas.

A equação (2) representa a função de transferência do filtro passa-baixas, que expressa a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do filtro. A função de transferência da corrente do indutor é obtida conforme equação (3).

$$\frac{I_L(s)}{V_{INV}(s)} = \frac{s \frac{1}{L} + \frac{1}{CLR}}{s^2 + s \left( \frac{R_L}{L} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{CL} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)} \quad (3)$$

A Figura 3 mostra o diagrama de blocos da malha fechada do controle de corrente, onde todos os componentes estão representados por suas funções de transferência ou ganhos. Em particular, o bloco do controlador é representado por um controlador do tipo proporcional-integral, já que análises preliminares indicaram que somente o controlador proporcional não seria suficiente para atender os parâmetros do projeto, pois este não é capaz de corrigir o erro em regime estacionário do sistema (Buso, Mattavelli, 2006; Sikarwar, Barve, 2013).

Do diagrama de blocos da Figura 3 pode ser definida a função de transferência de malha aberta do sistema de controle da corrente, a qual é dada pela equação (4).

$$H_f(s) = \left( K_{PI} + \frac{K_I}{s} \right) \left( \frac{1 - s \frac{T_{sv}}{4}}{1 + s \frac{T_s}{4}} \right) V_{cc} \left( \frac{s \frac{1}{L} + \frac{1}{CLR}}{s^2 + s \left( \frac{R_L}{L} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{CL} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)} \right) K_{sr} \quad (4)$$

Os valores de  $K_{PI}$  e  $K_I$  do controlador PI são calculados utilizando as condições de ângulo e módulo sobre a função de transferência de malha aberta. Definindo então como a largura de banda do sistema de controle da corrente (Buso, Mattavelli, 2006).

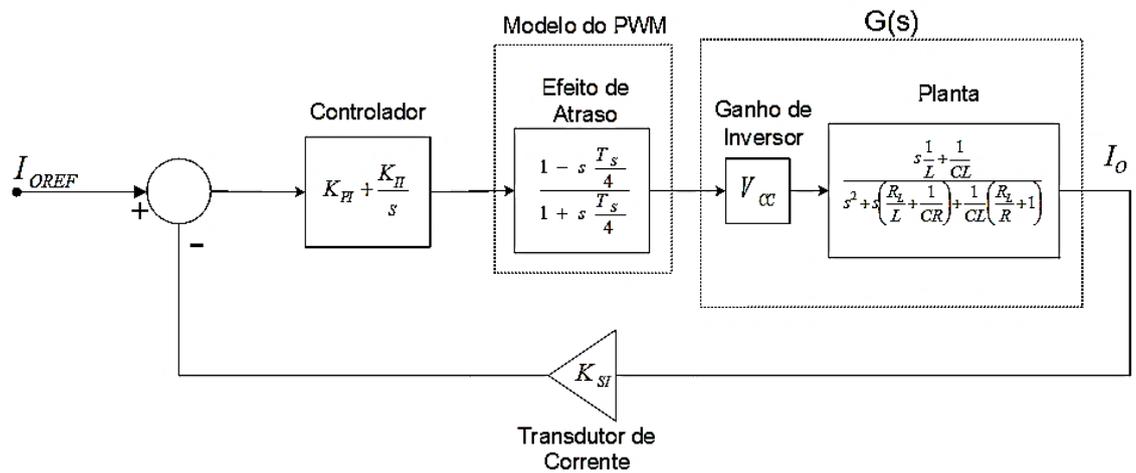


Figura 3 - Diagrama de bloco da malha de controle de corrente.

Fonte: Buso, Mattavelli (2006).

A função de transferência de malha aberta,  $H_I(j\omega_{CI})$ , é mostrada na equação (5).

$$H_I(j\omega_{CI}) = \frac{1 - j\omega_{CI} \frac{T_s}{4}}{1 + j\omega_{CI} \frac{T_s}{4}} V_{CC} \frac{j\omega_{CI} \frac{1}{L} + \frac{1}{CLR}}{(j\omega_{CI})^2 + j\omega_{CI} \left( \frac{R_L}{L} + \frac{1}{CR} \right) + \frac{1}{CL} \left( \frac{R_L}{R} + 1 \right)} K_{SI} \quad (5)$$

Para deslocar a frequência de corte do sistema para o valor desejado, isto é, para  $\omega_{CI}$ , o valor de  $K_{PI}$  é calculado de acordo com equação (6).

$$K_{PI} = \frac{1}{|H_I(j\omega_{CI})|} \approx 0.787 \quad (6)$$

Já para  $K_{II}$ , utiliza-se a condição de ângulo, impondo que a margem de fase do sistema seja igual a  $60^\circ$ , obtendo a equação (7).

$$K_{II} = \frac{K_{PI} I \omega_{CI}}{\tan((-180^\circ + 60^\circ) + 90^\circ - \phi\{H_I(j\omega_{CI})\})} \approx 402 \frac{rad}{s} \quad (7)$$

Pelo diagrama de Bode do sistema em malha aberta é possível verificar a margem de fase e a frequência de corte do sistema em malha fechada. O diagrama da Figura 4 foi traçado considerando diversos valores da carga para verificar a influência desta no comportamento do sistema. Conforme se observa, a margem de fase é de aproximadamente  $60^\circ$  (para  $R = 16 \Omega$ ).

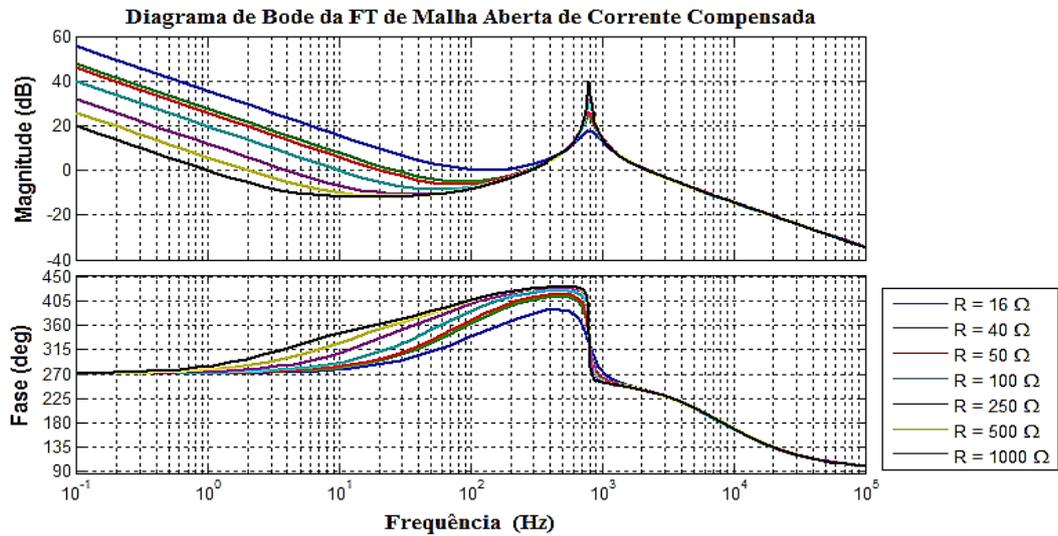


Figura 4 - Diagrama de Bode da malha de corrente variando R.

### 3.2 Modelagem da malha de controle de tensão

A malha de tensão é externa à malha de corrente. Portanto tendo esta definida, pode-se iniciar trabalho sobre a malha de controle de tensão. Desta forma, a malha fechada da corrente é tratada como um bloco do sistema de controle da tensão. O sistema completo com as duas malhas é apresentado no formato de diagrama de blocos na Figura 5.

A respectiva planta para a malha de tensão é a função de transferência da carga em paralelo com o capacitor do filtro, resultando na equação (8).

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)}(s) = \frac{R}{sCR} + 1 \quad (8)$$

Para o cálculo do controlador PI de tensão foi utilizado o mesmo método para a determinação do controlador de corrente, através das condições de ângulo e módulo da função de transferência em malha aberta do sistema de controle da tensão, com  $\omega_{CV} = 2\pi f_s/12$  como a largura de banda do sistema de controle da tensão.

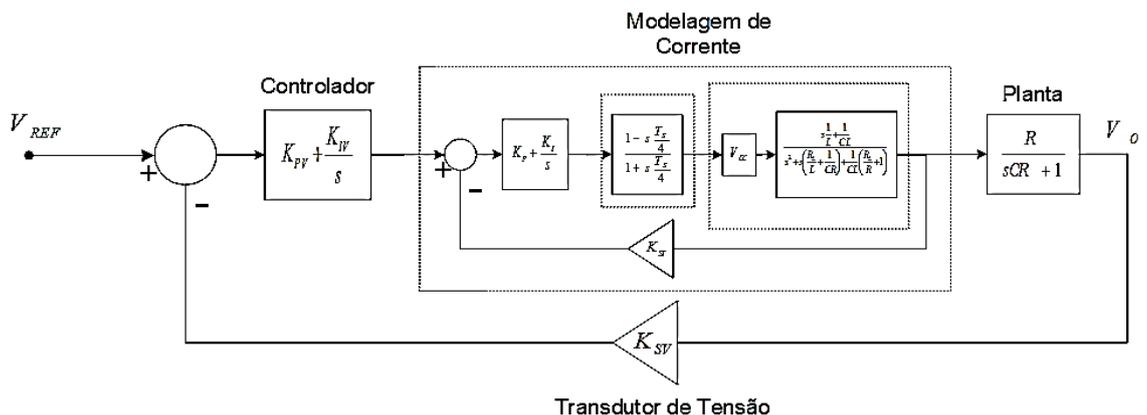


Figura 5 - Diagrama de bloco da malha de controle de tensão.

Fonte: Buso, Mattavelli (2006).

A função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão é descrita por:

$$H_V(s) = \left( K_{PV} + \frac{K_{IV}}{s} \right) H_{I\_MF} \left( \frac{R}{sRC+1} \right) K_{ST} \quad (9)$$

onde  $H_{I\_MF}$  é a função de transferência em malha fechada do sistema de controle de corrente.

Para deslocar a frequência de corte do sistema para  $\omega_{CV}$ , o valor de  $K_{PV}$  necessário é calculado conforme equação (10).

$$K_{PV} = \frac{1}{|H_V(j\omega_{CV})|} \approx 4,28 \quad (10)$$

O ganho integral,  $K_{IV}$ , é calculado usando a condição de ângulo, impondo que a fase do sistema na frequência  $\omega_{CV}$  seja igual a  $60^\circ$ , conforme equação (11).

$$K_{IV} = \frac{K_{PV}\omega_{CV}}{\tan((-180^\circ + 60^\circ) + 90^\circ - \phi\{H_V(j\omega_{CV})\})} \approx 14498 \frac{rad}{s} \quad (11)$$

É interessante analisar como o sistema de controle da tensão se comporta quando a carga varia. Para isso foram definidos diversos valores para a carga ( $R$ ) e traçado o respectivo diagrama de Bode, apresentado na Figura 6. Notam-se diferenças tanto no módulo quanto na fase do sistema. Entretanto, a margem de fase para  $R$  é de aproximadamente  $52^\circ$ , enquanto para os outros valores fica em torno de  $40^\circ$ . Portanto com pouca carga, isto é, com  $R$  muito alto, o sistema torna-se menos amortecido.

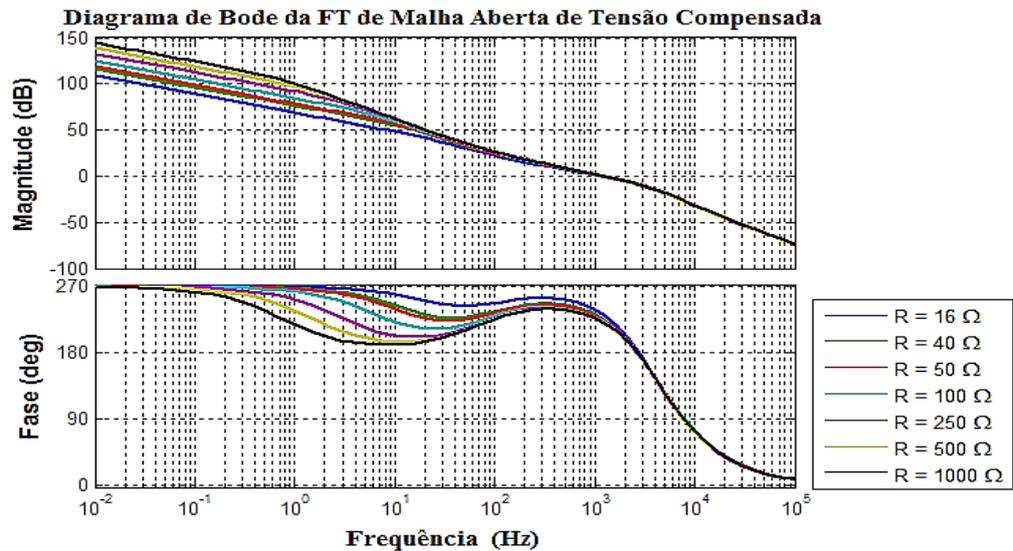


Figura 6 - Diagrama de Bode da malha de tensão variando R.

### 3.3 Simulação do conversor CC/CA

Após a modelagem e o projeto dos controladores, o circuito completo do inversor incluindo o modulador PWM e as malhas de realimentação é mostrado na Figura 7.

O diagrama esquemático consiste no circuito de um conversor CC-CA em ponte completa, com quatro MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e seus diodos em antiparalelo; o filtro de saída e a carga R; os transdutores de corrente e tensão usados para a realimentação; o modulador PWM com os comparadores, a onda triangular e a onda de referência.

Tendo em vista que o objetivo é realizar o controle de forma digital, e que suas implicações já foram consideradas na modelagem, os controladores PI são utilizados em suas versões digitais, programados em linguagem C e com frequência de amostragem igual à frequência de chaveamento do inversor ( $f_s$ ).

O princípio de funcionamento da ação integral necessita que o controlador tenha acesso ao valor anterior do integrador, pois a integral nada mais é que a soma e acúmulo dos valores que sua entrada assume. Desta forma, tem-se o circuito da Figura 7, onde os blocos S&H (*sample and hold*) representam os A/D's (conversores analógico-digital) responsáveis pela amostragem dos valores de tensão e corrente realimentado.

Dessa maneira, pode-se simular este circuito com controladores digitais e comparar sua resposta com a onda de referência para constatar o desempenho dinâmico do sistema controlado.

Para realizar a simulação foi gerado um sinal de referência com uma amplitude inicial de 100 V. Um degrau ocorre em 0,113 s elevando a amplitude para 180 V. Desta forma, na Figura 8 é visto que o sistema consegue seguir de forma satisfatória a referência, mostrando que os controladores estão adequados para este caso, com atraso e diferença de amplitude muito pequenos. Observa-se também que o

transitório é curto com o sistema entrando em regime logo após a aplicação do degrau.

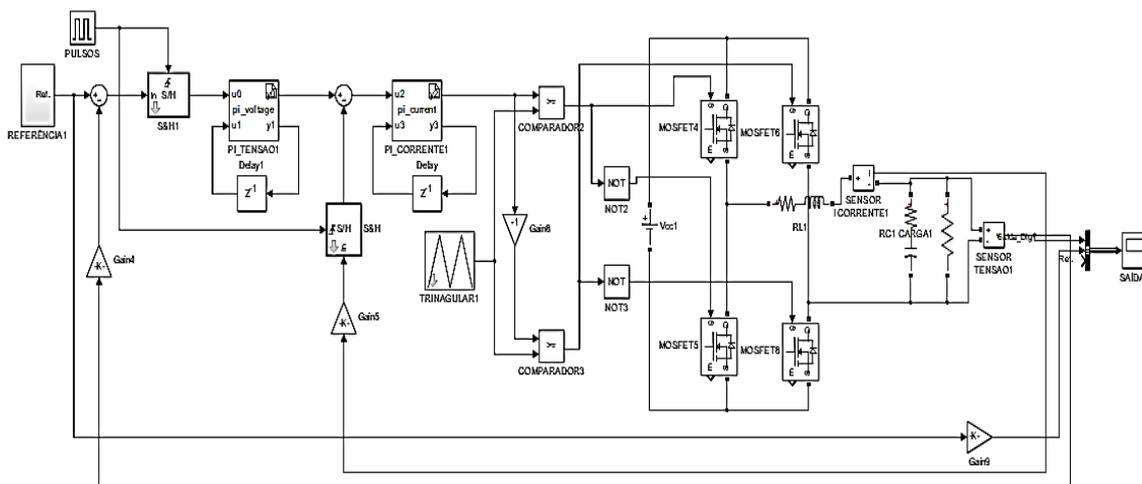


Figura 7 - Circuito com controlador digital.

Na Figura 8, mostra-se a comparação entre a onda de referência e a tensão de saída do inversor controlado de forma digital.

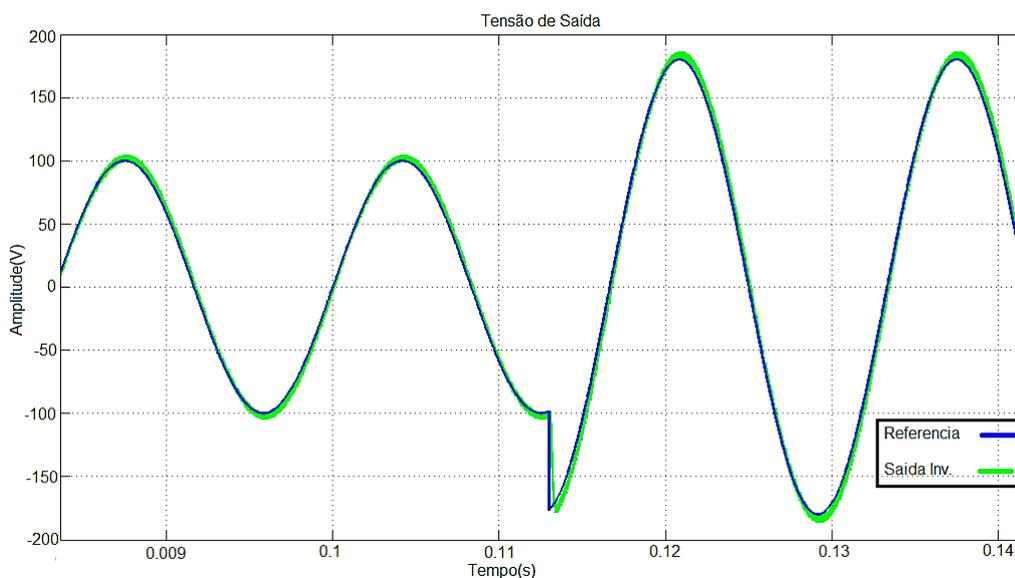


Figura 8 - Comparação da saída do inversor com a onda de referência.

### 3.4 Controle de velocidade do motor de indução

O controle V/F em malha aberta de motores de indução é o mais popular método de controle de velocidade devido a sua simplicidade. Tradicionalmente, motores de indução têm utilizado fonte de alimentação de 60 Hz, em malha aberta, para aplicações de velocidade constante. Para aplicações com velocidade ajustável, o controle da frequência é inevitável. Todavia, a tensão precisa se manter proporcional à frequência para que o fluxo ( $\Phi$ ) se mantenha constante. O diagrama de bloco que representa o método V/F é mostrado na Figura 9 (Bose, 2002).

A tensão  $V_s$  é diretamente gerada em função da frequência, pelo fator de ganho

G, assim o fluxo se mantém constante. À medida que a frequência diminui, a reatância de magnetização do motor diminui levando a um aumento da corrente do estator. Nesta condição a queda de tensão sobre a resistência do estator aumenta, aumentando as perdas de potência. Desta forma, ocorre o enfraquecimento do fluxo pelo entreferro. A tensão  $V_o$  (*boost voltage*) é adicionada para que o fluxo e o torque estejam disponíveis em velocidade baixa, e seu efeito é desprezível para as altas frequências (Bose, 2002).

Uma melhoria para o controle V/F em malha aberta é o controle por regulação de escorregamento em malha fechada, como mostrado na Figura 10.

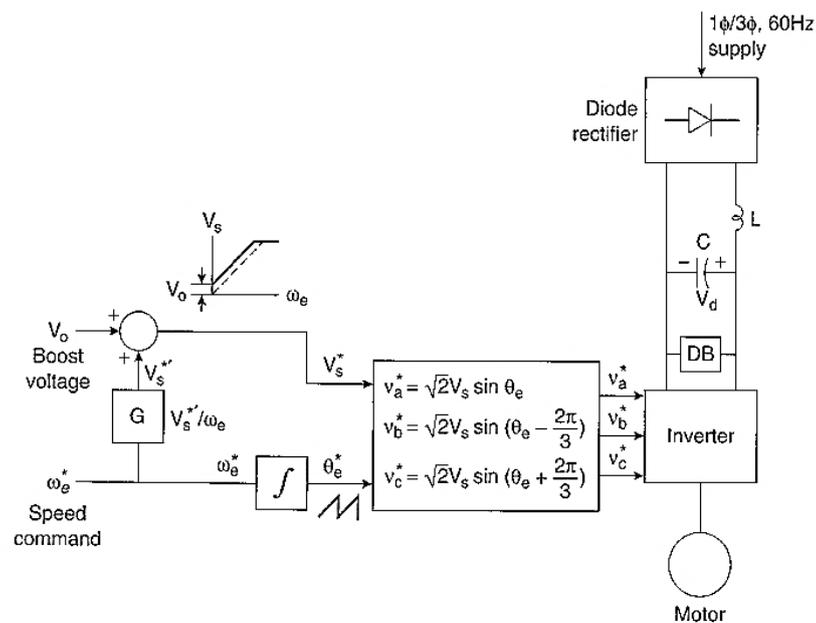


Figura 9 - Diagrama de bloco do método V/F em malha aberta trifásico.

Fonte: Bose (2002).

A velocidade instantânea do motor pode ser obtida através de um *encoder* de posição no eixo ou por um sensor de velocidade, que então é comparada com velocidade de referência gerando o sinal de erro é obtido. O sinal de erro de velocidade é processado pelo controlador de velocidade originando o sinal . Este sinal é somado à realimentação da velocidade para produzir a frequência de comando, que é utilizada, também, para gerar a referência de tensão do inversor através do bloco V/F (Bose, 2002; Singh, Kumar, Pattnaik, Reddy, 2016).

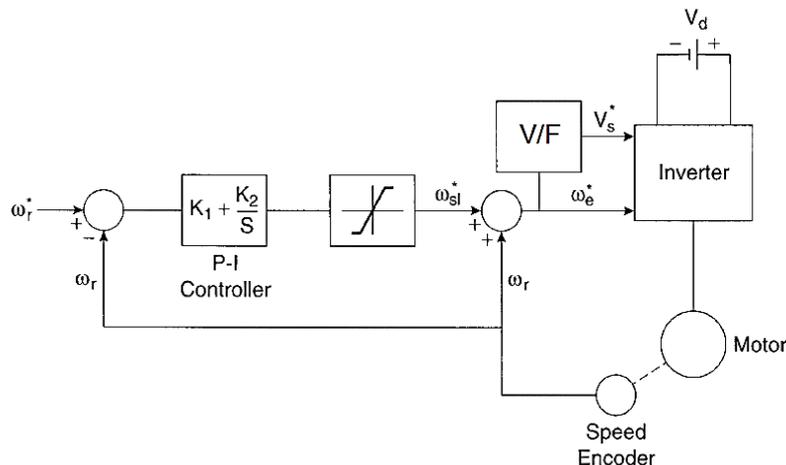


Figura 10 - Controle V/F em malha fechada.

Fonte: Buso, Mattavelli (2006).

Quando há um incremento no sinal de comando da velocidade, o motor acelera até estabilizar no valor de regime desejado. Quando há uma redução do sinal de comando, o motor entra em modo regenerativo ou de frenagem e desacelera até estabilizar novamente (Bose, 2002).

### 3.5 Implementação do controle de velocidade

Na simulação do funcionamento do controle de velocidade V/F é usado um motor de indução monofásico com capacitor de partida.

O modelo matemático do motor utilizado para as simulações já está presente no *software MATLAB* e as especificações, do mesmo, são apresentadas na Tabela 2.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	186,5 VA
Tensão nominal	127 Vrms
Frequência nominal	60 Hz
Resistência do enrolamento do estator ( $R_s$ )	2,02 $\Omega$
Indutância do enrolamento do estator ( $L_s$ )	7,4 mH
Resistência do enrolamento do rotor ( $R_r'$ )	4,12 $\Omega$
Indutância do enrolamento do rotor ( $L_r'$ )	5,6002 mH
Indutância mútua ( $L_{ms}$ )	0,17719 H
Resistência do enrolamento auxiliar ( $R_S$ )	7,14 $\Omega$
Indutância do enrolamento auxiliar ( $L_S$ )	8,5001 mH
Inércia	0,0146 J(kg.m <sup>2</sup> )
Fator de atrito	0 F(N.m.s)
Par de polos	2
Resistência do capacitor de partida ( $R_{st}$ )	2 $\Omega$
Capacitância do capacitor de partida ( $C_s$ )	254,7 $\mu F$
Velocidade de desconexão do capacitor (em relação a velocidade síncrona)	75%

Tabela 2 - Especificações do motor de indução monofásico

Para realizar o controle de velocidade será utilizado um controlador PI digital, para reduzir erros de regime permanente e melhorar a resposta geral do sistema (Bose, 2002).

A implementação do circuito segue o conceito de controle escalar apresentado na Figura 10. O circuito completo para controle de motor de velocidade através de um inversor é apresentado na Figura 11. O sistema é formado basicamente pelos seis blocos que foram destacados na Figura 11, facilitando o entendimento do funcionamento do processo.

O primeiro bloco, chamado de bloco 1 na Figura 11, é responsável por gerar as rampas que aumentam ou reduzem a referência de velocidade do motor. As rampas podem ser crescentes (aumentar velocidade) ou decrescentes (reduzir velocidade). O componente de ganho denominado  $RPM2w$ , converte a referência de velocidade para rad/s.

Na Figura 12 podem ser visualizadas as rampas geradas. Para a aceleração, a velocidade foi de 0 a 3600 RPM, incrementando 600 RPM em cada transição após atingir o valor inicial de 1800 RPM (1800-2400-3000-3600), com duração de 1 s cada. Já na desaceleração a velocidade reduziu de 3000 a 0 RPM, sendo decrementadas 600 RPM, em 1 s, para cada transição intermediária (3000-2400-1800). Assim, inicialmente o motor é acelerado até 3000 RPM para que possa realizar a redução de sua velocidade, e por fim parte de 1800 RPM até sua completa paralização, em 0 RPM.

O bloco 2 da Figura 11, representa o circuito de realimentação e o controlador de velocidade. O primeiro bloco somador realiza a subtração do sinal da rampa e o sinal de velocidade do motor. Essa diferença entra no bloco do controlador PI para ser processada.

O segundo somador tem como objetivo adicionar ao sinal de saída do controlador o valor da velocidade do motor. Assim tem-se o valor de velocidade compensada que será utilizada para o cálculo de tensão e para definição da frequência do sinal de referência do inversor.

O bloco 3 da Figura 11 é responsável por definir o valor da tensão de pico de saída do inversor, a partir da velocidade do motor. Uma constante de tensão é somada para que se tenha fluxo já em velocidades baixas, e em frequências mais altas essa constante se torna desprezível. O componente de saturação garante que o valor de tensão não ultrapassará o valor máximo (Bose, 2002).

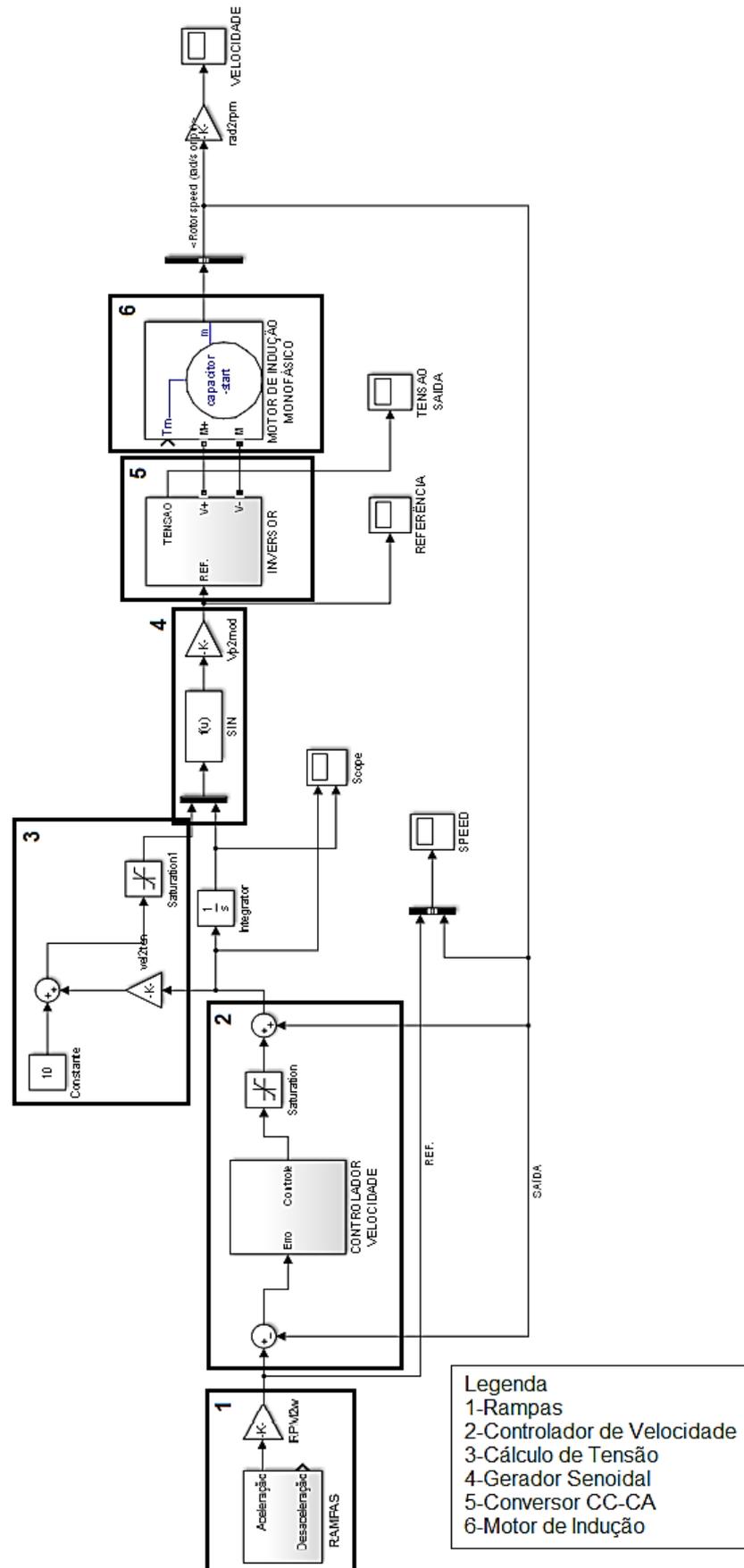


Figura 11 - Circuito completo de controle.

Na Figura 12, mostra-se as ondas de referência de velocidade/frequência para os movimentos de aceleração e desaceleração do motor.

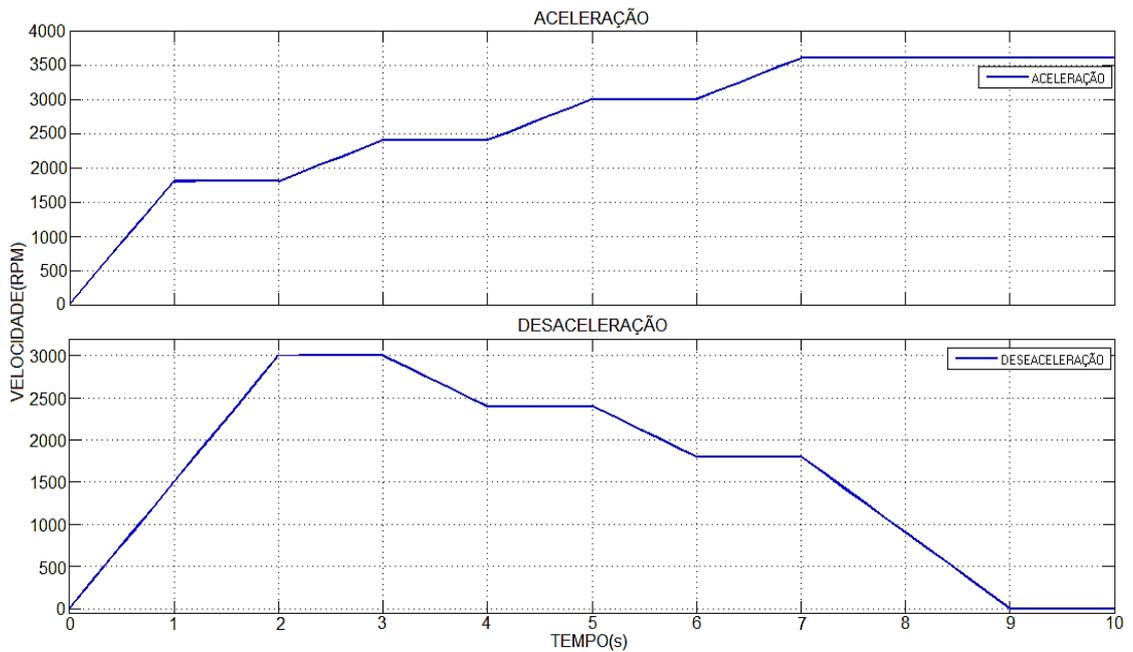


Figura 12 - Rampas de frequência.

O bloco 4 tem como função converter os valores de tensão de pico ( $\hat{v}$ ) e de velocidade compensado (em radianos) para uma referência senoidal, a qual deve ser sintetizada pelo inversor. Este bloco produz um sinal com a amplitude de pico-a-pico da tensão desejada na saída do inversor. Por isso é preciso multiplicar essa senoide por uma constante que ajuste este sinal em uma faixa entre -1 V e 1 V. O valor de pico desta senoide de referência corresponde ao índice de modulação do inversor.

Em seguida, o bloco, representa o inversor apresentado anteriormente na Figura 7, que foi suprimido para melhorar a visualização, com duas modificações: a retirada do bloco de referência e a carga R é retirada para a ligação do motor.

Finalmente tem-se o bloco 6, representando o motor de indução. Onde M+ e M, são os pinos de alimentação de tensão; pode ser usado para simular uma carga; e m é o pino onde são feitas as medições dos parâmetros do motor.

O restante dos componentes é utilizado para geração e visualização dos gráficos ou ganhos para transformar os valores em escala adequada para utilização no circuito e facilitar comparação visual.

O sistema mostrado na Figura 11 pode então ser simulado para verificar a eficácia do controle da velocidade do motor de indução.

Na Figura 13 tem-se o resultado da simulação de aceleração do motor. Pode-se perceber uma variação durante a primeira rampa e um *overshoot* de aproximadamente 8% ao atingir o primeiro patamar. A partir da segunda rampa o sistema possui um comportamento bem mais suave e consegue compensar erros que o sistema pudesse ter em regime permanente.

Já o *overshoot* na primeira rampa, entre 0s e 1s, se deve a ação do controlador PI de velocidade. Pois enquanto a velocidade do motor for menor que a velocidade de

referência, este acumula o valor de erro pela ação integral. Quando a velocidade do motor ultrapassa a de referência, o controlador começa a subtrair do valor acumulado até que consegue estabilizar.

Da mesma maneira que foi realizada a simulação para a rampa de aceleração, a seguir serão apresentados os resultados para a rampa de desaceleração do motor. Para isso, inicialmente a velocidade foi ajustada em 3000 RPM para que o motor obtivesse uma velocidade inicial, para em seguida iniciar o processo de desaceleração.

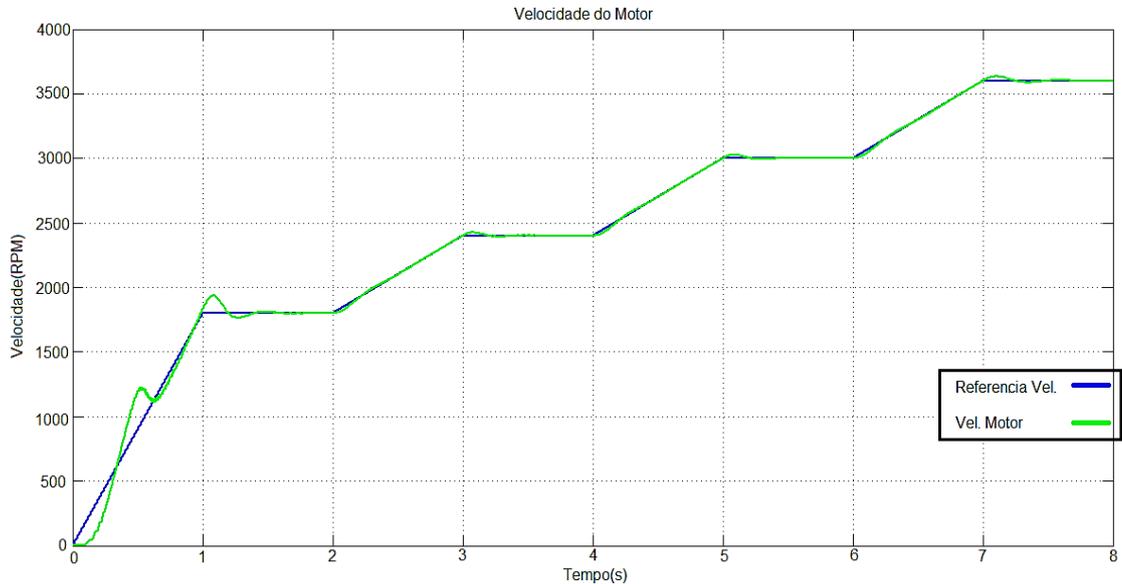


Figura 13 - Resposta de aceleração.

Em seguida apresenta-se, na Figura 14, a resposta de desaceleração do motor de indução comparado com o sinal de referência de velocidade. Da mesma forma que na aceleração, uma vez que o sistema se estabilizou em um patamar, as próximas transições são suaves e com *overshoot* pequenos e de rápida recuperação.

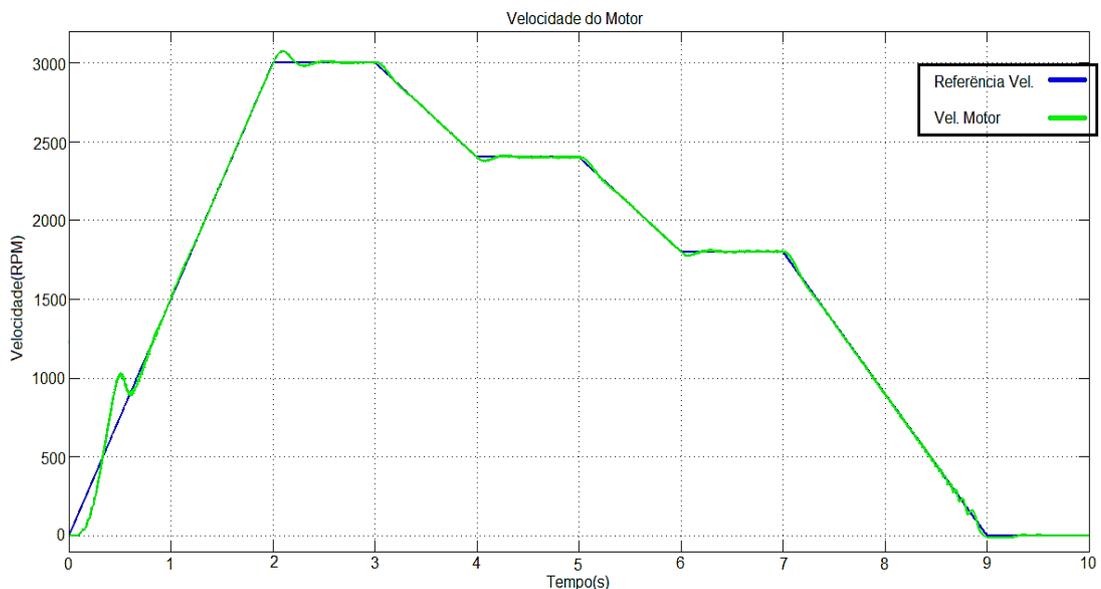


Figura 14 - Resposta do motor em desaceleração.

## 4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a modelagem de um inversor fonte de tensão controlado em tensão e a sua aplicação para o controle de velocidade de motores monofásicos assíncronos com capacitor de partida, utilizando a técnica de controle escalar V/F, com introduções teóricas sobre os mesmos e seu princípio de funcionamento.

Inicialmente foram apresentadas as modelagens das malhas de corrente e tensão, respectivamente, incluindo o projeto dos controladores de cada um. Através das simulações e dos diagramas de Bode pode-se concluir que o projeto estava adequado para os parâmetros esperados de resposta. Também foi realizada a simulação do circuito no *software* que apresentasse todas as ferramentas necessárias para a implementação do circuito.

E em seguida tem-se o desenvolvimento da técnica de controle escalar V/F, baseado na literatura utilizada. Pode ser visto o circuito implementado para realizar o controle de velocidade, além das simulações do circuito para aumento e redução de velocidade.

Dessa forma, tem-se que o projeto teve o resultado esperado, apresentando um *overshoot* inferior a 10%, além de responder de forma rápida e eliminar os erros de regime permanente do sistema, mostrando um funcionamento satisfatório do projeto desenvolvido no trabalho.

## REFERÊNCIAS

BOSE, B. K. **Modern power electronics an AC drives**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

BUSO, S.; MATTAVELLI, P. **Digital Control in Power Eletronics**. Lincoln: Lectures in power electronics, 2006.

DIYOKE, G. C.; OKEKE, C.; ANIAGWU, U. **Different Methods od Speed Control of Thre-Phase Asynchronous Motor**. American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 4, 2016. 62-68. Disponível em: <<http://pubs.sciepub.com/ajeee/4/2/3>>. Acesso em: 25 Maio 2017.

GUAY, L.; SALMON, J. **DSP Speed Control of Single-Phase Induction Motor Using C Programming**. 2006 IEEE International Symposium on Industril Electronics. Montreal: [s.n.]. 2006. p. 246-251.

HAYAKWONG, E.; KINNARES, V.; BUNLAKSANANUSORN, C. **Two-Phase Induction Motor Drive Impovement for PV Water Pumping System**. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba: [s.n.]. 2016. p. 1-6.

IORGULESCU, M. **Study of single phase induction motor with aluminium versus copper stator winding**. 2016 International Conference on Applied and Theoretical Eletrecity. Craiova: [s.n.]. 2016. p. 1-5.

LUO, F. L.; YE, H.; RASHID, M. **Digital Power Eletronics and Applications**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005.

NIU, M.-Z. et al. **A new speed control method of induction motor**. 2016 35th Chinese Control

Conference. Chengdu: [s.n.]. 2016. p. 10140-10143.

POMÍLIO, J. A. **Conversores para Acionamentos de Máquinas Elétricas**. UNICAMP. [S.I.]. 2016.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.

SIKARWAR, S.; BARVE, A. **Discrete PI and PID Controller Based Three Phase Induction Motor Drive: A Review**. International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Bhopal, Novembro 2013.

SINGH, A. K. et al. **Speed control of 3-phase Induction motor fed through direct matrix converter using GSPWM technique with unity input power factor**. 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems. Bhopal: [s.n.]. 2016. p. 420-425.

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DE LEITE EM PÓ INTEGRAL: ÊNFASE NA ETAPA DE SECAGEM POR *SPRAY DRYING*

**Gustavo Storte Tonin**

Instituição Federal Sul-Rio-Grandense – Campus Pelotas

Pelotas – Rio Grande do Sul

**Régis da Silva Pereira**

Instituição Federal Sul-Rio-Grandense – Campus Pelotas

Pelotas – Rio Grande do Sul

**RESUMO:** O leite em pó integral atualmente, no Brasil, merece destaque no mercado nacional e internacional devido a sua durabilidade e facilidade de armazenamento, além de suas características nutritivas. A fim de se obter um produto com a qualidade desejada, se faz necessário a compreensão de como e quais variáveis operacionais influenciam na produção do mesmo. Assim, este trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação do processo produtivo de leite em pó integral durante a etapa de secagem por “spray drying” no software “EMSO”. Foram avaliados 3 cenários distintos para as variáveis mais relevantes ao processo: composição e diâmetro inicial da partícula e temperatura do ar de secagem. O fator que alterou de forma mais expressiva as características finais foi o diâmetro inicial da partícula gerada no secador, podendo reduzir o tempo de processamento em até quatro vezes. Além disso, pode permitir a obtenção do

produto com os padrões de qualidade exigidos em legislação sem necessidade de processos complementares. As demais variáveis analisadas, ou possuem pouca influência no processo, não permitindo atingir a qualidade exigida sem a necessidade de uma secagem secundária ou, ainda, levam a condições de degradação do produto.

**PALAVRAS-CHAVE:** (Leite em Pó Integral, Spray drying, Modelagem, Simulação).

**ABSTRACT:** Currently in Brazil, whole milk powder deserves some spotlight in the national and international market due to its durability and easy storage, other than its nutritious characteristics. To achieve a product with the desired quality, it is necessary to comprehend how and which operational variables affect the production. With that in mind, this work has the objective to model and simulate the production process of whole milk powder during the drying process by “spray drying” in the software “EMSO”. Three distinct scenarios were analyzed for the most relevant variables to the process: initial composition and diameter of the particle and temperature of the drying air. The factor that most distinctively influenced the final characteristics was the initial diameter of the particle generated by the dryer, able to reduce the processing time up till 4 times. Besides, it can allow to obtain the necessary quality

demanded on the product by law without needing any extra processing. The other variables analyzed didn't cause much influence on the process, by not allowing the product to achieve the desired quality without a secondary drying stage or, still, led to conditions in which the degradation of the product occurred.

**KEYWORDS:** (Whole Milk Powder, Spray drying, Modelling, Simulation,)

## 1 | INTRODUÇÃO

O leite e seus produtos derivados merecem destaque por constituir um grupo de alimentos de grande valor nutricional (MUNIZ et al., 2013). O leite é constituído basicamente por água, lactose, gordura, proteínas e sais minerais, além de ser rico em vitaminas A, B e D (INMETRO, 1998). Porém, o consumo deste grupo de alimentos lácteos é associado, principalmente, como meio para que se atinja a ingestão diária necessária de cálcio para a nutrição humana (FAO, 2013), fundamental para a formação e manutenção da estrutura óssea do organismo (MUNIZ et al., 2013).

O Brasil se destaca como produtor leiteiro mundial com uma produção nacional total de leite sob inspeção de 95.950.025 m<sup>3</sup> nos anos de 2014 a 2017, com uma média anual de produção de 23.987.506 m<sup>3</sup> (IBGE, 2018). Representando em média dos anos de 2014 a 2016 uma fração de 3,6% da produção mundial de leite de vaca, se situando como 4º produtor mundial em 2016 (IBGE, 2018; FAO apud EMBRAPA, 2018). Em 2017, o valor bruto estimado do agronegócio foi de R\$ 539,4 bilhões, dos quais a cadeia produtiva de leite aparece com valor estimado de 12,9% do valor total (CEPEA, 2017). Enquanto que a exportação de lácteos no ano de 2016 somou US\$ 167,9 milhões (ZOCCAL, 2017).

Além de leite fluido, o país se sobressai na produção de derivados lácteos como manteiga, doce de leite, iogurte e bebidas fermentadas, requeijão cremoso, e é reconhecido no cenário mundial principalmente na produção de queijo e leite em pó (FIEMG e FEAM, 2015).

O leite em pó apresentou valor crescente em exportação desde o ano de 2013 a 2015 atingindo um pico de US\$ 236.763,4 em 2015 e decresceu cerca de 63,8% de 2015 a 2016. (SECEX apud EMBRAPA, 2018). Esta queda nos valores de exportação são explicados devido ao cenário econômico brasileiro e devido ao principal país importador de leite em pó do Brasil ser a Venezuela, que vivenciou uma forte crise econômica e política (ZOCCAL, 2017). Porém, apesar da queda nas exportações, o mercado asiático apresentou um aumento na demanda do leite em pó integral para as indústrias de alimentos (SINDILAT, 2018).

O processo de secagem do leite apresenta vantagens do ponto de vista de processamento aumentando a vida útil do produto, facilitando o transporte e comercialização do mesmo pelo fato do pó obtido ser leve, compacto e manter suas qualidades inalteradas por longos períodos. Além dos custos com armazenagem serem

reduzidos (CELESTINO, 2010). O processo de secagem, o qual pode ser realizado em mais de uma etapa com secagem secundária adicional, usualmente é realizado por atomização (“*spray drying*”) pois esta operação possui a vantagem de minimizar o dano térmico ao produto (TETRPAK, 1995; PEARCE, 2002; SCHUCK, 2009).

Entre os fatores essenciais para obtenção de um leite em pó que atenda os padrões de fabricação, destacam-se: (1) a composição do concentrado que antecede a etapa de secagem; (2) a umidade da partícula durante a secagem primária; (3) a temperatura que a gota atomizada atinge enquanto está no processamento.

As características do produto final serão afetadas diretamente por estes fatores como, por exemplo, a solubilidade que será prejudicada caso o processo utilize temperaturas elevadas que favoreçam a formação de insolúveis (desnaturação das proteínas do leite) ou o pó possua ao término um alto teor de umidade, o que pode provocar agregação das partículas (PISECKY, 2012; ROGERS et al., 2012). Já algumas propriedades organolépticas como cheiro, cor e gosto são consequências da composição do concentrado e do produto final, assim como da temperatura de secagem.

Desta forma, este trabalho tem o objetivo de avaliar a influência destes fatores durante a etapa de secagem por *spray drying* do processo de produção de leite em pó integral, utilizando a modelagem matemática e a simulação computacional.

## 2 | REVISÃO TEÓRICA DO MODELO MATEMÁTICO DE SECAGEM

### 2.1 PERFIL DE UMIDADE

Uma abordagem foi inicialmente proposta por CHEN e XIE (1997) com o objetivo de criar um modelo geral que pudesse ser utilizado para diferentes processos de secagem por “*spray drying*” de produtos alimentícios e dessa forma estes fossem classificados e seus comportamentos modelados. Este vem sendo utilizado com boa aproximação de processos reais (LIN e CHEN, 2006; CHEN, 2008; PATEL et al., 2010; ROGERS et al., 2012; CHAVES, 2016). Conforme CHEN e LIN (2005), quando a partícula gerada pelo atomizador está sendo processada, a taxa de secagem pode ser expressa de acordo com a equação 2.11:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -h_m A (\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \quad (2.1-1)$$

Sendo “ $m_s$ ” a massa de sólidos em uma partícula/gota ( $kg$ ), “ $h_m$ ” o coeficiente de transferência de massa externo a partícula ( $m \cdot s^{-1}$ ), “ $\rho_{v,b}$ ” a concentração de vapor de água (umidade) no ar de secagem ( $kg \cdot m^{-3}$ ), “ $\rho_{v,s}$ ” a concentração de vapor na superfície da partícula ( $kg \cdot m^{-3}$ ), “ $A$ ” a área superficial da partícula ( $m^2$ ), “ $X$ ” a umidade média da partícula calculada em base seca ou seja, teor de umidade em relação ao

conteúdo sólido ( $kg.kg^{-1}$ ) e “” o tempo de secagem (s).

De acordo com CHEN e XIE (1997), a concentração de vapor de água na superfície da partícula ( $\rho_{v,s}$ ) é uma relação com a concentração de saturação na superfície da mesma ( $\rho_{v,sat}$ ) através da equação 2.12:

$$\rho_{v,s} = \exp\left(-\frac{\Delta E_v}{RT_d}\right) \rho_{v,sat}(T_d) \quad (2.1-2)$$

Sendo “ $\Delta E_v$ ” a energia de ativação aparente de evaporação para água ( $J.mol^{-1}$ ), “ $R$ ” a constante universal dos gases ( $8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ), “ $T_d$ ” a temperatura na superfície da partícula ( $K$ ) que é considerada constante em toda a mesma e “ $\rho_{v,sat}(T_d)$ ” a concentração de saturação da água na superfície da partícula em função da temperatura da mesma ( $kg.m^{-3}$ ).

De acordo com LIN e CHEN (2006), a correlação entre “ $\rho_{v,sat}$ ” ( $kg.m^{-3}$ ) e “ $T_d$ ” ( $K$ ) pode ser expressa através da equação 2.13:

$$\begin{aligned} \rho_{v,sat}(T_d) = & 4,844.10^{-9}(T_d - 273)^4 - 1,4807.10^{-7}(T_d - 273)^3 \\ & + 2,6572.10^{-5}(T_d - 273)^2 - 4,8613.10^{-5}(T_d - 273) \\ & + 8,3420.10^{-3} \end{aligned} \quad (2.1-3)$$

A equação 2.14 foi levantada através da correlação experimental obtida entre “ $\Delta E_v$ ” e “ $X$ ” para leite integral (CHEN e LIN, 2005):

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{v,e}} = 0.957 \exp[-1.291(X - X_e)^{0.934}] \quad (2.1-4)$$

Sendo “ $\Delta E_{v,e}$ ” a energia de ativação aparente de equilíbrio ( $J.mol^{-1}$ ) que pode ser calculada através da equação 2.15 (CHEN e LIN, 2005), utilizando as condições do ar de secagem, como a temperatura ( $T$  em  $K$ ), umidade relativa ( $a_w$  em  $kg.kg^{-1}$ ) e umidade de saturação ( $a_{sat}$  em  $kg.kg^{-1}$ ), sendo ambas no ar de secagem e “ $X_e$ ” a umidade de equilíbrio calculada através de isotermas de dessorção do leite utilizando o modelo GAB (Guggen-heim-Anderson-de Boer) através da equação 2.16 (LIN et al., 2005):

$$\Delta E_{v,e} = -RT \ln\left(\frac{a_w}{a_{sat}}\right) \quad (2.1-5)$$

$$X_e = \frac{Ckm_0a_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (2.1-6)$$

Sendo “ $m_0$ ” é a umidade absoluta da monocamada (com valor de  $0,04277 kg.kg^{-1}$  para leite em pó integral) e “ $a_w$ ” a umidade relativa no ar de secagem. “ $C$ ” e “ $k$ ” são funções da temperatura do ar da câmara de secagem, que podem ser determinadas

através das equações 2.17 e 2.18 (LIN et al., 2005):

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_1}{RT}\right) \quad (2.1-7)$$

$$k = k_0 \exp\left(\frac{\Delta H_2}{RT}\right) \quad (2.1-8)$$

Conforme LIN et al. (2005), para leite em pó integral foram determinados estatisticamente  $C_0 = 0,1925$  e  $\Delta H_1 = 10,485 \text{ J/mol}$ , assim como  $k_0 = 2,960$  e  $\Delta H_2 = -3215 \text{ J/mol}$ .

## 2.2 PERFIL DE TEMPERATURA

No modelo que representa o balanço energético, a fim de se calcular a temperatura da partícula ( $T_d$ ), considera-se que esta seja constante em todo seu volume (CHEN e LIN, 2005). Também considera-se neste modelo que a relação entre a alimentação do ar de secagem e a entrada de matéria-prima seja cerca de 1000:1 ( $\text{kg.s}^{-1}/\text{kg.s}^{-1}$ ), garantindo, desta forma, que a diminuição de temperatura e aumento de umidade no ar devido a secagem das partículas se torne desprezível. Assim, a temperatura " $T_d$ " pode ser determinada através da equação 2.21 (ROGERS et al., 2011):

$$mC_{p,d} \frac{dT_d}{dt} = hA(T - T_d) + \Delta H_l m_s \frac{dX}{dt} \quad (2.2-1)$$

Sendo " $m$ " a massa da partícula (kg), " $C_{p,d}$ " a capacidade calorífica específica da gota ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), " $T$ " a temperatura do ar de secagem (K), " $h$ " o coeficiente de transferência de calor ( $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ), " $A$ " a área superficial da partícula ( $\text{m}^2$ ) e " $\Delta H_l$ " o calor latente de vaporização da água ( $\text{J.kg}^{-1}$ ).

Conforme LIN e CHEN (2002), a fim de se determinar os coeficientes de transferência de massa ( $h_m$ ) e de transferência de calor ( $h$ ), foram obtidas correlações matemáticas demonstradas pelas equações 2.22 e 2.23:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 2,04 + 0,62Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (2.2-2)$$

$$Sh = \frac{h_m D}{\zeta_{v,a}} = 1,63 + 0,54Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (2.2-3)$$

Sendo " $\zeta_{v,a}$ " a difusividade do vapor de água no ar ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ), " $D$ " o diâmetro da gota ( $m$ ), " $k$ " a condutividade térmica do ar ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), " $h$ " coeficiente de transferência de calor, " $Nu$ " o número de Nusselt, " $Sh$ " o número de Sherwood, " $Re$ " o número de Reynolds, " $Pr$ " o número de Prandtl e " $Sc$ " o número de Schmidt.

De acordo com ÇENGEL (2012), o cálculo dos números adimensionais de

Schmidt ( $Sc$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Prandtl ( $Pr$ ) podem ser feitos através das equações 2.24, 2.25 e 2.26 respectivamente, utilizando as condições do ar de secagem e o diâmetro da partícula:

$$Sc = \frac{\nu}{\zeta_{v,a}} \quad (2.2-4)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.2-5)$$

$$Pr = \frac{C_{p,ar}\mu}{k} \quad (2.2-6)$$

Sendo então " $\nu$ " a viscosidade cinemática do ar de secagem ( $m^2.s^{-1}$ ), " $V$ " a velocidade de escoamento do ar de secagem ( $m.s^{-1}$ ), " $D$ " o diâmetro da partícula ( $m$ ), " $C_{p,ar}$ " a capacidade calorífica do ar de secagem ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) e " $\mu$ " a viscosidade dinâmica do ar ( $Pa.s$ ).

## 2.3 DIÂMETRO DA PARTÍCULA

Pode-se observar que as equações 2.11, 2.21, 2.22, 2.23 e 2.26 dependem do diâmetro da partícula (" $D$ ") que varia conforme a redução da umidade, esta relação é proposta por ROGERS et al. (2011) e é representada pela equação 2.31.

$$\frac{D}{D_0} = b + \frac{(1-b)X}{X_0} \quad (2.3-1)$$

Sendo " $D$ " o diâmetro da partícula esférica no instante atual ( $m$ ), " $D_0$ " o diâmetro de partícula inicial na saída do atomizador ( $m$ ), " $X_0$ " a umidade inicial da partícula calculada em base seca ( $kg.kg^{-1}$ ), " $X$ " a umidade instantânea da partícula em base seca ( $kg.kg^{-1}$ ) e " $b$ " um valor constante determinado experimentalmente.

De acordo com LIN e CHEN (2009), os valores da constante " $b$ ", que aparecem na equação 2.31, foram obtidos previamente por LIN e CHEN (2004) para concentração de sólidos inicial de 20% e 30%  $kg.kg^{-1}$ . Com a obtenção do valor da constante " $b$ " para uma concentração de sólidos inicial de 40%  $kg.kg^{-1}$ , pôde-se obter uma correlação em função da umidade inicial da partícula ( $X_0$ ) para leite em pó integral, representada pela equação 2.32, utilizando-se um ar de secagem com umidade em base seca de aproximadamente  $0,0001 kg.kg_{ar\ seco}^{-1}$ :

$$b = 0,0083X_0^2 - 0,1036X_0 + 1,00 \quad (2.3-2)$$

## 2.4 ÍNDICE DE SOLUBILIDADE

Outro fator relevante no controle da qualidade do leite em pó é o índice de solubilidade do leite em pó (ou índice de insolubilidade) determinado pelo método

analítico padronizado citado na portaria nº 146 de 1996 do MAPA (Federação Internacional de Laticínios 129A: 1988) no qual, resumidamente, uma quantidade específica do pó é reconstituída em água e o produto reconstituído é centrifugado. O volume de sedimento obtido após a centrifugação é denominado índice de solubilidade, o qual é medido em mililitros (ml).

De acordo com STRAATSMA et al. (1999), a taxa de formação de resíduos insolúveis, e portanto o valor do índice de solubilidade pode ser estimado através da equação 2.41:

$$r_{ISI} = \frac{d(ISi)}{dt} = k_{0ISI} \times \exp\left(-\frac{E_{aISI}}{R} \times \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_{0ISI}}\right)\right) \quad (2.4-1)$$

Sendo “ $r_{ISI}$ ” a taxa de formação de material insolúvel ( $ml.s^{-1}$ ), “ISI” o índice de solubilidade ( $ml$ ), “ $t$ ” o tempo transcorrido na reação de formação ( $s$ ), conforme STRAATSMA et al. (1999), as constantes cinéticas “ $k_{0ISI}$ ”, “ $E_{aISI}$ ” e “ $T_{0ISI}$ ” foram determinadas de forma experimental sendo respectivamente “ $k_{0ISI} = 0,0054 \text{ ml/s}$ ”, “ $E_{aISI} = 2,7 \times 10^5 \text{ J/mol}$ ” e “ $T_{0ISI} = 348 \text{ K}$ ”, “ $R$ ” a constante dos gases ideais e, por fim, “ $T_d$ ” a temperatura instantânea da partícula ( $K$ ).

Ainda conforme STRAATSMA et al. (1999), a equação 2.41 considera que a formação de material insolúvel só ocorre durante a faixa de umidade de 10 a 30%  $kg/kg$  ( $kg_{\text{água}}/kg_{\text{total}}$ ), região em que a sensibilidade ao dano térmico é agravada e que, neste intervalo, a taxa de formação é independente do conteúdo úmido. Por fim, considera que a “reação” de formação de insolúveis acaba quando o valor do índice de solubilidade atinge  $10ml$ . Conforme ROGERS et al. (2012), o valor de  $10ml$  marca o fim da presença de proteínas termosensíveis, sendo que todas essas foram desnaturadas e perderam sua solubilidade em água.

### 3 | SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional do processo de “*spray drying*” foi realizada baseada em torno de quatro equações matemáticas resolvidas simultaneamente para descrever o processo: (1) equação 2.11 a qual modela o perfil de umidade de uma partícula no processo ao longo do tempo de secagem; (2) equação 2.21 que calcula o perfil da temperatura de uma gota também ao longo do período de secagem; (3) equação 2.31 modelando o diâmetro da partícula em função da umidade em cada instante; (4) equação 2.41 que prevê o desenvolvimento do índice de solubilidade no produto final em função da temperatura que a partícula atinge ao longo do tempo de secagem.

Buscou-se obter entendimento de como a qualidade do produto final é influenciada pelas principais condições iniciais que alteram os padrões estabelecidos em legislação. Para tal, estas foram avaliadas em 3 cenários (valor mínimo, médio e máximo). Analisaram-se temperatura do ar de secagem, o diâmetro inicial de atomização e a

umidade inicial da partícula de leite. Os valores mínimos, médios e máximos estão resumidos na tabela 3.1.

As faixas utilizadas industrialmente em patentes de produção de leite em pó integral para a temperatura de secagem no processo de “*spray drying*” são amplas, sendo citados valores de 60°C a 93°C (WISCONSIN ALUMNI RESEARCH FOUNDATION, 1959; AFICO A.G., 1962; PETMILK COMPANY, 1963; NESTLÉ S.A, 2003; NESTEC S.A, 2004).

Já a fração mássica de extrato seco inicial na partícula, a qual possui correlação direta com a umidade inicial da gota, é tida na faixa de 40 a 55 %kg/kg (TETRAPAK, 1995; PEARCE, 2002; FIEMG e FEAM, 2015; TORRES, 2016).

O diâmetro inicial da gota gerada no processo de “*spray drying*” varia conforme o tipo de atomizador utilizado no equipamento de secagem porém, industrialmente, a faixa de utilização usual varia de 10 a 1000 (OAKLEY, D. E., 1997 apud ROGERS et al., 2011; NANDIYANTO e OKUYAMA, 2011).

Com relação ao tempo de secagem, este pode variar em média de 20 a 60 segundos (SCHUCK, 2002; PISECKY, 2012).

	Mínimo	Médio	Máximo
Temperatura de secagem (°C)	60	76,5	93
Diâmetro inicial (µm)	10	505	1000
Fração de sólidos (%)	40	47,5	55

Tabela 3.1 Condições iniciais das variáveis utilizadas na simulação da etapa de “*spray drying*”.

Fonte: Autor.

Para a análise de cada variável nos três cenários possíveis as demais foram fixadas nos valores médios. Os quais foram determinados através da média aritmética entre os extremos encontrados na bibliografia consultada.

O ambiente de programação utilizado para a modelagem e simulação foi o “EMSO” (Environment for Modeling, Simulation and Optimization). Devido ao fato de que o mesmo traz a possibilidade da criação/edição de modelos matemáticos, permite a simulação em estado transiente e é um software gratuito, específico para simulação de processos químicos.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 EFEITOS DO DIÂMETRO INICIAL DA PARTÍCULA

Apesar da literatura sugerir que o diâmetro inicial possa partir de 10µm, conforme a tabela 3.1, para as simulações foi utilizado o valor mínimo de 190µm, uma vez que o método numérico divergiu para valores menores do que este. Nota-se

pela figura 4.1.1 que os efeitos do diâmetro inicial na umidade da partícula ao longo do processo são expressivos. Em 10 segundos de secagem com o diâmetro inicial mínimo atinge-se uma umidade absoluta de  $0,1447 \text{ kg/kg}$ , valor suficiente para que o pó siga para a etapa de secagem secundária ( $0,12 - 0,16 \text{ kg/kg}$ ) (PISECKY, 2012). Ao contraste de que os demais diâmetros simulados, ao final do tempo de secagem médio de 40 segundos, ainda não atingem a faixa satisfatória para dar seguimento a etapa secundária, atingindo valores de  $0,1911 \text{ kg/kg}$  para o diâmetro médio e  $0,3581 \text{ kg/kg}$  para o máximo.

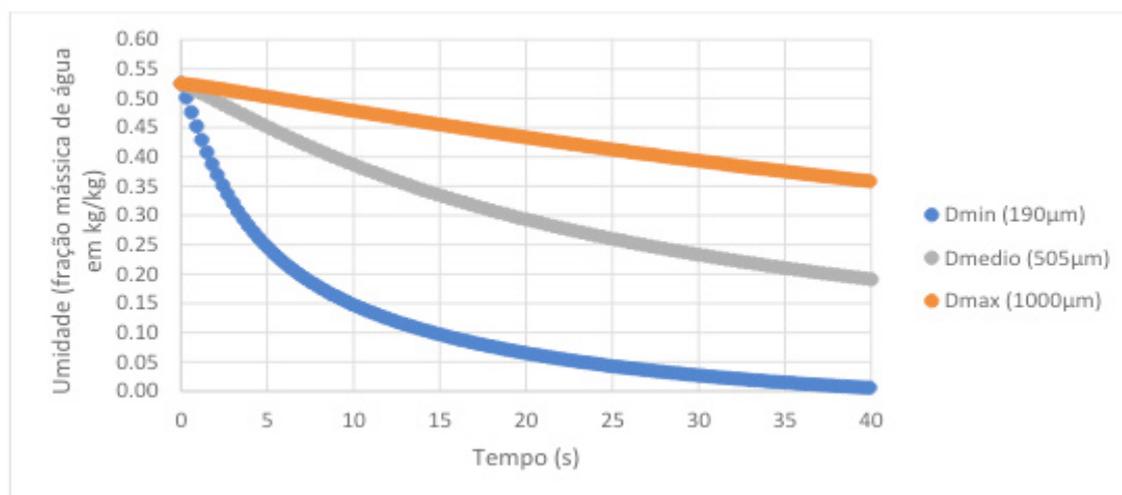


Figura 4.1.1: Perfil de umidade absoluta da partícula (em kg/kg) ao longo do tempo de secagem, em função do diâmetro inicial da mesma.

Fonte: Autor.

Conforme LIN e CHEN (2004, 2009) e ROGERS et al., (2011), com um diâmetro de partícula menor, a área superficial disponível para a realização da troca térmica e mássica com o ar de secagem é aumentada. Ocorre, conseqüentemente, um incremento no valor dos coeficientes de transferência de massa e de calor, resultando em uma taxa de secagem maior (equação 3.11).

O perfil de temperatura da partícula ao longo desta operação, observado na figura 4.1.2, confirma que a taxa de transferência de calor aumentou conforme a diminuição do diâmetro inicial. A gota atinge, respectivamente, uma temperatura de  $72^\circ\text{C}$ ,  $58^\circ\text{C}$  e  $52^\circ\text{C}$  em 5 segundos para os valores de mínimo, médio e máximo.

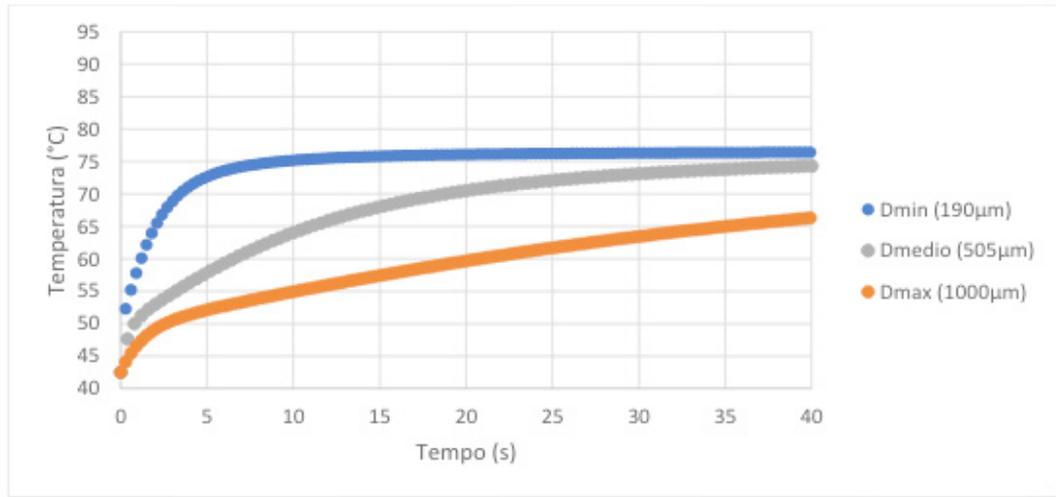


Figura 4.1.2: Perfil de temperatura da partícula ao longo do tempo de secagem, em função do diâmetro inicial da mesma.

Fonte: Autor.

Quanto ao índice de solubilidade no produto, representado na figura 4.1.3, observou-se que a sua taxa de formação foi suficientemente baixa a ponto de não produzir material insolúvel de forma significativa. Em nenhum dos casos de variação do diâmetro inicial o valor excedeu ao valor permitido de na portaria nº146 de 1996 do MAPA, vigente para leite em pó integral (BRASIL, 1996).

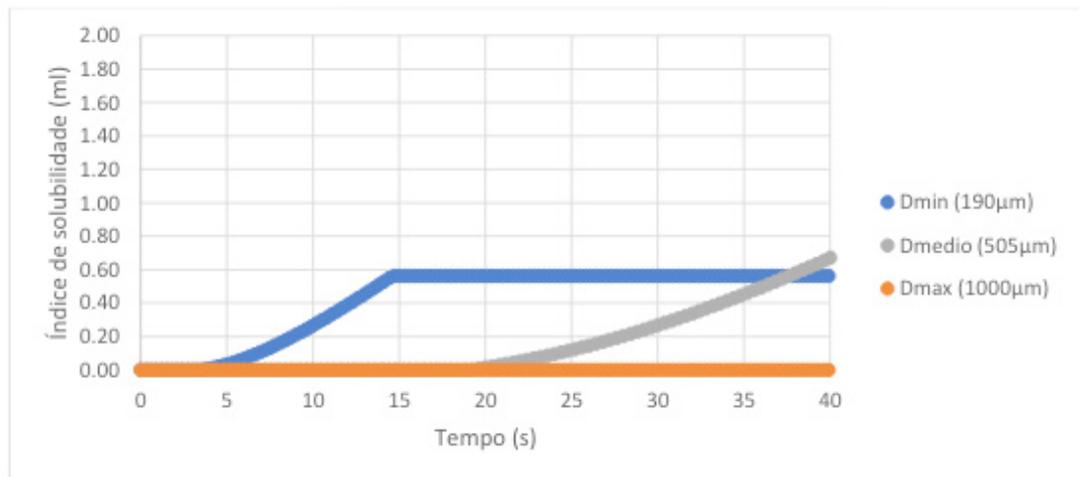


Figura 4.1.3: Perfil do índice de solubilidade ao longo do tempo de secagem, em função do diâmetro da mesma.

Fonte: Autor.

Ressalta-se que a operação realizada com o diâmetro mínimo de  $190\mu m$  e o tempo médio de 40 segundos, não necessitaria de uma etapa de secagem secundária uma vez que o produto já atende os padrões exigidos pela legislação: máximo de  $0,035\text{ kg/kg}$  para a umidade absoluta e até  $1\text{ ml}$  de índice de solubilidade. Inclusive, com um tempo de secagem de  $27,3\text{ s}$ , já se enquadra dentro do exigido, o que reduziria ainda o tempo de secagem médio de  $40\text{ s}$  em, aproximadamente, 1,46 vezes.

## 4.2 EFEITOS DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM

Os efeitos relacionados a variação da temperatura do ar de secagem produziram diferenças expressivas no perfil de temperatura da partícula ao longo do processo. Nota-se pela figura 4.2.1 com o ar de secagem a  $93^{\circ}\text{C}$  que a gota, nesta condição, chega a atingir  $91^{\circ}\text{C}$  ao fim da operação. Este valor alto pode danificar as proteínas presentes no leite que são sensíveis a temperaturas altas, fato que se evidencia através da figura 4.2.2 contendo o perfil do índice de solubilidade, onde o valor máximo de  $10\text{ml}$  foi atingido em apenas  $23\text{s}$  de secagem.

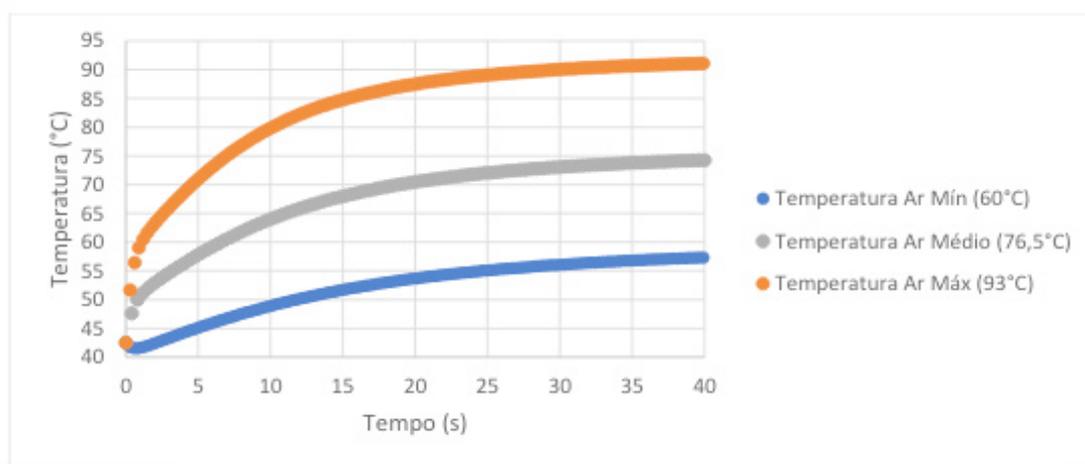


Figura 4.2.1: Perfil de temperatura da partícula ao longo do tempo de processo, em função da temperatura do ar de secagem.

Fonte: Autor.

Nos três casos estudados a temperatura da partícula ao final do processamento tende a atingir a temperatura do ar de secagem. Fato que se explica devido a consideração de que o fluxo mássico de entrada deste é 1000 vezes maior do que o do produto, o que torna a temperatura do ar constante ao longo de toda a câmara. Sendo assim, a gota tende a entrar em equilíbrio termodinâmico com o ar de secagem.

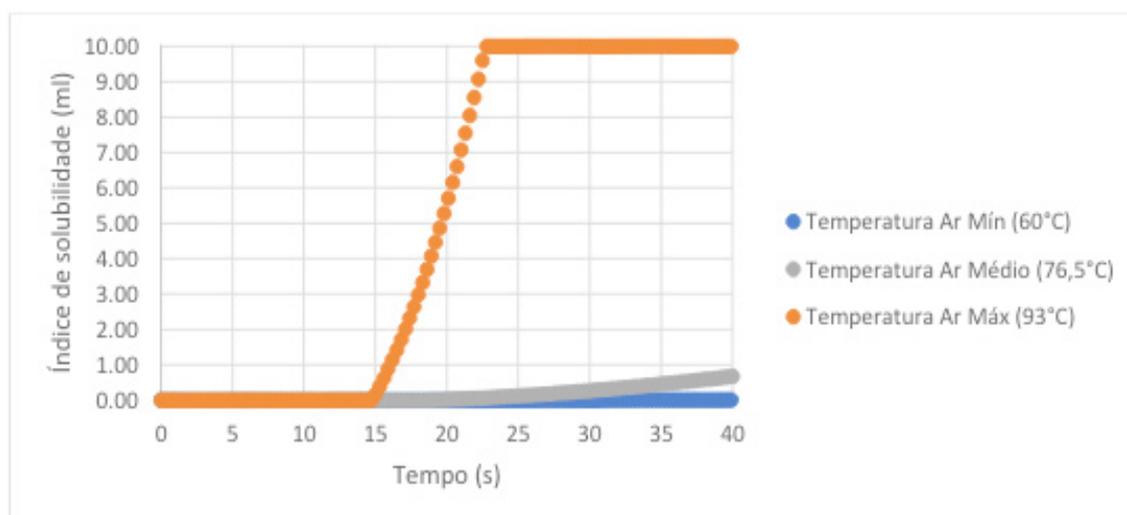


Figura 4.2.2: Perfil do índice de solubilidade ao longo do tempo de processo, em função da temperatura do ar de secagem.

Fonte: Autor.

Conforme ZHU et al. (2011), a agregação do particulado está diretamente ligada ao fenômeno de transição vítrea da partícula, que vem a ocorrer quando a mesma está a temperaturas maiores do que a sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). Encontra-se, então, em um estado viscoelástico com alto risco de aglomeração que pode impactar negativamente a reconstituição do leite em pó, com a formação de agregados de difícil dissolução. Tomando como comparação, para leite desnatado este valor de  $T_g$  é de cerca de  $95^\circ\text{C}$ , desta forma o produto obtido na operação com temperatura do ar de secagem máxima ( $93^\circ\text{C}$ ) estaria muito próximo da região de empedramento.

Com relação aos parâmetros exigidos pela portaria nº 146 de 1996 do MAPA de que o leite em pó integral possua umidade final máxima de  $0,035\text{ kg/kg}$  e valor máximo de índice de solubilidade de  $1\text{ ml}$ , nenhuma das condições de operação neste caso foram satisfatórias, como nota-se pelas figuras 4.2.2 e 4.2.3. Nas condições de temperatura média e mínima o índice manteve-se abaixo do permitido porém, a umidade final atingida foi maior do que a desejada para se dar continuidade a um processo de secagem secundária ( $0,12$  a  $0,16\text{ kg/kg}$ ), chegando a  $0,1911\text{ kg/kg}$  para a condição de  $76,5^\circ\text{C}$  e  $0,2351\text{ kg/kg}$  para  $60^\circ\text{C}$ .

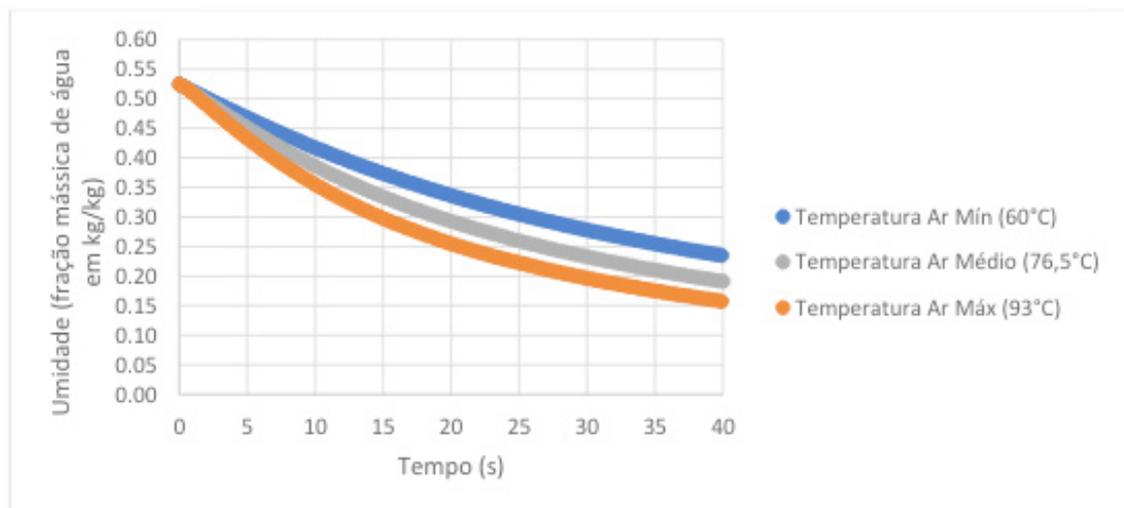


Figura 4.2.3: Perfil de umidade absoluta da partícula (em kg/kg) longo do tempo de processo, em função da temperatura do ar de secagem.

Fonte: Autor.

### 4.3 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO INICIAL DA PARTÍCULA

O efeito da composição da partícula, analisado através da variação da fração de sólidos iniciais presentes, influenciou diretamente na redução de diâmetro. Nota-se pela figura 4.3.1 que a gota com maior fração inicial de sólidos ( $55\% \text{ kg/kg}$ ) teve uma redução do seu diâmetro com relação ao inicial de 5,7% enquanto que, a partícula que

possuía mais água presente e, portanto, fração de sólidos mínima ( $40\%kg/kg$ ) reduziu em 11,6% o seu diâmetro.

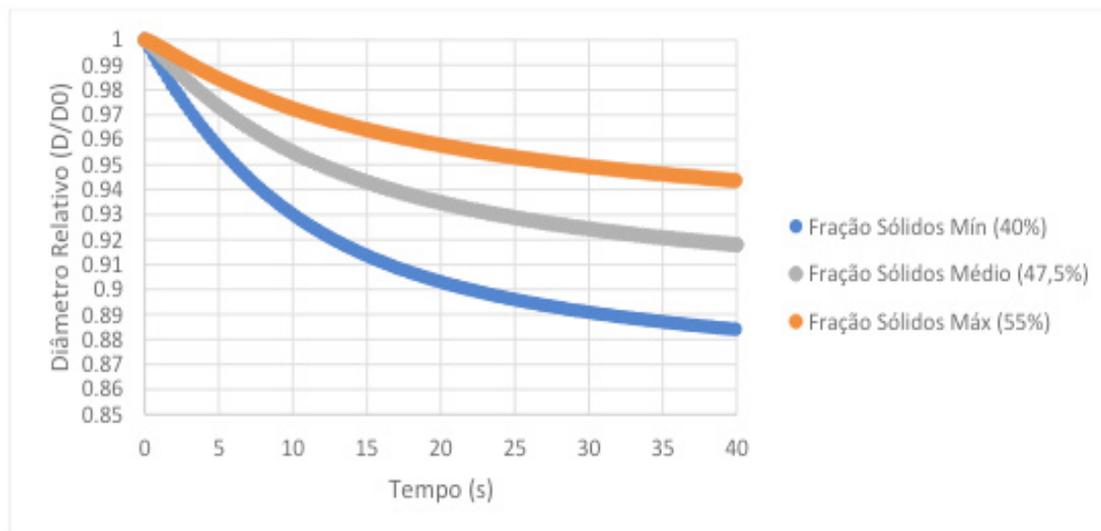


Figura 4.3.1: Perfil do diâmetro relativo ao diâmetro inicial da partícula ao longo do tempo de processo, em função da fração de sólidos iniciais.

Fonte: Autor.

A composição inicial da partícula não tem influência expressiva na umidade final da partícula, como indica a figura 4.3.2. A partir de 25 segundos de secagem nota-se que a diferença na umidade absoluta para todas as condições é desprezível (respectivamente,  $0,2625\text{ kg/kg}$ ,  $0,2587\text{ kg/kg}$ ,  $0,2488\text{ kg/kg}$  para frações de sólidos mínima, média e máxima) porém, a evaporação de água neste mesmo tempo para todos os casos é distinta: para  $40\%kg/kg$  de sólidos iniciais remove-se 56,25% de água; para  $47,5\%kg/kg$  de sólidos iniciais remove-se 56,06% de água; para 55% de sólidos iniciais remove-se 44,7% de água.

O padrão exigido em legislação para umidade (umidade absoluta final máxima de  $0,035\text{ kg/kg}$ , de acordo com a portaria nº146 de 1996 do MAPA) não foi atingido em nenhum dos casos para as variações na fração de sólidos inicial. Portanto, não seriam recomendados em um âmbito industrial. Uma etapa de secagem secundária também não se mostraria viável devido ao valor de umidade atingido ao final da operação não ser suficiente para continuidade do processo ( $0,12\text{ kg/kg}$  a  $0,16\text{ kg/kg}$ ). Quanto ao índice de solubilidade, todas as condições foram satisfatórias, estando abaixo de 1ml.

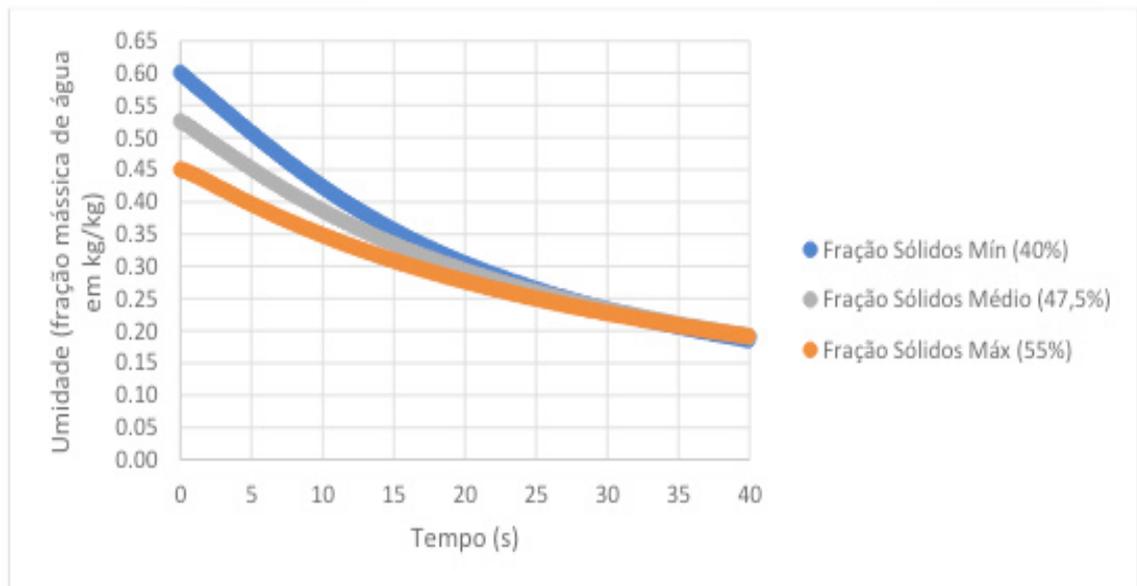


Figura 4.3.2: Perfil de umidade absoluta da partícula (em kg/kg) longo do tempo de processo, em função da fração de sólidos iniciais.

Fonte: Autor.

## 5 | CONCLUSÕES

Dentre os parâmetros analisados na etapa de secagem primária por “*spray drying*”, o diâmetro inicial da partícula mostrou uma influência expressiva na dinâmica de secagem. A operação realizada com diâmetro mínimo pode atingir a umidade aceitável para se dar continuidade ao processamento (com uma secagem secundária) em um tempo até quatro vezes menor. Também torna possível a obtenção do leite em pó dentro dos padrões exigidos na legislação.

Já as condições analisadas para a temperatura do ar de secagem não levaram ao atendimento dos padrões de qualidade, podendo causar até mesmo a degradação do produto. A composição inicial da gota, não mostrou influência expressiva na operação, sendo que em nenhuma destas situações simuladas as características finais desejadas do produto foram atingidas, nem mesmo para dar continuidade ao processo.

## REFERÊNCIAS

- AFICO A.G. (Lausanne, Suíça). Valentin Wenner; Erno Hirtler. **Whole Milk Powder**. US n. 3065076, 20 Novembro 1962.
- BRASIL. Portaria MAPA nº 146 de 7 de março de 1996. **Regulamento Técnico para Identidade e Qualidade Dos Produtos Lácteos**, Brasília, DF, mar 1996.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: Mcgraw-Hill, 2012.

- CEPEA. PIB de Cadeias Agropecuárias. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada**, 2017. Disponível em: <[www.cepea.esalq.usp.br](http://www.cepea.esalq.usp.br)>. Acesso em: Março 2018.
- CHAVES, D. H. S. **Modelagem, simulação e controle de um secador spray**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- CHEN, X. D. The Basics of a Reaction Engineering Approach to Modeling Air-Drying of Small Droplets or Thin-Layer Materials. **Drying Technology: An International Journal**, v. 26, n. 6, p. 627-639, 2008.
- CHEN, X. D.; LIN, S. X. Q. Air Drying of Milk Droplet under Constant and Time-Dependent Conditions. **AIChE**, Auckland, v. 51, n. 6, p. 1790-1799, 2005.
- CHEN, X. D.; XIE, G. Z. Fingerprints of the drying behavior of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model. **Food and Bioproducts Processing**, v. 75, n. 4, p. 213-222, 1997.
- EMBRAPA. **Indicadores: Leite e Derivados**. Juiz de Fora: Embrapa – Gado de Leite, 2018.
- FAO. **Milk and Dairy Products in human nutrition**. Roma: FAO, 2013.
- FIEMG; FEAM. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Laticínios**. 1. ed. Montes Claros: FIEMG/FEAM/SILEMG, 2015.
- IBGE. Pesquisa Trimestral do Leite. **SIDRA - IBGE**, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/leite/brasil>>. Acesso em: Março 2018.
- INMETRO. Leite em Pó Integral. **INMETRO**, 1998. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/leitepo.asp>>. Acesso em: 22 Março 2018.
- LIN, S. X. Q.; CHEN, X. D. Improving the Glass-Filament Method for Accurate Measurement of Drying Kinetics of Liquid Droplets. **Chemical Engineering Research and Design**, Auckland, v. 80, n. 4, p. 401-410, 2002.
- LIN, S. X. Q.; CHEN, X. D. Changes in milk droplet diameter during drying under constant drying conditions investigated using the glass-filament method. **Food and Bioproducts Processing**, v. 82, n. 3, p. 213-218, 2004.
- LIN, S. X. Q.; CHEN, X. D. A Model for Drying of an Aqueous Lactose Droplet Using the Reaction Engineering Approach. **Drying Technology: An International Journal**, Auckland, v. 24, n. 11, p. 1329-1334, 2006.
- LIN, S. X. Q.; CHEN, X. D. Engineering Data of Diameter Change during Air Drying of Milk Droplets with 40%wt Initial Solids Content. **Drying Technology: An International Journal**, Melbourne, v. 27, n. 10, p. 1028-1032, 2009.
- LIN, X. Q.; CHEN, X. D.; PEARCE, D. L. Desorption isotherm of milk powders at elevated temperatures and over a wide range of relative humidity. **Journal of Food Engineering**, v. 68, n. 2, p. 257-264, Maio 2005.
- MUNIZ, L. C.; MADRUGA, S. W.; ARAUJO, C. L. Consumo de leite e derivados entre adultos e idosos no Sul do Brasil: um estudo de base populacional. **Ciência saúde coletiva**, v. 18, n. 12, p. 3515-3522, 2013.
- NANDIYANTO, A. B. D.; OKUYAMA, K. Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges. **Advanced Powder Technology**, v. 22, n. 1, p. 1-19, 2011.

- NESTEC S.A. (Vevey, Suíça). Stefan Bodenstab. **Process for the preparation of milk powder**. US n. 6780450B2, 24 Agosto 2004.
- NESTLÉ S.A. (Vevey, Suíça). Rafael Berrocal. **Process for the preparation of concentrated milks and milk powders**. WO n. 03/043429A1, 30 Maio 2003.
- PATEL, K. et al. One-dimensional simulation of co-current, dairy spray drying systems - pros and cons. **Dairy Science & Technology**, v. 90, n. 3, p. 181-210, 2010.
- PEARCE, D. K. N. New Zealand Dairy Research Institute. **Milk Powder**, 2002. Disponível em: <<https://nzic.org.nz/app/uploads/2017/10/3C.pdf>>. Acesso em Maio de 2018.
- PETMILK COMPANY (San Luis, Missouri). Adrian Z. Hodson; Carl B. Miller. **Process for Making Milk Powder**. US n. 3080235, 5 Março 1963.
- PISECKY, I. J. **Handbook of Powder Manufacture**. 2. ed. Copenhagen: GEA Process Engineering A/S, 2012.
- ROGERS, S. et al. Particle shrinkage and morphology of milk powder made with a monodisperse spray dryer. **Biochemical Engineering Journal**, v. 62, p. 92-100, 2011.
- ROGERS, S. et al. A monodisperse spray dryer for milk powder: Modelling the formation of insoluble material. **Chemical Engineering Science**, v. 71, p. 75-84, 2012.
- SCHUCK, P. Spray drying of dairy products: state of the art. **Lait**, v. 82, n. 4, p. 375-382, 2002.
- SCHUCK, P. Understanding the factors affecting spray-dried dairy powder properties and behavior. In: CORREDIG, M. **Dairy-Derived Ingredients**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. p. 24-50.
- SINDILAT. Newsletter: Entressafra puxa alta do preço do leite no RS. **SINDILAT**, 2018. Disponível em: <[www.sindilat.com.br](http://www.sindilat.com.br)>. Acesso em: Março 2018.
- STRAATSMA, J. et al. Spray drying of food products: 2. Prediction of insolubility index. **Journal of Food Engineering**, Ede, v. 42, n. 2, p. 73-77, 1999.
- TETRAPAK. **Dairy Processing Handbook**. Lund: Tetra Pak Processing Systems, 1995.
- TORRES, J. K. F. **Caracterização e Secagem em Spray Dyer de leite em pó integral com lactose hidrolisada**. 2016. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- WISCONSIN ALUMNI RESEARCH FOUNDATION (Madison, Wisconsin) William C. Winder; Elwood W. Kielsmeier. **Process of Drying Milk**. US n. 2911301, 3 Novembro 1959.
- ZHU, P. et al. Prediction of dry mass glass transition temperature and the spray drying behaviour of a concentrate using a desorption method. **Journal of Food Engineering**, Rennes, v. 105, n. 3, p. 460-467, 2011.
- ZOCCAL, R. Mercado de lácteos no Brasil: Produção, importação e exportação. **Balde Branco**, 2017. Disponível em: <[www.baldebranco.com.br](http://www.baldebranco.com.br)>. Acesso em: Março 2018.

## NÍVEIS DE RUÍDO DE UM TRATOR AGRÍCOLA EM CONDIÇÃO ESTÁTICA

### **Maria Rosa Alferes da Silva**

Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí  
Urutaí- Goiás

### **Letícia Rodrigues da Silva**

Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí  
Urutaí- Goiás

### **Rônega Boa Sorte Vargas**

Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí  
Urutaí- Goiás

### **Beethoven Gabriel Xavier Alves**

Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí  
Urutaí- Goiás

**RESUMO:** A mecanização agrícola atualmente é essencial em todos os setores da agricultura. Apesar desses benefícios, a mecanização vem causando diversos prejuízos ao operador com relação aos fatores ergonômicos. Sendo lamentavelmente um dos motivos de insalubridade o ruído, causado pelas máquinas, que ultrapassam os limites das normas vigentes. Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar os níveis de ruído de um trator agrícola em condição estática utilizando um medidor de pressão sonora (decibelímetro) digital. O delineamento experimental utilizado foi o DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado), com três repetições em um esquema fatorial (3x2), composto de três posições (posto do operador,

próximo ao escapamento e próximo ao motor) e duas rotações (lenta – 800 rpm e máxima – 2.250 rpm). Os níveis de ruídos estão superiores aos permitidos pela legislação, devendo ser utilizado protetor auricular, exceto para o posto do operador e escapamento em rotação lenta (800 rpm). O nível de ruído aumenta à medida que ocorre incremento na rotação do motor do trator, independente da posição.

**PALAVRA-CHAVE:** insalubridade, rotação, escapamento, operador.

**ABSTRACT:** Agricultural mechanization is now essential in all sectors of agriculture. Despite these benefits, the mechanization has caused several damages to the operator in relation to the ergonomic factors. Unfortunately, one of the reasons for unhealthy noise is caused by machinery, which goes beyond the limits of current standards. In this way, the objective of the work was to evaluate the noise levels of an agricultural tractor in static condition using a digital sound pressure meter (decibelimeter). The experimental design was DIC, with three replications in a factorial scheme (3x2), composed of three positions (operator position near the exhaust and near the engine) and two rotations (slow - 800 rpm and maximum - 2,250 rpm). Noise levels are higher than those permitted by law, ear protectors must be used, except for the operator's station and slow-speed

exhaust (800 rpm) .The noise level increases as there is an increase in the motor rotation of the tractor, regardless of position.

**KEYWORDS:** insalubrity, rotation, exhaust, operator.

## 1 | INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola atualmente é essencial em todos os setores da agricultura. Apesar desses benefícios, a mecanização vem causando diversos prejuízos ao operador com relação aos fatores ergonômicos. Sendo lamentavelmente um dos motivos de insalubridade o ruído, causado pelas máquinas, que ultrapassam os limites das normas vigentes.

Tendo em vista que as operações com o conjunto trator-implementos podem comprometer a saúde do operador devido à sua exposição a condições ergonômicas desfavoráveis, levantou-se a hipótese de que lamentavelmente na maior parte dos casos o ruído se torna insalubre, pois ultrapassa os limites das normas vigentes.

Desta forma, é de grande relevância avaliar os riscos expostos aos operadores, tais como problemas auditivos que são determinados pelos níveis de ruídos, pela frequência e pelo tempo de exposição, para que possamos alertar, divulgar e melhorar ainda mais as condições ergonômicas, visando à manutenção da saúde do trabalhador rural, evitando assim problemas físicos e psíquicos.

Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar os níveis de ruído de um trator agrícola em condição estática, verificando qual a influência das variações de rotação e de posição.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos no Instituto Federal Goiano (IF Goiano), Campus Urutaí-Go, localizado na Fazenda Palmital – Rodovia Geraldo Silva Nascimento km 2,5, Zona rural, município de Urutaí, Estado de Goiás, cujas coordenadas geográficas são 17°29'10" S de latitude, 48°12'38" O de longitude e 697 m de altitude.

Os níveis de ruído foram determinados, conforme a norma NBR 9999, por meio de um medidor de pressão sonora (decibelímetro) digital. O trator utilizado no ensaio da presente pesquisa é um 4x4, com potência de 90 cv, 4 cilindros, cabinado, com pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-30 R1, com peso sem operador de 3.760 kg.

O delineamento experimental utilizado foi o DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado), com três repetições em um esquema fatorial (3x2), composto de três posições (posto do operador, próximo ao escapamento e próximo ao motor) e duas rotações (lenta - 800rpm e máxima - 2250rpm). Adotou-se a Norma Brasileira NBR 5353 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999) como referência ao local onde deverá ser posicionado o decibelímetro no posto do operador. Já para o

posicionamento do equipamento próximo ao escapamento e ao motor, foi adaptada a Norma Brasileira NBR-9714 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Os valores quantificados de ruído em dB (A) foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de comparação de médias de Tukey (teste f), a 5% de probabilidade, com o programa SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2014). Após isso, os dados foram comparados com os limites fixados pela norma regulamentadora NR-15 (BRASIL, 2018).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao nível de potência sonora (Tabela 1), houve influência significativa ( $p \leq 0,05$ ) para as posições: escapamento, motor e posição do operador, onde variou a rotação do motor de 800rpm e 2.250rpm.

Os maiores valores de ruído foram encontrados na rotação de 2.250rpm, condição esta de maior movimento das partes mecânicas do trator, que também ocasiona aumento de vibração que ajuda a aumentar o valor do ruído.

As operações com rotação de 800rpm podem ser realizadas por um período de oito horas sem proteção auricular, pois estão abaixo de 85dB(A). Acima deste valor, deverão ser obedecidos os limites contidos na NR-15 (Norma regulamentadora), ou utilizar a proteção auricular.

Cunha et al. (2009) ao estudarem vibrações e ruído com trator de 60,35kW (82 cv) de potência nominal no motor, concluíram que o nível de ruído aumenta com o incremento da rotação do motor. Santana et al. (2010) verificaram também incremento do nível de ruído a medida que aumenta a rotação e, ainda, que apenas com a rotação de 700-800 rpm pode-se trabalhar sem protetor auricular. O presente trabalho corrobora com os autores citados.

Já Araújo et al (2014) avaliaram os níveis de ruído emitidos por três tratores agrícolas, concluíram que os tratores de menor potência apresentaram maiores valores de níveis de ruídos emitidos. O trabalho demonstrou a influência da potência do motor com relação à emissão de ruídos. Além disso, potencializam as informações de que os tratores apresentaram níveis de ruído acima do permitido pela legislação brasileira para exposição sem proteção auricular.

Os níveis de potência sonora emitidos por trator agrícola em condições estáticas e dinâmicas foram estudados por Silva et al (2011). Os autores concluíram que, em todas as condições, o nível de potência sonora foi maior do que o permitido pela legislação.

Neste trabalho, os dados de níveis de ruídos para posição próxima ao motor na rotação lenta estão fora dos valores permitidos pela legislação.

## 4 | CONCLUSÃO

Os níveis de ruídos estão superiores aos permitidos pela NR – 15 de 85dB para uma jornada de trabalho de 8 horas diárias, devendo, assim, utilizar protetor auricular, exceto para o posto do operador e escapamento em rotação lenta (800rpm).

Observou-se uma diferença estatística entre as posições e rotações, demonstrando assim aumento no nível de ruído à medida que ocorre incremento na rotação do motor do trator, independente da posição.

## REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-ISO 5353: Máquinas rodoviárias, tratores e máquinas agrícolas e florestais – ponto de referência do assento. Rio de Janeiro: **ABNT**, P. 5, 1999.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-9714: veículo rodoviário automotor: ruído emitido na condição parado. Rio de Janeiro: **ABNT**, p. 6, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9999**. Medição do nível de ruído no posto de operação de tratores agrícolas. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 21p.

ARAÚJO, V. F.; HONORATO, A.C; CORTEZ, J. W.; FILHO, A. P.P.; & DE JESUS NAGAHAMA, H.. Patinagem, opacidade e ruído de três tratores agrícolas de pneus. **Energia na agricultura**, v.29 n.1, p.01-08, 2014.

BRASIL, MINISTÉRIO DO TRABALHO. Portaria MTb n.º 3.214, de 08 de junho de 1978, **Norma Regulamentadora Nº 15** - Atividades E Operações Insalubres. DOU 06/07/78. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR15/NR-15.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

CUNHA, J.P.A.; DUARTE, R.M.A.; RODRIGUES. V.J.C. Avaliação dos níveis de vibração e ruído emitidos por um trator agrícola em preparo de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, n.4, p.348- 355. 2009.

OLIVEIRA, A. P. L.; TAVARES, L. A. F.; LUCAS, R. F.; MELGAÇO, M. F. M.; SILVA, W. N. J. Caracterização dos níveis de ruído em tratores com diferentes potências na região noroeste de Minas Gerais. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - **CONBEA**, 2015, São Pedro. Jaboticabal: FCAV/UNESP, v. 1, 2015.

SANTANA, S.R.A.; CORTEZ, J.W.; ALVES, A.D.S.; COSTA, F.R.L.; NAGAHAMA. H.J. Avaliação do nível de potência sonora do trator agrícola em condições estáticas. In: **V Jornada de Iniciação Científica da UNIVASF**, 2010, Juazeiro, BA, Anais... Juazeiro: UNIVASF, 2010. p.1-2. Cd\_ROM.

SILVA, A. D. D. A.; COSTA, F. R. L.; CORTEZ, J.W.; DANTAS, A. C. D. S.; & NAGAHAMA, H. D. J.. Níveis de potência sonora emitidos por trator agrícola em condições estáticas e dinâmicas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n.1, 2011.

FERREIRA, Daniel Furtado. **Sisvar**: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciênc. agrotec.* [online]. 2014, vol.38, n.2 [citado: 2015-10-17], pp. 109-112. Disponível em: ISSN 1413-7054, <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

Posições	Rotações do motor	
	Lenta - 900rpm	Máxima - 2300rpm
Posto do operador	82,3 a1	91,7 a2
Escapamento	79,4 b1	93,7 b2
Motor	85,4 c1	104,1 c2

Médias seguidas por letras distintas minúsculas na coluna e números na linha diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey a 0,05%.

**Tabela 1** – Médias dos níveis de ruído em diferentes parâmetros e rotação.

## O MÉTODO SORM DG E SUAS APLICAÇÕES NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PROBLEMAS DE ENGENHARIA

### **Emmanuel Guasti Ferreira**

Instituto Federal do Espírito Santo  
Vitória – Espírito Santo

### **Marcílio Sousa da Rocha Freitas**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

### **José Antônio da Rocha Pinto**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória – Espírito Santo

### **Geraldo Rossoni Sisquini**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória – Espírito Santo

**RESUMO:** O método semianalítico SORM DG (Second Order Reliability Method by Differential Geometry) realiza a análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem utilizando as curvaturas principais da superfície de estado limite (SEL). Foi analisado um exemplo de SEL, cujos resultados fornecidos via geometria diferencial para as curvaturas principais, no ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ), foram exatos. Além disso, os resultados obtidos para o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha do método semianalítico FORM (First Order Reliability Method) foram otimizados pelo método semianalítico SORM DG, em relação aos resultados fornecidos pela literatura, via Simulação Monte Carlo Simples (SMCS).

Esses resultados foram comparados, também, em termos de acurácia e eficiência com os fornecidos pelo método semianalítico SORM (Second Order Reliability Method) convencional, sendo que o método semianalítico SORM DG apresentou resultados acurados em termos de análise de confiabilidade, além de ser mais eficiente que o método semianalítico SORM convencional, sem prejuízo de acurácia.

**PALAVRAS-CHAVE:** FORM; SORM; SORM DG; Curvaturas principais; Geometria diferencial.

**ABSTRACT:** The semi-analytical SORM DG (Second Order Reliability Method by Differential Geometry) performs second-order structural reliability analysis using the main curvatures of the limit state surface (SEL). An example of SEL was analyzed, the results provided by differential geometry for the main curvatures, at the design point ( $\mathbf{V}^*$ ), were accurate. In addition, the results obtained for the reliability index and the probability of failure of the semi-analytical FORM (First Order Reliability Method) were optimized by the semi-analytical SORM DG, in relation of the results provided by literature, via Simple Monte Carlo Simulation (SMCS). These results were also compared in terms of accuracy and efficiency with those provided by the semi-analytical conventional SORM (Second Order Reliability Method), and the semi-analytical

SORM DG presented accurate results in terms of reliability analysis, in addition to being more efficient than semi-analytical conventional SORM, without prejudice to accuracy.

**KEYWORDS:** FORM; SORM; SORM DG; Main curvatures; Differential geometry.

## 1 | INTRODUÇÃO

Muitas das variáveis envolvidas nos projetos de engenharia são aleatórias, ou seja, os seus parâmetros possuem incertezas. A presença dessas incertezas são, geralmente, tratadas com o uso do fator global de segurança, segundo a abordagem tradicional do método das tensões admissíveis. Esse fator de segurança é selecionado com base na experiência passada ou em regras gerais práticas e não reflete as incertezas dos parâmetros subjacentes individuais nem a sua estrutura de correlação. Essas limitações podem ser superadas através de projetos baseados em confiabilidade, nos quais a segurança de uma estrutura é descrita por um índice de confiabilidade ao invés do fator de segurança. O índice de confiabilidade é capaz de explicar as incertezas e as correlações paramétricas e fornece um caminho para estimar a probabilidade de falha da estrutura e dos seus componentes.

Devido à sua maior simplicidade e eficiência, o FORM, que realiza uma aproximação linear, através de um hiperplano, à superfície de estado limite (SEL), tem sido amplamente usado em análises de confiabilidade. Entretanto, a linearização inerente ao FORM introduz erros em muitos casos e por isso o SORM tem sido empregado como alternativa (Zeng et al., 2016).

As aplicações do SORM, em problemas de engenharia, por Cho (2009), Lu e Low (2011), Lu et al. (2011 e 2012), Chan e Low (2012), Zeng e Jimenez (2014), Zeng. et al. (2015, 2016 e 2017), nos últimos anos, sugerem um interesse relevante pelo SORM e, portanto, há muito espaço para novas pesquisas nessa área, sendo o principal desafio calcular as curvaturas principais da SEL, que envolve muita complexidade matemática e esforço computacional.

O SORM DG, que visa melhorar os resultados do FORM de maneira mais eficiente que o SORM convencional, sem prejuízo na acurácia dos resultados, pode ser considerado, então, como uma contribuição de utilidade para a engenharia. Para que o SORM DG realize a análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem é necessário que o FORM forneça as coordenadas do ponto de máxima densidade local de probabilidade (ponto de projeto) e que as curvaturas principais da SEL sejam calculadas nesse ponto, através de geometria diferencial. Devido a isso, está desenvolvido neste artigo um procedimento analítico de cálculo dessas curvaturas no espaço multidimensional (espaço  $R^n$ ), onde  $n$  é o número de variáveis aleatórias da função da SEL (função de falha) envolvidas na análise.

Para muitos problemas de engenharia a função da SEL é trabalhosa para ser avaliada e as derivadas analíticas não existem (Du, 2005). Nesse caso, levando em conta essa característica dos problemas de engenharia, as derivadas são calculadas

pelo método das diferenças finitas. Devido a este fato, neste artigo, todas as derivadas parciais necessárias para solução das avaliações das probabilidades de falha de primeira e segunda ordem foram calculadas, via software MATLAB (Lee, 2018), pelo método das diferenças finitas.

Basicamente os diversos métodos existentes para avaliação da probabilidade de falha podem ser divididos em quatro categorias:

- a) Métodos de Integração Numérica;
- b) Simulação Monte Carlo (SMC) ou Método Monte Carlo e suas variações;
- c) Métodos semianalíticos FORM, SORM convencional e, no caso em tela, o SORM DG;
- d) Métodos Híbridos.

Serão apresentados, via software MATLAB (Lee, 2018), somente os cálculos do SORM DG e do FORM, que realiza a análise de confiabilidade estrutural de primeira ordem, tendo em vista que fornece ao SORM DG as coordenadas do ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ). Já os resultados do SORM convencional foram fornecidos pela literatura, bem como os da Simulação Monte Carlo Simples, sendo esse último utilizado como referência.

## 2 | REVISÃO DO FORM E DO SORM CONVENCIONAL

Nesta Seção, além da revisão do FORM e do SORM convencional, são comentados os métodos tradicionais usados para calcular as soluções do FORM e da matriz Hessiana. A análise de confiabilidade do SORM convencional, baseada nesses métodos, também é discutida, além de sua eficiência. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências Madsen et al. (2006), Ditlevsen e Madsen (2007), Melchers e Beck (2018).

### 2.1 Análise de confiabilidade estrutural de primeira ordem

No FORM a probabilidade de falha de primeira ordem é obtida através de transformações das variáveis aleatórias originais ( $\mathbf{U}$ ) do espaço  $U$  (espaço original), da função da SEL  $G(\mathbf{U})=0$ , em variáveis aleatórias reduzidas (ou normais padrão) estatisticamente independentes  $\mathbf{V}$  do espaço  $V$  (espaço normal padrão, espaço reduzido ou espaço das variáveis reduzidas), cuja função da SEL ( $g(\mathbf{V})=0$ ) é aproximada por um hiperplano e o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) é interpretado como a distância mínima em relação à origem para a referida superfície no espaço normal padrão e o mais provável ponto de falha (ponto de maior densidade local de probabilidade), denominado ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ), é procurado usando métodos matemáticos de programação.

A probabilidade de falha fornecida pelo FORM, utilizando as propriedades da

distribuição normal multidimensional padrão, é dada por (Madsen et al.,2006):

$$Pf = \int_F fu(\mathbf{U})d\mathbf{u} = \int_F fv(\mathbf{V})d\mathbf{v} = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

onde, F indica o domínio de falha,  $f_u(\mathbf{U})$  é a função densidades de probabilidades conjunta de  $\mathbf{U}$ ,  $f_v(\mathbf{V})$  é a função densidades de probabilidades conjunta de  $\mathbf{V}$  e  $\Phi$  é a distribuição cumulativa normal padrão de probabilidades.

De acordo com Madsen et al. (2006), o índice de confiabilidade se relaciona ao ponto de projeto através das Equações 2 e 3:

$$\beta = \|\mathbf{V}^*\| \quad (2)$$

e

$$\mathbf{a}^* = \frac{\nabla g(\mathbf{V}^*)}{\|\nabla g(\mathbf{V}^*)\|} = -\frac{\mathbf{V}^*}{\beta} \quad (3)$$

onde,  $\mathbf{a}^*$  é o vetor normal unitário à SEL no ponto  $\mathbf{V}^*$  e  $\|\nabla g(\mathbf{V}^*)\|$  é a norma do gradiente da SEL no espaço reduzido (espaço V), no referido ponto, como ilustrado na Figura 1:

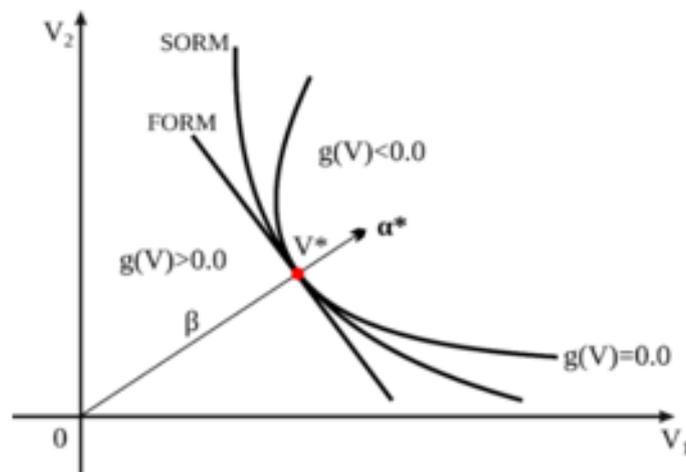


Figura 1 – Aproximação de  $g(V)=0$  realizada via FORM e SORM no espaço bidimensional

Fonte: Adaptado de Sagrilo (1994).

## 2.2 Análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem via SORM convencional

Com a finalidade de melhorar a aproximação, ilustrada na Figura 1, da probabilidade de falha calculada pelo FORM, o SORM convencional foi estabelecido e avalia a probabilidade de falha de segunda ordem usando as coordenadas

(calculadas pelo FORM) do ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ) aproximando um hiperparabolóide à SEL no ponto  $\mathbf{V}^*$ . Além disso, necessita, também, do cálculo da matriz Hessiana no ponto  $\mathbf{V}^*$ , realizando em seguida rotação de suas coordenadas, a fim de que sejam obtidas as curvaturas principais do hiperparabolóide aproximado à SEL nesse ponto, considerando-as como se fossem iguais às curvaturas principais da SEL no referido ponto.

A fim de resolver a Equação 1, foi usado nos exemplos apresentados o FORM com o algoritmo HL–RF (FORM HL–RF), tendo em vista que de acordo com Sagrilo (1994) é o método de primeira ordem mais frequentemente utilizado.

Para medir a eficiência computacional, segundo Zeng et al. (2016), usa-se o número de avaliações da função da SEL (NAF), necessárias em cada análise, porque o esforço computacional exigido por outras partes do algoritmo é muitas vezes insignificante, quando comparado com o NAF, principalmente quando métodos numéricos trabalhosos (como diferenças finitas) estão envolvidos. Assim, o NAF pode ser usado como indicador geral de eficiência computacional em problemas reais da área de engenharia, ou seja, maior NAF indica menor eficiência e vice e versa.

No caso do FORM HL–RF, quando as coordenadas do gradiente da função  $G(\mathbf{U})=0$  forem calculadas pelo método das diferenças finitas, serão necessárias  $n+1$  avaliações da função  $G(\mathbf{U})=0$  para cada iteração ( $i$ ) no algoritmo (HL–RF) de busca do ponto de projeto no espaço original ( $\mathbf{U}^*$ ), ou seja, o número de avaliações da função da SEL para o FORM HL–RF é

$$NAF_{\text{FORM}} = i(n+1) \quad (4)$$

### 2.3 Cálculo da matriz Hessiana

Antes de calcular a probabilidade de falha de segunda ordem, as variáveis  $\mathbf{V}$  do espaço  $V$  devem ser transformadas, por meio de rotação, para o espaço normal padrão  $\mathbf{Y}$  usando uma transformação ortogonal

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R} \mathbf{V} \quad (5)$$

onde,  $\mathbf{R}$  é uma matriz de rotação ortogonal, com dimensão  $n \times n$ , cuja última coluna contém as coordenadas do vetor normal unitário ( $\alpha^*$ ) à SEL, e pode ser obtida através de um processo de ortogonalização, como por exemplo, o de Gram-Schmidt. Depois de girar as coordenadas da matriz Hessiana ( $\mathbf{H}$ ) é obtida a matriz  $\mathbf{H}_R$ , cujos termos são definidos como

$$\mathbf{H}_{Rij} = \frac{(\mathbf{RHR}^T)_{ij}}{\|\nabla_{\mathbf{g}}(\mathbf{V}^*)\|}, i, j = 1, \dots, n-1 \quad (6)$$

onde  $\mathbf{R}^T$  é a transposta de  $\mathbf{R}$  e  $\|\nabla_{\mathbf{g}}(\mathbf{V}^*)\|$  é a norma do gradiente da SEL no ponto de projeto (avaliado na última iteração do algoritmo HL–RF). Os autovalores da matriz  $\mathbf{H}_R$  são as curvaturas principais  $k_j$  ( $j=1, 2, \dots, n-1$ ) da SEL.

## 2.4 Eficiência do SORM convencional

Na prática, no que tange aos problemas de engenharia, quando as soluções analíticas para as derivadas parciais não estão disponíveis, a matriz Hessiana pode ser calculada por diferenças finitas. Portanto, o número de análises extras da função da SEL para o cálculo de todas as derivadas de segunda ordem via diferenças finitas é  $n(n+1)$ . Porém, como a matriz Hessiana é simétrica o número de avaliações da função da SEL para o SORM convencional é

$$NAF_{SORM} = \frac{n(n+1)}{2} \quad (7)$$

Isso poderá aumentar significativamente o consumo computacional, particularmente quando a função da SEL possuir um grande número de variáveis aleatórias e for morosa para ser avaliada, quando forem usados métodos trabalhosos, como o método das diferenças finitas.

## 2.5 Estimativa da probabilidade de falha de segunda ordem

De posse das coordenadas de  $\mathbf{V}^*$ , bem como dos valores de  $k_j$ , a estimativa da probabilidade de falha de segunda ordem do SORM convencional pode ser obtida de acordo com Madsen et al. (2006) por

$$Pf_2 = \Phi(-\beta) \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta k_j)^{-1/2} \quad (8)$$

onde  $Pf_2$  é a probabilidade de falha de segunda ordem,  $\Phi(-\beta)$  é a probabilidade de falha de primeira ordem ( $Pf$ ),  $\beta$  é o índice de confiabilidade de primeira ordem fornecido pelo FORM,  $k_j$  são as curvaturas principais da superfície de estado limite no ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ),  $n$  é o número de variáveis aleatórias envolvidas na análise e  $\Phi$ , a função cumulativa de probabilidades para a distribuição normal padronizada.

O índice de confiabilidade de segunda ordem ou índice de confiabilidade equivalente é calculado por

$$\beta^{EQ} = -\Phi^{-1}(Pf_1) \quad (9)$$

### 3 | SUPERFÍCIES EM R<sup>3</sup>

Para que o SORM DG efetue a análise de confiabilidade de segunda ordem através da equação de Breitung (Equação 8) é necessário que sejam determinadas as curvaturas principais ( $k_j$ ) da SEL. A seguir está explicado para uma melhor compreensão, como as curvaturas principais num ponto  $p$  de uma superfície em  $R^3$  são calculadas através de geometria diferencial e na Seção 4 é realizada a generalização desse procedimento de cálculo, via geometria diferencial, para as curvaturas principais num ponto  $p$  qualquer de uma superfície em  $R^n$  (hipersuperfície).

#### 3.1 Parametrização de uma superfície regular em $R^3$

O gráfico de uma equação da forma  $F(x, y, z)=0$ , onde  $F$  é uma função diferenciável e suas derivadas parciais não se anulam, simultaneamente, em nenhum ponto  $p$ , tal que  $F(p)=0$ , é um exemplo de uma superfície regular em  $R^3$ . Verifica-se que o gráfico de uma função diferenciável  $f: R^2 \rightarrow R$  é também um exemplo de superfície regular.

De maneira mais geral, um subconjunto  $S$  de  $R^3$  é denominado superfície regular se, para cada ponto  $p \in S$ , existir uma vizinhança aberta  $V \subset R^3$  de  $p$ , um aberto  $U \subset R^2$  e uma bijeção  $\phi: U \rightarrow V \cap S$ , sendo  $\phi$  da forma  $\phi(u,v)=\{x(u,v), y(u,v), z(u,v)\}$ , com as propriedades descritas a seguir (Rodrigues, 2001):

a)  $\phi$  é de classe  $C^\infty$ , ou seja,  $\phi$  tem derivadas parciais contínuas de todas as ordens no ponto  $p$ ;

b)  $\phi$  é um homeomorfismo (ou seja, sua inversa é contínua); e

c) para qualquer ponto  $q \in U$  a matriz Jacobiana de  $\phi$  tem posto dois. A referida matriz ter posto dois, significa que a imagem da transformação linear obtida pela mesma tem dimensão dois, ou ainda, eliminando-se uma linha, convenientemente escolhida, a matriz  $2 \times 2$  resultante tem determinante diferente de zero. A matriz Jacobiana, no caso, tem dimensões  $3 \times 2$ , sendo dada por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Nessas condições, diz-se que  $\phi$  é uma parametrização para  $S$ , conforme ilustrado na Figura 2:

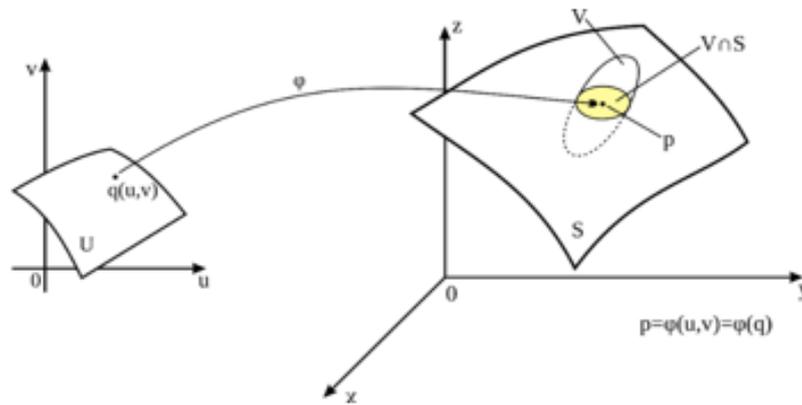


Figura 2 – Parametrização de uma superfície regular

Fonte: Adaptado de Carmo, 2006.

Uma superfície regular  $S \subset \mathbb{R}^3$  é orientável, se e somente se existir um campo diferenciável  $\mathbf{N}: S \rightarrow \mathbb{R}^3$  de vetores normais em  $S$ , segundo Carmo (2006).

### 3.2 Curvaturas de uma superfície em $\mathbb{R}^3$

Sendo  $S$  uma superfície orientável, a aplicação de Gauss é o campo de vetores normais  $\mathbf{N}: S \rightarrow S^2$ , onde  $S^2 \subset \mathbb{R}^3$  é a esfera de raio 1 e centro na origem.  $\mathbf{N}$  é uma aplicação diferenciável e sua derivada  $-DN_p: T_p S \rightarrow T_p S$  é um endomorfismo (ou seja uma transformação linear  $T: U \rightarrow V$ , sendo  $U=V$ ), onde  $T_p S$  é o espaço (plano) tangente à superfície  $S$  no ponto  $p = \phi(u, v)$ . Da definição de derivada (regra da cadeia), destacada por Araújo (1998), tem-se:

$$\mathbf{N}_u = -DN_{\phi(u,v)}(\phi_u) \quad (11)$$

e

$$\mathbf{N}_v = -DN_{\phi(u,v)}(\phi_v) \quad (12)$$

Os vetores  $\mathbf{N}$  e  $\phi_u$  são ortogonais. O mesmo vale para  $\mathbf{N}$  e  $\phi_v$ . Derivando os produtos escalares  $\langle \phi_u, \mathbf{N} \rangle = 0$  e  $\langle \phi_v, \mathbf{N} \rangle = 0$ , conclui-se que  $-DN_p$  é uma aplicação linear auto adjunta de  $T_p S$  em  $T_p S$ . Ainda, de acordo com Araújo (1998), os autovalores  $k_1(p)$  e  $k_2(p)$  do operador linear  $(-DN_p)$  são as curvaturas principais de  $S$  no ponto  $p$  e as direções ortogonais definidas em  $T_p S$  pelos autovalores  $k_1(p)$  e  $k_2(p)$  são denominadas direções principais.

Segundo Gray (2006), o determinante  $K$  de  $-DN_p$  é chamado de curvatura Gaussiana de  $S$  em  $p$ , podendo ser obtida pelo produto das curvaturas principais

$$K = k_1(p) \cdot k_2(p) \quad (13)$$

Esse procedimento é válido também para o caso de uma hipersuperfície, onde

$$K = k_1(p) \cdot k_2(p) \dots k_n(p) \quad (14)$$

passa a ser denominada de curvatura de Gauss-Kronecker, segundo Carmo (2011).

### 3.3 Curvatura normal

Seja  $a:(a,b) \rightarrow S$  uma curva parametrizada pelo comprimento de arco. A curvatura normal de  $a$  em  $a(s)$  é a componente de  $\mathbf{a}''(s)$  segundo a normal a  $S$  nesse ponto e é dada por  $k_n(a,s) = \langle \mathbf{a}''(s), \mathbf{N} \circ a(s) \rangle$  (produto escalar entre  $\mathbf{a}''(s)$  e  $\mathbf{N}$ , com  $\mathbf{N}$  aplicado no ponto  $a(s)$ ) e ilustrada conforme a Figura 3. Se a curva não estiver parametrizada pelo comprimento de arco, a fórmula da curvatura normal passa, de acordo com Rodrigues (2001), a ser:

$$k_n(\alpha, t) = \frac{1}{\|\alpha'(t)\|^2} \langle \alpha''(t), \mathbf{N} \circ \alpha(t) \rangle \quad (15)$$

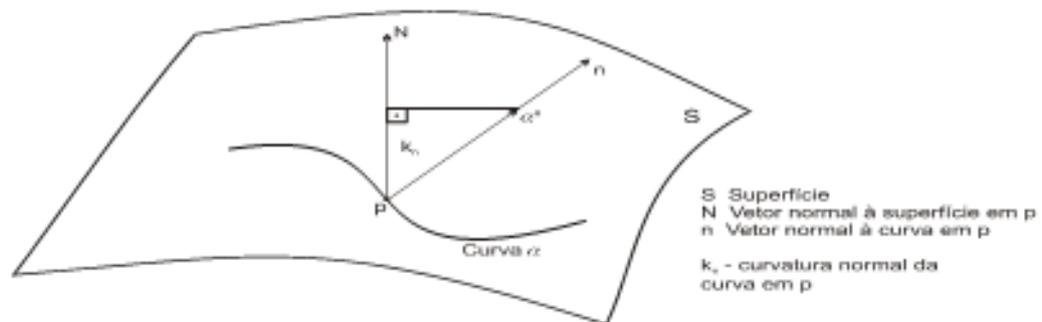


Figura 3 – Curvatura normal no ponto p.

De acordo com Rodrigues (2001), o valor máximo e o valor mínimo das curvaturas normais das seções normais em  $p$  são as curvaturas principais da superfície no ponto  $p$ , conforme ilustrado na Figura 4.

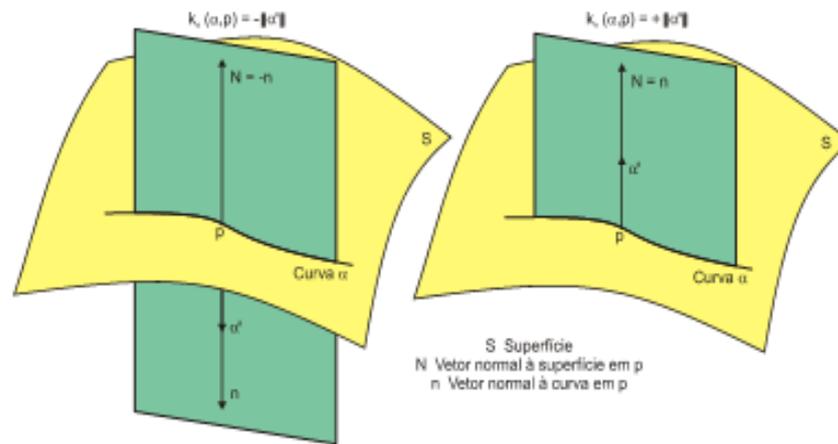


Figura 4 – Curvatura normal quando  $\alpha$  é uma seção normal no ponto  $p$ .

## 4 | SUPERFÍCIES EM $\mathbb{R}^n$

A maioria da literatura sobre geometria diferencial apresenta os coeficientes da 1ª e 2ª forma fundamental para simplificar o cálculo das curvaturas em uma superfície em  $\mathbb{R}^3$  e também para obter outras informações, como por exemplo, a área de uma superfície. Neste trabalho, como o interesse recai sobre a generalização da ideia de superfície (hipersuperfície), tal simplificação pelo uso desses coeficientes não foi possível, tendo em vista a complexidade das operações matemáticas envolvidas no cálculo das curvaturas principais quando  $n > 3$ , por isso na Subseção 3.2 optou-se em utilizar o operador linear  $-DN_p$  (poderia ter sido feita, também, a opção pelo operador linear  $DN_p$ , porém essa questão está esclarecida na Subseção 5.1).

Para facilitar o cálculo do vetor (campo) normal à superfície, esta foi descrita como o gráfico de uma função diferenciável  $f: \mathbb{R}^{n-1} \rightarrow \mathbb{R}$ .

### 4.1 Parametrização da superfície $g(\mathbf{V})=0$

Uma parametrização para a superfície nessa vizinhança pode ser dada por:

$$\varphi_{(p)}(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1}) = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1}, f(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1})] \quad (16)$$

A função  $f(\mathbf{V})$ , com  $\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1}) \in \mathbb{R}^{n-1}$ , é obtida explicitando quaisquer das variáveis  $\mathbf{V}$  da função  $g(\mathbf{V})=0$ , onde  $\mathbf{V} = (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1}, \mathbf{V}_n) \in \mathbb{R}^n$ . Considerando, por exemplo, a explicitação da última variável de  $g(\mathbf{V})=0$  tem-se  $\mathbf{V}_n = f(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{n-1})$ .

### 4.2 Obtenção dos vetores tangentes à superfície $g(\mathbf{V})=0$

Os vetores tangentes, que correspondem às derivadas parciais da Equação 16, são calculados no ponto  $p$  de acordo com

$$\boldsymbol{\varphi}_{v_1}(\mathbf{p}) = (1, 0, \dots, 0, f_{v_1}(\mathbf{p})) = \left(1, 0, \dots, 0, \frac{\partial f(\mathbf{p})}{\partial v_1}\right) \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{v_i}(\mathbf{p}) = (0, \dots, 1, \dots, 0, f_{v_i}(\mathbf{p})) = \left(0, \dots, 1, \dots, 0, \frac{\partial f(\mathbf{p})}{\partial v_i}\right); 1 < i < n - 1 \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{v_{n-1}}(\mathbf{p}) = (0, 0, \dots, 0, 1, f_{v_{n-1}}(\mathbf{p})) = \left(0, 0, \dots, 1, \frac{\partial f(\mathbf{p})}{\partial v_{n-1}}\right) \quad (19)$$

#### 4.3 Obtenção do vetor normal à superfície $g(\mathbf{V})=0$ e de suas derivadas parciais

O vetor normal no ponto  $\mathbf{p}$  é calculado fazendo uma extensão na equação apresentada em Carmo (2006) para esse vetor, isto é

$$\mathbf{N}(\mathbf{p}) = \frac{(-f_{v_1}(\mathbf{p}), -f_{v_2}(\mathbf{p}), \dots, -f_{v_{n-1}}(\mathbf{p}), 1)}{\sqrt{(f_{v_1}(\mathbf{p}))^2 + (f_{v_2}(\mathbf{p}))^2 + \dots + (f_{v_{n-1}}(\mathbf{p}))^2 + 1}} \quad (20)$$

Já as derivadas parciais do vetor normal são obtidas por

$$\mathbf{N}_{v_j}(\mathbf{p}) = \frac{\partial \mathbf{N}(\mathbf{p})}{\partial v_j}, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (21)$$

#### 4.4 Obtenção das curvaturas principais da superfície $g(\mathbf{V})=0$

Efetuada o cálculo do vetor normal e de suas derivadas parciais  $\mathbf{N}_{v_j}$ , basta escrevê-las como uma combinação linear dos vetores  $\boldsymbol{\varphi}_{v_1}, \dots, \boldsymbol{\varphi}_{v_{n-1}}$ , do plano tangente, obtendo a matriz  $(\mathbf{M})$  do operador linear  $-DN_p$ , cujos autovalores são as curvaturas principais. Fazendo uma extensão na equação apresentada por Araújo (1998) para o referido operador linear, tem-se:

$$(-DN_p)(\boldsymbol{\varphi}_{v_j}) = -\mathbf{N}_{v_j}, j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (22)$$

logo:

$$\begin{aligned} -\mathbf{N}_{v_1} &= (-N_{1,1}) \cdot \boldsymbol{\varphi}_{v_1} + \dots + (-N_{1,n-1}) \cdot \boldsymbol{\varphi}_{v_{n-1}} \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (23)$$

$$-\mathbf{N}_{v_{n-1}} = (-N_{n-1,1}) \cdot \boldsymbol{\varphi}_{v_1} + \dots + (-N_{n-1,n-1}) \cdot \boldsymbol{\varphi}_{v_{n-1}}$$

e

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -N_{1,1} & \cdot & \cdot & -N_{1,n-1} \\ -N_{2,1} & -N_{2,2} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -N_{n-1,1} & -N_{n-1,2} & \cdot & -N_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

## 5 | SORM DG

O SORM DG foi proposto como uma alternativa para realizar a análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem por ser mais eficiente que o SORM convencional, sem prejuízo da acurácia, como está demonstrado na Subseção 5.3. Na Subseção 5.1 são feitas considerações sobre a orientação do vetor normal  $\mathbf{N}$  e na Subseção 5.2 está estabelecido o algoritmo para a aplicação desse método.

### 5.1 Orientação do vetor normal à superfície $g(\mathbf{V})=0$

O vetor normal  $\mathbf{N}^*$  calculado através da Equação 20, no ponto  $p=\mathbf{V}^*$ , pelo procedimento matemático supramencionado e que fornece as curvaturas principais da superfície ao SORM DG, deve ter a mesma orientação do vetor  $\alpha^*$ , uma vez que, também, é o vetor normal unitário à SEL no ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ ). Como os métodos de cálculo são distintos é necessário fazer essa verificação, quanto à orientação, para uma correta utilização da equação de Breitung (Equação 8), através do produto interno entre os referidos vetores. Evidentemente, se o produto interno for positivo eles possuirão a mesma orientação e os sinais das curvaturas principais calculadas, via geometria diferencial, deverão ser mantidos (o operador linear  $-\text{DN}_p$  deve ser mantido), caso contrário esses sinais deverão ser trocados (o operador linear  $-\text{DN}_p$  deve ser substituído pelo operador linear  $\text{DN}_p$ ).

### 5.2 Algoritmo para aplicação do SORM DG

- a) Fornecer, via FORM (ou outro método de análise de confiabilidade de primeira ordem), as coordenadas do ponto de projeto ( $\mathbf{V}^*$ );
- b) Generalizar o processo da seguinte maneira:
  - i) Caso o vetor  $\mathbf{U}$  esteja representando variáveis aleatórias Gaussianas, que estejam correlacionadas, deve ser realizada a transformação ortogonal (vide Apêndice B, Seções B.3 e B.4 de Melchers e Beck, 2018) desse vetor, sendo obtido o vetor  $\mathbf{V}$ , cujas variáveis serão normais padrão e estatisticamente independentes;
  - ii) Se o vetor  $\mathbf{U}$  estiver representando variáveis aleatórias não Gaussianas independentes, transformar essas variáveis usando as distribuições normais equivalentes (vide Ditlevsen, 1981);
  - iii) Se o vetor  $\mathbf{U}$  estiver representando variáveis aleatórias não Gaussianas, que estejam correlacionadas, antes de realizar as transformações supramencionadas, (i) e (ii), deve ser realizada a transformação de Nataf (vide Kiureghian e Liu, 1986);

- c) Obter a função  $f(\mathbf{V})$ , com  $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_{n-1}) \in \mathbb{R}^{n-1}$ , explicitando quaisquer das variáveis do vetor  $\mathbf{V}$  da função  $g(\mathbf{V})=0$ , onde  $(V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V_n) \in \mathbb{R}^n$ . Considerando, por exemplo, a explicitação da última variável de  $g(\mathbf{V})=0$  tem-se  $V_n = f(V_1, V_2, \dots, V_{n-1})$ ;
- d) Gerar, na vizinhança de  $p=\mathbf{V}^*$ , a partir da função  $V_n = f(V_1, V_2, \dots, V_{n-1})$ , a parametrização de acordo com a Equação 16;
- e) Calcular as derivadas parciais da parametrização a fim de obter os vetores tangentes à superfície, no ponto  $p = \mathbf{V}^*$ , utilizando as Equações 17, 18 e 19;
- f) Obter o vetor normal à superfície ( $\mathbf{N}^*$ ), no ponto  $p = \mathbf{V}^*$ , de acordo com a Equação 20;
- g) Calcular as derivadas parciais do vetor normal à superfície, no ponto  $p = \mathbf{V}^*$ , através da Equação 21;
- h) Obter, através da Equação 24, os autovalores da matriz ( $\mathbf{M}$ ) do operador linear, tendo em vista que eles são as curvaturas principais da superfície  $g(\mathbf{V})=0$  no ponto  $p = \mathbf{V}^*$ ;
- i) Realizar o produto interno entre  $\mathbf{N}^*$  e  $\alpha^*$ , para garantir que a orientação de  $\mathbf{N}^*$  seja a mesma de  $\alpha^*$ , a fim de que as curvaturas principais da superfície, calculadas no item anterior, sejam aplicadas com a orientação correta na Equação 8;
- j) Efetuar a análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem através da Equação 8.

### 5.3 Eficiência do SORM DG

Analisando o algoritmo apresentado na Subseção 5.2, verifica-se que para o item “e” é necessária a obtenção das derivadas parciais de primeira ordem de  $f(\mathbf{V})$ , já para o item “g” faz-se necessário o cálculo das derivadas parciais de segunda ordem de  $f(\mathbf{V})$ , ou seja, a matriz Hessiana ( $\mathbf{H}$ ) precisa ser calculada. Como os valores das derivadas parciais de primeira ordem de  $f(\mathbf{V})$  foram programados para serem obtidos simultaneamente com os valores calculados dos termos da matriz Hessiana, tem-se que

$$NAF_{\text{SORM DG}} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (25)$$

porque, conforme mencionado no item “c” da Subseção 5.2, a função  $f(\mathbf{V})$  é obtida explicitando uma das variáveis  $\mathbf{V}$  da função  $g(\mathbf{V})=0$ , possuindo assim uma variável a menos que a função  $g(\mathbf{V})=0$ . Portanto, substituindo  $n-1$  no lugar de  $n$  na Equação 7 obtém-se a Equação 25.

## 6 | RESULTADO

### Exemplo

Este exemplo foi analisado por Wu e Wirsching (1987) e utilizado na análise de fadiga de componentes em alta temperatura e baixo número de ciclos de carregamento. A função da SEL é expressa por

$$G(\mathbf{U}) = U_1 - 10^4 \left[ \frac{U_2}{U_3 (U_4 U_6)^{-1.71}} + \frac{1 - U_2}{U_5 (U_4 U_6)^{-1.188}} \right] \quad (26)$$

onde

$$\mathbf{U} = (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6). \quad (27)$$

As características (distribuições de probabilidades e momentos) das variáveis aleatórias (mutuamente independentes), bem como as coordenadas do ponto de projeto e do vetor normal, fornecidas pelo FORM, são mostradas na Tabela 1 e os resultados calculados para as curvaturas principais e para a análise de confiabilidade são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Variável	Distribuição	Média ( $\mu_i$ )	Desvio padrão ( $\sigma_i$ )	$U^*$	$V^*_i$	$\alpha^*$
$U_1$	Lognormal	1.0440	0.31320	0.6892	-1.2680	0.5315
$U_2$	Normal	0.7000	0.07000	0.6545	-0.6504	0.2726
$U_3$	Lognormal	0.2390	0.09560	0.1992	-0.2796	0.1172
$U_4$	Lognormal	1.0110	0.15165	1.1302	0.8219	-0.3445
$U_5$	Lognormal	1.8020	0.72080	0.9815	-1.3844	0.5802
$U_6$	Gumbel	0.0005	0.00008	0.0006	0.9957	-0.4173

Tabela 1 – Características das variáveis aleatórias, coordenadas do ponto de projeto (no espaço U e no espaço V) e coordenadas do vetor normal

Transformação de variáveis para o espaço reduzido:

- Para as variáveis com distribuição Lognormal  $U_i \sim LN(\mu_i, \sigma_i)$ , mostradas na Tabela 1:

$$T: \Phi(V_i) = F_{U_i}(U_i) \Rightarrow V_i = \Phi^{-1}[F_{U_i}(U_i)] = \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln(U_i) - \lambda_i}{\xi_i}\right)\right] \Rightarrow V_i = \frac{\ln(U_i) - \lambda_i}{\xi_i}$$

então

$$U_i = e^{(\xi_i V_i + \lambda_i)} \quad (28)$$

onde

$$\xi_i = \sqrt{\ln\left[1 + \frac{(\sigma_i)^2}{(\mu_i)^2}\right]} \quad (29)$$

e

$$\lambda_i = \ln(\mu_i) - 0.5(\xi_i)^2 \quad (30)$$

- Para a variável com distribuição Normal  $U_i \sim N(\mu_i, \sigma_i)$ , apresentada na Tabela 1:

$$T: \Phi(V_i) = F_{U_i}(U_i) \Rightarrow V_i = \Phi^{-1}[F_{U_i}(U_i)] = \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{U_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)\right] \Rightarrow V_i = \frac{U_i - \mu_i}{\sigma_i} \Rightarrow$$

$$U_i = \sigma_i V_i + \mu_i \quad (31)$$

- Para a variável com distribuição Gumbel  $U_i \sim G(\mu_i, \sigma_i)$ , ilustrada na Tabela 1:

Através do princípio da aproximação da extremidade normal (Ditlevsen, 1981),  $G(\mu_i, \sigma_i) \sim N(\mu_{U_i}^N, \sigma_{U_i}^N)$ , onde  $\mu_{U_i}^N$  e  $\sigma_{U_i}^N$  representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da distribuição normal equivalente para a variável  $U_i$ , sendo calculados como

$$\sigma_{U_i}^N = \frac{\varphi\{\Phi^{-1}(F_{U_i}(U_i^*))\}}{f_{U_i}(U_i^*)} \quad (32)$$

e

$$\mu_{U_i}^N = U_i^* - \sigma_{U_i}^N \Phi^{-1}(F_{U_i}(U_i^*)) \quad (33)$$

onde  $F_{U_i}(\cdot)$  e  $f_{U_i}(\cdot)$  são as funções cumulativa e de densidade de probabilidades originais da variável  $U_i$ ;  $\Phi(\cdot)$  e  $\varphi(\cdot)$  correspondem às funções cumulativa e de densidade de probabilidades da distribuição normal padrão. Através das Equações

32 e 33 os valores de  $\sigma_{U_6}^N = 1.0353$  e  $\mu_{U_6}^N = 4.6999$  são obtidos, logo:

$$U_6 = \sigma_{U_6}^N V_6 + \mu_{U_6}^N = 1.0353 V_6 + 4.6999 \quad (34)$$

Substituindo os valores obtidos nas Equações 28, 31 e 34 na Equação 26:

$$g(\mathbf{V}) = e^{(\xi_1 V_1 + \mu_1)} - 10^4 \left[ \frac{\sigma_2 V_2 + \mu_2}{e^{(\xi_3 V_3 + \mu_3)} (e^{(\xi_4 V_4 + \mu_4)} (1.0353 V_6 + 4.6999))^{-1,71}} + \frac{1 - (\sigma_2 V_2 + \mu_2)}{e^{(\xi_5 V_5 + \mu_5)} (e^{(\xi_4 V_4 + \mu_4)} (1.0353 V_6 + 4.6999))^{-1,188}} \right] \quad (35)$$

Portanto, optando pela explicitação da primeira variável ( $\xi_1$ ) na Equação 35, tem-se:

$$f(\mathbf{V}) = \frac{\ln \left[ 10^4 \left( \frac{\sigma_2 V_2 + \mu_2}{e^{(\xi_3 V_3 + \mu_3)} (e^{(\xi_4 V_4 + \mu_4)} (1.0353 V_6 + 4.6999))^{-1,71}} + \frac{1 - (\sigma_2 V_2 + \mu_2)}{e^{(\xi_5 V_5 + \mu_5)} (e^{(\xi_4 V_4 + \mu_4)} (1.0353 V_6 + 4.6999))^{-1,188}} \right) \right] - \mu_1}{\xi_1} \quad (36)$$

-0.1319
-0.0613
0.0712
0.0514
0.0000

Tabela 2 – Curvaturas principais ( $k_i$ ) via geometria diferencial

	FORM HL- RF Tolerância =10-4	SORM Breitung DG	SORM Convencional Sa- grilo (1994)	SMCS WU e Wirsching (1987)
i	5	-	-	-
$\beta$	2.386	-	-	-
Pf	8.52x10 <sup>-3</sup>	-	-	-
Pf <sub>2</sub>	-	9.72x10 <sup>-3</sup>	9.70x10 <sup>-3</sup>	10.20x10 <sup>-3</sup>
$\beta^{EQ}$	-	2.337	2.338	2.320
NAF	35	15	21	2x10 <sup>5</sup>

Tabela 3 – Resultados calculados na análise de confiabilidade via software MATLAB

Conforme mostrado na Tabela 3, o SORM DG ( $Pf_2 = 9.72 \times 10^{-3}$ ) aproximou o resultado da probabilidade de falha calculado pelo FORM ( $8.52 \times 10^{-3}$ ) em relação ao resultado fornecido pela SMCS ( $10.20 \times 10^{-3}$ ), sem prejuízo de acurácia quando comparado com o SORM convencional (os valores da  $Pf_2$  dos dois métodos estão

muito próximos), demonstrando que as curvaturas principais (vide Tabela 2) calculadas pelo procedimento via geometria diferencial contribuíram para esse fim. Além disso, o SORM DG foi mais eficiente do que SORM convencional, pois apresentou um  $NAF$  menor, como indicado na Tabela 3.

## 7 | CONCLUSÕES

O exemplo de engenharia apresentado neste artigo, cuja função da SEL não é linear, foi analisado para mostrar que o SORM DG realiza a análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem otimizando com relevância os resultados calculados pelo FORM e com maior eficiência que o SORM convencional, sem prejuízo da acurácia, demonstrando a contribuição do procedimento analítico via geometria diferencial, para o cálculo das curvaturas principais num ponto  $p$  (no caso em tela  $p=V^*$ ) de uma hipersuperfície.

O FORM ( $NAF=35$ ) é o mais eficiente, porém limitado em termos de acurácia. A SMC é mais acurada, mas peca pela falta de eficiência ( $NAF=200000$ ), por isso sempre que for viável utilizar o FORM/SORM ( $NAF=35+21=56$ ), haverá aumento de eficiência em relação à SMC. Nesse sentido o FORM/SORM DG ( $NAF=35+15=50$ ), contribui para aumentar ainda mais a eficiência em relação à SMC. Para superfícies de estado limite, que possuam funções não lineares e com muitas variáveis aleatórias (situação muito frequente nos problemas reais de engenharia) envolvidas na análise, o consumo computacional costuma ser relevante, por isso a busca pela eficiência na análise de confiabilidade estrutural é bastante requisitada.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, P. V. **Geometria diferencial**. Rio de Janeiro: IMPA, 1998. (Coleção Matemática Universitária).

CARMO, M. P. **Geometria diferencial de curvas e superfícies**. Rio de Janeiro: SBM, 2006. (Textos Universitários).

CARMO, M. P., Flaherty F. **Riemannian geometry**. Boston: Birkhauser, 2011.

CHAN, C. L., LOW, B. K. **Practical second-order reliability analysis applied to foundation engineering**. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 36, n. 11, p. 1387-1409, 2012.

CHO, S. E. **Probabilistic stability analyses of slopes using the ANN-based response surface**. Computers and Geotechnics, v. 36, n. 5, p. 787-797, 2009.

DITLEVSEN, O. **Principle of normal tail approximation**. Journal of Engineering Mechanics, v. 107, n. EM6, p. 1191-1208, 1981.

DITLEVSEN, O., MADSEN, H. O. **Structural reliability methods: coastal, maritime and structural engineering**. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, 2007.

DU, X. **Probabilistic engineering design**. Rolla: University of Missouri, 2005.

- GRAY, A. **Modern differential geometry of curves and surfaces with mathematic**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- KIUREGHIAN, A. D., LIU, P. L. **Structural reliability under incomplete probability information**. Journal of Engineering Mechanics, v. 112, n. 1, 1986.
- LEE, H. H. **Programming and engineering computing with MATLAB 2018**. USA: SDC Publications, 2018.
- LU, Q., LOW, B. K. **Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM**. Computers and Geotechnics, v. 38, n. 8, p. 1008-1021, 2011.
- LU, Q., SUN, H-Y., LOW, B. K. **Reliability analysis of ground–support interaction in circular tunnels using the response surface method**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 48, n. 8, p. 1329-1343, 2011.
- LU, Q., CHAN, C. L., LOW, B. K. **Probabilistic evaluation of ground-support interaction for deep rock excavation using artificial neural network and uniform design**. Tunnelling And Underground Space Technology, v. 32, p. 1-18, 2012.
- MADSEN, H. O., KRENK, S., LIND, N. C. **Methods of structural safety**. New Jersey: Prentice Hall, Englewoods Cliffs, 2006.
- MELCHERS, R. E., BECK, A. T. **Structural reliability: analysis and prediction**. New York: Jon Willey & Sons, 2018.
- RODRIGUES, P. R. **Introdução às curvas e superfícies**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2001.
- SAGRILO, L. V. S. **Análise de confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM**. Tese de doutorado. Programa de engenharia civil, COPPE/UFRJ, 1994.
- WU, Y. T.; WIRSCHING, P. H. **New algorithm for structural for reliability estimation**. Journal of Engineering Mechanics (ASME), v.117, n. 9, p. 1319-1339, 1987.
- ZENG, P., JIMENEZ, R. **An approximation to the reliability of series geotechnical systems using a linearization approach**. Computers and Geotechnics, v. 62, p. 304-309, 2014.
- ZENG, P., JIMENEZ, R., JURADO-PIÑA, R. **System reliability analysis of layered soil slopes using fully specified slip surfaces and genetic algorithms**. Engineering Geology, v. 193, n. 2, p. 106-117, 2015.
- ZENG, P., JIMENEZ, R., LI, T. **An efficient quasi-Newton approximation- based SORM to estimate the reliability of geotechnical problems**. Computers and Geotechnics, v. 76, p. 33-42, 2016.
- ZENG, P., LI, T., JIMENEZ, R., FENG, X., CHEN, Y. **Extension of quasi-Newton approximation-based SORM for series system reliability analysis of geotechnical problems**. Engineering with Computers, v. 34, p. 215-224, 2017.

## PROPOSTA DE INTERVENÇÃO PARA CRIAÇÃO DA ZONA DE SEGURANÇA HÍDRICA DO MUNICÍPIO DE CUIABÁ, MATO GROSSO

### **Ibraim Fantin-Cruz**

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMT)

### **Maria Ivoneide Vital Rodrigues**

Secretaria de Educação do Estado do Ceará (SEDUC)

### **Leandro Obadowiski Bruno**

Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT)

### **Marcel Medinas de Campos**

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (UFMT)

**RESUMO:** A segurança hídrica tem sido uma tarefa árdua para os governantes atuais, que tem como objetivo assegurar a população o acesso a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável com a finalidade de sustentar a saúde humana e a saúde dos ecossistemas. O Brasil, o Estado de Mato Grosso e o Município de Cuiabá possuem legislações importantes e eficazes com diretrizes voltadas à gestão dos recursos hídricos, mas se tornam inconsistentes, uma vez que, até o momento, poucas ações foram colocadas em prática, em termos da implementação de políticas públicas eficazes, da participação integrada do Poder Público junto com os usuários e a comunidade no planejamento das ações, para garantir o uso múltiplo das águas. Assim, este trabalho

tem como objetivo propor uma intervenção para a criação da Zona de Segurança Hídrica de Cuiabá, que tem como finalidade garantir a quantidade e a qualidade da água bruta em mananciais que atendem aos sistemas de captação de água potável para a população. Para isso realizou-se um diagnóstico sobre os principais problemas e existentes na bacia e a proposição de estudos e medidas de intervenção e gestão para garantir a disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade dos mananciais que atendem ao abastecimento urbano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Crise Hídrica; Gestão integrada; Segurança Hídrica; Qualidade da Água.

**ABSTRACT:** Water security has been an arduous task for current rulers, whose purpose is to ensure the population access to adequate quantities of water of acceptable quality for the purpose of sustaining human health and ecosystem health. Brazil, the State of Mato Grosso and the Municipality of Cuiabá have important and effective legislation with guidelines for water resources management, but they are inconsistent, since so far, few actions have been put into practice in terms of implementation of effective public policies, the integrated participation of the Public Power with the users and the community in the planning of actions, to guarantee the multiple use of water.

The objective of this study is to propose an intervention for the creation of the Water Security Zone of Cuiabá, whose purpose is to guarantee the quantity and quality of raw water in springs that serve the potable water abstraction systems for the population. For this, a diagnosis was made on the main problems and existing in the basin and the proposal of studies and measures of intervention and management to guarantee the water availability in quantity and quality of the sources that serve the urban supply.

**KEYWORDS:** Water crisis. Integrated management. Water Security. Water quality.

## 1 | INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas ambientais enfrentados atualmente pelas cidades é a denominada Crise Hídrica, que tem atingido diversas regiões do Brasil, como demonstrado por Marengo et al. (2015); Bezerra; Bezerra (2016); Tavares et al. (2017), entre outros. Esses autores argumentam que, além da chuva, outros fatores podem levar à redução da disponibilidade hídrica em uma região, como o aumento efetivo do consumo e desperdício de água pela população, a alteração do uso do solo nas áreas de preservação permanente, a erosão e o assoreamento dos cursos d'água, a falta de planejamento e a má gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, as áreas onde estão localizados os mananciais de abastecimento público devem ter atenção especial no que tange os usos da bacia, bem como o estabelecimento de medidas protetivas que garantam os serviços ambientais por ela oferecidas.

Para isso, é necessária a implantação de um planejamento de recursos hídricos integrado ao uso e ocupação do solo, principalmente em ambiente urbano, que se constitua como um instrumento fundamental para o gerenciamento da água e da bacia hidrográfica em forma de zoneamento hídrico, uma vez que se possa induzir ou restringir o uso e ocupação do solo e a implantação de planos de desenvolvimento econômico em sua área de abrangência, pelo disciplinamento e controle do acesso e uso da água (LEAL 2012; SANTOS 2016). Que essas ações garantam a disponibilidade hídrica para o atendimento do abastecimento urbano, em quantidade suficiente e em qualidade adequada ao consumo humano, para a produção, para o lazer e para a manutenção de valores sociais tangíveis, como a igualdade de direitos de acesso, e intangíveis, como a paisagem e a cultura (ONU 2017).

Sendo assim, fazem-se necessárias as adoções de instrumentos que integrem a gestão dos recursos hídricos com o planejamento local, tendo em vista que, no Brasil, a gestão de recursos hídricos é de competência dos Estados e da União, enquanto que a gestão do uso e ocupação do solo é dos Municípios. Desta maneira, os Planos de Bacia estabelecem as diretrizes para a gestão hídrica em âmbito regional, os municípios definem as suas políticas urbanas, que geram impactos ambientais positivos e negativos de diversas magnitudes sobre os recursos hídricos em âmbito local/municipal, por meio de seu ordenamento territorial e dos usos do solo (PIZELLA 2015). Assim, demonstra-se que os municípios possuem uma grande responsabilidade

na proteção dos recursos hídricos e, sem seu apoio, não é possível integrar a gestão territorial e hídrica em âmbito de bacia hidrográfica e de modo a garantir a segurança hídrica para o abastecimento público das cidades.

Por fim, este estudo adotou o conceito de Melo (2016) para a segurança hídrica do abastecimento urbano como a garantia de provimento de quantidade e qualidade de água bruta suficiente para o fornecimento público, associado a um determinado risco de escassez, tendo como referencial a bacia hidrográfica. Desta forma, este autor amplia a perspectiva da avaliação do abastecimento para a escala da bacia hidrográfica, que possui outros usuários a montante e a jusante da captação para distribuição urbana de água e diversos usos múltiplos a serem garantidos, inclusive demandas ambientais.

## 2 | OBJETIVOS

Elaborar uma proposta de intervenção para a Criação da Zona de Segurança Hídrica de Cuiabá, a fim de proteger os mananciais que atendem aos sistemas de abastecimento público, conforme preconiza a Lei Complementar Municipal de Cuiabá nº 389, de Novembro de 2015, ampliando seu conceito e abrangência para a bacia hidrográfica.

## 3 | METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em três níveis de levantamento bibliográfico, organizados da seguinte forma:

O primeiro nível foi a realização de pesquisa bibliográfica, cuja reuniu a informação necessária à compreensão do conceito Segurança Hídrica, que permitisse estabelecer um marco referencial, baseando-se em organismos internacionais de ações amplas e específicas em água. Esta base permitiu a construção do modelo proposto neste trabalho, o qual avalia a ação de estressores na bacia, no manancial de abastecimento, seu padrão de comportamento, efeitos e severidade dos impactos causados.

O segundo nível consistiu-se no levantamento indireto de dados da cidade de Cuiabá, com o intuito de reunir as informações necessárias para a avaliação da Segurança Hídrica do município, identificando os principais estressores da bacia. As informações foram obtidas a partir de documentos acadêmicos e técnicos, como também de material disponibilizado pelo município, órgãos e instituições públicas, como a Concessionária de Água e Esgoto da Capital (Águas Cuiabá), Secretaria de Estado e Meio Ambiente (SEMA) e Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

No terceiro nível, foram realizadas pesquisas em normas, resoluções e leis, sejam elas municipais, estaduais ou federais, que tratem ou regulamentem os agentes estressores identificados na bacia. Também foram feitas buscas de editais ou parcerias que tenham o potencial de oferecer orçamento para o desenvolvimento da proposta.

## 4 | REFERENCIAL TEÓRICO

A Segurança Hídrica é uma temática que tem se destacado na área de recursos hídricos nos últimos anos, uma vez que conflitos gerados pelo uso da água e a ocorrência de desastres naturais vem se tornando cada vez mais frequentes. O tema ganhou repercussão internacional com o pronunciamento intergovernamental sobre a segurança hídrica na Declaração Ministerial do 2º Fórum Mundial da Água, em 2000 (MDH, 2000), que resultou em duas importantes contribuições. A primeira foi a definição de segurança hídrica, que foi conceituada como “garantia de que ecossistemas de água doce, costeira e outros relacionados sejam protegidos e melhorados, que o desenvolvimento sustentável e a estabilidade política sejam promovidos, que cada pessoa tenha acesso à água potável suficiente a um custo acessível para levar uma vida saudável e produtiva, e que a população vulnerável seja protegida contra os riscos relacionados à água”.

A segunda contribuição foi a lista com os setes principais desafios para a obtenção da segurança hídrica, sendo estes: Satisfação das necessidades básicas; Garantia do abastecimento de alimentos; Proteção aos ecossistemas; Compartilhamento de recursos hídricos; Gerenciamento de riscos; Valorização da água; e Controle racional da água.

Posteriormente, o Programa Hidrológico Internacional da UNESCO (2012) revisitou o termo Segurança Hídrica e definiu a capacidade de assegurar a uma população o acesso a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável, com a finalidade de sustentar a saúde humana e a saúde dos ecossistemas, em uma bacia hidrográfica, e também assegurar proteção eficiente da vida e da propriedade contra desastres relacionados a recursos hídricos (secas, enchentes, deslizamentos, afundamento de solos).

No Brasil, a Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL 1997), que criou a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), trouxe implicitamente em seu escopo diversos pontos inerentes à segurança hídrica, onde se pode destacar, entre seus fundamentos e objetivos, a garantia de que, em situação de escassez, o consumo humano e a dessedentação de animais terá prioridade sobre os outros usos; a garantia de que a atual e as futuras gerações terão assegurada a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a garantia de ações de prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais; e a garantia de ações que incentivem e promovam a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.

No entanto, o tema passou a ser abordado explicitamente a partir do ano de 2012, quando, das discussões sobre a elaboração do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), que culminou em 2014 na publicação do Termo de Referência, se estabeleceu critérios, seleção e detalhamento de intervenções estratégicas para a

elaboração deste plano (ANA, 2014). O PNSH tem como objetivo definir as principais intervenções estruturantes e estratégicas na gestão dos recursos hídricos, visando garantir a oferta de água para o abastecimento humano e para o uso em atividades produtivas e reduzir os riscos associados a eventos críticos. Para isso, o território brasileiro foi dividido em sete Grupos de Estados, numerados de I a VII, e classificados em três níveis de prioridade de execução dos trabalhos (A a C). Vale destacar na classificação do PNSH a região Centro-Oeste e seus respectivos estados, que se encontram na última posição em prioridade por não terem nenhuma bacia considerada crítica.

No ano de 2017, o tema voltou a ganhar ampla repercussão, uma vez que a Agência Nacional de Águas elaborou o Projeto Legado para a Gestão das Águas, que visa estabelecer uma agenda política para melhoria da gestão de águas no país. Neste documento, foram identificadas e detalhadas 20 propostas para o aperfeiçoamento dos marcos constitucional, legal e infralegal da gestão de águas no Brasil, entre elas está a necessidade de incorporar o conceito de segurança hídrica (ANA, 2017). Estas propostas foram apresentadas e discutidas no 8º Fórum Mundial da Água, ocorrido em Brasília, em março de 2018 (ANA, 2018).

No estado de Mato Grosso, a segurança hídrica também foi tratada implicitamente na Lei Estadual nº 6.945, de 05 de novembro de 1997 (MATO GROSSO 1997), que criou a Política Estadual de Recursos Hídricos. No Art. 35 desta Lei, são previstas diversas ações consideradas de Segurança Hídrica, como: (i) a instituição de áreas de proteção e conservação das águas utilizáveis para o abastecimento das populações; (ii) a conservação, a recuperação e a implantação de matas ciliares; (iii) o zoneamento do uso do solo em áreas de recarga de mananciais superficiais e subterrâneos; (iv) o zoneamento de áreas inundáveis, restringindo os usos incompatíveis nas áreas sujeitas a inundações frequentes; (v) implantação de sistemas de alerta, através da Defesa Civil, para garantir a segurança e saúde pública quando ocorrem eventos hidrológicos e/ou meteorológicos impactantes; (vi) prevenção da inundações, das secas e das erosões; (vii) o tratamento das águas residuárias, em especial dos esgotos urbanos e industriais.

No município de Cuiabá, o tema foi tratado diretamente, pela Lei Complementar Municipal nº 389 de novembro de 2015, que em seu artigo 80º prevê áreas definidas como Zona de Segurança Hídrica do Município (CUIABÁ, 2015). Este artigo define as ZSH como áreas a montante e no entorno das instalações de captação de água bruta para tratamento e distribuição ao consumo humano, bem como a continuidade dos cursos hídricos. Apesar desta Lei abranger todas as captações, diagnóstico realizado no Plano Municipal de Saneamento de Cuiabá (PMSB, 2011), juntamente com outras pesquisas (ALVEZ 2009; RODRIGUES 2013; SILVA 2015; RIBEIRO 2016; MATTOS 2018) indicaram que a bacia do rio Coxipó encontra-se em situação mais crítica e, por isso, é a mais vulnerável à ocorrência de crises hídricas que possam comprometer o abastecimento público por água potável.

Baseado nestas evidências, a área de abrangência deste estudo compreende a Bacia do rio Coxipó, que atende ao Sistema Tijucal e por sua vez apresenta uma capacidade de produção de 1100 l/s e atende de 27% da população da capital (CUIABÁ 2011). Vale destacar que além do Sistema Tijucal, a zona urbana de Cuiabá possui o Sistema Ribeirão do Lipa, com capacidade de produção de 1250 l/s e atendimento de 65% da população e o Sistema Cophema, com produção de 190 l/s e atendimento de 8% da população, em ambos a captação é feita no rio Cuiabá (CUIABÁ 2011).

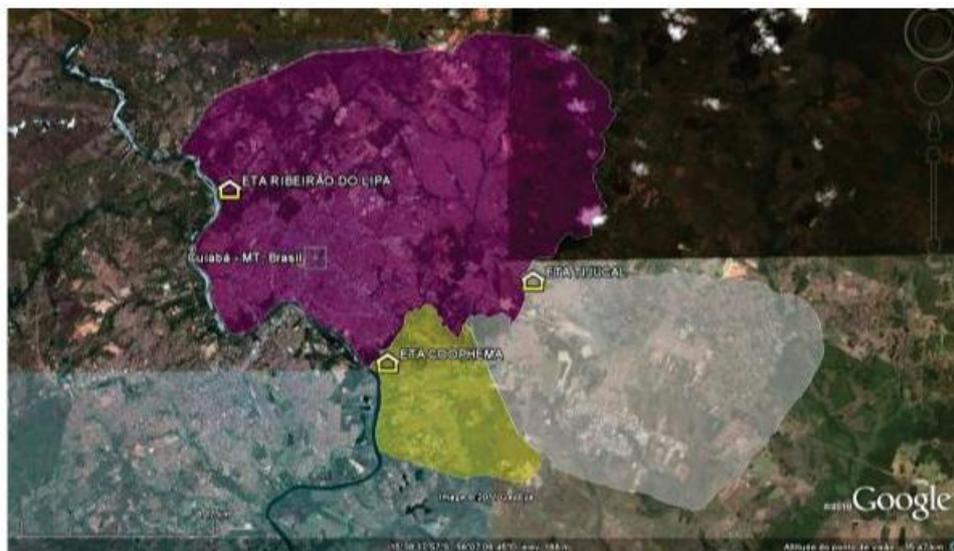


Figura 1- Sistemas de Captação e Tratamento de Água de Cuiabá.

Fonte: Plano Municipal de Saneamento de Cuiabá (CUIABÁ, 2011).

## 5 | DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Coxipó possui área de drenagem de aproximadamente 688 km<sup>2</sup> e abrange os municípios de Chapada dos Guimarães e Cuiabá. Tem sua nascente na Área de Proteção Ambiental de Chapada dos Guimarães (APA) e o Parque Nacional de Chapada Dos Guimarães (PARN), próxima da estrada que vai para a localidade de Água Fria, com altitude aproximada de 868 metros, a noroeste da cidade de Chapada dos Guimarães (Figura 2). A bacia possui uma baixa suscetibilidade a enchentes, uma vez que o coeficiente de compacidade observado foi de 2,33, e o de forma de 0,073. A hierarquização do sistema da drenagem mostrou que o rio Coxipó em seu exutório é de 5ª ordem. Outro fator quem também pode indicar o potencial de uma bacia para inundação é a densidade de drenagem, que, neste estudo, foi de 0,83 km/km<sup>2</sup>, o que indica uma drenagem regular, representando uma resposta lenta da bacia a uma precipitação.

O rio Coxipó tem como seus principais afluentes na margem esquerda os Córregos Coxipó Mirim, Castelhana e Tijuca, e, à margem direita, os rios Claro, Paciência, Salgadeira, Mutuca, Peixes e os córregos do Piçarão, do Doutor, Pirapora, Urumbanda, Ribeirão da Ponte, Moinho e Urubu (ALVES 2009). Destes, os córregos

do Moinho e Castelhana estão em trecho urbano. A bacia ocupa cerca de 21,70% da área urbana do município de Cuiabá, compreendendo 54 bairros e uma população estimada de 117.300 habitantes (RODRIGUES 2013).

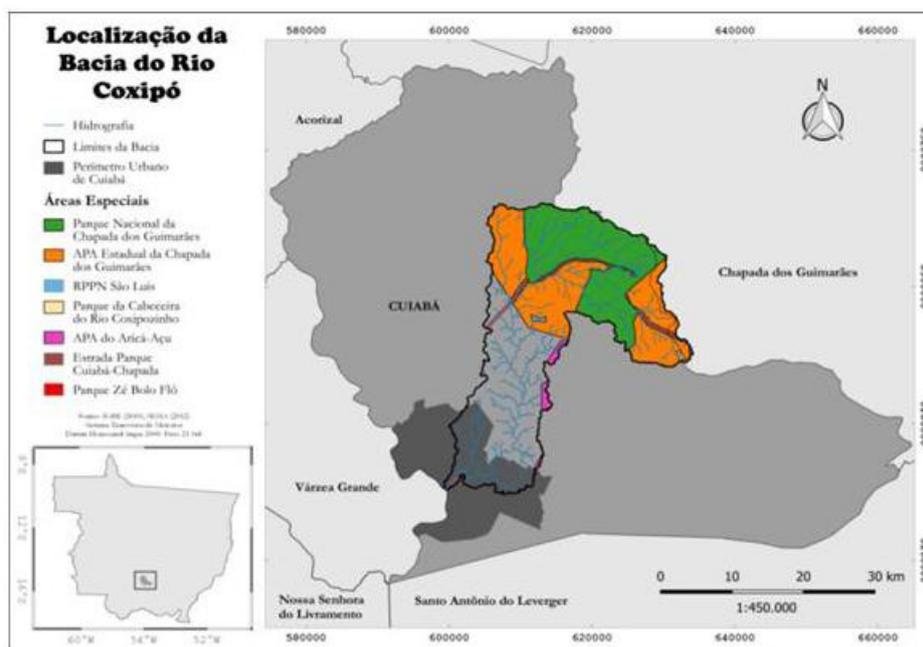


Figura 2- Localização da bacia do rio Coxipó, perímetro urbano do município de Cuiabá e unidades de conservação.

## 6 | IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Entre os três sistemas de captação e tratamento de água, o Sistema Tijucal é o mais vulnerável, principalmente no aspecto qualitativo. Estudos realizados na bacia do Rio Coxipó, que avaliaram o Índice de Qualidade da Água (IQA), mostraram que a qualidade da água na zona urbana, parte baixa da bacia, está comprometida, principalmente no período de estiagem, quando 67% das amostras de água foram classificadas como ruim e 35% como razoável (Figura 3a). No período chuvoso, a qualidade apresenta uma pequena melhora, com 58% das amostras classificadas como ruim e 42% como boa (Figura 3a). Já, na zona rural da bacia, parte alta e média da bacia, a qualidade da água está aceitável, uma vez que as amostras de água foram classificadas como razoável (48 e 50%) e boa (48 e 50%), em ambos os períodos hidrológicos (Figura 3b). Além disso, segundo Alves (2009), a água do rio Coxipó na zona urbana de Cuiabá é imprópria para balneabilidade, com Coliformes Termotolerantes acima de 2500 NMP/100mL e *Escherichia coli* acima de 2000 NMP/100mL, nos dois períodos hidrológicos.

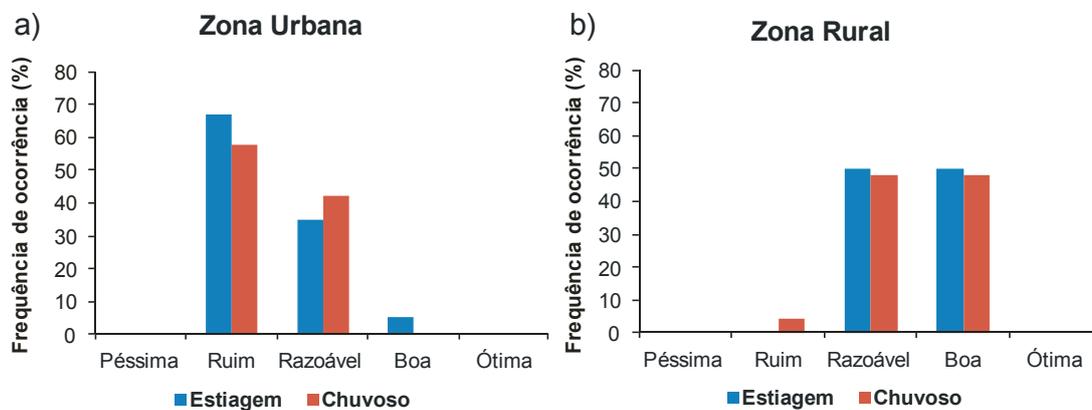


Figura 3- Índice de Qualidade de Água (IQA) da bacia do Rio Coxipó nas Zonas Urbana (a) e Rural (b), nos períodos de estiagem e chuvoso. A amostragem foi realizada no período entre os anos de 2009 e 2015, no total de 177 amostras, sendo 118 realizadas na zona urbana e 59 na zona rural.

Fonte: Compilação de ALVEZ (2009), RODRIGUES (2013) E SILVA (2015).

A deterioração da qualidade da água no rio Coxipó pode ser atribuída a três fatores: ao lançamento de efluentes urbanos e de piscicultura; e a ausência de práticas conservacionista de proteção do solo.

Considerando apenas os lançamentos de efluentes outorgados pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA, 2016), a bacia possui dez outorgas, todas elas tendo como finalidade o esgotamento sanitário de condomínios residenciais e rede pública (Figura 4). Essas outorgas indisponibilizam uma vazão de  $0,74\text{m}^3/\text{s}$ , que corresponde apenas a 15% da vazão de referência (Q95) no exutório da bacia, que é de  $4,78\text{ m}^3/\text{s}$ , segundo Rodrigues (2013). Porém, de todo o efluente gerado na bacia, apenas 10% é coletado e devidamente tratado (CUIABÁ, 2011), o restante é lançado diretamente em córregos e galerias pluviais. Levantamento realizado por Silva (2015) identificou 22 pontos de lançamentos de efluentes apenas no rio Coxipó, ou seja, considerando apenas esse rio, 50% dos lançamentos são irregulares. Além disso, a Prefeitura de Cuiabá, através do Decreto Municipal nº 5621, de 04 de novembro de 2014 (CUIABÁ 2014), revogado pelo Decreto Municipal Nº 6714 de 03 setembro de 2018 (CUIABÁ 2018), poderá autorizar o lançamento de efluente tratado em galerias de águas pluviais, em locais onde não houver rede coletora de esgoto, desde que obedçam às condições, padrões e exigências dispostos nas Resoluções específicas sobre o tema (CONAMA 357:2005 e CONAMA 430:2011). Esta regulamentação vem contribuindo para a degradação da qualidade da água dos córregos urbanos, que são afluentes diretos do rio Coxipó.

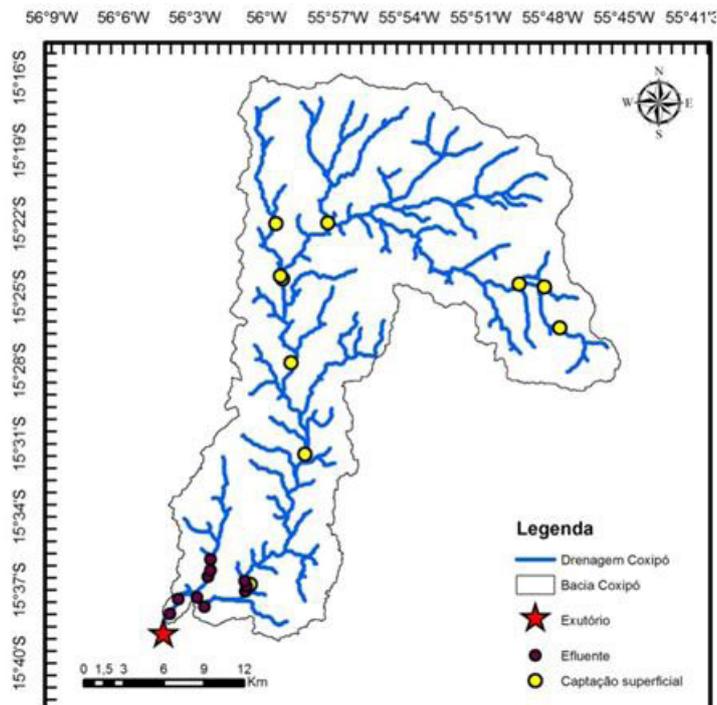


Figura 4: Outorgas de usos da água na bacia do rio Coxipó.

Fonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (2016).

Demais atividades na bacia, como pocilgas, pisciculturas, extração mineral de pequeno porte, dentre outras, também são fontes de nutrientes para os rios. Essas atividades, por serem de pequeno porte, não estão outorgadas e, portanto, não foram quantificadas, mas no conjunto constituem importantes fontes de nutrientes para o rio. Nas bacias dos rios Coxipó e Cuiabá, a expansão da atividade de piscicultura tem gerado discussões sobre seus efeitos sobre a qualidade da água, principalmente para os sistemas de abastecimento público. Levantamento realizado por Silva (2007), até o ano de 2004, quantificou 815 empreendimentos piscícolas na região metropolitana de Cuiabá. Em 2016, esse número passou para 1695 empreendimentos, que, na sua maioria, estão localizadas às margens dos rios, incluindo áreas de preservação permanente (SIQUEIRA et al. 2017).

Os viveiros de peixes são ambientes favoráveis para a eutrofização, uma vez que apresenta elevado tempo de residência da água, e de matéria orgânica alóctone e autóctone, formada pelas sobras de alimentos e pelas fezes dos animais (CYRINO et al., 2010). Esses fatores criam condições favoráveis para o desenvolvimento de altas densidades de algas, formando florações que se tornam um problema de saúde pública quando essas são formadas por cianobactérias potencialmente tóxicas (COSTA et al., 2017). O principal impacto da piscicultura intensiva está na geração de efluentes ricos em nitrogênio, fósforo e altas densidades de cianobactérias, que são lançados nos corpos de água ao final dos ciclos de cultivos. Estudos realizados na região demonstraram que viveiros de piscicultura podem gerar uma carga orgânica de efluente de até 259,3 kg/dia de DBO (SILVA, 2007), com densidades de cianobactérias

superiores a 8.000.000 cel/ml (COSTA et al., 2017). As consequências desta atividade já estão sendo refletidas na qualidade das águas utilizadas para abastecimento em Cuiabá. Um levantamento realizado por Siqueira et al. (2017) constatou o aumento da ocorrência de densidades superiores a 20.000 cel/ml no rio Cuiabá, próximo aos locais de captação de água para abastecimento público. Segundo esses autores, entre os anos de 2012 e 2014 não foram registrados eventos com densidades superiores a 20.000 cel/ml, passando para uma frequência de ocorrência de 28 e 22% das amostras de água, nos anos de 2015 e 2016. Esse valor é definido pela Portaria de Consolidação nº 05/2017, do Ministério de Saúde, como nível de alerta, sendo necessária para este caso a realização de análises de cianotoxinas no corpo de água (BRASIL 2017).

Além destes fatores, os acelerados processos de urbanização e de crescimento populacional alteram severamente a paisagem, marcada por diferentes intervenções no meio físico, que, em regiões litologicamente vulneráveis, podem desencadear grave degradação ambiental. Feições erosivas decorrentes da má gestão do uso do solo e da falta de planejamento urbano provocam impactos ambientais pela produção de sedimentos que podem comprometer, não só a qualidade de água durante o período chuvoso, mas, também, causar assoreamento e o aumento da ocorrência de enchentes.

Os efeitos da urbanização sobre os recursos hídricos podem ser observados em toda a área urbana de Cuiabá, porém, a situação é mais crítica na região que compõe a Bacia do rio Coxipó. A partir de 2010, ações governamentais e privadas vêm promovendo um acelerado adensamento populacional nessa bacia com a implantação de seis conjuntos habitacionais, os quais estão em fase de finalização, e mais dois em fase de projeto, que preveem a adição de mais 3.500 unidades habitacionais (RIBEIRO, 2016). O desmatamento das áreas de implantação e falhas no planejamento e execução de serviços de terraplenagem têm implicado em generalizada e intensa ação de processos erosivos, que, segundo Ribeiro (2016), estão provocando alterações nos parâmetros de cor e turbidez da água bruta, ocasionando paralisações constantes da captação no período chuvoso, com prejuízos ao abastecimento da população atendida pelo Sistema Tijucal. Esses efeitos foram comprovados por Mattos (2018), que mostrou que os valores máximos mensais de turbidez no rio Coxipó, no ponto de captação para o Sistema Tijucal, têm aumentado gradativamente nos últimos anos. A partir de 2013, foram registrados picos superiores a 4000NTU, chegando a 10000NTU em 2016 (Figura 5).



Figura 5 - Evolução dos valores máximos mensais da turbidez no rio Coxipó, no ponto de captação de água para o Sistema Tijucal.

Fonte: MATTOS, 2018.

A alta produção de sedimentos na bacia do Coxipó também está associada às suas características naturais, segundo Maranholi et al. (2016). Essa bacia possui 40% de sua área classificada como vulnerável por apresentar propensão a processos erosivos, devido a fragilidade do solo e relevo (Figura 6). Esses autores também mencionam que uma característica importante da pedologia local é a presença de solos ferruginosos, os quais dificultam a penetração da água de chuva e, até mesmo, a penetração de raízes, podendo, às vezes, impedir ou dificultar o desenvolvimento de uma vegetação mais densa. Além disso, várias nascentes dos cursos d'água, inclusive do principal (rio Coxipó), estão localizadas na área vulnerável, fato este que compromete qualquer tipo de ação que não seja devidamente planejada.

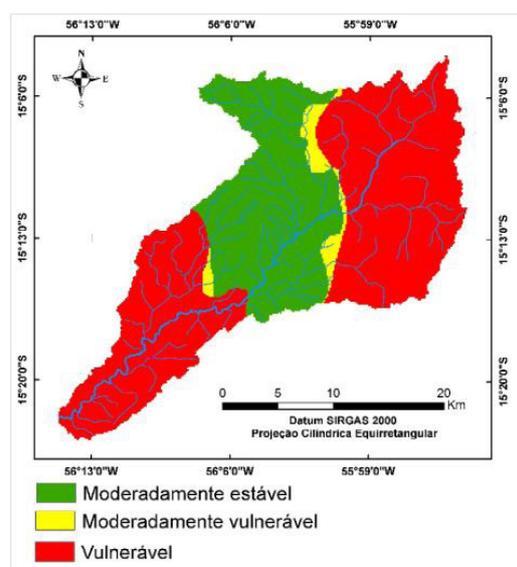


Figura 6 - Vulnerabilidade natural da bacia do rio Coxipó.

Fonte: MARANHOLI et al., 2016.

## 7 | AÇÕES DE INTERVENÇÃO

### 7.1 Proteção da bacia

A proteção dos mananciais e de sua bacia contribuinte é determinante para a sustentabilidade do abastecimento urbano, de médio e longo prazo, e dos demais usos múltiplos de água. A conservação da bacia tem relação direta com sua cobertura vegetal, sendo garantida por lei a proteção de nascentes, olhos d'água, vegetação ciliar, áreas úmidas, encostas e topos de morros (BRASIL, 2012).

Além das feições especificadas em lei, existem outras também relevantes para a sustentabilidade do ciclo hidrológico terrestre, como, por exemplo, as zonas de recarga de aquíferos e com alto potencial de produção de sedimentos.

As zonas de recarga de aquíferos são áreas geográficas que, devido à natureza do solo, às formações geológicas aflorantes e subjacentes e à morfologia do terreno, apresentam condições favoráveis à ocorrência de infiltração e recarga natural dos aquíferos, revestindo-se de particular interesse na salvaguarda da quantidade e qualidade da água, a fim de prevenir ou evitar a sua escassez ou deterioração (LOPES 2014).

Do mesmo modo, áreas com alto potencial em produção de sedimentos, quando sofrem modificação de sua cobertura vegetal, seja ela urbana (construções, limpeza e terraplanagem de terrenos para loteamentos, construção de ruas, avenidas e rodovias) ou rural (substituição de vegetação nativa), aceleram o processo de produção e transporte de sedimentos, o que contribui para a degradação dessas áreas, aumenta a carga sólida sedimentar nos cursos hídricos, provocando o assoreamento e o comprometimento do atendimento do abastecimento (TUCCI; COLLISCHONN, 2000).

Sendo assim, a primeira etapa para uma ação de intervenção é a identificação e mapeamento destas feições, em escala compatível com sua ocorrência. A exemplo das nascentes, onde é necessária a realização de buscas ativas em campo para identificar sua ocorrência e características (FELIPPE, 2013). Para os usos em feições onde restrições não são determinadas por lei, é necessário definir quais usos são compatíveis com cada feição e quais são as condicionantes que permitem o seu uso.

As discussões sobre as formas de usos das áreas identificadas como de segurança hídrica devem ser pautadas por embasamento técnico científico, mas precisam contar com amplo debate e participação social, seja dentro de órgãos colegiados (Conselho Municipal de Meio Ambiente de Cuiabá e Chapada dos Guimarães, Conselhos Estaduais de Meio Ambiente e Recursos Hídricos e no Comitê de Bacia dos Afluentes da Margem Esquerda do rio Cuiabá), bem como em forma de audiências públicas.

## 7.2 Infraestrutura

A variabilidade no volume de água disponível é um dos grandes desafios para a segurança hídrica. A realização de obras de infraestrutura, especialmente barragens, busca minimizar a variabilidade e aumentar a disponibilidade para o abastecimento. No entanto, dentro de um horizonte de planejamento de 35 anos, não há necessidade de obras estruturantes com esta finalidade, caso seja mantida e ampliada a conservação da bacia (CUIABÁ, 2011).

## 7.3 Controle de poluição

A coleta e o tratamento de esgoto são os principais fatores para melhoria da qualidade das águas em áreas urbanas, porém, outras fontes decorrentes da própria drenagem urbana, como demais atividades de uso e ocupação do solo e práticas agrícolas na bacia de contribuição, devem ser consideradas no controle da poluição.

Como anteriormente abordado, em Cuiabá o que tem comprometido a qualidade das águas é lei que autoriza o lançamento de esgoto tratado nas galerias pluviais, que, por sua vez é despejado nos córregos urbanos. A responsabilidade sobre a coleta e o tratamento do esgoto é do Prestador de Serviços de Água e Esgoto (Águas Cuiabá), que tem como meta atender a 90% da população Cuiabana até 2020 (CUIABÁ, 2011). Porém, desde a concessão dos serviços em 2012, a concessionária CAB-Cuiabá não vinha atendendo às metas de universalização previstas em contrato, e, em maio de 2016, o Prefeito de Cuiabá decretara sua intervenção, com o objetivo de se garantir a continuidade da prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, que durou até julho de 2017, quando a nova concessionária assumiu a gestão. Desta forma, novos prazos para a universalização estão sendo definidos e pactuados, os quais serão elencados na revisão do Plano de Saneamento Básico de Cuiabá, com previsão de divulgação ainda em 2018 (ARSEC, 2018).

Assim, cabe aos órgãos fiscalizadores (Prefeitura de Cuiabá, Agência Municipal de Serviços Públicos Delegado, Ministério Público Estadual e usuários do serviço) acompanhar e cobrar melhorias no saneamento básico, em especial na coleta e tratamento de esgoto, haja visto que apenas 35% de todo o esgoto gerado na Capital é devidamente coletado e tratado, o restante é destinado de maneira irregular aos córregos, comprometendo, assim, o próprio abastecimento.

Outra importante fonte de poluição detectada neste estudo é o lançamento de efluentes de piscicultura, devido ao grande número de empreendimentos na bacia que aceleram o processo de eutrofização dos mananciais por causa das altas concentrações de nutrientes, organismos patogênicos e substâncias tóxicas, comprometendo, portanto, o funcionamento do ecossistema aquático, bem como trazendo riscos potenciais para a saúde pública (MACEDO; SIPAÚBA-TAVARES 2010). O maior risco referente a essa atividade sobre mananciais de abastecimento está na proliferação de algas, em especial de cianobactérias, cujas têm o potencial de produção de cianotoxinas, seja

pela ingestão de água seja pelo contato em atividades de recreação no ambiente. As florações destes organismos também acarretam consequências negativas sobre a eficiência e o custo do tratamento da água, pois podem ocasionar disfunções operacionais nas várias etapas de tratamento, tais como dificuldade de coagulação e floculação, baixa eficiência do processo de sedimentação, colmatação dos filtros e aumento da necessidade de produtos para a desinfecção (FUNASA 2003).

O desafio no controle dos efeitos desta atividade sobre os mananciais que atendem ao abastecimento urbano é a realização de estudos que estabeleçam qual a capacidade de suporte do corpo hídrico em assimilar estes efluentes sem que haja o comprometimento das metas de qualidade exigidas pelo enquadramento (BRASIL 2005). Porém, a legislação vigente não permite qualquer tipo de controle sobre “pequenos” piscicultores, uma vez que a Lei Nº 10.669, de 16 de Janeiro de 2018, determina que piscicultores com até cinco hectares de lâmina d’água em tanque escavado e represa de até 10.000 (dez mil) metros cúbicos de água em tanque-rede ficam dispensados de licenciamento ambiental e outorga (MATO GROSSO, 2018).

No entanto, a Resolução do CEHIDRO nº 42, de 20 de outubro de 2011, determina que independam de outorga os lançamentos de efluentes em corpos de água superficiais, cujas concentrações de DBO sejam iguais ou inferiores às concentrações de referência, estabelecidas para as respectivas classes de enquadramento dos corpos receptores, em consonância com a legislação vigente. A respeito do lançamento de efluentes, a Resolução CONAMA nº 430:2011 determina que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências previstas (BRASIL 2011).

Com base nessas resoluções e no potencial poluidor, os efluentes gerados pela atividade de piscicultura e sua destinação no manancial deveriam ser outorgáveis, mesmo aquelas em pequena lâmina de água. A justificativa é que o efeito individual pode ser insignificante, mas o efeito acumulativo dos 1.695 empreendimentos aquícolas pode degradar de forma significativa a qualidade da água na bacia, comprometendo a garantia do atendimento dos usos múltiplos dos recursos hídricos. Desta forma, a outorga deveria ser aplicada como instrumento de gestão no controle das características do efluente, bem como no volume, duração e frequência dos lançamentos, compatibilizando os diversos usos da bacia e indicando quando a capacidade de suporte para assimilação de efluentes foram alcançadas, sem que ocorra a degradação da qualidade.

## **8 | CONCLUSÃO**

Esta proposta de intervenção avaliou o nível de segurança hídrica para o abastecimento urbano de Cuiabá, e a Bacia do Rio Coxipó, que atende ao Sistema de Abastecimento Tijucal, se encontra em maior risco e vulnerabilidade no atendimento

da população. Foram identificados três grandes problemas que estão comprometendo e degradando a qualidade da água para o abastecimento da Capital: o lançamento de esgoto nas galerias pluviais e, conseqüentemente, nos córregos urbanos; o lançamento de efluentes de piscicultura com alto potencial de contaminação; e o manejo irregular do solo que tem gerado assoreamento e altas concentrações de sedimentos. Assim, para lidar com esses problemas, propôs-se a criação de uma Zona de Segurança Hídrica, ampliando o conceito e a abrangência especificados na Lei Complementar Municipal de Cuiabá nº 389, de 2015, dos limites municipais para a bacia hidrográfica, passando a responsabilidade de conduzir os estudos e os debates para sua execução ao Comitê de Bacia Hidrográfica dos Afluentes da Margem Esquerda do Rio Cuiabá.

## 9 | AGRADECIMENTOS

Aos Engenheiros Édio Ferras Ribeiro e Danilo Bravo da Concessionária de Água e Esgoto da Capital (Águas Cuiabá) pelas relevantes informações e contrições com dados e material bibliográfico que fundamentaram este trabalho.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E.C.R.F. **Monitoramento quali-quantitativo da Bacia Hidrográfica do rio Coxipó – MT: Uma ferramenta para implementação da gestão participativa dos recursos hídricos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

ANA - Agência Nacional de Águas. **ANA apresenta Projeto Legado no 8º Fórum Mundial da Água.** 2018. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/ana-apresenta-projeto-legado-no-forum-mundial-da-agua>. Acesso em: ago. 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Plano Nacional de Segurança Hídrica: critérios, seleção e detalhamento de intervenções estratégicas (Termo de Referência).** 2014. Disponível em: [http://interaguas.ana.gov.br/Lists/Licitacoes\\_Docs/Attachments/32/TDR\\_PNSH\\_Preliminar.pdf](http://interaguas.ana.gov.br/Lists/Licitacoes_Docs/Attachments/32/TDR_PNSH_Preliminar.pdf). Acesso em: mar. 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Projeto Legado: 20 propostas para o aperfeiçoamento dos marcos constitucional, legal e infralegal da gestão das águas no Brasil.** 2017. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/programas-e-projetos/projeto-legado/documento-base-versao-1-0-6-dezembro-2017.pdf>. Acesso em: jul. 2018.

ARSEC - Agência Municipal de Serviços Públicos Delegados. **Cuiabá prepara revisão do Plano Municipal Saneamento Básico com foco na universalização dos serviços.** 2018. Disponível em: <http://www.arsec.cuiaba.mt.gov.br/conteudo/show/secao/1/materia/114>. Acesso em: jul. 2018.

BEZERRA, M.B.; BEZERRA, A.P.P.S. **A crise hídrica como reflexo da seca: o Nordeste Setentrional em alerta.** *Revista de Geociências do Nordeste*, 2: 623-632, 2016.

BRASIL, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa.** 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm). Acesso em: abr. 2018.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357**, Diário Oficial da União, de 18 de março de 2005.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, Diário Oficial da União, de 16 de maio de 2011.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília, 9 de janeiro de 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm). Acesso em: mar. 2018.

\_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5**, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. 2017.

COSTA, R.L.; TODESCHINI, T; RIBEIRO, M.J.P.; TEIXEIRA-OLIVEIRA M. **Florações de cianobactérias potencialmente tóxicas em tanques de pisciculturas da região centro sul do Estado de Mato Grosso**. *Biodiversidade*, 16: 33-45, 2017.

CUIABÁ. **Plano de Saneamento Básico de Cuiabá** – MT. 2011. Disponível em: [http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/plano\\_municipal\\_de\\_saneamento\\_vale.pdf](http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/plano_municipal_de_saneamento_vale.pdf). Acesso em: fev. 2018.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 5621**, de 04 de novembro de 2014. Estabelece procedimento padrão para aprovação de projetos urbanísticos, análise e recebimento dos projetos de esgotamento sanitário protocolados no município de Cuiabá para os interessados que pretendam obter licença de construção e “habite-se”. 2014. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=276583>. Acesso em: mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Decreto nº 6714**, de 03 setembro de 2018. Estabelece procedimento padrão para análise, aprovação e recebimento de projetos de esgotamento sanitário protocolados no Município de Cuiabá para os interessados que pretendam obter alvará de obras, habite-se, projetos urbanísticos e licenças e adequação ambiental e dá outras providências. 2018. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=367269>. Acesso em: jan. 2019.

CYRINO, J.E.P.; BICUDO, Á.J.A.; SADO, R.Y.; BORGHESI, R.; DAIRIK, J.K.OJI. **A piscicultura e o ambiente: o uso de alimentos ambientalmente corretos em piscicultura**. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39: 68-87, 2010.

FELIPPE, M.F.; MAGALHAES JR., A. P. **Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d’água e propostas de especialistas**. *Geografias*, 9: 70-81, 2013.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano**. 2003. Disponível em: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/cianobacterias.pdf>. Acesso em: mar. 2018.

LEAL, A.C. **Planejamento ambiental de bacias hidrográficas como instrumento para o gerenciamento de recursos hídricos**. *Entre-Lugar*, 3: 65-84, 2012.

LOPES, A.C. **Comparação de metodologias para identificação de áreas estratégicas de proteção e recarga de aquíferos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada). Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa.

MACEDO, C.F.; SIPAÚBA-TAVARES, E.L.H. **Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações**. *Boletim do Instituto de Pesca*, 36: 149-163, 2010.

MARANHOLI, H.N.; MATOS, L.A. ; ROQUE, W.F. ; LIMA, T.E. ; NEVES, S.M. A.S. ; GONZALEZ, A.Z. D. **Análise da vulnerabilidade natural da bacia do Rio Coxipó Açu - MT**. In: 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2016, Cuiabá. Anais do 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2016.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, A.; ALVES, L.M.; MENDIONDO, E.M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. **A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**. *Revista USP*, 106: 31-44, 2015.

MATO GROSSO. **Lei nº 6.945**, de 05 de novembro de 1997. Dispões sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. 1997. Disponível em: <http://www.al.mt.gov.br/storage/webdisco/leis/lei-6945-1997.pdf>. Acesso em: mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 10.669**, de 16 de janeiro de 2018. Altera e revoga dispositivos da Lei nº 8.464, de 04 de abril de 2006, altera dispositivo da Lei nº 9.408, de 01 de julho de 2010. 2018. Disponível em: <https://www.al.mt.gov.br/storage/webdisco/leis/lei-10669-2018.pdf>. Acesso em: mar. 2018.

MATTOS, C.S. **Dados de turbidez da ETA Tijucal III**. Relatório Águas Cuiabá (Inguá-Cuiabá), 2018.

MDH, Ministerial Declaration of the Hague. **Water Security in the 21st Century**, 2nd World Water Forum, 2000. Disponível em: [http://www.worldwatercouncil.org/sites/default/files/World\\_Water\\_Forum\\_02/The\\_Hague\\_Declaration.pdf](http://www.worldwatercouncil.org/sites/default/files/World_Water_Forum_02/The_Hague_Declaration.pdf). Acesso em: mar. 2018.

MELO, M.C. **Segurança hídrica para abastecimento urbano: proposta de modelo analítico e aplicação na Bacia do rio das Velhas, Minas Gerais**. 2016. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil.

ONU, Organização das Nações Unidas. **Relatório das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**. 2017. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acao/agua/>. Acesso em: 08 mar. 2016.

PIZELLA, D.G.A. **Relação entre Planos Diretores Municipais e Planos de Bacias Hidrográficas na gestão hídrica**. *Ambiente & Água*, 10(3): 635-645, 2015.

RIBEIRO, E.F. **Breve histórico do abastecimento de água potável em Cuiabá, ameaças e medidas de proteção**. Relatório CAB-Cuiabá, 2016.

RODRIGUES, A.C.J. **Aplicação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos “outorga” e “enquadramento” para o setor de saneamento no perímetro urbano da bacia do rio Coxipó – Cuiabá/MT**. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

SANTOS, B.B.M. **Segurança hídrica na região metropolitana do Rio de Janeiro: contribuições para o debate**. *Ambiente e Sociedade*, 1: 103-120, 2016.

SILVA, P.A.J.G. **Limnologia e qualidade da água da bacia do rio Coxipó (MT): subsídios à gestão dos recursos hídricos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

SIQUEIRA, A.; RIBEIRO, E.F.; SANTOS, M.F. **O impacto dos efluentes de piscicultura na qualidade das águas de abastecimento público de Cuiabá**. Relatório CAB-Cuiabá, 2017.

TAVARES, A.M.F.; VASCONCELOS, F.G.; BENFICA, S.R.; CAMPOS, F.I.; LACERDA, B.F.C. **A crise hídrica no Distrito Federal no panorama atual (2016-2017)**. *ANAIS SNCMA*, 8: 1-27, 2017.

TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. **Drenagem urbana e controle de erosão**. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. da M. M. (Org.). Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: EDUFRGS, 2000.

UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **International Hydrological Programme – IHP**. 20th Session of the Intergovernmental Council. Paris, June 2012. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002164/216434E.pdf>. Acesso em: mar. 2018.

## PROSPECÇÃO QUÍMICA DA CASCA DO FRUTO E DA SEMENTE DA *Magonia pubescens* A. ST.-HIL

### **Amanda Silva Oliveira**

Centro Universitário de Patos de Minas –  
UNIPAM, Engenharia Química  
Patos de Minas – Minas Gerais

### **Arnaldo Ferreira Ribeiro Júnior**

Centro Universitário de Patos de Minas –  
UNIPAM, Engenharia Química  
Patos de Minas – Minas Gerais

### **Bruna Lane Malkut**

Centro Universitário de Patos de Minas –  
UNIPAM, Engenharia Química  
Patos de Minas – Minas Gerais

### **Fábio Gramani Saliba Júnior**

Centro Universitário de Patos de Minas –  
UNIPAM, Engenharia Química  
Patos de Minas – Minas Gerais

### **Maria Perpétua Oliveira Ramos**

Docente do Centro Universitário de Patos de  
Minas – UNIPAM, Engenharia Química  
Patos de Minas – Minas Gerais

**RESUMO:** A *Magonia pubescens*, conhecida popularmente por tinguí, é uma planta típica do cerrado de porte médio para alto. O trabalho objetivou realizar a triagem química da casca do fruto e da semente da *M. pubescens*. O material botânico coletado na zona rural da cidade de Urucuia – MG, armazenados devidamente foram levados para estudo nos laboratórios de química do Centro Universitário

de Patos de Minas – UNIPAM. Todos os testes de identificação foram realizados seguindo metodologia adaptada de Simões *et. al.* (2010). Diversos grupos de metabólitos especiais foram determinados na casca do fruto de flavonoides, alcaloides, taninos, óleos essenciais, saponinas e cumarinas, na semente resinas, flavonoides, taninos, cumarinas. O estudo serve como suporte inicial sobre o conhecimento da viabilidade de utilização dessa planta para fins medicinais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cerrado. Tinguí. Metabólitos especiais.

**ABSTRACT:** The *Magonia pubescens*, popularly known by tinguí, is a typical plant of the cerrado from medium to high. The objective of this work was to carry out the chemical screening of the fruit bark and the *M. pubescens* seed. The botanical material collected in the rural area of the city of Urucuia - MG, duly stored were taken to study in the chemistry laboratories of the Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM. All the identification tests were performed following a methodology adapted from Simões *et. al.* (2010). Several groups of special metabolites were determined in the shell of the flavonoids, alkaloids, tannins, essential oils, saponins and coumarins, in the seeds resins, flavonoids, tannins, coumarins. The study serves as initial support on the knowledge of the feasibility of

using this plant for medicinal purposes.

**KEYWORDS:** Thick. Tinguí. Special metabolites.

## 1 | INTRODUÇÃO

O uso de derivados de plantas como componentes das formulações cosméticas, de acordo com especialistas possui diversos aspectos positivos, o mais citado refere-se à biodiversidade brasileira. Outro ponto a favor da categoria está associado a uma postura “politicamente correta” (PACHIONE).

A *Magonia pubescens* da família das Sapindáceas, conhecida popularmente por tinguí (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS) é uma planta típica do cerrado de porte médio para alto, cujos frutos são castanhas marrons (JONH, 2012). Com ocorrência nos estados de Bahia, Ceará, Goiás, Maranhão, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Piauí, São Paulo e Tocantins. Floresce em agosto-setembro, a maturação dos frutos ocorre em agosto-setembro, quase simultaneamente com a nova florada (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE).

Neste estudo realizaram-se análises na casca do fruto e na semente de *Magonia pubescens*, com a finalidade de identificar a presença de metabólicos especiais, que possam ser utilizados em fitocosméticos.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

A coleta das amostras foi realizada em 27 de março de 2016 em Urucuia – MG na Fazenda Oliveira, o material foi coletado dentro dos parâmetros para diminuir os riscos de erros experimentais, e posteriormente levados ao Laboratório de Química Orgânica do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM).

As amostras foram lavadas para retirada de sujidades aparente, e para melhores resultados foram levadas para secagem em estufa a temperatura de 50° C até desidratação total, em seguida triturou-se obtendo o extrato para triagem química.

Todos os testes de identificação foram realizados seguindo metodologia de Simões *et. al.* (2010) com adaptações.

Para a identificação de alcaloides, colocou-se 2 g da amostra com 20 mL de HCl a 1% sob aquecimento por 5 minutos. Ao material filtrado alcalinizado com 1 mL NaOH a 10%. Em 2 tubos de ensaio contendo a amostra adicionou-se três gotas os reagentes de Dragendorff e Mayer, respectivamente. A presença de um precipitado vermelho alaranjado no teste de Dragendorff e precipitado esbranquiçado em Mayer indica a presença de alcaloides.

Para a identificação de resinas preparou-se extrato hidroalcoólico com 1 g da planta em 15 mL etanol, agitando por 30 min, ao material filtrado adicionou-se água destilada. O aparecimento de um precipitado floculoso após agitação indica presença

de resinas.

Para a identificação de quinonas, realizou-se a extração por 7 dias com 5 g do material vegetal em 50 mL de etanol e a seguir submetido a filtração simples. Realizou-se dois testes, no primeiro teste, o extrato foi tratado com 2 mL de metanol e 5 mL de clorofórmio, sob agitação. Após repouso de 15 minutos, separou-se a fase clorofórmica e adicionou-se 1 mL de NaOH 5%, o aparecimento de coloração roxa indica presença de antraquinonas. No segundo teste a amostra foi tratada com etanol e exposta a vapores amoníacos, a coloração azul indica hidroxibenzenoquinonas, a coloração violeta indica presença de hidroxinaftoquinonas e a coloração vermelha indica presença de hidroxiantraquinonas.

Para a identificação de flavonoides, preparou-se o extrato em banho-maria com 1 g da amostra juntamente com 10 mL de etanol 70% por 2 minutos, e a partir dele foram realizadas teste de shinolda (1 mL de HCl conc + 1cm de fita de magnésio). A presença de coloração avermelhada indica positivo para o metabolito.

Para identificação de triterpenos e esteroides pesou-se 2g da amostra e promoveu-se a extração com éter de petróleo. Após, realizou-se o teste de Liebermann-Burchard (1 mL de anidrido acético + 1 mL  $\text{CHCl}_3$  e gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) A coloração vermelha afirma presença do de triterpenos, a coloração verde/azulada presença de esteroides.

Para a identificação dos óleos essenciais, preparou-se o extrato com hexano e acetona (80:20). Adicionados anidro acético e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , posteriormente foram feitos testes que se baseiam em cromatografia em placa, onde se borrifou anisaldeído sulfúrico. O aparecimento de uma mancha rósea ou roxa indica a presença de óleos essências.

Para a identificação de taninos, foram realizados dois testes; o de cloreto férrico 10%, onde a amostra foi pesada e diluída em metanol e água destilada. Filtrou-se a solução e adicionou no filtrado algumas gotas de cloreto férrico. No segundo teste com gelatina incolor, pesou-se 50 g de cloreto de sódio e diluiu-se com água destilada. A solução foi filtrada e a seguir acrescentou-se a solução de gelatina. O surgimento de precipitado branco evidencia a presença de taninos.

Para a identificação de cumarinas, foi preparado o extrato com etanol com medições de 2 mL do extrato com 3 alíquotas de éter etílico. Foram colocados em banho-maria para reduzir o extrato e adicionaram 0,5 mL de metanol. Posteriormente foram gotejadas gotas do extrato em um papel filtro e uma gota de hidróxido de potássio que foi exposto a radiações ultravioletas. Reação positiva para fluorescência azul-esverdeada.

Para a identificação de saponinas, foram pesados 2 g da amostra e juntamente com 10 mL de água destilada foi colocada a solução para aquecimento. Agitou-se periodicamente, e foi realizada a medida da altura da espuma. Posteriormente foi realizada a extração genérica da saponina com a adição de água, HCl e 1 g da amostra, posteriormente filtrados e adicionado 50 mL de clorofórmio. Posteriormente levado a tratamento a solução em banho-maria para redução do volume. Realizaram-se os testes de Rossol, Rosenthalene Komarovisk a partir do extrato para identificação de

saponinas.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o processamento e análise do extrato de *Magonia pubescens* A. ST.-HIL., foi possível observar a presença na casca do fruto de flavonoides, alcaloides, taninos, óleos essenciais, saponinas e cumarinas, na semente resinas, flavonoides, taninos, cumarinas.

Preparações à base de plantas que contêm taninos são usadas para parar pequeno sangramento local, dor na boca, bronquite, queimaduras, feridas na pele, feridas e outros. Os taninos são considerados antioxidantes, e previne o aparecimento de doenças degenerativas, tais como o cancro e as doenças cardiovasculares.

O uso dos óleos essenciais é bastante popular nas áreas farmacêutica, terapêutica e cosmética, como analgésico. No campo da cosmética, eles servem para perfumar produtos como xampus, sabonetes, cremes entre outros, e também estão presentes em dose moderada em produtos de cuidados.

As cumarinas podem atuar com anti-inflamatório, antimicrobiano, antipirético, broncodilatador, inseticida e vasodilatador.

O principal uso terapêutico dos alcaloides é como sedativo, no caso da morfina.

As saponinas têm sido de interesse farmacêutico, como adjuvante em formulações, componentes ativos em drogas vegetais, ou ainda, como matéria-prima para a síntese de esteroides.

Os flavonoides possuem propriedades importantes tais como anticarcinogênico, anti-inflamatório, antialérgico, antiulcerogênico, antivirais entre outros (SIMÕES *et al.*, 2010).

Os resultados encontrados para a casca do fruto e da semente de *Magonia pubescens* foram comparados com os resultados obtidos por Oliveira (2013), que analisou casca do caule da planta em estudo.

Metabólitos	Casca do fruto	Semente	Oliveira (2013) <sup>[1]</sup>
Alcaloides	+	-	+
Resinas	-	+	-
Flavonoides	+	+	+
Quinonas	-	-	-
Triterpenos/ Esteroides	-	-	-
Óleos essenciais	+	-	-
Taninos	+	+	+
Cumarinas	+	+	-
Saponinas	-	-	+

(+) Resultado positivo, (-) Resultado negativo.

Quadro 1 – Comparativo de resultados fito químico entre casca do fruto e a semente:

[1] FITOQUÍMICA DA CASCA DO CAULE DE *Magonia pubescens* (SAPINDACEAE) OCORRENTE EM MONTES CLAROS – MG. Oliveira, Daiane M. (2013).

Foram observados nesse estudo a presença de taninos e flavonoides em sementes e casca do fruto de *Magonia pubescens* o que também foi observado por Oliveira (2013) nos caules da planta. Observou-se ainda que não foi identificado a presença de triterpenos esteroides e quinonas nesse estudo e também nos estudos de Oliveira, 2013.

A divergência das demais classes de metabolitos estudados pode ser justificada pela variação do tipo de solo, temperatura, época do ano e horários da coleta.

#### 4 | CONCLUSÃO

(i) Os metabólitos especiais mais evidentes na casca do fruto e na semente foram alcaloides, flavonoides, taninos e cumarinas.

(ii) A partir dos resultados encontrados com a planta *Magonia pubescens*, é possível produzir fitocosméticos como creme para manchas, shampoos e sabonetes devido a presença de flavonoides.

#### REFERÊNCIAS

INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **Tingui do Cerrado - Magonia pubescens – Semente**. Disponível em: <<http://ibflorestas.org.br/loja/sementes/semente-tingui-do-cerrado.html>>. Acesso em: 10 maio 2016.

JOHN, L. Do Cerrado, contra a dengue. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/blog/biodiversa/2012/08/>. Acesso em: 10 de maio de 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. O Bioma Cerrado. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em: 10 maio 2016.

OLIVEIRA, D. M.; ROYO, V. A.; MERCADANTE-SIMÕES, M. O. **Fitoquímica da casca do caule de *Magonia Pubescens* (Sapindaceae) ocorrente em Montes Claros – MG**. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 64. 2013

PACHIONE, R. **Fitocosmética**: Indústria avança em direção ao cosmético verde. 2002. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/fitocosmetica-industria-avanca-em-direcao-ao-cosmetico-verde/>>. Acesso em: 10 maio 2016.

SIMÕES, C.M.O., et.al. **Farmacognosia**: da planta ao medicamento. 6.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; Florianópolis: Editora da UFSC, 2010. 1104p.

## REÚSO DE EFLUENTE DE ESGOTO TRATADO NO CULTIVO DO PIMENTÃO AMARELO EM SOLO DO CERRADO

### **Delvio Sandri**

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Campus Darcy Ribeiro  
Brasília – DF

### **Waltoíres Reis da Silva Júnior**

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Campus Darcy Ribeiro  
Brasília – DF

### **Cícero Célio de Figueiredo**

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Campus Darcy Ribeiro  
Brasília – DF

### **Rodrigo Moura Pereira**

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Campus Darcy Ribeiro  
Brasília – DF

**RESUMO:** Com a crescente conscientização de que a água é um recurso natural limitado e de expressivo valor econômico, técnicas de uso sustentável e racional são cada vez mais difundidas. Dentre elas, o uso de efluentes de esgoto tratado (EET) para fins de irrigação se destaca, tanto pelo reaproveitamento da água, como pelo aporte de nutrientes ao solo e benefícios ambientais. Este trabalho objetivou

avaliar a utilização de EET, proveniente da Fazenda Água Limpa da UnB, na irrigação da cultura do pimentão amarelo, híbrido Canário F1. Avaliou-se o desenvolvimento das plantas e dos frutos e seus efeitos quanto à quantidade de nutrientes adicionados e alteração nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Amarelo, em resposta aos seguintes tratamentos: irrigação com água de córrego; EET; água de córrego com adubação de base; EET com adubação de base; EET com adubação de cobertura; e EET com adubação de cobertura e de base. A massa úmida, perímetro e produção total dos frutos de pimentão são maiores nos tratamentos com EET. A aplicação de EET sem adubação química resulta em maior produção e altura de frutos. A irrigação com EET proporciona maior número de frutos. O EET pode ser utilizado sem interferir de forma negativa na cultura do pimentão. O teor de potássio no solo aumenta nos tratamentos irrigados com EET, enquanto que os teores de fósforo, matéria orgânica e pH do solo que recebeu EET apresenta pouca elevação em comparação ao solo irrigado com água do córrego. A aplicação de 253 mm de EET adiciona ao solo 10 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio total, 10 kg ha<sup>-1</sup> de potássio total e 0,5 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato total.

**PALAVRAS-CHAVE:** fenometria, fertirrigação, gotejamento, *Capsicum annuum* L.

**ABSTRACT:** With the growing awareness that water is a limited natural resource of significant economic value, sustainable and rational use techniques are increasingly widespread. Among them, the treated wastewater reuse (TWR) for irrigation purposes stands out, both for the reuse of water, as dream as the contribution of nutrients to the soil and environmental benefits. The objective of this work was to evaluate the use of TWR, from the Água Limpa Farm of UnB, in the irrigation of the yellow pepper culture, F1 Canary hybrid. Evaluate for the performance of plants and fruits and chemical properties of soil (red-yellow-oxisol), in response to irrigation with dream water, TWR, dream water with base fertilization, TWR with base fertilization, TWR with cover fertilization and TWR with cover and base fertilization. The wet mass, perimeter and total production of yellow pepper fruits are higher in TWR treatments. The application of TWR without chemical fertilization results in higher production and height of fruits. The irrigation with TWR provides greater fruit production. The TWR can be used without interfering negatively in the yellow pepper culture. As a result, the levels of potassium were higher in the le treatments. The content of phosphor, organic matter and pH, related to le, showed little increase compared to Ic treatments. In conclusion, the application of 253 mm of le may add to the soil approximately 10 kg ha<sup>-1</sup> of nitrogen, 10 kg ha<sup>-1</sup> of potassium and 0.5 kg ha<sup>-1</sup> of total phosphor.

**KEYWORDS:** phenometry, fertigation, drip, *Capsicum annum L.*

## 1 | INTRODUÇÃO

O elevado incremento populacional no distrito federal e em seu entorno resultaram na crescente demanda por insumos básicos, especialmente de recursos hídricos, tanto para produção de hortaliças, grãos e fibras, como para atendimento de atividades industriais e urbanas. Como consequência, maior quantidade de resíduos e dejetos é gerada, bem como conflitos pelo uso da água entre os diversos setores de usuários tendem a surgir em determinadas épocas do ano.

Diante disso, para fins de irrigação, o uso de EET proporciona o reaproveitamento da água e de nutrientes essenciais, aumentando o rendimento das culturas. Por outro lado, é importante que o esgoto passe por tratamento prévio antes de sua reutilização, sendo a resposta da cultura em função de vários fatores, como arquitetura da planta, tipo de sistema de aplicação da água, composição do efluente, dentre outros fatores.

Com a crescente conscientização de que a água é um recurso natural limitado e de expressivo valor econômico, técnicas de uso sustentável e racional têm tido grande difusão, dentre elas, o uso de efluentes de esgoto tratado (EET). Para fins de irrigação, o EET se destaca pelo reaproveitamento da água com aporte de nutrientes ao solo, o que o viabiliza na agricultura, atividade da qual é responsável por cerca de 70% do consumo total de água no mundo (ALMEIDA, 2010).

O reúso de águas domésticas já se tornou uma técnica bastante usual e com benefícios conhecidos, porém há uma falta de normatização no Brasil que regule

seu uso para a agricultura, pois sua utilização sem critérios pode colocar em risco a saúde pública devido às doenças de veiculação hídrica, além de ser uma atividade potencialmente poluidora do solo e aquíferos subterrâneos.

Diante deste cenário, têm-se adotadas referências técnicas internacionais como a descrita por Ayers e Westcot (1991), que divide as águas utilizadas para irrigação de acordo com um potencial de restrição em: nenhuma, ligeira, moderada e severa, de acordo com os parâmetros de condutividade elétrica (CE), total de sais dissolvidos (SDT), relação de adsorção de sódio (RAS), sódio (Na), cloreto, boro (B), nitrogênio (N), bicarbonato ( $\text{NaHCO}_3$ ) e potencial hidrogeniônico (pH). Em diversos estudos com aplicação de efluente de esgoto tratado foram observadas alterações de vários atributos físico-químicos do solo irrigado com EET, com destaque a condutividade elétrica e ao sódio (SANDRI et al., 2009; VARALO et al., 2010). Assim, sugere-se que, ao se utilizar EET na irrigação é necessário se atentar aos cuidados necessários com o cultivo de plantas sensíveis a solos salinos, como o nabo, alface e pimentão, as quais segundo Ayers e Westcot (1991) toleram, na água de irrigação, valores de 0,9, 1,0, e 1,5  $\text{dS m}^{-1}$ , respectivamente.

Segundo Silva et al. (2014) a aplicação de EET na agricultura pode melhorar as condições físico-químicas do solo, porém, recomendam, como para a cultura da pimenta tekila, a aplicação de efluente tratado juntamente com adubação química para obtenção de melhores resultados no rendimento da cultura. Cunha et al. (2014) observaram que a aplicação de EET na irrigação de tomate de mesa resulta em economia de 65,38 a 100% no consumo de cálcio, sulfato, cobre e molibdênio no cultivo do tomate sweet grape em sistema hidropônico com diferentes substratos, resultando em benefícios diretos com a redução de custos com a aquisição de sais sintéticos com consequente melhora da relação custo benefício na comparação com a irrigação de água natural. Ressaltam que a indispensabilidade de monitoramento constante com indicação de técnicas de manejo apropriadas em função de vários aspectos, dentre eles, a composição dos efluentes e seus efeitos nos atributos físicos e químicos do solo.

Diante do exposto o presente trabalho objetivou avaliar o desenvolvimento das plantas e dos frutos e a quantidade de nutrientes adicionados ao solo e seu efeito nas propriedades físico-químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo irrigado com EET tratado em sistema de zona de raízes e aplicado por gotejamento no cultivo do pimentão híbrido Canário F1.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Água Limpa (FAL), localizada nas coordenadas 15°56' a 15°59' S e 47°55' a 47°58' W. A altitude média é de 1100 m, e, conforme a classificação de Köppen's, apresenta clima do tipo Aw, sendo caracterizado por duas estações bem definidas, uma quente e chuvosa, que ocorre de outubro a

abril e outra fria e seca de maio a setembro (ALVARES, 2014).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2013), textura muito argilosa e situado em relevo plano.

A área experimental, no momento de seu preparo, estava sendo cultivada com soja preta onde no estágio de formação de grãos foi incorporada ao solo com grade aradora a 0,20 m de profundidade aos 40 dias antes do transplante das mudas de pimentão.

Foi utilizada a cultivar de pimentão amarelo (*Capsicum annuum* L.), híbrido Canário F1 e o cultivo realizado no período de 04/09/2015 a 10/01/2016.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos completamente casualizados com quatro repetições, com os seguintes tratamentos: solo sem adubação e irrigado com água de córrego – testemunha (Ic); solo sem adubação e irrigado com EET (Ie); solo com adubação de cobertura e irrigado com EET (Acle); solo com adubação de base e irrigado com água de córrego (AbIc); solo com adubação de base e irrigado com EET (Able) e solo com adubação de base e de cobertura e irrigado com EET (AbAcle).

Cada parcela experimental foi formada por quatro linhas de pimentão com 5 plantas em cada, considerando-se úteis as plantas das duas linhas centrais, excluindo-se as plantas da bordadura o que resultou em 6 plantas úteis por parcela, totalizando 24 plantas por tratamento, com espaçamento entre plantas de 0,50 m e entre linhas de 0,80 m correspondendo a uma área de 8,4 m<sup>2</sup> por parcela experimental em uma densidade estimada de 23800 plantas ha<sup>-1</sup>.

O EET utilizado é oriundo do refeitório e dos sanitários coletivos da FAL/UnB, caracterizado como essencialmente doméstico. O tratamento consiste de uma fase primária onde o efluente passa por três tanques sépticos de PVC em série com volume útil individual de 5100 L. O tratamento secundário foi executado em três sistemas de raízes (SZR) e um não cultivado (testemunha) em paralelo com dimensões de 6,5 x 2,5 x 0,5 m – comprimento x largura x altura – preenchidos com brita #2, resultando em uma porosidade de 50% e volume útil individual de 3.82 m<sup>3</sup>. No primeiro SZR foi cultivada a taboa (*Typha spp*), no segundo o papiro-brasileiro (*Cyperus giganteus*), o terceiro com lírio do brejo (*Hedychium coronarium Koehne*) e o quarto não foi cultivado. Após o tratamento, o EET foi conduzido a um reservatório com volume útil de 4750 L e posteriormente bombeado para a área de cultivo em outro reservatório de 2000 L de onde então foi aplicado na irrigação do pimentão em sistema de gotejamento.

O EET (Ie) e a água do córrego (Ic) foram analisados no início, no meio e no fim do experimento, quanto aos atributos apresentados na Tabela 1, seguindo as metodologias de APHA (2005).

Atributos	Unidade	Ac	Ie
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Unidades	8,30	7,05
Condutividade elétrica (CE)	dS m <sup>-1</sup>	0,003	0,530
Temperatura	°C	26,10	26,70
Sólidos suspensos (SS)	mg L <sup>-1</sup>	0,00	68,50
Sólidos totais dissolvidos (STD)	mg L <sup>-1</sup>	1,92	339,2
Turbidez	NTU	4,88	29,005
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg L <sup>-1</sup>	0,002	0,034
Amônia (N-NH <sub>3</sub> )	mg L <sup>-1</sup>	0,035	3,695
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg L <sup>-1</sup>	0,33	1,79
Nitrogênio total (N total)	mg L <sup>-1</sup>	7,00	37,80
Potássio (K)	mg L <sup>-1</sup>	0,00	38,87
Ferro (Fe)	mg L <sup>-1</sup>	0,26	0,26
Fosfato total (P)	mg L <sup>-1</sup>	1,10	1,80
Manganês (Mn)	mg L <sup>-1</sup>	0,05	0,05
Boro (B)	mg L <sup>-1</sup>	0,31	0,49
Enxofre (S)	mg L <sup>-1</sup>	1,00	1,00
Sódio (Na)	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0,062	4,83
Cálcio (Ca)	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0,68	2,88
Magnésio (Mg)	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	0,11	0,02
RAS	(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	0,10	4,01

Tabela 1. Atributos físico-químicos do efluente de esgoto tratado (Ie) e da água do córrego (Ac) utilizadas na irrigação da cultura do pimentão amarelo.

O A irrigação foi realizada com turno de rega de dois dias, realizada com fitas gotejadoras dispostas na superfície do solo e a 0,05 m da linha de plantas. Os emissores *in line* de fluxo turbulento, espaçados em 0,30 m na linha lateral, com 12 mm de diâmetro interno e vazão de 1,3 L h<sup>-1</sup> na pressão de 147 kPa.

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi obtida pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), estimada a partir de dados climáticos fornecidos por uma estação meteorológica localizada a 300 m do experimento. A evapotranspiração da cultura (K<sub>c</sub>) foi ajustada considerando porcentagem de área molhada de 68,5% e valores de K<sub>c</sub> de 0,4 durante o pegamento das mudas/vegetativo, 0,7 durante a floração/frutificação, 1,05 durante a produção plena e 0,85 no declínio de produção (Marouelli e Silva, 2012), sendo a ET<sub>c</sub> total foi de 493 mm, enquanto a ET<sub>o</sub> foi de 533 mm.

Durante o ciclo de cultivo ocorreram condições adversas, tanto de baixas temperaturas, chegando a 15 °C aos 46 dias após transplante, como de temperaturas acima de 35 °C aos 7 dias do início do ciclo.

Nos períodos de floração e produção plena registraram-se umidades relativas médias do ar abaixo da faixa adequada (50 a 70%) ao longo de 62 dias. Assim, o efeito dessas condições resultou no abortamento de algumas inflorescências com consequente falha de pegamento dos frutos, ao mesmo tempo reduziu o

desenvolvimento das plantas e prolongou o ciclo da cultura. A precipitação total ao longo do ciclo do pimentão foi de 641,55 mm com maior concentração das chuvas a partir do mês de novembro de 2015.

As medições da altura e do diâmetro da copa das plantas foram realizadas aos 140 dias após transplântio (DAT), usando fita métrica com precisão de 1 mm. A massa úmida dos frutos foi medida em balança digital, com precisão de 0,1 g. Também foram retirados ao acaso três frutos e avaliados a altura (AL) e o perímetro (PF), utilizando-se um paquímetro com precisão de 0,01 mm e uma fita métrica com precisão de 1 mm. Após a aferição das medidas foi calculado o índice de formato dos frutos (IFF), representado pela relação altura/perímetro. A partir do peso total de todos os frutos das plantas úteis, foi obtida a produtividade em  $t\ ha^{-1}$ .

A amostragem para análise de solo foi realizada anteriormente a implantação do cultivo e foi composta por seis pontos de coleta em toda a área considerando a profundidade de 0 a 0,2 m, a qual foi utilizada para a determinação da necessidade de calagem para elevar a 70% a saturação por base. Com base nos resultados aplicou-se aos 60 dias antes do transplântio das mudas de pimentão,  $510\ kg\ ha^{-1}$  de calcário dolomítico com PRNT de 100%, contendo 47% de óxido de cálcio (CaO) e 7% de óxido de magnésio (MgO). Após a calagem, para os cálculos das necessidades de adubação de base e cobertura, foram realizadas quatro amostragens de solo compostas, sendo uma para cada bloco com quatro pontos de coleta cada. A profundidade considerada foi de 0,20 m, os resultados médios representativos de toda a área são apresentados na Tabela 2. Com estes resultados determinou-se a adubação de base, sendo aplicado  $80\ kg\ de\ P_2O_5$  e  $50\ kg\ de\ K_2O\ ha^{-1}$  na formulação super simples e cloreto de potássio, respectivamente. A aplicação foi realizada a lanço em toda a área e incorporada ao solo com enxada manual.

A adubação de cobertura, seguiu as recomendações de Ribeiro et al. (1999), resultando na necessidade de  $165\ kg\ ha^{-1}$  de N e  $180\ kg\ ha^{-1}$  de  $K_2O$  na formulação de uréia e cloreto de potássio, respectivamente, dividida em 7 aplicações ao longo do ciclo da cultura, a primeira no plantio, a segunda após 20 dias e as demais a cada 15 dias além da aplicação de  $300\ kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$  na formulação superfosfato simples em única aplicação aos 10 dias antes do transplântio.

Ao término do ciclo da cultura foram coletadas 24 amostras compostas de solo, uma em cada parcela, com três pontos de coleta cada, na profundidade de 0 a 0,2 m, onde determinou-se os parâmetros cálcio, magnésio, alumínio + hidrogênio, potássio, fósforo, matéria orgânica total e pH, seguindo metodologia proposta por Silva (1999). Posteriormente os resultados das análises foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. Utilizou-se o software XLSTAT, versão 2015.6.01.25106 (ADDINSOFT, 2015).

pH	MO	K	Ca	Mg	Al	AcP	CTCe	CTCt	P	SAI	SB
01:02,5	g kg <sup>-1</sup>			cmol <sub>c</sub> (dm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>				mg (dm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>		%	%
5,9	11,25	0,12	5,18	3,25	0,15	7,7	8,68	16,23	0,88	0,95	52,25

pH: pH em água; MO: Matéria Orgânica; K: Potássio Extraível; Ca: Cálcio Extraível; Mg: Magnésio Extraível; Al: Alumínio Trocável; AcP: Acidez potencial; CTCe: CTC efetiva; CTCt: CTC total; SAI: Saturação por Al trocável; SB: Saturação por bases e P: Fósforo Extraível. CTC: Capacidade de Troca de Cátions.

Tabela 2. Valores dos atributos químicos do solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade antes do início do cultivo de pimentão.

Os dados foram submetidos à análise de variância e à comparação de médias pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. Para tanto foi utilizado o Software XLSTAT, versão 2015.6.01.25106 (ADDINSOFT, 2015).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Desenvolvimento das plantas e dos frutos de pimentão

Aos 140 DAT o diâmetro da copa das plantas de pimentão foi menor no tratamento com solo sem adubação e irrigado com água de córrego (testemunha) comparado com os demais tratamentos, que não se diferenciaram entre si (Tabela 3).

A altura de planta e a massa seca de folhas não sofreram variações estatísticas e nem indícios de tendências de que os tratamentos com EET seriam mais vantajosos nestes aspectos. SOUSA et al. (2009) aplicando biofertilizante na cultura do pimentão também não encontraram variações estatisticamente significativas nas alturas das plantas.

Tratamentos	Altura da planta (cm)	% da altura das plantas	Diâmetro maior da copa (cm)	Diâmetro menor da copa (cm)	Massa seca das folhas (g)	Massa seca do caule (g)	% de produtividade em relação ao esperado
AbAcle	43 a	35,0 %	62 a	46,7 a	13 a	36 a	90,6 %
Acle	46 a	30,0 %	65 a	44,2 a	8 a	35 a	119,3 %
Able	39 a	38,3 %	57 a	34,5 a	10 a	29 a	114,7 %
le	36 a	35,8 %	60 a	36,0 a	11 a	29 a	84,9 %
lc	42 a	32,5 %	62 a	29,0 b	16 a	33 a	117,6%
AbIc	43 a	35,8 %	52 a	36,0 a	11 a	32 a	115,7 %

Média seguidas de letras distintas para cada característica apresentam diferenças estatísticas pelo teste de Duncan (P<0,05).

Tabela 3. Medidas de crescimento das plantas de pimentão nos diferentes tratamentos aos 140 DAT da cultura do pimentão e valores em porcentagens entre dados esperados conforme fabricante da semente e obtidos em campo para a produtividade e altura dos frutos.

Para a cultivar canário F1 a produtividade esperada de 4.900 kg ha<sup>-1</sup> não foi

atingida nos tratamentos AbAcle e le (Tabela 3).

Foram realizadas duas colheitas, a primeira aos 94 DAT e a segunda aos 132 DAT, totalizando 51 kg e 55 kg, respectivamente, em todos os tratamentos, observando-se que os pesos totais não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 4). As médias dos pesos unitários dos frutos apresentaram amplitude de até 70 g, sendo que os tratamentos com água de córrego tiveram resultados inferiores e estatisticamente diferentes comparados com os de EET. O uso de EET propiciou melhores condições para o desenvolvimento dos frutos, apresentando efeito sinérgico quando aplicado em conjunto com adubação de base e água de córrego, proporcionando maior valor de massa úmida dos frutos quando comparado com aplicação exclusiva de irrigação ou a combinação de irrigação com adubação de base.

O uso apenas de irrigação com EET (le) apresentou menor perímetro dos frutos do que do que AbAcle e Able, não havendo diferenças entre os demais tratamentos ( $P < 0,05$ ). As alturas e o peso total dos frutos não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos. A aplicação exclusiva de EET promoveu maior relação altura/perímetro dos frutos do que os tratamentos AbAcle e Acle. A altura dos frutos esperada de 15 cm e das plantas de 120 cm não foi atingida em nenhum tratamento e o perímetro dos frutos esperado de 24 cm foi atingido em todos os tratamentos, acreditando-se que os estresses climáticos submetidos fizeram com que os frutos produzidos não atingissem altura satisfatória, assim como a planta.

Tratamento	Massa úmida dos frutos (g)	Perímetro dos frutos (cm)	% do perímetro dos frutos em relação ao esperado	Altura dos frutos (mm)	% da altura dos frutos em relação ao esperado	Altura/perímetro dos frutos	Peso total dos frutos (kg/canteiro)
AbAcle	230,1 a	28,3 a	106,2 %	117,6 a	74,2 %	4,2 b	4,7 a
Acle	187,9 ab	27,8 ab	113,7 %	111,7 a	82,6 %	4,1 b	4,7 a
Able	202,7 ab	28,5 a	115,8 %	119,0 a	74,4 %	4,3 ab	4,8 a
le	195,9 ab	27,3 ab	111,6 %	124,0 a	76,4 %	4,6 a	4,9 a
lc	160,0 b	25,5 b	118,7 %	111,3 a	79,3 %	4,4 ab	3,7 a
Ab1c	165,7 b	26,8 ab	117,9 %	114,6 a	78,4 %	4,4 ab	3,4 a

Média seguidas de letras distintas para cada característica apresentam diferenças estatísticas pelo teste de Duncan ( $P < 0,05$ ).

Tabela 4. Valores dos parâmetros fenométricos dos frutos de pimentão nos tratamentos aos 140 DAT e valores em porcentagens entre dados esperados conforme fabricante da semente e obtidos em campo para o perímetro dos frutos e altura das plantas.

### 3.2 Quantidade de nutrientes adicionados ao solo e alteração nas propriedades químicas do solo

No final do experimento, observou-se que apenas o parâmetro K apresentou diferença significativa entre os tratamentos, de modo que no tratamento AbAcle o teor de K foi superior aos tratamentos Ic e Acle, não sendo verificadas diferenças entre os demais tratamentos (Tabela 5). Considerando a aplicação de 253,1 mm de EET na irrigação, foi acrescentado ao solo a quantidade de 9,57 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio total (composto por aproximadamente 10% de amônia, 5% de nitrato, 1% de nitrito e 84% de nitrogênio orgânico), 9,84 kg ha<sup>-1</sup> de potássio total (11,85 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) e 0,46 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato total (1,04 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Já pela água de córrego, o acréscimo de nitrogênio total foi de 1,77 kg ha<sup>-1</sup>, não houve acréscimo de potássio total e o fosfato total teve acréscimo de 0,28 kg ha<sup>-1</sup>.

O fato do EET não ter promovido acúmulo de MOT no solo decorre da rápida mineralização desse nutriente, promovida pelo ambiente favorável a atividade microbiana do solo. Ainda, durante as etapas de tratamento o efluente passa por uma bateria de tanques de sedimentação em seguida por tanques cultivados com aproximadamente 50% de porosidade (brita #2) e posteriormente pelo sistema de filtragem da irrigação constituído de filtro de discos que eram limpos frequentemente para a remoção de materiais particulados, o que de fato pode ter contribuído na remoção de grande parte dos sólidos que resultariam em diferenças na MOT. De maneira geral, a MOT apresenta resultados contrastantes na literatura, Duarte (2008) observou maiores teores de MOT em solo que recebeu o EET, enquanto que Sandri et al. (2009) observaram, após dois ciclos de cultivo de alface Elisa que a MOT no solo não apresentou diferença em relação a água de represa.

Atributos no solo					
Tratamentos	Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	CTC	V (%)	MOT (g kg <sup>-1</sup> )
AbAcle	0,018 a	3,3 a	7,3 a	54,8 a	61,4 a
Ie	0,010 a	3,1 a	7,4 a	58,4 a	57,4 a
Ic	0,015 a	2,9 a	7,4 a	60,5 a	58,8 a
Acle	0,013 a	3,0 a	7,4 a	59,3 a	50,8 a
AbIc	0,015 a	3,0 a	7,1 a	57,4 a	53,9 a
Able	0,013 a	3,2 a	7,2 a	53,8 a	57,7 a

Tratamentos	pH CaCl <sub>2</sub> 1:2,5	P meh <sup>-1</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	K (mg dm <sup>-3</sup> )	Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )
AbAcle	5,9 a	6,1 a	47,0 a	3,0 a	0,9 a
Ie	6,0 a	5,4 a	37,0 ab	3,2 a	1,0 a
Ic	6,0 a	5,4 a	28,7 b	3,3 a	1,0 a
Acle	6,0 a	6,0 a	31,5 b	3,4 a	0,9 a
AbIc	6,0 a	4,4 a	35,7 ab	3,0 a	1,0 a
Able	5,9 a	5,7 a	35,0 ab	2,9 a	0,9 a

Solo sem adubação e irrigado com água de rio (Ic), solo sem adubação e irrigado com EET

(Ie), solo com adubação de cobertura e irrigado com EET (Acle), solo com adubação de base e irrigado com água de rio (AbIc), solo com adubação de base e irrigado com EET (Able), solo com adubação de base e de cobertura e irrigado com EET (AbAcle) e matéria orgânica total (MOT).

Tabela 5. Atributos químicos do latossolo vermelho-amarelo avaliado ao final do ciclo de cultivo de pimentão para diferentes tratamentos na camada de solo de 0 a 0,20 m.

## 4 | CONCLUSÕES

O uso de EET propiciou melhores condições para o desenvolvimento dos frutos de pimentão, apresentando efeito sinérgico quando aplicado em conjunto com adubação de base e água de córrego.

A fenometria da cultura do pimentão amarelo não é afetada de forma negativa pelo uso da irrigação com EET.

A irrigação de EET no cultivo do pimentão não apresentou alterações significativas nos atributos químicos do solo, em comparação aos tratamentos que receberam adubação de base e de cobertura. Com exceção do K, o solo dos tratamentos que receberam o efluente tratado apresentou teores mais elevados, principalmente no tratamento que associou o uso do efluente com adubação de base e de cobertura.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio financeiro: Chamada Universal – MCTI/CNPq Nº 14/2013. Processo: 480332/2013-4.

## REFERÊNCIAS

ADDINSOFT. **XLSTAT statistical analysis software, versão 2015**. 2016. Disponível em: <www.xlstat.com>. Acesso em: 12 dez. 2015. Crop

**ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. ROME: FAO, 1998, 297p. FAO. IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER, p. 56.**

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 228 p.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 6, p.711-728 (published online January 2014). DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2005. 541p.

AYERS, R. S.; WESTCOOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218 p.

CERQUEIRA, L. L.; FADIGAS, F. de S.; PEREIRA, F. A.; GLOAGUEN, T. V.; COSTA, J. A. Desenvolvimento de *Heliconia psittacorum* e *Gladiolus hortulanus* irrigados com águas residuárias tratadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.12,n.6, p. 606-613, 2008.

- CUNHA, A. H. N.; SANDRI, D.; VIEIRA, J. A.; ALVES, J. A. A.; CUNHA, I. N. Uso de efluente para complementação de nutrientes no cultivo de Sweet Grape. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 43, 2014. **Anais...** Campo Grande: Centro de Convenções 'Arquiteto Rubens Gil de Camilo', Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014.
- DUARTE, A. S.; AIROLDI, R. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; SOARES, T. M. Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, p.302- 310, 2008.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.
- FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P.F.F. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. **Fundamentos do tratamento anaeróbio**. Capítulo 2. PROSAB, ABES, Rio de Janeiro, 1999.
- GARCIA, G. O.; RIGO, M. M.; CECÍLIO, R. A.; REIS, E. F.; BAUER, M. O.; RANGEL, O. J. P. Propriedades químicas de um solo cultivado com duas forrageiras fertirrigadas com esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, suplementar, 2012, p. 737-742.
- LIBANO, A. M.; FELFILI, J. M. Mudanças temporais na composição florística e na diversidade de um Cerrado sensu stricto do Brasil Central em um período de 18 anos (1985-2003). **Acta Botânica Brasílica**. v. 20, n.4, p. 927-936, 2006.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação na cultura do pimentão. 1ª Ed. Brasília: Embrapa, 2012, 20p. **Circular Técnica, 101**.
- METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3 ed. Metcalf & Eddy Inc., 1991. 1334 p.
- REGO, J. L.; EDGLERDÂNIA, L. L. O.; ARILENE, F. C.; ANA PAULA, B. A.; FRANCISCO, M. L. B.; ANDRÉ, B. S.; SUETÔNIO M. Uso de esgoto doméstico tratado na irrigação da cultura da melancia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, suplemento, p. 155-159, 2005.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Alteração química do solo irrigado por aspersão e gotejamento subterrâneo e superficial com água residuária. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p.755–764, 2009.
- SILVA, L. L.; CARVALHO, C. M.; SOUZA, R. D. P. F.; FEITOSA, H. O.; FEITOSA, S. O. GOMES FILHO, R. R. Crescimento da pimenta ekila bode vermelha irrigada com diferentes concentrações de efluente doméstico na água de irrigação. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 35, n.1, p.121-132. 2014.
- SIMÕES, K. S.; PEIXOTO, M. F. P.; ALMEIDA, A. T.; LEDO, C. A. S.; PEIXOTO C. P.; PEREIRA F. A. C. Água residuária de esgoto doméstico tratado na atividade microbiana do solo e crescimento da mamoneira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 518–523, 2013.
- SOUSA, M. J. R.; MELO, D. R. M.; FERNANDES, D.; SANTOS, J. G. R.; ANDRADE, R. Crescimento e produção do pimentão sob diferentes concentrações de biofertilizante e intervalos de aplicação. **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, n.4, p. 42- 48, out/dez 2009.

VARALO, A. C. T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B. L.; SOUZA, C. F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reúso. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.372–377, 2010.

## SISTEMA DE IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICO

### **Camila Dias de Jesus**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade  
Rio Verde – Goiás

### **Márcio da Silva Vilela**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade  
Rio Verde – Goiás

### **Leonardo Nazário Silva dos Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade  
Rio Verde – Goiás

### **Clarissa Vitória Borges dos Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade  
Rio Verde – Goiás

**RESUMO:** O setor agrícola é o responsável pelo maior consumo de toda a água doce disponível em todo o mundo, diante deste cenário o agendamento eficiente e eficaz da irrigação é essencial para melhorar as práticas e a produção agrícola em todo o mundo. Assim, este trabalho aplica o Raspberry Pi, o qual consiste em um computador de pequeno porte, e também um sensor de umidade do solo para o

monitoramento automático da umidade do solo no local do cultivo, isso visando ajudar a facilitar o agendamento efetivo da irrigação, promover a gestão eficiente dos recursos hídricos, reduzir vários custos associados à irrigação, e ainda poder contribuir para maiores rendimentos e aumento do lucro das atividades agrícolas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Irrigação automática; Raspberry Pi; Sensor umidade.

**ABSTRACT:** The agricultural sector is responsible for the largest consumption of all available water around the world, based on the efficient and effective irrigation program to improve agricultural practices and production around the world. Thus, this work is the type of raspberry powder, which is done in a small computer, and also a soil moisture sensor for automatic monitoring of soil moisture in soil cultivation, which allows effective scheduling of irrigation, and then we conclude that water resource managers have greater resilience and greater profit from agricultural activities.

**KEYWORDS:** Automatic irrigation; Raspberry Pi; The humidity of the sensor.

## 1 | INTRODUÇÃO

Dentre os setores da economia, o setor agrícola é o responsável pelo maior consumo de água doce disponível em todo o mundo, e esse percentual tende a aumentar nos próximos anos com o crescimento da população e conseqüentemente o aumento da demanda por alimentos (AGUGLIARO, 2018). Diante deste cenário, tem se tornado cada vez maior a busca por métodos que visem a gestão de água pelos sistemas de irrigação, em especial métodos que envolvem programação (CANALES, 2017).

Geralmente os sistemas de irrigação automatizados consistem basicamente em plataformas compostas essencialmente por controladores de baixa potência e sensores que captam informações externas do ambiente, como por exemplo a umidade do solo. Em grande parte os sistemas de irrigação automáticos requerem a implementação de algoritmos que atendem a uma aplicação específica (FERDOUSH; LI, 2014).

Esta pesquisa tem como objetivo a automação de sistemas de irrigação, a irrigação deve ocorrer automaticamente com base na leitura da umidade do solo no local do cultivo. O fato do sistema de irrigação tomar a decisão de irrigar ou não o cultivo de forma automática, promove a gestão de água e ainda fornece comodidade e praticidade aos usuários do sistema, isso porque a irrigação somente ocorrerá quando for verificado pelo sistema que a umidade do solo se encontra abaixo de um valor pré estabelecido, outro fato é que não há a necessidade de um acionamento manual da irrigação e tampouco que esteja alguém presente fisicamente para ativar o sistema, situações estas corriqueiras na maioria dos sistemas de irrigação convencionais.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa emprega o método indutivo, a pesquisa quantitativa e a pesquisa de campo do tipo experimental. O estudo foi realizado na parte interna e externa do laboratório de “Automação, simulação e controle”, localizado no bloco Engenharias I, do Campus Rio Verde no Instituto Federal Goiano em Rio Verde - Goiás.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados essencialmente os seguintes materiais: sensor de umidade do solo, Raspberry PI, bomba d’água, módulo relé e reservatório de água. O Raspberry PI consiste em um computador de pequeno porte e funciona como cérebro do sistema, é o responsável pela tomada de decisão de irrigar ou não o cultivo, sendo esta decisão tomada com base na leitura da umidade do solo. A umidade do solo é detectada por sensor de umidade do solo instalado no local do cultivo. A água destinada à irrigação se encontrava armazenada em um reservatório para a posterior aplicação na área de plantio, o reservatório simulou um rio, poço ou outro, pois geralmente em um sistema de irrigação real a água provém destes locais. Para que a irrigação ocorra é então necessário o bombeamento da água do reservatório para o local de plantio, sendo assim o Raspberry PI é o responsável

por enviar um sinal de nível lógico baixo ou alto para o módulo relé, fazendo com que a bomba d'água seja respectivamente ligada ou não.

Para facilitar o entendimento do funcionamento do sistema de irrigação automático, um diagrama é apresentado na figura 1, o mesmo ilustra o funcionamento do sistema desenvolvido.

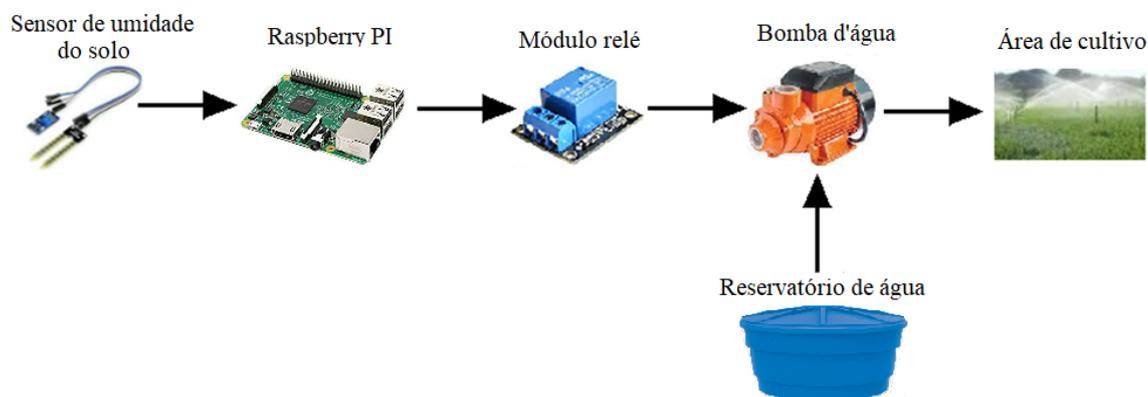


Figura 1 – Diagrama do funcionamento do sistema de irrigação automático.

Fonte: Dos autores

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de irrigação automático foi montado utilizando a parte interna e externa do laboratório de “Automação, simulação e controle”. A área interna do laboratório foi utilizada mediante a necessidade de utilização do ponto de fornecimento de energia elétrica em corrente alternada (CA) para a alimentação elétrica da bomba d'água e também para o armazenamento de equipamentos fora dos momentos de testes, o sistema em si foi implementado na área externa do laboratório onde há um gramado em que os testes do funcionamento do sistema de irrigação foram realizados.

O sistema de irrigação automático funcionou conforme esperado, sempre que o valor de umidade detectado pelo sensor de umidade do solo se encontrava abaixo do valor estabelecido em programação, o Raspberry PI enviava um sinal de nível lógico alto para o módulo relé fazendo com que o contato normalmente aberto do módulo se fechasse e então ocorresse o acionamento da bomba d'água e por sua vez o solo fosse irrigado. Já quando o valor de umidade detectado pelo sensor de umidade do solo se encontrava acima do valor estabelecido em programação, o Raspberry PI enviava um sinal de nível lógico baixo para o módulo relé fazendo com que o contato normalmente aberto do módulo permanecesse neste estado para que a bomba d'água se encontrasse desligada e a irrigação não ocorresse.

O trabalho desenvolvido pode ser aplicado em áreas pequenas de cultivo, assim como áreas mais extensas de plantio. É importante considerar que em sistemas de porte maior que o implementado neste trabalho é consideravelmente necessária a utilização de um número maior de sensores, isso para que área de cultivo seja

considerada de forma abrangente e se tenha uma leitura mais precisa da umidade do solo para que o sistema tome a decisão correta de irrigar ou não o cultivo.

#### 4 | CONCLUSÃO

A automação dos sistemas de irrigação é uma alternativa extremamente relevante, já que consiste em forma de diminuir o elevado consumo de água pelo setor agrícola, além da gestão de água o sistema desenvolvido fornece comodidade e praticidade aos usuários.

Por fim, esta pesquisa poderá auxiliar de forma significativa os produtores rurais na irrigação de suas plantações, isso por promover a gestão de água e tornar o procedimento de acionamento do sistema de irrigação cômodo e prático.

#### REFERÊNCIAS

AGUGLIARO, F. M. **Economic analysis of sustainable water use: A review of worldwide research**. 2018, v.198,p.1120-1132. Journal of Cleaner Production.

CANALES, A. R. **Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures**. 2017, v.148, p. 148-159. Computers and Electronics in Agriculture.

FERDOUSH, S.; LI, X. **Wireless Sensor Network System Design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications**. 2014, v. 34, p. 103-110. Procedia Computer Science.

## SISTEMA RADICULAR DA CULTIVAR ‘GOLD JEWEL’ DE KALANCHOE BLOSSFELDIANA POELLN CULTIVADA EM SUBSTRATO COMERCIAL E EM DIFERENTES DOSAGENS DE IRRIGAÇÃO

**Fátima Cibele Soares**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**Jumar Luís Russi**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**Andressa Fernandes Leal**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**Carine Brum Duran**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**Francieli Ribeiro Corrêa**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**Giordana Trindade de Abreu**

Universidade Federal do Pampa  
Alegrete – Rio Grande do Sul

**RESUMO:** O sistema radicular é indispensável para a absorção de água e nutrientes do substrato. Embora seja indiscutível sua importância, este tem sido pouco estudado. Assim, objetivou-se avaliar a evolução do sistema radicular da *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln., cv ‘Gold Jewel’, cultivada em substrato comercial, em função de diferentes lâminas de irrigação. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamento de irrigação Estudos Transdisciplinares nas Engenharias 2

(50, 38, 26 e 14% da capacidade de vaso (CV)) e seis repetições. As mudas foram feitas pelo método de estaquia e transplantadas para vasos, preenchidos de substrato comercial, após 32 dias. Ao longo do ciclo foi avaliado o número de flores por planta. Aos 51, 103 e 133 DAT (dias após o transplante) avaliou-se o sistema radicular, através do teor de umidade. Por meio dos resultados observou-se a máxima eficiência técnica, para o número de flores por planta, à lâmina de irrigação de 34% da CV. No final do ciclo, ambas as lâminas de irrigação apresentaram redução do sistema radicular. Conclui-se que tanto a falta quanto o excesso de umidade no substrato causam inibição do crescimento da parte aérea e radicular da cultivar, bem como redução da produtividade de flores.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Kalanchoe*, sistema radicular, lâminas de irrigação, cultivo protegido

**ABSTRACT:** The root system is indispensable for the absorption of water and nutrients from the substrate. Although its importance is indisputable, it has not been thoroughly studied. The objective of this study was to evaluate the evolution of the root system of the *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln., Cv ‘Gold Jewel’, cultivated in commercial substratum, due to different irrigation depths. The experiment was conducted in a greenhouse in a completely randomized

design with four irrigation treatments (50, 38, 26 and 14% of vessel capacity) and six replicates. The seedlings were made by the cutting method and transplanted to vessels, filled with commercial substrate, after 32 days. During the cycle the number of flowers per plant was evaluated. At 51, 103 and 133 DAT (days after transplantation) the root system was evaluated through the moisture content. The maximum technical efficiency was observed for the number of flowers per plant, at the irrigation depth of 34% of the CV. At the end of the cycle, both irrigation depths showed reduction of the root system. It is concluded that both lack and excess moisture in the substrate causes inhibition of shoot and root growth of the cultivar, as well as reduction of flower productivity.

**KEYWORDS:** Kalanchoe, Irrigation depth, Root system

## 1 | INTRODUÇÃO

A floricultura brasileira vem se desenvolvendo e qualificando com o passar dos anos, fazendo com que os produtores se interessem e invistam no mercado, que tem se tornado altamente rentável segundo dados da IBRAFLORE (2017), a qual apontou que o setor em 2016 faturou 6,65 bilhões. O país apresenta auto potencial produtivo, neste setor, pela sua diversidade climática, o que possibilita a produção de diversas cultivares de clima tropical e temperado.

A espécie Kalanchoe em números não é citada como planta ornamental mais consumida no país, no entanto, seu número de produção é crescente por se tratar de planta perene, resistente às altas temperaturas e incidência solar, de fácil manejo e valor aceitável de mercado.

O cultivo de plantas utilizando substrato já é uma técnica amplamente empregada na maioria dos países de agricultura avançada. Nos últimos anos a tecnologia tem chegado ao Brasil, porém, de forma pouco expressiva, devido ao alto custo e às particularidades no manejo de água e nutrientes associadas a esse sistema de cultivo (FERNANDES et al., 2001; CARRIJO et al., 2002).

O substrato é responsável pela disponibilidade de água e nutrientes às plantas, atuando diretamente no desenvolvimento e arquitetura do sistema radicular (BÖHN, 1979; LATIMER, 1991). A função principal do sistema radicular é absorver água e os nutrientes além de fixar a planta no solo, por isso as raízes estão diretamente ligadas a produtividade da planta.

A irrigação no meio agrícola é um fator limitante de produção, seja pelo excesso ou pelo déficit hídrico. E a utilização do manejo da irrigação, é primordial para as culturas manejadas em casas de vegetação.

Dentro deste contexto, objetivou-se avaliar a evolução do sistema radicular do Kalanchoe blossfeldiana Poelln., cv 'Gold Jewel', cultivada em substrato comercial, em função de diferentes lâminas de irrigação.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação com dimensões de 7 x 15m, com cobertura plástica localizada na área experimental do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, situada nas coordenadas geográficas 29° 47' de latitude, 55° 46' de longitude e 91 m de altitude.

As mudas da cultivar 'Gold Jewel' de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, foram postas para enraizar, no dia 09 de janeiro de 2015 através do método de estaquia, em bandejas de isopor com substrato comercial. A transferência das mudas para os vasos, ocorreu no dia 09 de fevereiro de 2015.

Os vasos utilizados no experimento foram de material plástico de cor escura, com 11 cm de diâmetro maior, 9,5 cm de diâmetro menor e 11 cm de altura. Os mesmos foram preenchidos com substrato comercial.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro tratamentos de irrigação e seis repetições, totalizando 24 unidades experimentais. As lâminas de irrigação, foram determinadas a partir da capacidade de retenção de água do vaso (CV), que foi determinada seguindo a metodologia de Kampf et al. (2006) conforme equação 1.

$$CV = m_{24hrs} - m_{seco} \quad (1)$$

Onde:

Cv: capacidade de retenção;  $m_{24hrs}$ : massa com substrato saturado, após 24 horas de drenagem;  $m_{seco}$ : massa seca do vaso preenchido com substrato seco.

A partir da CV, foram definidas as lâminas a serem testadas com percentual de 50% (T1), 38% (T2), 26% (T3) e 14% (T4) da CV. As irrigações iniciaram após o transplante e foram conduzidas até o final do ciclo da cultura. As mesmas eram realizadas manualmente, através de provetas graduadas, com intervalos de dois a três dias.

O consumo de água pela planta foi determinado pela equação 2, do balanço hídrico, proposta por Thornthwaite e Mather (1949):

$$E_{tr} = \sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{i+1} + I - D \quad (2)$$

Onde:

$E_{tr}$  = evapotranspiração real da cultivar no início de um dado intervalo de tempo;  $M_i$  = massa de substrato e água contida no vaso no início de um dado intervalo de tempo;  $M_{i+1}$  = massa de substrato e água remanescente no final do intervalo de tempo considerado;  $I$  = irrigação aplicado no intervalo  $\Delta t$ ;  $D$  = drenagem que ocorre no período  $\Delta t$ .

Para a avaliação do sistema radicular, aos 51, 103 e 133 DAT (dias após o transplante) realizou-se a destruição de uma planta por tratamento. Para a obtenção da matéria seca e úmida da parte radicular, estas foram armazenadas em sacos de papel pardo e pesadas, e após submetidas a secagem a 65° em estufa e pesadas novamente para obtenção da matéria seca. A metodologia utilizada foi a proposta por Neto e Barretos (2011), onde o teor de umidade da planta é obtido com base na diferença entre a massa úmida e massa seca da planta dividido pela massa úmida.

Ao longo do ciclo foi avaliado o número de flores por planta. Os dados foram submetidos à análise de variância. Posteriormente, quando significativos pelo teste F, os efeitos dos níveis de irrigação foram submetidos à análise de regressão buscando-se ajustar as equações. Na análise de regressão foram testados os modelos, linear e polinomial quadrático. As equações de regressão que melhor se ajustaram aos dados foram escolhidas com base na significância dos coeficientes de regressão a 1 % ( $P < 0,01$ ) e 5 % ( $P < 0,05$ ) de probabilidade pelo teste F e no maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

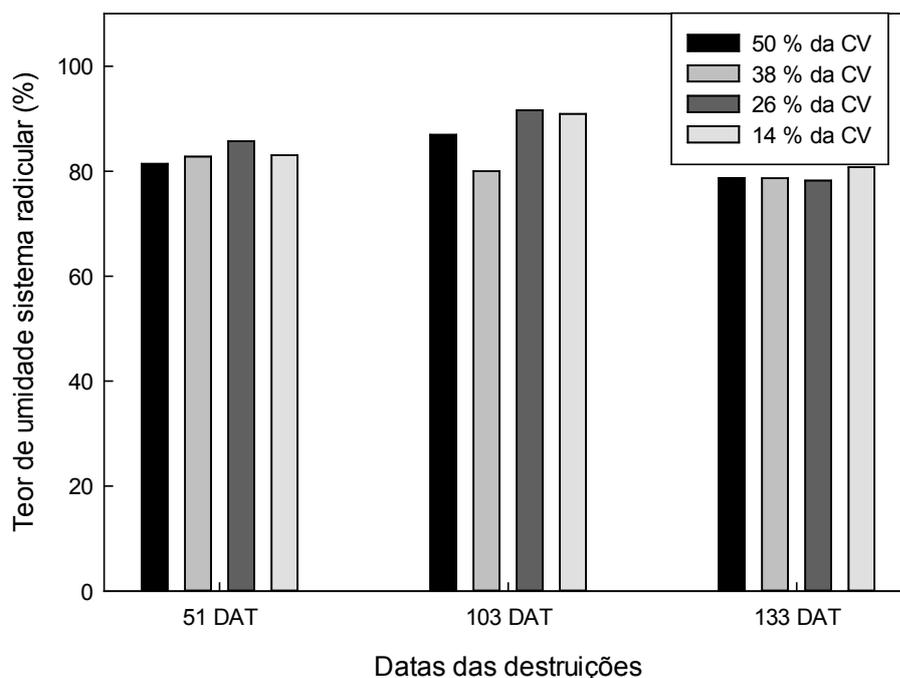
### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O consumo hídrico dos tratamentos com 50%, 38%, 26% e 14% de reposição da CV foram respectivamente: 1,60 mm.dia<sup>-1</sup>; 1,40 mm.dia<sup>-1</sup>; 1,20 mm.dia<sup>-1</sup> e 0,79 mm.dia<sup>-1</sup>. Obtendo-se os maiores consumos para a lâmina de irrigação de 50% e seguindo um formato decrescente até a lâmina de 14%. Estes resultados são inferiores aos encontrados por Souza et al. (2010), os autores observaram que o consumo de água para cultivo em vaso de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln., cultivar 'Gold Jewel', variou de 2,80 à 3,06 mm.dia<sup>-1</sup>.

Bortolás (2016), testando diversas lâminas de irrigação, encontrou um consumo médio diário variando de 0,99 à 1,26 mm.dia<sup>-1</sup>, para a cultivar 'Debbie'.

O teor de umidade do sistema radicular, da *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, 'Gold Jewel' é apresentado na figura 1. Observa-se que não ocorre um comportamento uniforme da massa radicular de acordo com o acréscimo das lâminas de irrigação. Nota-se que apenas aos 133 DAT a lâmina de irrigação correspondente a reposição de 14% da CV superou a lâmina de irrigação de 26% da CV, nos teores de umidade do sistema radicular.

Verificou-se, na Figura 1, que aos 133 DAT houve um decréscimo no peso da massa seca e úmida dos tratamentos, discordando dos resultados de Souza et al. (2010) que ao avaliarem a *Kalanchoe* em diversos substratos encontraram um crescimento no aumento do sistema radicular com o passar dos DAT, com exceção do tratamento com substrato composto de matéria orgânica e esterco bovino que aos 50 DAT diminuiu o sistema radicular em função da primeira avaliação aos 30 DAT.



**Figura 1.** Teor de umidade do sistema radicular ao longo do ciclo do Kalanchoe, nas distintas lâminas de irrigação.

Na Figura 2 são apresentadas as imagens das plantas, nas destruições realizadas ao longo do ciclo. Nota-se, em ambas as destruições, que o tratamento com a maior reposição de água apresentou sistema radicular com menor extensão vertical.

Conforme Dalri (2006), para turnos de rega com alta frequência de irrigação, ou taxa elevada de água, o sistema radicular tende a ficar contido dentro do bulbo molhado, enquanto para um turno de rega com maior intervalo entre irrigações, ou com menor lâmina, o sistema radicular tenderá a ocupar volume maior de solo para suprir as necessidades hídricas da cultura.



**Figura 2.** Sistema aéreo e radicular do Kalanchoe, nos diferentes estágios da cultura, (A) aos 51 DAT, (B) aos 103 DAT e (C) aos 133 DAT, e tratamentos de irrigação.

Observa-se, ainda na Figura 2 que o sistema radicular é menos denso no final do ciclo da cultura, corroborando com o estudo de Ohashi (2014), que percebeu que as taxas de crescimento do sistema radicular, da cana-de-açúcar, variaram ao longo do ciclo, sendo mais elevadas nos estádios iniciais.

As plantas não submetidas as condições de excesso ou déficit de irrigação, ou seja,

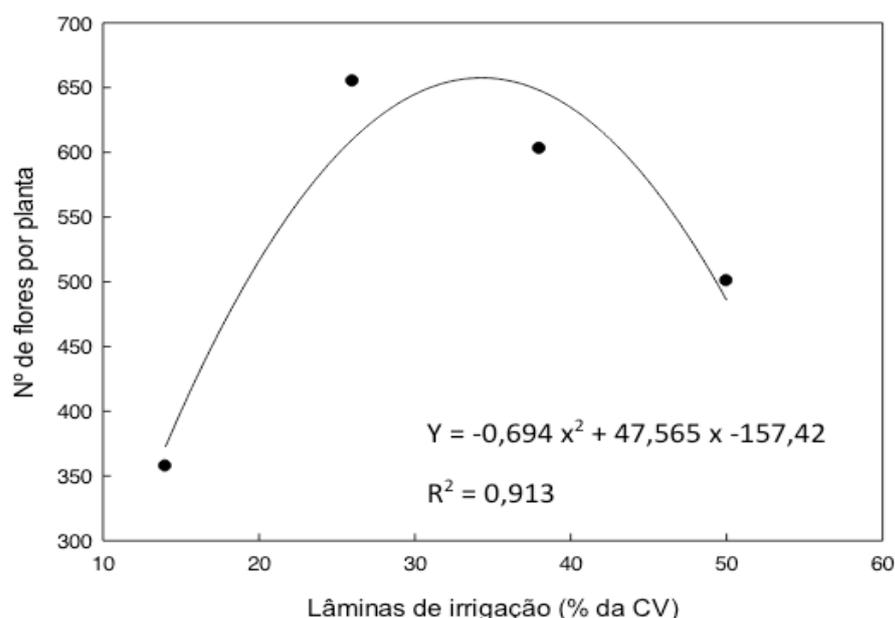
àquelas expostas as lâminas de irrigação de 38 e 26 % CV, apresentaram parte aérea maiores, mais densas e com coloração mais esverdeadas. Coloração avermelhada, que observa-se em algumas plantas, da Figura 2, é resposta do Kalanchoe ao excesso e déficit de água.

A cultivar 'Gold Jewel' teve sua produção máxima de flores, que é quando todas as inflorescências estão desenvolvidas, aos 191 DAT, denominado como final do ciclo. O comportamento do número de flores por planta em função das lâminas de irrigação aplicadas é apresentado na Figura 3.

Nota-se, para a Figura 3 que os valores se adequaram a uma equação polinomial quadrática, ajustando-se a um  $R^2$  de 0,913. A máxima eficiência técnica correspondeu a lâmina de irrigação de 34% da CV, obtendo o valor de 657,57 flores por planta.

Bortolás (2016) ao avaliar a cultivar do Kalanchoe encontrou maior desenvolvimento do número de flores por planta correspondente a lâmina de 20% da CV, e que com o aumento da lâmina de irrigação houve um decréscimo da média da variável analisada.

Pereira et al. (2009) observou que o número de flores é reduzido pelo aumento do nível de água, obtendo os maiores valores próximo a capacidade de campo.



**Figura 3.** Número médio de flores por planta do Kalanchoe, cv 'Gold Jewel' em função das diferentes lâminas de irrigação.

#### 4 | CONCLUSÕES

A falta e o excesso de umidade no substrato causam inibição do crescimento da parte aérea e radicular da cultivar 'Gold Jewel' de Kalanchoe blossfeldiana Poelln, bem como redução de sua produtividade de flores.

A cultivar em estudo, obteve máxima eficiência técnica em relação ao número de flores por planta, na lâmina de irrigação correspondente a reposição de 34% da CV. Quanto ao sistema radicular o mesmo apresentou melhor desenvolvimento na

reposição de 38 e 26 % da CV.

## REFERÊNCIAS

BÖHM, W. **Methods of Studying Root Systems**. Berlin: Springer Verlag, 1979. 188 p.

CARRIJO, O.A.; LIZ, R.S; MAKISHIMA, N. **Fibra de casca do coco verde como substrato agrícola**. Horticultura Brasileira, v. 20, p. 533-540, 2002.

DALRI, A.B. **Irrigação em cana-de-açúcar**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Orgs). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, 2006. p. 157-169.

FERNANDES, A. **Fertirrigação na cultura do melão em ambiente protegido, utilizando fertilizantes organominerais e químicos**. Tese. Campinas: UNICAMP-FEAGRI, 2001. 94 p.

**IBRAFLOR**. Instituto Brasileiro de Floricultura. Mercado de Flores. Disponível em: <[http://www.ibraflor.com/mercado\\_de\\_flores\\_vera\\_longuini.php](http://www.ibraflor.com/mercado_de_flores_vera_longuini.php)>. Acesso em: 05 de janeiro de 2018.

KÄMPF, A.N.; TAKENE, R.J.; SIQUEIRA, P.T.V.D. **Floricultura: técnicas de preparo de substratos**. – Brasília (DF): LK Editora e Comunicação, 2006. 132 p.

LATIMER, J.G. **Container size and shape influence growth and landscape performance of marigold seedling**. HortScience, v. 26, n. 2, p. 124-126, 1991.

NETO E.B.; BARRETO, L.P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife, UFRPE, 2011. 267 p.

OHASHI, A.Y.P. **Crescimento e distribuição do sistema radicular de cultivares de cana-de-açúcar fertirrigadas por gotejamento subsuperficial**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, SP.

PEREIRA, J.R.D. et al. **Crescimento e produção de hastes florais de gladiolo cultivado sob diferentes tensões de água no solo**. Revista Ciência e Agroecologia, v.33, n.4, p.965-970, 2009.

SOUZA, A. R. et al. **Consumo hídrico e desempenho de kalanchoe cultivado em substratos alternativos**. Revista Ciência Rural, v.40, n.3, p.534-540. 2010.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955. 104 p.

## UMA ABORDAGEM DE APRENDIZADO DE MÁQUINAS PARA AUXÍLIO NO PLANEJAMENTO E CONTROLE DE MANUTENÇÃO

### **Jéfter Mateus de Oliveira Rezende**

Instituto Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia  
Jataí – Goiás

### **Gustavo de Assis Costa**

Instituto Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia  
Jataí – Goiás

### **Camila Dias de Jesus**

Instituto Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia  
Jataí – Goiás

**RESUMO:** Falhas e defeitos em equipamentos são corriqueiros em qualquer ambiente industrial, gerando perdas e prejuízos materiais e financeiros. Para sanar problemas como estes, diferentes técnicas de manutenção corretiva e preventiva são empregadas. Dentre estas, podemos citar algumas técnicas baseadas em Inteligência Artificial, as quais permitem que seja utilizado o poder computacional para alcançar alto nível de capacidade analítica baseada em busca de padrões gerados a partir de dados previamente obtidos. Desta forma, é possível que sejam realizadas análises como predição de valores e/ou estados futuros ou mesmo a classificação de dados. A aplicação destas técnicas tem sido uma alternativa eficaz que permite a geração de soluções que irão

amenizar este problema. Neste trabalho foi desenvolvido um subsistema de apoio a um sistema automatizado responsável por integrar e monitorar uma parte de um processo industrial, com o intuito de oferecer auxílio ao planejamento e controle de manutenção em um ambiente que simula uma produção industrial, de forma que o programa informe dados que irão influenciar nas ações que deverão ser realizadas pela equipe de manutenção para evitar possíveis falhas no andamento do processo industrial. Para este subsistema, foram utilizados algoritmo de Regressão e algoritmo de Classificação. Para testar a viabilidade do mesmo, propõe-se um ambiente que simula uma produção industrial através do uso de uma base de dados pública que foi desenvolvida por meio da análise e monitoramento de um sistema de rolamento de motores. O subsistema foi testado em uma base de dados com medições feitas em um motor do IFG, e conseguiu encontrar um defeito. Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de uma solução baseada em aprendizado de máquina para auxiliar no planejamento e controle de manutenção em um ambiente simulado de produção industrial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inteligência Artificial; Planejamento e Controle de Manutenção; Aprendizado de Máquinas.

**ABSTRACT:** Failures and defects in equipment

and machines are commonplace in any industrial environment, taunting material and financial losses. To solve these problems, different techniques of corrective and preventive maintenance can be used. Among these techniques, we can mention some based on Artificial Intelligence, which allows computational power to be used to achieve high level of analytical capacity based on the search for patterns generated from previously obtained data. In this way, it's possible to carry out analyzes as prediction of values and/or future states or even the classification of data. The application of these techniques it has been a powerful alternative that allows find solutions that will decrease these problems. In this work, a subsystem to support an automated system that will monitor a part of an industrial process was developed, whit the purpose of offering assistance to planning and maintenance control in an environment that simulates an industrial production, so that the program informs data that will influence the actions that must be performed by maintenance team to avoid possible failures in the progress of the industrial process. For this subsystem, it's used Regression algorithm and Classification algorithm .To test this subsystem a public database was used, this database was originally developed through a monitoring the motor bearing system. The subsystem was tested in a database made on an IFG engine, and was able to find a defect. This project aims to develop and implement a solution based on machine learning to assist in planning and maintenance control in a simulated industrial production environment.

**KEYWORDS:** Artificial Intelligence; Planning and Control of Maintenance; Machine Learning.

## 1 | INTRODUÇÃO

Falhas e defeitos em equipamentos são comuns em processos industriais. De acordo com Lessmeier *et. al.* (2016), 40% a 70% das falhas em motores e sistemas de acionamentos eletromecânicos são causadas por danos no rolamento. Essas falhas podem interromper a produção, gerando prejuízos para o empresário e para o consumidor. Na tentativa de minimizar este problema, as indústrias começaram a criar equipes que realizam atividades de inspeção e monitoramento. Essas equipes, ao encontrarem alguma anormalidade, empregam o tipo de manutenção adequada, onde é considerado o grau de criticidade, prioridade das máquinas e os equipamentos da planta industrial.

Para auxílio neste tipo de análise, é possível utilizar métodos computacionais para garantir um resultado mais preciso e confiável. O uso de banco de dados pode ser de grande ajuda, pois será possível avaliar o histórico de equipamentos, quais danos ele já sofreu, se a vida útil de um equipamento já se esgotou, ou se alguma mudança na estrutura da máquina foi feita. Porém, em um banco de dados que contém muitas informações, a análise humana pode não ser indicada, pois algum fato ou dado importante pode passar despercebido pelo analisador, sendo necessário o uso de um

software ou um subsistema que irá verificar e informar os dados necessários para uma análise correta.

Uma ferramenta computacional que pode contribuir de modo extremamente relevante neste caso é a inteligência artificial. Se utilizarmos as técnicas de aprendizado de máquinas como colaboradoras na análise humana, teremos uma previsão mais precisa e confiável. Há diversas abordagens diferentes de inteligência artificial para solucionar uma grande variedade de problemas. Uma delas é o aprendizado de máquina, uma das áreas mais importantes dentro da inteligência artificial. Estas técnicas de aprendizado são utilizadas para encontrar padrões ou tendências em um conjunto de dados, e podem ser de grande auxílio para o planejamento e controle de manutenção, já que as equipes de inspeção e manutenção lidam com um grande número de dados. Dentre os algoritmos de aprendizado de máquinas, foi utilizado o algoritmo de aprendizado supervisionado. O subsistema criado neste trabalho utiliza algoritmo de Regressão e algoritmo de Classificação.

O presente artigo propõe utilizar algoritmos de aprendizado de máquinas para auxiliar em um planejamento e controle de manutenção.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para a criação do subsistema baseado em Inteligência Artificial apresentado neste artigo era necessária uma grande quantidade de dados, que deveriam ser colhidos em um ambiente industrial simulado, com diferentes aspectos de funcionamento de motores, para subsidiar a análise proposta. Esta foi encontrada no trabalho de Lessmeier *et. al.* (2016), no qual os autores descrevem detalhadamente uma base de dados bastante completa e heterogênea que foi disponibilizada publicamente para experimentos. A base de dados inclui diferentes tipos de danos relacionados ao rolamento do motor.

O trabalho de Lessmeier *et. al.* (2016) gerou dados de sinais de medição através do monitoramento do rolamento do motor. Foram feitas medições com motores sem nenhum tipo de dano em seu rolamento, medições em motores com danos artificiais em seu rolamento e danos através da aceleração do tempo de vida do motor.

Os tipos de danos existem no anel interno e no anel externo do rolamento, e foram classificados em danos singulares, danos repetitivos e danos múltiplos. Foram atribuídos 5 níveis relacionados à extensão do dano, sendo o nível 1 o dano mínimo e o nível 5 o dano com dimensões maiores.

Foram realizados 32 experimentos com rolamentos diferentes. Os arquivos estão disponíveis para download e podem ser encontrada na página da Universidade Paderborn. As bases de dados possuem medições de 10 variáveis. As variáveis medidas foram:

- Força;

- Corrente de fase 1;
- Corrente de fase 2;
- Velocidade;
- Torque;
- Vibração;
- Temperatura;
- HostService;
- Temp\_1Hz;
- Mech\_4Khz.

Na página de download, cada arquivo possui um código baseado na classificação dos danos. Neste trabalho, foram utilizados os dados relativos a:

- Perfuração no anel interno no rolamento do motor, sendo o seu código para download KA07;
- Motor sem nenhum tipo de dano, sendo o seu código para download K006;
- Deformação plástica, sendo seu código para download KA30;

Também foram feitas medições em um motor do Instituto Federal de Goiás – Câmpus Jataí. Para medição e armazenamento dos dados, foi utilizado um motor de indução trifásico de 0,5 c.v de potência, 3410 r.p.m, 60 Hz, fabricado pela empresa WEG. As variáveis mensuradas foram: Corrente de fase e velocidade.

Para aferição da velocidade, foi utilizado um tacômetro óptico digital portátil, modelo TD-704 com mira a laser. O tacômetro mediu uma velocidade constante para todo o tempo de operação do motor. A velocidade medida foi de 3592 r.p.m. A medição da corrente de fase foi feita utilizando o equipamento *PowerPad* modelo 8335.

Os dados foram gravados e armazenados em uma planilha no Microsoft Excel. O motor foi acionado com ligação Triângulo, um multímetro foi utilizado para verificar a tensão da rede que chegava ao motor. Após uma primeira ligação do motor, para verificar se estava funcionando corretamente, foram colocados os bornes do *PowerPad* em conjunto com alicate amperímetro em cada fase que saía da alimentação para o motor. A forma de onda foi observada no visor do *PowerPad* e transferida do equipamento para um notebook através de uma conexão USB.

Para este subsistema foi aplicada a linguagem de programação *Python*. Esta linguagem de programação foi escolhida porque é muito versátil, possui comandos simples e fáceis de desenvolver e é também considerada uma das principais linguagens para o desenvolvimento de soluções de aprendizado de máquinas. O interpretador utilizado foi o *Jupyter Notebook*.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico apresentaremos os resultados dos algoritmos que fazem parte do subsistema. Estes resultados foram obtidos a partir de duas bases de dados: de Lessmeier *et. al.* (2016); das medições feitas em um motor do IFG.

Na base de dados, algumas variáveis não foram utilizadas no algoritmo, pois tinham poucas amostras e estavam prejudicando os algoritmos de regressão e de classificação. As variáveis não utilizadas foram: Temperatura, Temp\_1Hz. Algumas variáveis continham mais amostras do que outras, portanto, foi necessário normalizar a quantidade de amostras das variáveis, de forma que elas tivessem a mesma quantidade. Sem essa normalização, o algoritmo de regressão não funcionaria. As variáveis que continham mais amostras do que outras e precisaram ser normalizadas foram: Corrente de fase 1, Corrente de fase 2 e Vibração.

Foi utilizado uma função de normalização de dados, pois algumas variáveis continham dados na escala decimal, outras variáveis continham dados na escala de milhar. Essa função de normalização utiliza fatores de divisão e multiplicação para diminuir a diferença entre os valores das variáveis. Se não houvesse essa normalização, o algoritmo não funcionaria adequadamente. Neste experimento, as bases de dados obtidas em Lessmeier *et. al.* (2016), foram concatenadas em uma só.

Foi necessário extrair os dados no formato .mat e copiá-los para uma planilha no programa Libre Office. Para isso, foi criado um algoritmo, utilizando a linguagem de programação *Python*, que realiza essa extração automaticamente de todas as variáveis e também faz a conversão para uma planilha em Libre Office. Esta conversão foi necessária, pois o *Jupyter Notebook* não reconhece arquivos no formato .mat, mas aceita arquivos com extensão .csv, que é uma das extensões que podem ser utilizada pelo Libre Office.

Todos esses dados foram coletados em motores sem danos e defeitos, com danos artificiais e danos acelerando o tempo de vida. Cada variável apresenta um comportamento diferente para cada tipo de dano e defeito, com apenas a temperatura se mantendo mais ou menos constante para toda a base de dados.

#### 3.1 Resultados do algoritmo de regressão

As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam a previsão realizada pelo algoritmo para 4 variáveis da base de dados concatenada, que são: Corrente de fase 1, Corrente de fase 2, Velocidade, Força. Essas 4 variáveis são dependentes, as variáveis restantes foram utilizadas como independentes para cada uma das previsões. Nos gráficos, a cor azul representa os valores reais, verde representa os valores previstos.

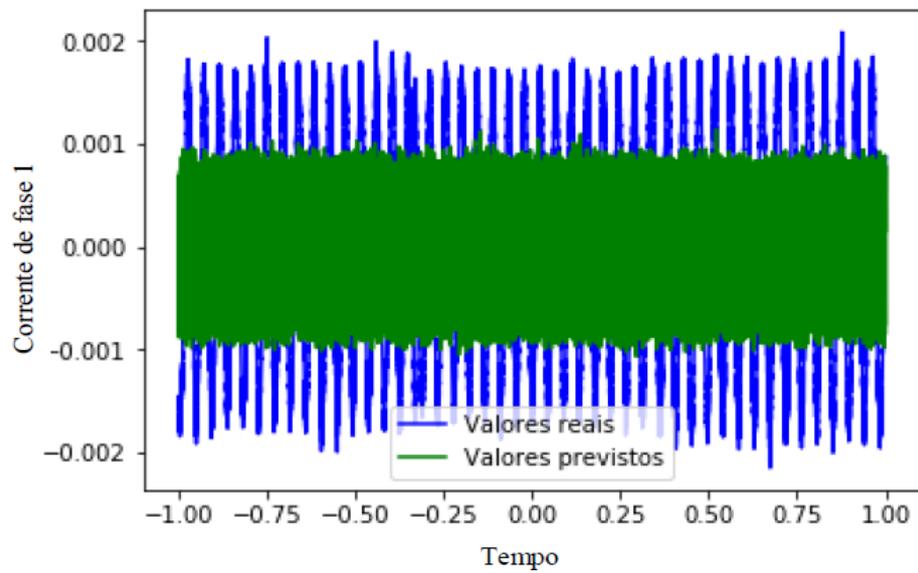


Figura 1: Previsão para Corrente de Fase 1.

Fonte: Autoria própria.

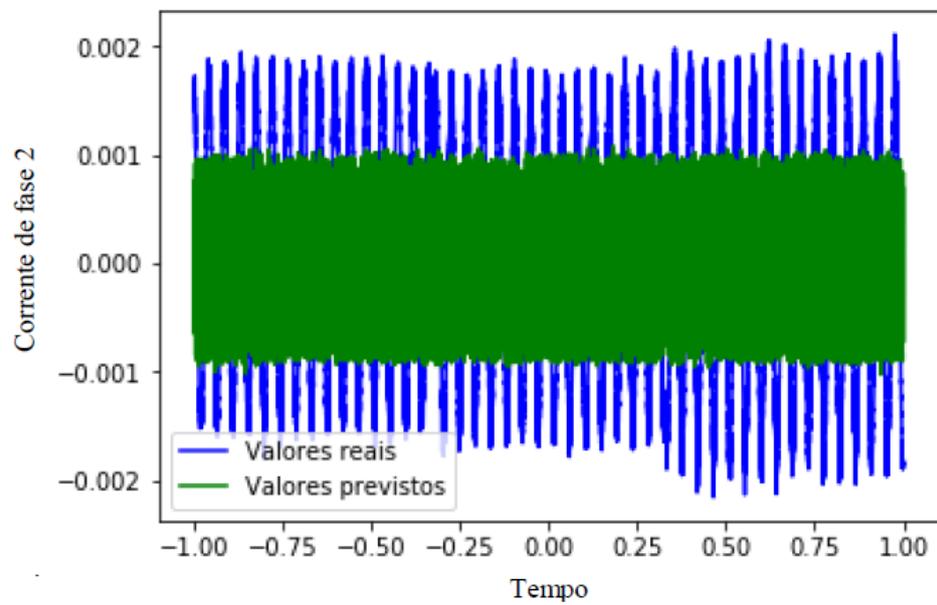


Figura 2: Previsão para Corrente de Fase 2.

Fonte: Autoria própria.

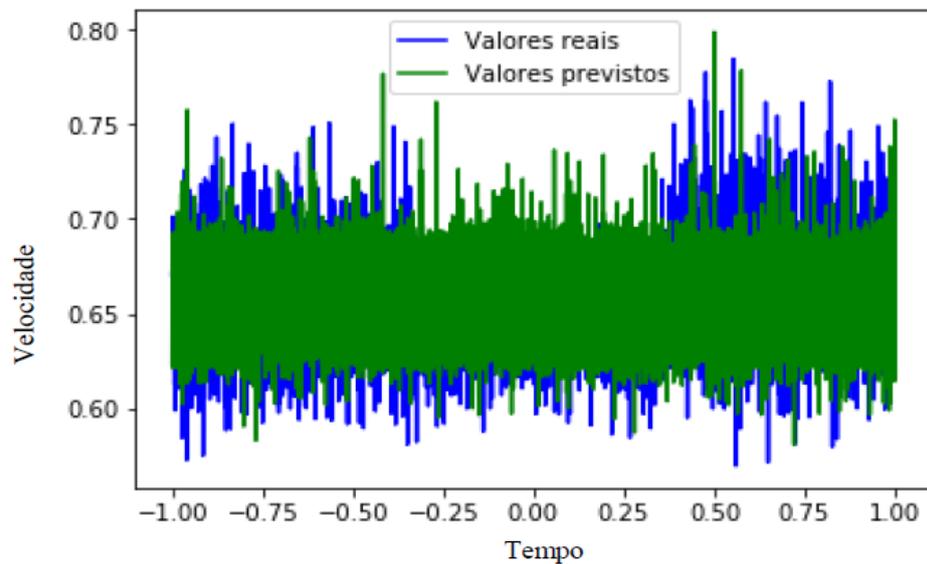


Figura 3: Previsão para Velocidade.

Fonte : Autoria própria.

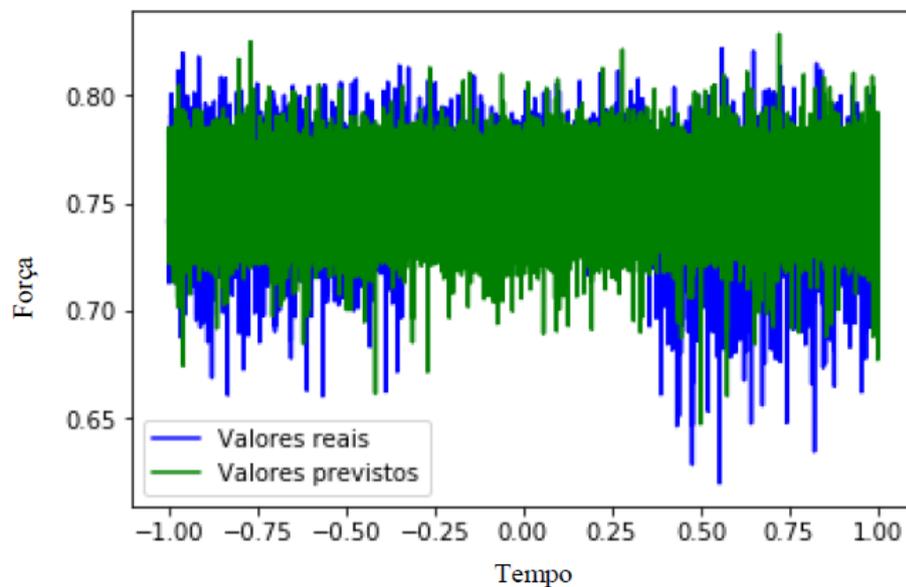


Figura 4: Previsão para Força.

Fonte: Autoria própria.

A previsão mostrada acima foi para uma base de dados concatenada, contendo os dados das três bases de dados: K006 (Motor Saudável), KA07 (Perfuração), KA30 (Deformação Plástica).

Para as variáveis cujos valores eram muito próximos de zero, como Corrente de fase 1 e Corrente de fase 2, a previsão foi menor, pois o algoritmo de regressão faz suas previsões com base nos métodos dos mínimos quadrados, como os valores são próximos de zero, logo, a precisão do algoritmo será menor. Para as variáveis onde os valores eram maiores, como Força e Velocidade, o algoritmo teve uma precisão de quase 99%.

### 3.2 Resultados do algoritmo de Classificação

No algoritmo de classificação, a base de dados concatenada dos motores foi utilizada como referência. No algoritmo, para classificar os dados, foi empregada a seguinte estratégia:

- Motores saudáveis recebem o valor de: Zero;
- Motores defeituosos recebem valores maiores que Zero.

Os motores defeituosos não poderiam conter os mesmos valores, pois o algoritmo não poderia diferenciar um defeito do outro. Para solucionar este problema, a estratégia adotada foi:

- KA07 recebe o valor de: Um (1);
- KA30 recebe o valor de: Dois (2).

O algoritmo de classificação escolhido foi o KNN (K - *Nearest - Neighbour*). Primeiramente foi criado um modelo de treinamento do algoritmo de classificação. Foram utilizados da base concatenada 70% dos dados, valor geralmente adotado para testes e treinamentos de algoritmos. A Figura 5 mostra o resultado do treinamento do algoritmo de classificação para esta base de dados concatenada.

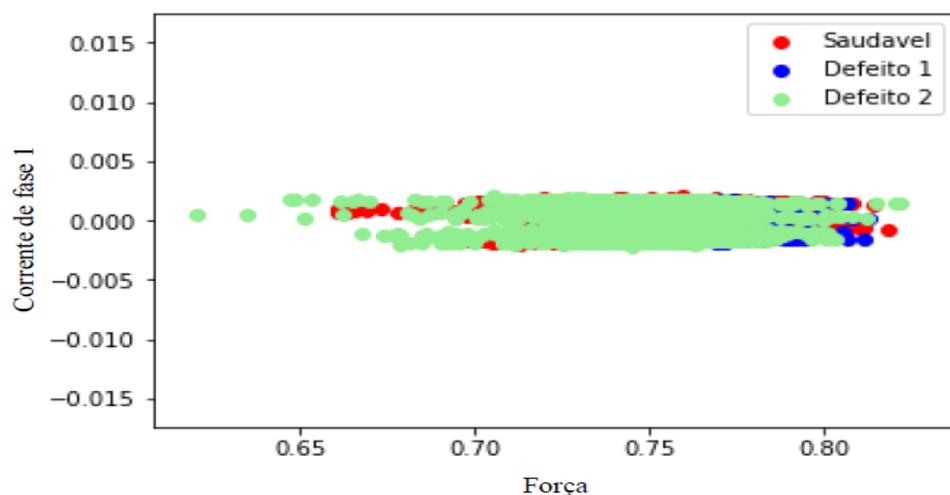


Figura 5: Comportamento do algoritmo de classificação (Treinamento).

Fonte: Autoria própria.

Na figura 5, no eixo Y estão os valores de Corrente de fase 1 e no eixo X os valores de Força. Essas duas variáveis foram correlacionadas porque nos mostram um gráfico mais fácil de ser interpretado, mas quaisquer das variáveis que existam na base de dados poderiam ser correlacionadas.

A partir dos valores existentes na base concatenada, foi plotada a correlação entre

as duas variáveis para visualmente entendermos a distribuição da condição do motor. Em vermelho, estão classificados os valores saudáveis, em azul estão classificados os valores com o defeito de perfuração, em verde os valores classificados como deformação plástica.

Como foi informado anteriormente, somente 70% dos valores da base foram utilizados. Após o teste do modelo de treinamento, foram testados no algoritmo de classificação somente os valores que não foram utilizados antes, ou seja, os 30% restantes dos valores das medições. A Figura 6 apresenta o resultado do algoritmo de classificação para essa base de dados.

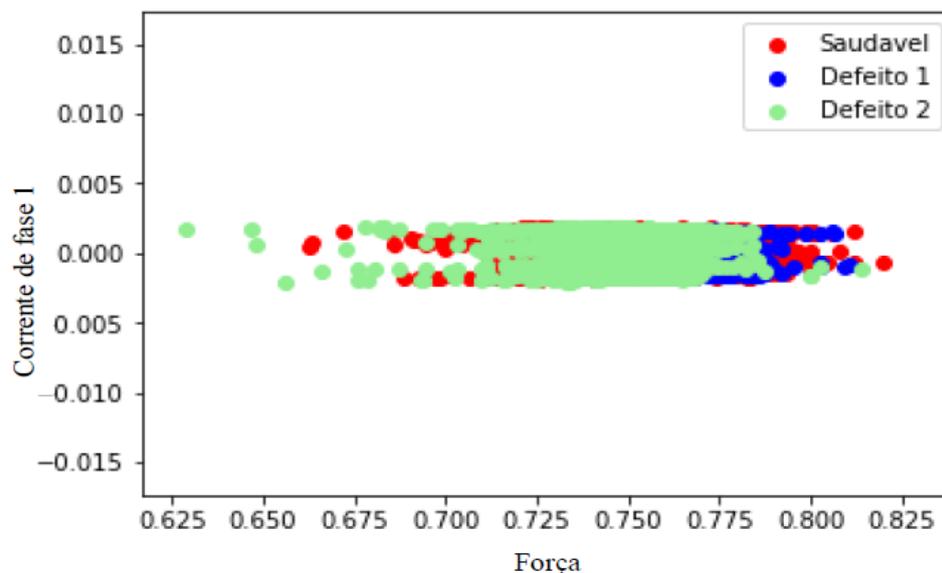


Figura 6: Comportamento do algoritmo de classificação (Teste).

Fonte: Autoria própria.

A figura 6 mostra o resultado da classificação dos dados rotulados. No eixo Y estão os valores de Corrente de fase 1 e no eixo X os valores de Força. A partir dos valores existentes na base concatenada, foi plotada a correlação entre as duas variáveis. Após isso, o algoritmo foi testado novamente, para verificar o que ele consegue classificar dos 30% dos valores da base de dados concatenada, porém sem os dados serem rotulados. A Figura 7 mostra a classificação obtida.

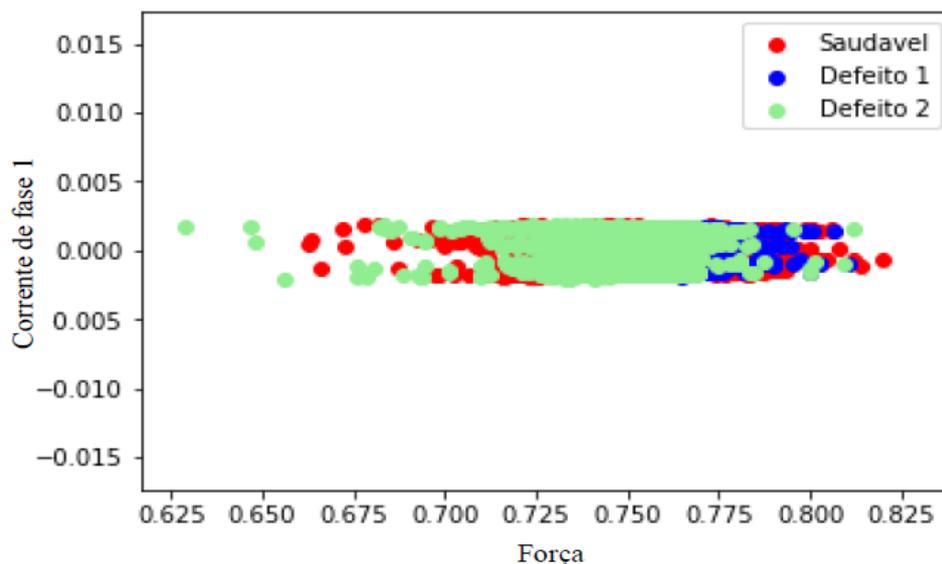


Figura 7: Comportamento do algoritmo de classificação (Predição).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 representa a classificação dos dados sem serem rotulados. A precisão da classificação foi de aproximadamente 86%. Na Figura 7, no eixo Y estão os valores de Corrente de fase 1 e no eixo X os valores de Força. Os valores da relação entre as duas variáveis estão mostrados no gráfico.

### 3.3 Resultados em medições no laboratório do campus jataí

Neste tópico será mostrado o comportamento do algoritmo para medições feitas em um motor no laboratório de Eletrônica de Potência do IFG – Campus Jataí. As Figura 8, 9 e 10 mostram os resultados do algoritmo de regressão para a corrente nas três fases do motor:

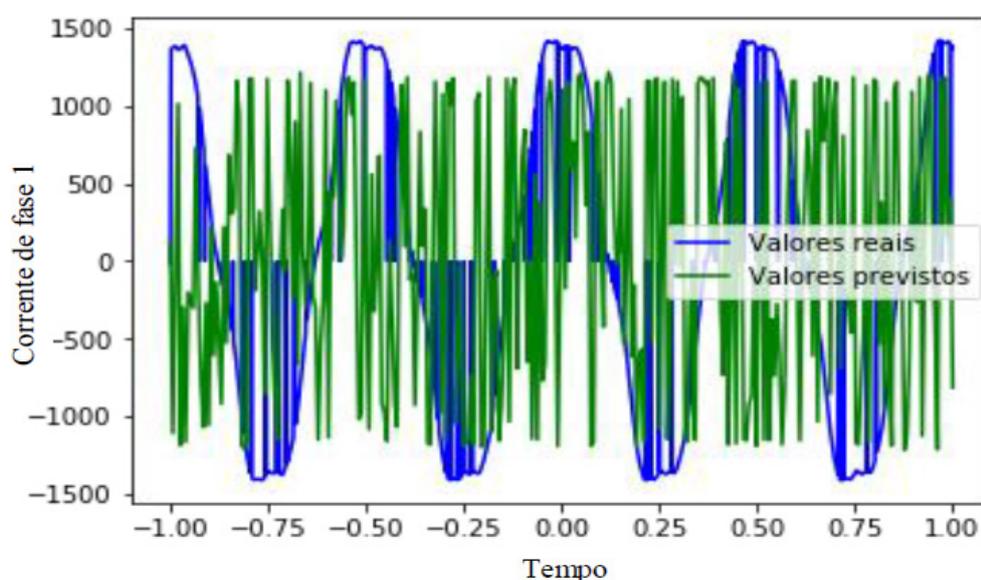


Figura 8: Comportamento do algoritmo de Regressão para a Corrente na Fase 1.

Fonte: Autoria própria.

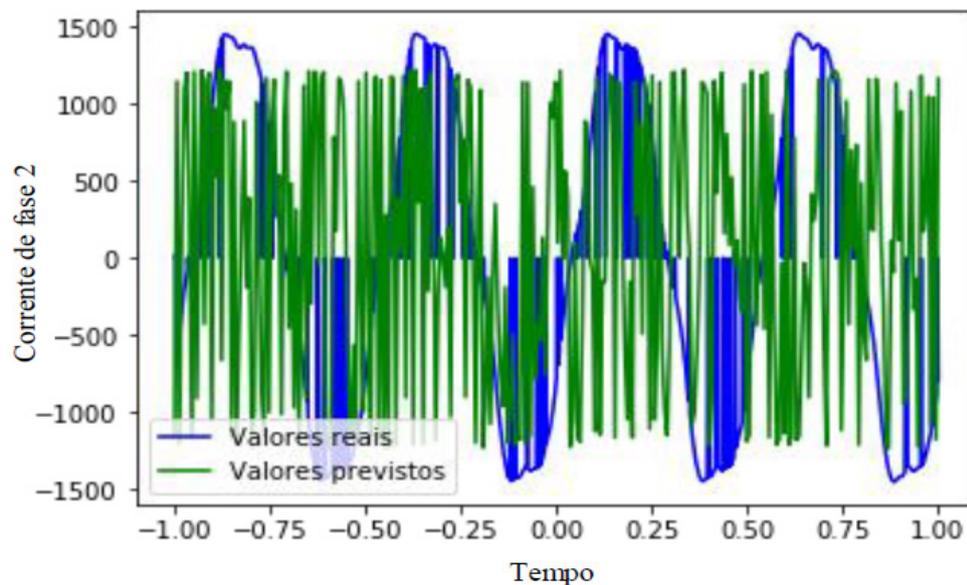


Figura 9: Comportamento do algoritmo de Regressão para a Corrente na Fase 2.  
Fonte: Autoria própria.

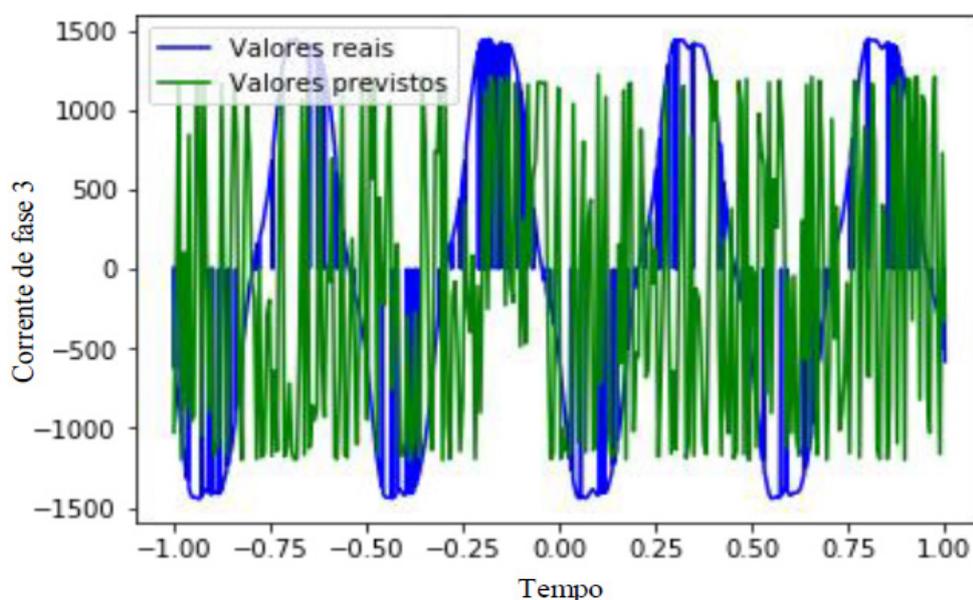


Figura 10: Comportamento do algoritmo de Regressão para a Corrente na Fase 3.  
Fonte: Autoria própria.

O algoritmo de classificação teve uma precisão de aproximadamente 61% para essa base de dados. Se fossem colhidas mais amostras de medições de outras variáveis, tais como torque, força e vibração, essa precisão poderia ser maior.

Antes de testar o algoritmo de classificação na base de dados, foi necessário criar um modelo de classificação e testar uma base de dados diferente. A base utilizada para teste foi a base de dados concatenada contendo os valores das medições das três bases de dados: K006, KA07, KA30. Porém, as únicas variáveis aproveitadas foram velocidade e corrente de fase, pois foram as variáveis que foram medidas no motor.

O algoritmo conseguiu identificar um defeito no motor onde foram realizadas tais

medições. O comportamento do algoritmo de classificação é mostrado na Figura 11.

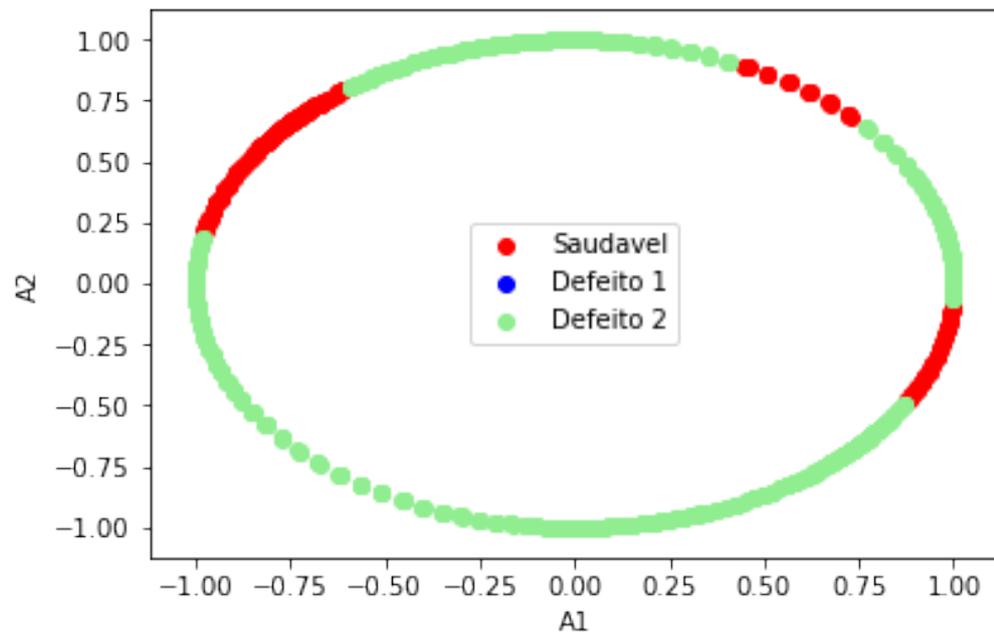


Figura 11: Comportamento do algoritmo de Classificação para a base de dados.

Fonte: A autoria própria.

Na figura 11 foram correlacionadas a Corrente de fase 1, representada pela variável A1, e a Corrente de fase 2, representada pela variável A2. O algoritmo classificou a base de dados obtida com medições no motor do IFG com o defeito 2, o defeito 1 não foi encontrado. O defeito encontrado é detalhado na Tabela 1:

Código do rolamento	Modo principal e sintomas	Elemento do rolamento	Combinação	Arranjos	Extensão do dano	Característica do dano
KA30	Deformação Plástica: Identação	OR	R	Aleatório	1	Distribuído
OR : Anel Externo; IR : Anel Interno ; R : Dano Repetitivo; S : Dano Singular; M : Danos Múltiplos.						

Tabela 1: Comportamento do algoritmo de Classificação para a base de dados.

Fonte: Lessmeier *et. al.* 2016 (Adaptado).

Quando foram colhidas as amostras das variáveis do motor do IFG, os sinais de corrente de fase estavam um pouco distorcidos. Essa distorção pode ocorrer por diversos fatores, neste caso, acredita-se que foi devido às harmônicas. Essa distorção pode influenciar no algoritmo de regressão, talvez classificando as amostras obtidas com um defeito que não exista no motor. No próximo tópico iremos trazer as considerações finais para este trabalho.

## 4 | CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento deste trabalho, concluímos que o algoritmo de regressão, para variáveis com valores próximos de 1, possui uma eficácia de previsão de 99%. Já para variáveis com valores mais próximos de 0, o algoritmo apresentou uma eficácia menor.

O algoritmo de classificação obteve uma precisão de aproximadamente 86% para a base de dados concatenada. Na base dos dados obtidos através de medições feitas no motor no IFG, a precisão do algoritmo foi de aproximadamente 61%.

A quantidade de amostras também interferiu no resultado, pois a base de dados do motor do IFG continha 1024 amostras, o que, comparado à base de dados de treinamento com variáveis que continham mais de 200000 amostras, é muito pouco.

O subsistema desenvolvido demonstrou ser capaz de auxiliar as decisões de uma equipe de manutenção, informando o dano ou defeito encontrado em uma base de dados feita através de medições de variáveis de um motor elétrico, tais como: Velocidade, Corrente de fase, Torque, Vibração e Força.

Este trabalho foi aplicado especificamente na área de Engenharia Elétrica, porém o uso da Inteligência Artificial pode abrir caminhos para solucionar problemas em outras áreas da engenharia e em outras áreas do conhecimento humano, como por exemplo: Biologia, Medicina, Geografia, Matemática, entre outros.

## REFERÊNCIAS

LESSMEIER, Christian; ZIMMER, Detmar; SEXTRO, Walter; KIMOTHO, James.

***Condition Monitoring of Bearing Damage in Electromechanical Drive Systems by Using Motor Current Signals of Electric Motors: A Benchmark Data Set for Data-Driven Classification.***

Paderborn University, julho 2016.

## UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) PARA OBTENÇÃO DO MAPA DE DEFORMAÇÕES EM PAINÉIS DE MADEIRA DE *Pinus oocarpa*

**Eduardo Hélio de Novais Miranda**

Universidade Federal de Lavras  
Lavras – Minas Gerais

**Rodrigo Allan Pereira**

Universidade Federal de Lavras  
Lavras – Minas Gerais

**RESUMO:** Diversas metodologias convencionais são capazes de caracterizar os materiais, no entanto, a maioria destas técnicas apresenta problemas como o custo dos equipamentos e dos ensaios, além de causarem danos permanentes aos corpos de prova. Neste contexto, surgem alternativas à estas técnicas, dentre as quais estão as técnicas não destrutivas de ensaio, destacando-se a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV). A técnica PIV mede variações de posição de uma região de análise em um objeto a partir de imagens capturadas durante uma sessão de carregamento. O objetivo nesta pesquisa foi analisar os deslocamentos ocorridos na superfície de painéis de madeira de *Pinus oocarpa*, submetidos ao ensaio de flexão estática, através da construção do mapa de deformações. Com a aplicação de uma regressão linear entre os valores de deformação obtidos antes da ruptura dos corpos de prova, verificou-se que o valor do coeficiente

de determinação entre os valores advindos da técnica PIV e do relógio comparador foi consideravelmente satisfatório. Concluiu-se que foi possível a análise das deformações ocorridas na superfície dos corpos de prova de maneira precisa, através da técnica não destrutiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deslocamentos, Flexão Estática, Técnica não Destrutiva.

**ABSTRACT:** Several conventional methodologies are able to characterize the materials, however, most of these techniques present problems such as the cost of equipment and tests, besides causing permanent damage to the specimens. In this context, there are alternatives to these techniques, among which are non-destructive testing techniques, especially the particle image velocimetry (PIV) technique. The PIV technique measures position variations of an analysis region on an object from images captured during a load session. The objective of this research was to analyze the displacements on the surface of *Pinus oocarpa* wood panels, submitted to the static bending test, through the construction of the deformation map. With the application of a linear regression between the values of deformation obtained before the rupture of the specimens, it was verified that the value of the coefficient of determination between the values derived from

the PIV technique and the comparator watch was considerably satisfactory. It was concluded that it was possible to analyze the deformations occurring on the surface of the specimens in a precise way, through the non-destructive technique.

**KEYWORDS:** Deformation, Static flexion, Non-destructive techniques.

## 1 | INTRODUÇÃO

A utilização e criação de diferentes tipos de materiais na construção civil têm crescido nos últimos anos. A demanda por materiais com diferentes propriedades físicas e mecânicas aumenta a necessidade de melhor avaliação e conhecimento de suas características. (PAIVA, 2012).

As técnicas convencionais de ensaio utilizadas atualmente para análise das propriedades mecânicas dos materiais demandam alto tempo de processamento, necessitam de equipamentos específicos, grande número de amostras, e causam danos permanentes ao material ensaiado.

As técnicas não destrutivas de ensaio (END's) são uma alternativa frente a necessidade de caracterizar os materiais que serão utilizados em uma estrutura, pois não causam danos permanentes aos corpos de prova, nem demandam materiais de alto custo para serem implementados, na maioria das vezes. (PEREIRA, 2017).

Os END's mais usados atualmente são, dentre outros, o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações, micro-ondas, emissão acústica e técnicas óticas, destacando-se dentre esses métodos, a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) (PEREIRA, 2017).

A técnica PIV foi desenvolvida para o campo de materiais fluidos e gases inicialmente, mas, alguns autores já estudaram a aplicação deste método em corpos sólidos, para verificação de deformações e obtenção de propriedades, tais como Braga Júnior et al. (2015), Souza et al. (2014) e Pereira (2017).

A técnica PIV nos materiais sólidos é utilizada através da captura de imagens em intervalos de tempo pré-definidos durante uma fase de carregamento em um ensaio de flexão estática. Após capturadas, as imagens são processadas em um algoritmo que calcula os deslocamentos ocorridos na superfície do material.

A partir dos deslocamentos dessas janelas de interrogação, regiões aleatórias pré-definidas na superfície dos corpos de prova, por onde calculam-se os deslocamentos sofridos; e com o auxílio de um algoritmo computacional, é possível a criação de um mapa de deformação, que demonstra, qualitativamente e quantitativamente os deslocamentos ocorridos em toda superfície do material ensaiado.

Diante da necessidade de avaliar materiais com função estrutural, a madeira destaca-se por possuir características atraentes, como, baixo consumo de energia para seu processamento, a alta resistência específica, o bom isolamento térmico e elétrico, além de ser um material complexo devido a sua anisotropia. Por isso, pode ser inferido que, se a técnica PIV for capaz de medir deslocamentos corretamente

nesse material complexo, poderá ser utilizada em materiais de complexidade inferior, como aço e concreto. (PAIVA, 2012).

Objetivou-se neste trabalho, analisar os deslocamentos ocorridos na superfície de corpos de prova de madeira de *Pinus oocarpa*, através da construção de um mapa de deformações, comparando os resultados da técnica PIV com os valores obtidos pelo relógio comparador, um método convencional.

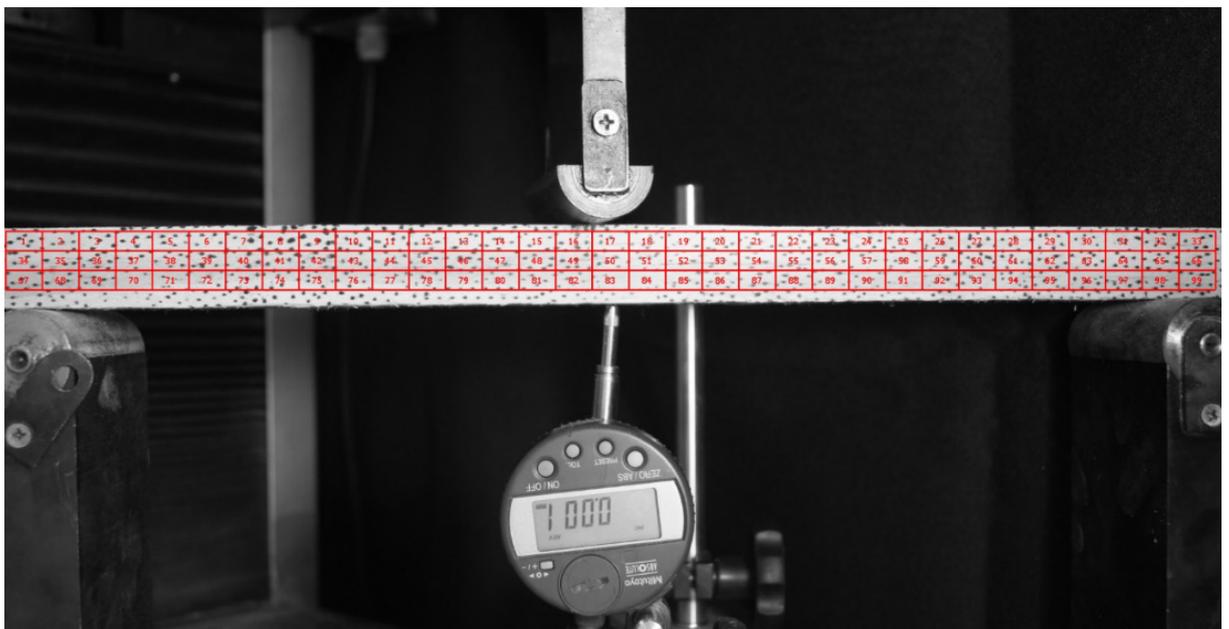
## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa, foram utilizados 25 corpos de prova de *Pinus Oocarpa*. Tais corpos de prova foram serrados nas dimensões 2,5 x 2,5 x 41 cm utilizando-se uma serra circular esquadrejadeira, de acordo com a ASTM D143-94.

Depois da confecção, os corpos de prova foram submetidos a ensaio de flexão estática, em uma Máquina Universal de Ensaio com capacidade de carga de 30 toneladas-força, sendo a velocidade adotada no ensaio de 1,3mm/min. Utilizou-se a técnica PIV para medição das deformações ocorridas nos corpos de prova durante os ensaios de flexão estática.

Para a execução da técnica PIV, os corpos de prova foram marcados com pontos de coloração preta, sendo os pontos de marcação distribuídos aleatoriamente por toda sua superfície. Para fins de comparação, posicionou-se um relógio comparador para encontrar os valores de deslocamento da madeira no centro do corpo de prova.

A aplicação da técnica PIV consiste em capturar imagens consecutivas durante a sessão de carregamento em períodos de tempo definidos. Para obtenção das imagens, foi utilizada uma câmera digital, alocada perpendicularmente à superfície da amostra. As imagens foram capturadas em intervalos de 30 segundos, após o acionamento da Máquina Universal de Ensaio, conforme a Figura 1.



**Figura 1.** Vista geral da Máquina Universal de Ensaio, a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV, os materiais ensaiados e as janelas de interrogação

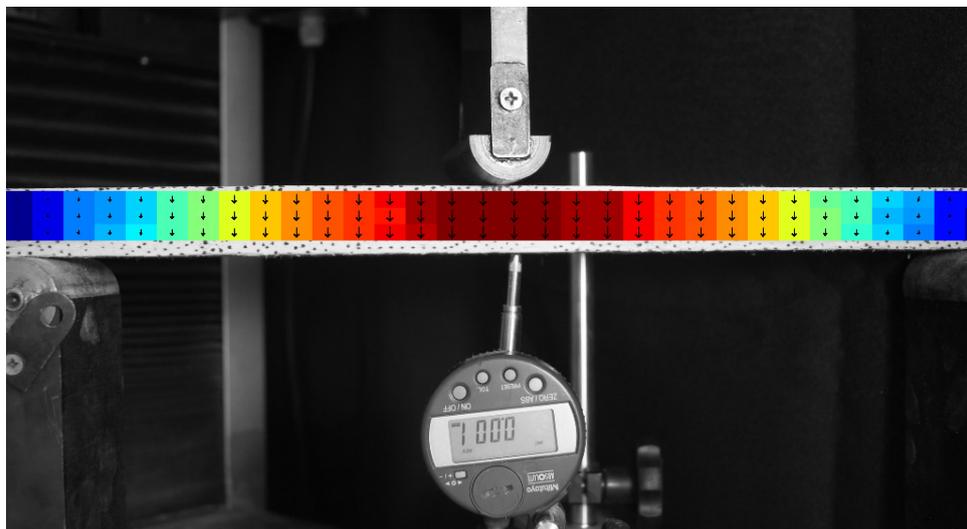
escolhidas para criação do mapa de deformações.

As imagens capturadas foram processadas no software “ImageJ”, para redução de seu tamanho de armazenamento, para que o tempo de processamento das imagens no algoritmo, seja reduzido.

Depois de preparadas, as imagens foram processadas em um algoritmo computacional, onde foi possível a obtenção de um mapa de deformações para cada um dos corpos de prova, e a análise dos deslocamentos obtidos em toda superfície destes corpos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

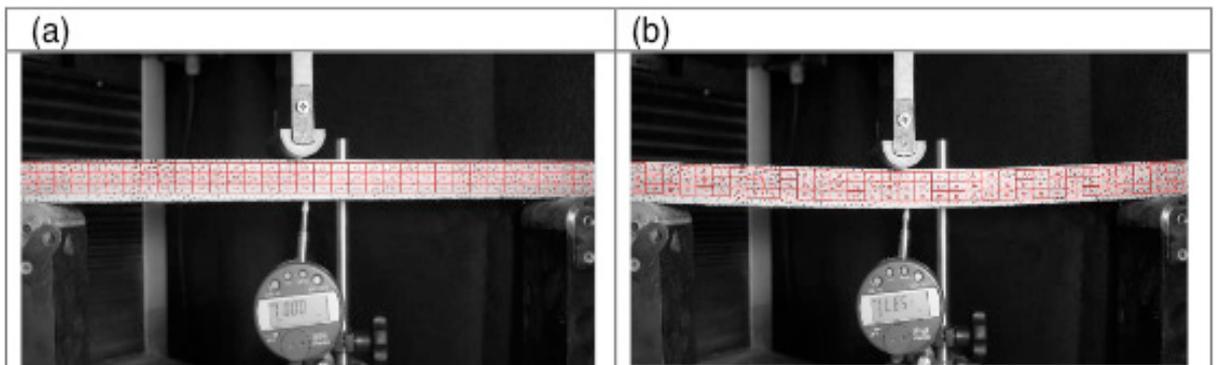
O algoritmo computacional calculou as deformações ocorridas em regiões previamente escolhidas dos corpos de prova e resultou um mapa de deformações (Figura 2).



**Figura 2.** Mapa de deformações resultante do corpo de prova e a respectiva legenda do grau de deformação conforme a coloração.

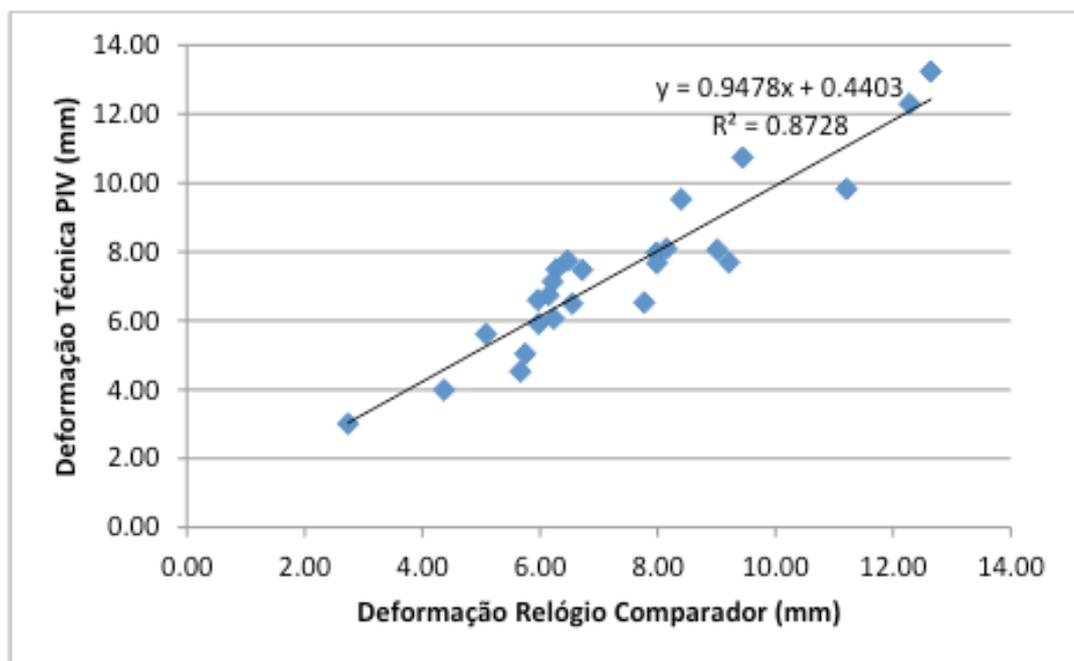
A viga de madeira bi apoiada, sofreu um carregamento central, por isso apresentou menores valores de deformação perto de seus apoios e grandes deslocamentos nas superfícies próximas a aplicação da carga; esse fato é corroborado pela teoria de Hibeler (2011). Na Figura 2, está exposta tal situação, onde se notam setas maiores e mais escuras na região central do corpo de prova de *Pinus oocarpa*, representando excessivos deslocamentos e setas menores e mais claras nas regiões dos apoios, indicando menores deformações.

Além do mapa de deformações, a técnica PIV calculou as deformações em cada região escolhida, sendo possível a comparação com os deslocamentos ocorridos no relógio comparador (Figuras 3a e 3b).



**Figura 3a e 3b.** Deformações ocorridas nas janelas de interrogação a partir da Técnica PIV (Figura 3a) e pelo método do relógio comparador (Figura 3b).

Os deslocamentos ocorridos na superfície de cada corpo de prova no instante anterior à ruptura foram ajustados por meio de uma regressão linear (Gráfico 1). O valor do coeficiente de determinação entre a técnica PIV e o relógio comparador é de 0,872, portanto, em 87,2% das vezes, a variável dependente (valores da técnica PIV) foi capaz de corresponder aos valores da variável independente (relógio comparador), o que demonstra a eficiência da técnica não destrutiva frente a um método convencionalmente utilizado.



**Gráfico 1.** Ajuste linear entre as deformações ocorridas em cada corpo de prova, a partir dos dois métodos usados.

Outros autores já utilizaram técnicas não destrutivas para obtenção de propriedades mecânicas, como Targa et al. (2005), que utilizaram o método de vibração transversal em espécies de eucalipto; já Ballarin et al. (2005), aplicaram o método de ultra-som para descobrirem o módulo de elasticidade de madeira de *Pinus Taeda*.

Outros pesquisadores, também, já comprovaram a eficiência da técnica PIV frente a métodos convencionais, com relação a parâmetros mecânicos, como, por

exemplo, Pereira (2017) e Braga Junior et al. (2015).

## 4 | CONCLUSÕES

Concluiu-se que a técnica PIV foi capaz de demonstrar com precisão os deslocamentos ocorridos na superfície dos corpos de prova, a partir da construção do mapa de deformações. Através de uma regressão linear, entre os valores encontrados de deformação, no momento anterior à ruptura de cada corpo de prova, pela técnica PIV e pelo relógio comparador, foi encontrado um coeficiente de determinação de 87,2%, o que demonstra a eficiência da técnica PIV frente a um método convencional.

## 5 | AUTORIZAÇÕES/RECONHECIMENTO

Ao submeter o trabalho, os autores tornam-se responsáveis por todo o conteúdo da obra.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 94**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber-ASTM D143-94, 1994.

BALLARIN, W.A. et al. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som**. Jaboticabal, 2005.

BRAGA JÚNIOR, R. A. et al. Maps of deformations in a cantilever beam using particle image velocimetry (PIV) and speckle patterns. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 68, n. 3, p. 273-278, 2015.

HIBBELER, R.C. Estática - **Mecânica para Engenharia**. 12<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

Paiva, J.C. **Madeiras**. Disponível em: <http://ww1.jcpaiva.net/files/ensino/alunos/20022003/teses/020370017/madeiras/madeiras.htm>. Consultado em 18 de maio de 2017.

PALMA, H. C. L. Determinação de propriedades elásticas e de resistência em compensados de *Pinus elliottii*. **SCIENTIA FORESTALIS**. n. 51, p. 37-48, 1997.

PEREIRA, R. A. **Velocimetria por imagens de partículas aplicadas ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SOUZA, T. M. et al. Non-destructive technology associating PIV and Sunset laser to create wood deformation maps and predict failure. **Biosystems Engineering**, London, v. 126, p. 109-116, 2014.

TARGA, L.A. et al. **Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal**, Jaboticabal, 2005.

## UTILIZAÇÃO DE AGENTE DE SECAGEM NA PRODUÇÃO DE PAPEL CARTÃO

### **Crivian Pelisser**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó – SC, Brasil.

### **Márcio Antônio Fiori**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó – SC, Brasil.

### **Josiane Maria Muneron de Mello**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó – SC, Brasil.

### **Jaqueline Scapinello**

Área das Ciências Exatas e Ambientais, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó – SC, Brasil.

**RESUMO:** O papel é um dos produtos mais utilizados no cotidiano. Além de possuir muitas aplicações, tem a capacidade de ser reciclado por inúmeras vezes. Para aumentar a eficiência do processo de reciclagem de papel, muitos insumos são utilizados. Neste trabalho, utilizou-se um agente de secagem durante a etapa de formação da folha de papel, com o objetivo de reduzir a quantidade de insumos utilizados na secagem do papel cartão, e conseqüentemente gerar economia de energia. Analisou-se os parâmetros de consistência de fibras na caixa de entrada, água branca e retenção, umidade,

gramatura, espessura, consumo de vapor e lenha, sem e com a aplicação do agente de secagem. Após a aplicação do agente de secagem a consistência de fibras da caixa de entrada reduziu 11,17%, a consistência da água branca reduziu em 38,77% e a retenção de fibras na mesa plana apresentou um aumento de 21,32%. A qualidade do papel foi mantida para os padrões 188 e 210 g m<sup>-2</sup>. Houve uma redução de 12,55% no consumo de lenha para caldeira, logo a aplicação do agente de secagem trouxe melhorias para o processo de produção do papel cartão.

**PALAVRAS-CHAVE:** reciclagem de papel, redução de custos, papel cartão.

### USE OF DRYING AGENT IN PAPER PRODUCTION CARD

**ABSTRACT:** Paper is one of the most used products in everyday life. In addition to possessing many applications, it has the property of being recycled numerous times. To increase the paper recycling efficiency, many inputs are used. In this paper, a drying agent was used during the step of forming the paper sheet, in order to reduce the amount of paperboard used to dry the paper, and consequently generate energy savings. The parameters of fiber consistency in the input box, white water and

retention, humidity, weight, thickness, steam consumption and firewood, without and with the application of the drying agent were analyzed. After application of the drying agent the inlet fiber consistency reduced 11.17%, the consistency of the white water reduced by 38.77% and the retention of fibers in the flat table showed an increase of 21.32%. Paper quality was maintained for standards 188 and 210 g m<sup>-2</sup>. There was a 12.55% reduction in consumption of wood for boiler, so the application of the drying agent brought improvements to the paperboard production process.

**KEYWORDS:** paper recycling, cost reduction, paperboard.

## 1 | INTRODUÇÃO

A indústria de celulose e papel está entre as mais poluidoras, consumindo aproximadamente 5% de toda a energia consumida pelas indústrias produzindo cerca de 2% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo (KONG; HASANBEIGI; PRICE, 2016). No processo produtivo do papel virgem, a etapa de formação da polpa representa a maior fonte de poluição de todo o processo. Nesta etapa, os efluentes líquidos são característicos da decomposição da madeira e podem conter lignina, compostos como cloretos, sulfatos, sulfitos, ácido acético e resinas ácidas. Além disso, a indústria de papel e celulose exige que extensas áreas sejam destinadas aos reflorestamentos, que geram impactos negativos sobre a flora e a fauna nativas (POKHREL; VIRARAGHAVAN, 2004; BHATNAGAR et al., 2007; TOCZYLOWSKA-MAMIŃSKA, 2017).

Os benefícios econômicos da indústria de celulose e papel a levaram a ser um dos segmentos industriais mais importantes do mundo (FURLEY; AQUINOGA; SIQUEIRA, 2018). No entanto, nos últimos anos, as fábricas de celulose e papel estão enfrentando desafios com os mecanismos de eficiência energética e geração de poluentes (FURLEY; AQUINOGA; SIQUEIRA, 2018). Diante disso, a reciclagem de papel vem figurando como uma alternativa ao alto consumo energético e de recursos naturais, além de atuar como geradora de renda e na redução da quantidade de resíduos em lixões e aterros. A produção de uma tonelada de papel novo consome aproximadamente 100 mil litros de água, 50 a 60 eucaliptos e 5.000 kW de energia, enquanto que a produção de uma tonelada de papel reciclado consome, 1,2 tonelada de papel pós-consumo, 2 mil litros de água e 1.000 a 2.000 kW de energia (ZHANG, 2013; BRASIL, 2014; WU et al., 2014; PIVNENKO, 2015; CHEN et al., 2016).

Por definição, papel é uma folha de uma suspensão de fibras vegetais, as quais foram desintegradas, refinadas e depuradas e tiveram ou não a adição de insumos. Estes compostos adicionados são responsáveis pela aplicação futura (MARTINEZ et al. 2018). Dentre os vários tipos de papel, existe o papel cartão, que é caracterizado pela alta resistência sendo aplicado em sua maioria na produção de produtos de escritório. A demanda mundial de papel cartão vem aumentando significativamente, e a sua produção deverá crescer 146% até o ano de 2050, segundo estimativas da Agência Internacional de Energia (IEA), passando de 365 Mt (2006) para 900 Mt (2050)

KONG; HASANBEIGI; PRICE, 2016).

O papel cartão reciclado, em particular, é obtido através da desagregação de papéis. A Figura 1 apresenta o fluxograma tradicional para a produção do papel cartão de uma unidade que recicla o papel no estado de Santa Catarina.

As principais matérias-primas utilizadas no processo de produção de papel cartão são as aparas de jornal II (definida como aparas de jornais, geradas em redações, encalhe de redação e retorno de banca, desde que livre de revistas e papéis coloridos, sem cola) e também aparas mista I (definida como uma mistura de aparas de diversos tipos de papéis de fibra curta, é permitida a presença de papéis fabricados com pasta de alto rendimento)(NBR 15483, 2009).

A etapa de preparação da massa para obtenção do papel cartão, consiste na desagregação do material, adicionando-se as aparas, os insumos e a água branca, que é proveniente do reuso da água do processo, no *hidrapulper*, até a completa homogeneidade da suspensão. Nesta etapa são removidos os resíduos grosseiros como plásticos, madeira, metais e isopor que são encaminhados para o aterro industrial. Na etapa de filtragem a suspensão fibrosa passa por vários processos que tem a finalidade de retirar qualquer material que não seja fibras de papel, isso ocorre através do uso de peneiras, separador magnético e separador de areia. A suspensão segue para a máquina de papel e é admitida no processo através da caixa de entrada, passando pela tela formadora, prensas hidráulicas e secadores sendo então obtido o papel reciclado que segue para a etapa de conversão, a qual consiste em acoplar várias bobinas que se transformam em papel cartão (ROBERT, 2007; CHERUBIN et al., 2013; PELISSER, 2018).

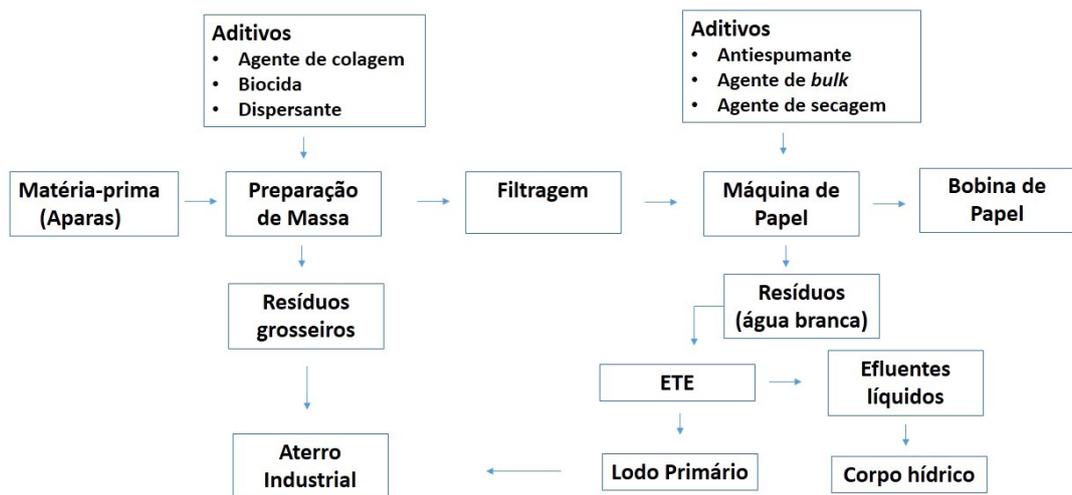


Figura 1. Fluxograma tradicional do processo de produção do papel cartão de uma unidade recicladora de papel do estado de Santa Catarina

Fonte: ROBERT, 2007; PELISSER, 2018.

Muitos insumos são aplicados no processo de reciclagem de papel, dentre eles está o amido que tem por finalidade melhorar o processo de colagem reduzindo a

quantidade de pó do papel cartão durante os processos de corte. O agente de *bulk* que tem por função aumentar o volume do papel, ou seja, aumentar a espessura e facilitar a secagem. O agente de colagem confere propriedades hidrofóbicas ao papel. A utilização do agente coagulante permite controlar a demanda iônica, reduzir a concentração de sólidos nas águas residuais, aumentar a drenagem na tela formadora. O dispersante, tem como ação evitar a formação de sujeira e entupimento dos feltros. Já o polímero catiônico, auxilia no controle de cargas na máquina de papel. A aplicação do antiespumante tem a finalidade de controlar a geração de espumas evitando o transbordamento de tanques além de evitar a má formação do papel devido a presença de bolhas. A aplicação do agente de secagem visa melhorar muitos aspectos da máquina de papel, tais como, redução na consistência, aumento da retenção das fibras na mesa plana (etapa de formação do papel) o que ocasionará uma redução no volume de lodo da estação de tratamento de efluentes (E.T.E.).

Um dos parâmetros a ser avaliado no processo produtivo de reciclagem de papel é a consistência de fibras de papel da caixa de entrada, pois ela influencia diretamente na formação do papel. As variações bruscas de consistência acabam por gerar quebra de papel na máquina durante a produção das bobinas, por isso é importante que a consistência tenha as menores variações possíveis. A água branca representa as perdas na mesa plana, na qual uma quantidade de fibras curtas não é aproveitada para a formação do papel, podendo assim calcular a retenção de fibras, que representa o grau de aproveitamento da matéria-prima (CHERUBIN, 2013; PELISSER; SCAPINELLO; PERRET, 2014).

A gramatura e a espessura também são parâmetros importantes na determinação da qualidade do papel produzido, nas quais alterações na espessura podem causar variações na tensão de bobinamento e conseqüente deformação da bobina, já a gramatura que relaciona massa por área e afeta outras propriedades como espessura, opacidade e desempenho em etapas posteriores (SUZANO, 2014).

A proposta deste trabalho é modificar a utilização de insumos com o objetivo de gerar melhorias no processo mantendo-se a qualidade do papel cartão. O principal insumo a ser adicionado no processo é o agente de secagem que irá substituir o polímero catiônico, o amido de mandioca, irá reduzir a dosagem do agente de *bulk* (2,2 kg t<sup>-1</sup> para 1,7 kg t<sup>-1</sup>) e remoção completa do agente de colagem, agente dispersante e coagulante.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta os insumos que foram retirados do processo de obtenção do papel cartão, a partir de papel reciclado, bem como os insumos que foram mantidos e os adicionados e suas respectivas concentrações em kg de insumo por tonelada de papel produzido. Além disso, a Tabela 1 apresenta também o local onde o insumo é aplicado no processo tradicional.

Insumo	Local de Aplicação	Dosagens (kg t <sup>-1</sup> )	
		Antes	Depois
Amido de Mandioca	Máquina de papel	4,0	0,0
Agente de <i>Bulk</i>	Máquina de papel	2,2	1,7
Agente de colagem	Tanque de preparação de massa	0,7	0,0
Agente coagulante	Tanque de preparação de massa	0,6	0,0
Dispersante	Tanque de água branca	0,5	0,0
Polímero	Máquina de papel	0,2	0,0
Antiespumante	Máquina de papel	0,4	0,4
Agente de secagem	Caixa de nível	0,0	8,0

Tabela 1. Relação de insumos aplicados e retirados durante o processo produtivo de reciclagem de papel para produção de papel cartão, com suas respectivas quantidades em kg por tonelada de papel.

Os insumos aplicados na produção de papel cartão foram dosados com o auxílio de bombas dosadoras na forma de soluções em pontos específicos do processo.

A aplicação do agente de cola, está ligada diretamente a absorção de água depende fundamentalmente da qualidade da celulose utilizada, do seu processo de obtenção e do tipo de revestimento aplicado (POÇAS, 2014). Para medir a capacidade de absorção de água no papel utiliza-se o Método Cobb<sub>120'</sub>, descrito na NBR 535 de 2011. Os ensaios foram realizados com a adição de 0,7 kg t<sup>-1</sup> de agente de colagem e sem a adição do agente de colagem, para o papel com gramatura de 172 g m<sup>-2</sup> e espessura de 0,37 mm. Foram retiradas oito amostras de dois lotes distintos, o ensaio foi feito em duplicata, sendo que a média foi utilizada na análise estatística.

O agente de secagem possui características que lhe permitem substituir muitos dos insumos utilizados no processo de fabricação de papel, tornando o processo mais eficiente, mais fácil de ser controlado e ainda melhorar alguns aspectos do processo produtivo. Para verificar estas melhorias, faz-se necessário avaliar vários parâmetros do processo antes das modificações propostas e após as modificações propostas (Tabela 1). Avaliou-se a consistência de fibras na caixa de entrada, a consistência de fibras na mesa plana, a retenção, a umidade, a gramatura, espessura, consumo de vapor e lenha.

A consistência pode ser definida como a razão da massa de uma porção de pasta celulósica, depois de seca até massa constante, do material que pode ser separado por filtração e a massa da porção sem filtrar, os ensaios de consistência e retenção foram realizados conforme estabelece a NBR 14003 de 2003. Já a retenção influencia diretamente na drenagem de água na mesa plana. Uma maior drenagem da água da suspensão fibrosa, na mesa plana, tende a aumentar o teor seco do papel, conseqüentemente ocasionará uma redução no consumo de vapor, gerando uma economia de lenha. Para avaliar todos estes parâmetros, serão comparados dados do

processo obtidos antes da aplicação do agente de secagem e, valores obtidos durante a aplicação do agente de secagem.

Para analisar os efeitos da adição do agente de secagem, foram coletados dados da máquina de papel. O consumo de vapor é obtido através do controlador de processo, onde é possível visualizar a pressão da caldeira, a vazão de vapor requerida pelo sistema e a pressão de cada grupo de equipamentos que realizam a secagem do material (secador). A coleta de dados de vapor foi realizada antes e depois da aplicação do agente de secagem. A verificação do consumo de lenha foi realizada diariamente através do formulário de consumo de lenha, preenchido pelos colaboradores da empresa.

A gramatura é a massa do papel expressa em gramas por metro quadrado. É determinada através da metodologia descrita na NBR 536 de 05/2002. A espessura foi determinada com o auxílio do micrômetro (Digital Micrometer, Modelo 49-85), conforme a NBR 536:2006. A umidade da bobina foi realizada conforme preconiza a NBR 10664 de 1989.

Os dados foram obtidos por meio de réplicas e são apresentados como média  $\pm$  desvio padrão da média. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as diferenças entre as médias foram estabelecidas com um teste de *Tukey*. Os resultados são dados no texto como valores de probabilidade, com  $p < 0,05$  adotadas como critério de significância.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 AVALIAÇÃO DO AGENTE DE COLAGEM

Os resultados obtidos para o ensaio Cobb (absorção de água) com a aplicação do agente de cola e sem a aplicação do agente estão apresentados na Figura 2.

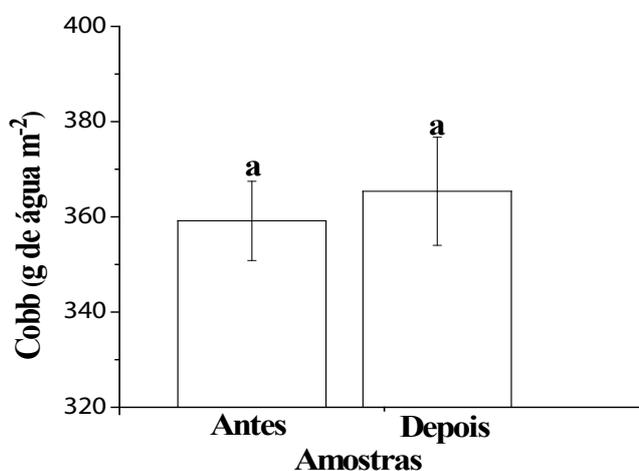


Figura 2. Ensaio Cobb com e sem a aplicação do agente de colagem. Média com a mesma letra nas barras não diferem pelo teste de *Tukey* ( $P < 0,05$ )

A Figura 2 demonstra que com a adição do agente de colagem a absorção de água (Cobb) foi de  $359,15 \pm 8,31$  g de água  $m^{-2}$  e  $365,38 \pm 11,34$  g de água  $m^{-2}$  para as amostras sem a aplicação de  $0,7$  kg  $ton^{-1}$  do agente de colagem, ou seja, a adição do agente não promoveu mudanças significativas na absorção de água do papel, o que é evidenciado pelo valor de  $P = 0,2338$ . Desta forma, verifica-se que o agente de colagem pode ser retirado do processo sem prejuízos a qualidade do papel, reduzindo os custos de produção.

### 3.2 ADIÇÃO DO AGENTE DE SECAGEM

#### 3.2.1 ANÁLISES DE CONSISTÊNCIA

A redução na consistência com a manutenção da gramatura e espessura gera uma economia de matéria-prima, deve-se a isso a importância de melhorar estes parâmetros. Valores ideais de consistência de fibras da caixa de entrada, segundo o projeto da máquina de papel, sugerem que a consistência seja no máximo de 1% (VIANA, 2015). A amostra sem adição do agente de secagem apresentou consistência média da caixa de entrada de  $1,388\% \pm 0,075\%$ . Após a aplicação do agente de secagem a consistência média da caixa de entrada foi de  $1,233\% \pm 0,075\%$  (Figura 3).

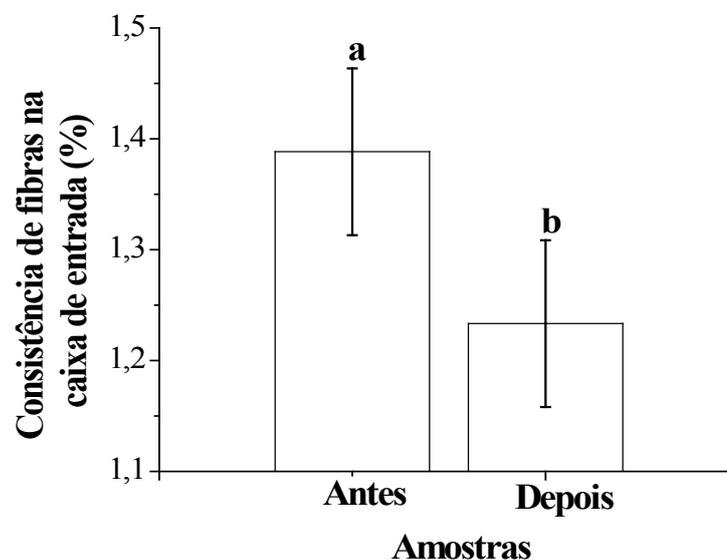


Figura 3. Análise de consistência da caixa de entrada de massa antes e depois da aplicação do agente de secagem. Média com letras diferentes nas barras diferem pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

Pode-se verificar que as amostras são diferentes estatisticamente ( $p = 0,0051$ ). Isto significa que a adição do agente de secagem foi positiva, pois houve uma redução de 11,17% na consistência de fibras da caixa de entrada, se aproximando mais do valor de projeto do equipamento, gerando uma melhoria no processo produtivo do papel, pois ela influencia diretamente na formação do papel. Segundo Viana (2015) a consistência típica na máquina de papel é de 1,0% e deve ser controlada para que

a qualidade do papel seja alcançada e a produtividade garantida. Quanto menor a consistência, menor será a probabilidade de formação de flocos durante a construção ou estruturação da folha e conseqüentemente haverá menos quebras de papel na máquina durante a produção das bobinas, por isso é importante que a consistência tenha as menores variações possíveis (CHERUBIN, 2013; PELISSER; SCAPINELLO; PERRET, 2014).

A Figura 4 A e B representam os resultados obtidos para a consistência de fibras na água branca e retenção sem a adição do agente de secagem e com a adição do agente de secagem.

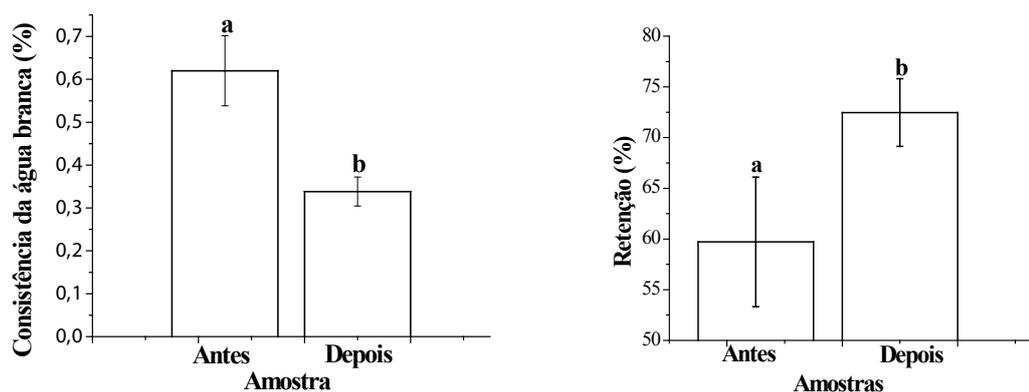


Figura 4. A - Consistência de fibras da água branca sem aplicação do agente de secagem e com aplicação do agente de secagem. B - Retenção de fibras na mesa plana sem e com aplicação do agente de secagem. Média com letras diferentes nas barras diferem pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

A consistência de água branca sem a aplicação do produto foi de  $0,552\% \pm 0,034\%$  e para as amostras com a aplicação  $0,338\% \pm 0,081\%$ , (Figura 4 A). Através da análise estatística observa-se que os valores são diferentes ( $p = 0,0002$ ) e apontam para uma redução de aproximadamente 38,77% de perdas de fibras no processo. Considerando que parte da água branca é reaproveitada no processo e parte é enviada para a estação de tratamento de efluentes, com esta redução haverá também uma redução na quantidade de lodo produzida na E.T.E.

A água branca representa as perdas na mesa plana, na qual uma quantidade de fibras curtas não é aproveitada para a formação do papel. Assim realizando-se as duas análises citadas anteriormente, é possível calcular a retenção de fibras, que representa o grau de aproveitamento da matéria-prima (CHERUBIN, 2013; PELISSER; SCAPINELLO; PERRET, 2014).

A retenção de cada um dos seus componentes será crítica para as propriedades e qualidade da folha de papel, assim como para o atendimento de requisitos ambientais e de custos, além de demonstrar a eficiência do processo de produção do papel, avaliado em relação ao total de fibras que entram no sistema e o percentual de fibras retidas na tela formadora (VIANA, 2015). As amostras coletadas antes da aplicação do agente de

secagem apresentaram como resultado de retenção de fibras na mesa plana  $59,72\% \pm 6,39\%$ , e após a aplicação do agente de secagem as amostras apresentaram a porcentagem de retenção de  $72,45\% \pm 3,33\%$ . Através da análise estatística, verificou-se que esses valores diferem significativamente ( $p = 0,0015$ ) (Figura 4 B). Isto significa que o processo se tornou mais eficiente, com um aumento de aproveitamento das fibras de  $21,32\%$ . Segundo Viana (2015) trata-se de um dos mais importantes parâmetros de operação e controle da parte úmida do processo de fabricação de papel e está associada a mecanismos de natureza química, mecânica ou combinação dos dois mecanismos. Enquanto os materiais dissolvidos na suspensão são retidos por adsorção ou através da formação de ligações químicas aos sólidos suspensos, estes últimos são retidos mediante um processo de filtração durante o processo de formação da folha úmida de papel. Tal processo ocorrerá independentemente de forças de atração ou de repulsão entre as partículas, desta forma, pode-se inferir que possivelmente a aplicação do agente de secagem aumentou o número de interações química entre as moléculas.

### 3.2.2 CONSUMO DE VAPOR E LENHA

A adição do agente de secagem aumenta o desague na mesa plana e a retenção das fibras no processo e desta forma o papel entra no processo de secagem com uma umidade menor, quando comparada a umidade do papel sem o agente de secagem, o que irá gerar uma economia de vapor e conseqüentemente de lenha. A Figura 5 A e B representa os resultados obtidos sem a adição do agente de secagem e com a adição do agente de secagem para os padrões  $172 \text{ g m}^{-2}$  e  $188 \text{ g m}^{-2}$ .

O consumo de vapor ( $\text{kg t}^{-1}$ ) é proporcional ao tipo de papel (gramatura) que está sendo produzido, para o papel de  $172 \text{ g m}^{-2}$  utilizou-se  $2.036,31 \text{ kg t}^{-1} \pm 277 \text{ kg t}^{-1}$  e após a aplicação do agente de secagem foi utilizado  $1.718,65 \text{ kg t}^{-1} \pm 165 \text{ kg t}^{-1}$ . Pode-se afirmar que estes dados são estatisticamente diferentes ( $p = 0,0018$ ) e é adequado para o processo, pois foi possível produzir papel da mesma gramatura com uma vazão de vapor menor, gerando uma economia de vapor de aproximadamente  $15,60\%$ .

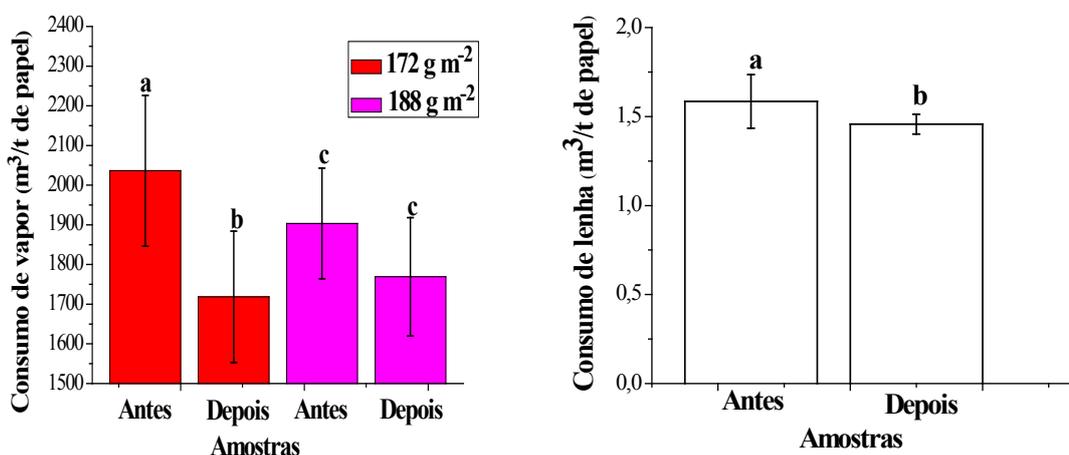


Figura 5. A Consumo de vapor para os papéis com gramatura de  $172 \text{ g m}^{-2}$  e

188 g m<sup>-2</sup> sem e com aplicação do agente de secagem. B: Consumo de lenha sem e com a aplicação do agente de secagem. Média com letras diferentes nas barras diferem pelo teste de Tukey (P<0,05).

Já para o papel de 188 g m<sup>-2</sup>, sem adição do agente de secagem, o consumo de vapor foi 1.903,36 kg t<sup>-1</sup> ± 139 kg t<sup>-1</sup> e após a aplicação do agente de secagem foi utilizado 1.768,98 kg t<sup>-1</sup> ± 149 kg t<sup>-1</sup>. A análise estatística mostrou que não houve mudanças significativas no consumo de vapor com a sem a aplicação do agente de secagem para o padrão 188 g m<sup>-2</sup>, no entanto, o consumo se mantém, ou seja, não causou variações no processo. O consumo de vapor é afetado por muitas variáveis, como as condições climáticas, a largura e espessura do papel, desta forma para se ter uma maior certeza sobre a economia de vapor, foi realizada a análise do consumo de lenha para produção de papel 172 g m<sup>-2</sup> e 188 g m<sup>-2</sup> sem a adição do agente de secagem e com a adição do agente de secagem (Figura 5 B).

Através da Figura 5 B é possível observar que houve uma redução no consumo de lenha utilizado para produção do papel 172 g m<sup>-2</sup> e 188 g m<sup>-2</sup> durante os ensaios, comprovando a economia de vapor. Antes da aplicação do agente de secagem o consumo médio de lenha (m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> de papel) era de 1,666 ± 0,085 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> e após a aplicação do agente de secagem o consumo médio de lenha passou para 1,457 ± 0,150 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>, estes resultados comprovam que realmente a economia de vapor e conseqüentemente de lenha de 12,54% aproximadamente, reduzindo os custos de produção.

Todos os benefícios observados nos ensaios anteriores só serão realmente válidos se a qualidade do papel produzido for mantida ou melhorada, desta forma analisou-se o teor de umidade do papel produzido, a gramatura e espessura dos padrões 172 g m<sup>-2</sup>, 188 g m<sup>-2</sup> e 210 g m<sup>-2</sup>, conforme as Figuras 6 A e B.

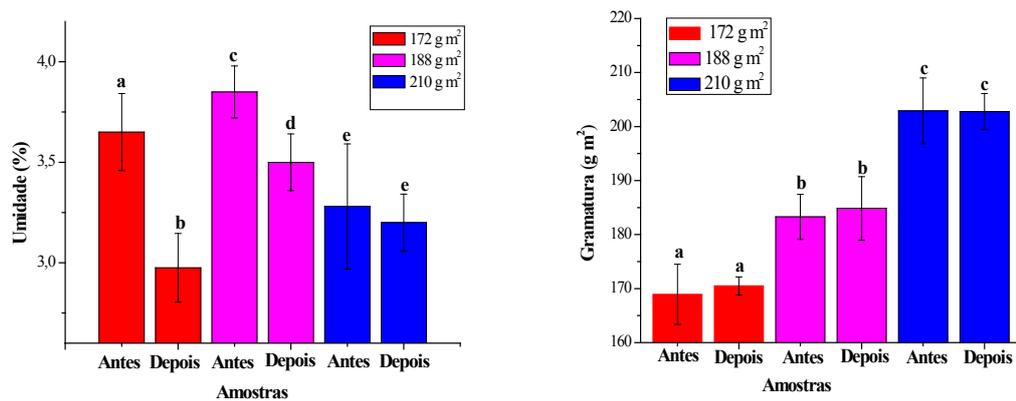


Figura 6. A- Umidade por tipo de papel antes e após a aplicação do agente de secagem. B - Espessura das amostras antes e depois da aplicação do agente de secagem. Média com letras diferentes nas barras diferem pelo teste de Tukey (P<0,05).

A umidade é um fator muito importante, cujos valores de umidade acima de 3,8% comprometem a etapa posterior de produção de papel cartão que consiste na acoplagem de várias bobinas para formação do papel cartão. Os valores da umidade

após a etapa de secagem para o papel de 172 g m<sup>-2</sup> antes da aplicação do agente de secagem foram de 3,65% ± 0,19% e após a aplicação do agente de secagem foi de 2,98% ± 0,17%. Para o papel de 188 g m<sup>-2</sup> os valores da umidade após a etapa de secagem foram de 3,85% ± 0,13% e 3,50% ± 0,14%, para o papel sem e com da aplicação do agente de secagem, respectivamente. Para o papel de padrão 210 g m<sup>-2</sup>, as análises de umidade revelaram um teor de 3,15 ± 0,13% e 3,15 ± 0,10% para sem e com a aplicação do agente de secagem, respectivamente (Figura 6 A).

Para o parâmetro umidade, valores ótimos ficam entre 2,5% e 3,8%. Para valores abaixo de 2,5%, a qualidade do papel é comprometida, pois o mesmo fica excessivamente seco, prejudicando o processo de acoplagem das bobinas, o mesmo acontece para valores acima de 3,8% (CHERUBIN et al., 2013).

A gramatura deve manter-se igual, ou reduzir, pois como o produto final é vendido em unidades, quanto menor for a gramatura e maior for a espessura, menos matéria-prima será necessária para a fabricação. Conforme Figura 8 B, a amostra para o padrão 172 g m<sup>-2</sup>, teve um valor médio de gramatura antes da aplicação do agente de secagem de 168,93 g m<sup>-2</sup> ± 5,57 g m<sup>-2</sup> e após a aplicação do agente de secagem a gramatura obtida foi de 170,50 g m<sup>-2</sup> ± 1,65 g m<sup>-2</sup>, os resultados encontrados não diferem estatisticamente, logo a qualidade do papel foi mantida com a aplicação do agente de secagem.

Para o padrão 188 g m<sup>-2</sup>, a gramatura sem a adição do agente de secagem era 183,27 ± 4,19 g m<sup>-2</sup> e com a aplicação do agente de secagem passou a ser 184,85 ± 5,88 g m<sup>-2</sup>, os resultados não diferem estatisticamente, logo a qualidade do papel foi mantido. Para o padrão 210 g m<sup>-2</sup>, o resultado para o parâmetro gramatura sem a aplicação do agente de secagem foram 202,91 ± 6,09 g m<sup>-2</sup> e 202,77 ± 3,33 g m<sup>-2</sup>, os resultados são estatisticamente iguais, logo a qualidade também foi mantida para este padrão.

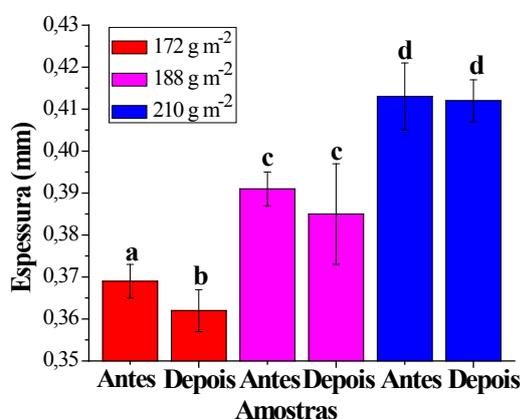


Figura 7. Espessura das amostras sem e com a aplicação do agente de secagem. Média com letras diferentes nas barras diferem pelo teste de Tukey (P<0,05).

Observando-se a Figura 7, para o padrão de 172 g m<sup>-2</sup> a espessura deve ser

de 0,37 mm, observa-se que a espessura sem a aplicação do agente de secagem era de 0,369 mm  $\pm$  0,004 mm e após a aplicação do agente de secagem o resultado obtido foi de 0,362 mm  $\pm$  0,005 mm, porém ambos os resultados estão próximos de 0,37 mm. Já para o padrão 188 g m<sup>-2</sup> a espessura deve ser de 0,39 mm, sem a adição do agente de secagem a espessura era de 0,391  $\pm$  0,004 mm e com a aplicação do agente de secagem foi de 0,385  $\pm$  0,012 mm. Estes valores são estatisticamente iguais (Figura 10), logo para o padrão 188 g m<sup>-2</sup>, a qualidade foi mantida nos dois parâmetros (gramatura e espessura).

Para o padrão de 210 g m<sup>-2</sup>, a espessura deve ser de 0,41 mm. Os ensaios realizados sem a adição do agente de secagem foram de 0,413  $\pm$  0,008 mm e após a aplicação do agente de secagem passou para 0,412  $\pm$  0,005 mm, sendo estatisticamente iguais, logo, a aplicação do agente de secagem manteve a qualidade do papel produzido.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a aplicação do agente de secagem foi possível observar várias melhorias no processo e no desempenho da máquina de papel. Na consistência da caixa de entrada houve uma redução de 11,17% em relação aos ensaios sem a aplicação do agente de secagem, melhorando a formação da folha de papel. Na água branca, a perda de fibras para o processo foi reduzida em 38,77%, melhorando o aproveitamento das fibras e economia de matéria-prima no processo. A retenção foi aumentada em 21,32%, beneficiando a estação de tratamento de efluentes, pois uma quantidade menor de fibras passou a ser encaminhada para lá, gerando uma economia de produtos químicos necessários para o tratamento dos efluentes.

Em relação à quantidade de insumos químicos, foi possível reduzir de sete para três insumos aplicados na produção de papel cartão. Isto acaba por tornar o processo mais eficiente reduzindo os custos para controle, transporte, cotação e compra. Ainda, todos estes ganhos foram alcançados com a manutenção da qualidade do papel produzido. A gramatura foi mantida em todos os padrões analisados (172, 188 e 210 g m<sup>-2</sup>) e a espessura foi mantida para os padrões 188 e 210 g m<sup>-2</sup>. A umidade foi reduzida em todos os padrões analisados, além de ter gerado uma economia de vapor e lenha. O teste Cobb comprovou que o agente de colagem não exercia influência sobre o papel produzido, desta forma foi eliminado do processo.

#### REFERÊNCIAS

BHATNAGAR, A.; MINOCHA, A. K.; JEON, B. H.; PARK, J. M.; LEE, G. Adsorption of orange G dye on paper mill sludge: equilibrium and kinetic modeling. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 16, p. 99-103, 2007.

BRASIL – Recursos Hídricos e a economia Verde – Setor Privado, Disponível em: < <http://www.fbds.org.br/IMG/pdf/doc-19.pdf> >. Acesso em: out. 2014 b.

BRASIL, Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável, Disponível em: <[http://www.orcamentofederal.gov.br/eficiencia-do-gasto/PES\\_versao\\_FINAL\\_Agua\\_Pape\\_%20e\\_Copo.pdf](http://www.orcamentofederal.gov.br/eficiencia-do-gasto/PES_versao_FINAL_Agua_Pape_%20e_Copo.pdf)>. Acesso em: out. 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 14003**: Pastas celulósicas - Determinação da consistência, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 15483**: Aparas de papel e papelão ondulado – Classificação, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 535**: Papel e cartão - Determinação da capacidade de absorção de água – Método Cobb, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 536**: Papel e cartão - Determinação da gramatura, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 10664**: Águas – Determinação de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 1989.

CHEN, P. C.; CHIU, M. C.; HWONG-WEN, M. Measuring the reduction limit of repeated recycling e a case study of the paper flow system. **Journal of Cleaner Production**, v. 132, p. 98-107, 2016.

CHERUBIN, M.J.; D'ALMEIDA, M. L. O.; KOGA, MARIZA, E. T.; FERREIRA, D. C.; PIGOZZO, R. J. B.; TOUCINI, R.; HAROLDO, M. R.; VIANA, E. F. Informações tecnológicas: celulose. São Paulo: SENAI, 2013.

FURLEY, T. H.; AQUINO, F. M.; SIQUEIRA, J. B. L. Principais questões ambientais causadas pelos efluentes de fábricas de celulose da América Latina. **O papel**, v. 79, n. 4, p. 70-77, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Resumo 2013**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/pt/>>. Acesso em: ago. 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Tipos de papéis**. Disponível em: <<http://iba.org/pt/produtos/papel>>. Acesso em: jan. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Technology Transitions for Industry - Strategies for the Next Industrial Revolution**. Paris, France, 2009.

KONG L.; HASANBEIGI A.; PRICE L.; Assessment of emerging energy-efficiency technologies for the pulp and paper industry: A technical review, **Journal of Cleaner Production**, v. 122, p. 5-28, may. 2016.

MARTINEZ, M. E. M.; REIS, P. C. S.; ALVES, D.; WINTER, E. Mapeamento das tecnologias do setor de celulose e papel por meio de documentos patentários depositados no Brasil no período de 2009 a 2013. **O papel**, v. 79, n. 9, p. 73-79, 2018.

PELISSER, C. **Obtenção de alita e belita a partir do resíduo de uma indústria de reciclagem de papel**. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) – Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2018.

PELISSER, C.; SCAPINELLO, J.; PERRET, E. **Redução do custo de produção de papel cartão através da aplicação de agente de secagem**. 2014. Monografia (conclusão do curso de engenharia química) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2014.

PIVNENKO, K.; ERIKSSON, E.; ASTRUP, T. F. Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances. **Waste Management**, v. 45, p. 134-142, 2015.

POÇAS, M. F. A Embalagem e a Conservação de Produtos Alimentares, Disponível em: <<http://www2.esb.ucp.pt/twt/embalagem/MyFiles/biblioteca/publicacoes/sebenta/seb51.pdf>>, Acesso em: novembro

de 2014.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN T. Treatment of pulp and paper mill wastewater - a review. *Science of the Total Environment*, v. 333, p. 37-58, 2004.

ROBERT, N. T. F. **Produção de Embalagem de Papel**. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro, 2007.

SUZANO. **Papel e Celulose**. Disponível em: <<http://www.suzano.com.br/portal/suzano-papel-e-celulose/glossario.htm#a>>. Acesso em: set. 2014.

TOCZYLOWSKA-MAMIŃSKA, R. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 78, p. 764-772, 2017.

WU, Q.; CUI, Y.; LI, Q.; SUN, J. Effective removal of heavy metals from industrial sludge with the aid of a biodegradable chelating ligand GLDA. **Journal of Hazardous Materials**, v. 283, p. 748-754, 2014.

ZHANG, X.; TANG, D.; JIANG G. Synthesis of zeolite NaA at room temperature: The effect of synthesis parameters on crystal size and its size distribution. **Advanced Powder Technology**, v. 24, p. 689-696, 2013.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**João Dallamuta:** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Trabalha com Gestão da Inovação, Empreendedorismo e Inteligência de Mercado.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-356-9

