



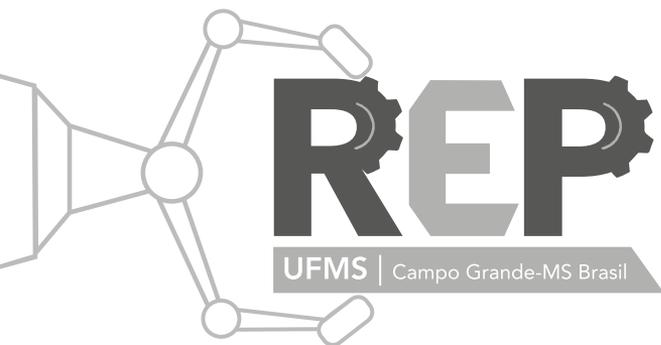
ISSN 2763-9967

Revista de  
**Engenharia**  
de **Produção**

V2 N1 • 2020



 **editora**  
**UFMS**



ISSN 2763-9967

Revista de  
**Engenharia**  
de **Produção**

ANO 2020 – PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL ELETRÔNICA





**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE MATO GROSSO DO SUL**

**Reitor**

Marcelo Augusto Santo Turine

**Vice-Reitora**

Camila Celeste Brandão Ferreira Ítavo

**Pró-Reitoria de Graduação**

Cristiano Costa Argemon Vieira

**Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação**

Maria Lígia Rodrigues Macedo

**Diretor da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e  
Urbanismo e Geografia**

Robert Schiaveto de Souza

**Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia de  
Produção - Bacharelado**

Nadya Kalache



**COORDENAÇÃO EDITORIAL DA REP - REVISTA DE ENGENHARIA  
DE PRODUÇÃO**

**Prof. Dr. Alexandre Meira de Vasconcelos**

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e  
Geografia – FAENG/UFMS

**Prof. Dr. Marcio Rogério Silva**

Faculdade de Engenharia - FAEN/UFMS

**Endereço para correspondência**

**REP - REVISTA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Universidade Federal do Mato Grosso do Sul**

**FAENG - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e  
Urbanismo e Geografia**

Av. Costa e Silva S/N - CEP 79070-900 - Cidade Universitária

Campo Grande - Mato Grosso do Sul

Telefone: (+67) 981188977

E-mail: alexandre.meira@ufms.br

<https://periodicos.ufms.br/index.php/REP/index>

**EQUIPE EDITORIAL**

**Rodolfo Benedito Zattar da Silva**

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

**Marcelo Furlan Alves**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

**Alexandre Meira de Vasconcelos**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

**Joelma Kremer**

Instituto Federal de Santa Catarina, Brasil

**Rafael Sanaiotte Pinheiro**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

**Wilerson Sturm**

Instituto Federal do Paraná, Brasil

**Janduhy Camilo Passos**

Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

**Carolina Lino Martins**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

**Helio Aisenberg Ferenhof**

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

**Fernanda Hänsch Beuren**

Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil

**Fabiana Raupp**

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

**Paula Regina Zarelli**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

**Mariana Lara Menegazzo**

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

**Caroline Rodrigues Vaz**

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

**Samuel Borges Barbosa**

Universidade do Sul de Santa Catarina, Brasil

**Rodrigo Barichello**

Universidade Comunitária da Região de Chapecó-SC, Brasil

**Wagner da Silveira**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

**Nícolas Alessandro de Souza Belete**

Universidade Federal de Rondônia, Brasil

**Leopoldo Pedro Guimarães Filho**

Universidade do Extremo Sul Catarinense, Brasil

**Marcio Rogerio Silva**

Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Divisão da Editora UFMS, Campo Grande, MS, Brasil)

REP: Revista de Engenharia de Produção [recurso eletrônico] / Universidade Federal  
de Mato Grosso do Sul. – v. 1, n. 1(2020) – Campo Grande, MS : Ed. UFMS,  
2020- .

Trimestral

Modo de acesso: <https://periodicos.ufms.br/index.php/REP>

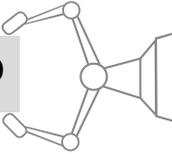
ISSN 2763-9967

1. Engenharia de Produção – Periódicos. 2. Pesquisa operacional – Periódicos. I.  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

CDD (23) 658.5

Elaborada pela Bibliotecária Lilian Aguilar Teixeira CRB 1/2448

## SUMÁRIO



EDITORIAL \_\_\_\_\_ 5

*Alexandre Meira de Vasconcelos & Marcio Rogério Silva*

Modelagem Matemática para Utilização de  
Fertilizantes no Cultivo de Soja \_\_\_\_\_ 7

*Matheus Vanzela, Hugo Aguiar Monteiro & Luan Barbosa de Morais*

Particionamento de Conjuntos para o Problema de Roteamento  
Capacitado, Periódico e com Múltiplos Depósitos \_\_\_\_\_ 20

*Kellen Dayelle Endler, Cassius Tadeu Scarpin,  
Maria Teresinha Arns Steiner & Vinicius Martins Ton*

Condução de um Projeto Seis Sigma para a Redução  
dos Custos da não Qualidade no Processo de Produção de Balas \_\_\_\_\_ 34

*Juliano Endrigo Sordan, Mariana Máximo,  
Marcelo Cesar de Moura & Pedro Carlos Oprime*

Diagnóstico de Maturidade dos Sistemas de Medição de  
Desempenho em Instituições de Ensino Superior: um estudo multicase \_\_\_\_\_ 47

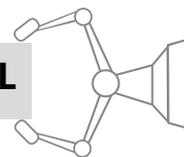
*Juliano Endrigo Sordan, Flávio Augusto Custódio,  
Roberto Antônio Martins & Pedro Carlos Oprime*

Análise do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo	59
---	----

*Cleber Bisognin & Liane Werner*

LINHA EDITORIAL	73
-----------------	----

## EDITORIAL



Esta edição traz artigos relacionados à engenharia organizacional, engenharia de operações e processos produtivos, logística e engenharia do produto.

Na área de engenharia organizacional, o artigo *“As competências do gestor de projetos no desenvolvimento de fornecedores em projetos de desenvolvimento de produto: um estudo de caso”* é um convite para reflexão, em bases teórico-empíricas do impacto que um gestor de projetos pode ocasionar no processo de desenvolvimento de novos fornecedores e também no alinhamento em relação a prazos e qualidade, com reflexos da redução de custos.

Com ponto forte do artigo, há a reflexão do papel da liderança na gestão de conflitos, comunicação e alocação de recursos e processos. Essa reflexão está em consonância com as novas diretrizes curriculares para a engenharia e também com a iniciativa *“Worldwide CDIO Initiative”* que trata justamente da importância do desenvolvimento de habilidades e competências em lidar com pessoas e, ao mesmo tempo, resgatar a importância da capacidade do engenheiro em saber conceber, projetar, implementar e operar sistemas e processos.

Na fronteira entre a engenharia de produto e engenharia organizacional, esse número conta com o artigo de título *“Análise do perfil de um grupo de consumidores de produtos agroecológicos da cidade de Dourados/MS”*.

Trata-se de uma pesquisa de mercado em feira agroecológica na cidade de Dourados/MS – ao pesquisar o perfil dos consumidores, os autores trazem uma reflexão interessante sobre o perfil dos consumidores, em geral mulheres e de escolaridade elevada, que apontam que os preços são considerados por elas elevados e não são fáceis de serem encontrados. Esse texto inspira futuras soluções propostas pela engenharia de produção que busquem contribuir na elevação da produção, consumo e distribuição, com redução de custos, considerando a alimentação saudável como um direito humano independente das classes sociais.

Ainda no tema alimentos, mas na área de “engenharia de operações e processos produtivos”, com título *“Identificação das etapas críticas no processo de produção da goiaba de mesa”*, é demonstrada a importância da aplicação de ferramentas como o FMEA em

um empreendimento rural, onde ficou demonstrado que o processo de produção da goiaba de mesa tinha riscos altos, especialmente nas etapas de produção de “florescimento e surgimento do fruto”, de onde podem surgir os maiores impactos ao longo da operação.

Por fim na área de logística na fronteira com a engenharia de operações e processos produtivos, de título “*Desenvolvimento de Melhorias logísticas no setor hospitalar*”, os autores do artigo, de maneira ainda mais transdisciplinar, buscaram propor melhorias de fluxo logístico de materiais da cadeia de suprimentos, passando não só pelo suporte teórico-metodológico da logística, mas por gestão da qualidade e produção enxuta. Como resultados foram observados a melhoria no tempo de transporte, melhoria da temperatura dos alimentos para os pacientes, redução de carga transportada e redução das dores musculares das funcionárias que faziam os transporte e redução no número de reclamações de atrasos de entregas. Esse artigo traz como inovação a observância de melhorias quali-quantitativas em várias áreas da engenharia de produção.

A equipe editorial convida a todos para a leitura desse excelente número da revista de Engenharia de Produção.

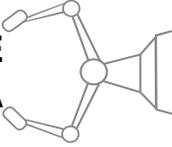
**Alexandre Meira de Vasconcelos**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

**Marcio Rogério Silva**

Universidade Federal da Grande Dourados

# MODELAGEM MATEMÁTICA PARA UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTES NO CULTIVO DE SOJA



**Matheus Vanzela**

matheus.vanzela@ifms.edu.br; Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS

**Hugo Aguiar Monteiro**

hugomonteeiro@hotmail.com; Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS

**Luan Barbosa de Moraes**

luan.morais@novaandradina.org; Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS

Recebido em: 04/12/2019

Aceito em: 11/05/2020

**Resumo:** Este artigo levanta as principais características, custos, demandas técnicas e algumas operações envolvidas na produção de soja. A partir deste estudo é proposto um modelo matemático inteiro misto para otimizar a compra de fertilizantes necessários na etapa de correção do solo para plantio. Foram consideradas restrições de compatibilidade entre as fontes e foram simuladas diferentes demandas dos principais nutrientes na etapa de correção, Nitrogênio, Fósforo e Potássio (N-P-K). A linguagem de programação utilizada foi Python 3.3.3 com modelagem das equações via PuLP e resolução pelo solver CBC (COIN-OR). Os resultados obtidos diferiram da prática usual, foram encontradas soluções com mais combinações entre as fontes disponíveis, enquanto usualmente são utilizadas uma fonte formulada ou uma combinação entre fontes simples. O modelo foi testado com 105 instâncias de dados, sendo agrupadas em 5 categorias de custos com 21 diferentes combinações de N-P-K. As análises concentraram-se nos custos totais, correlação entre quantidade de fertilizante total e custos, número de fontes selecionadas por instância e tempos computacionais.

**Palavras-chave:** modelagem matemática na agricultura; gestão da produção agrícola; aplicação de fertilizantes; pesquisa operacional.

**Abstract:** *This paper raises the main characteristics, costs, technical demands and some operations involved in the production of soybeans. From this study it is proposed a mixed mathematical model to optimize the purchase of fertilizers needed in the soil correction stage for planting. Nitrogen, Phosphorus and Potassium (N-P-K) were considered to be different compatibility requirements. The programming language used was Python 3.3.3 with modeling of the equations via PuLP and resolution by the CBC solver (COIN-OR). The results obtained differed from usual practice, solutions with more combinations between the available sources were found, whereas a formulated source or a combination between simple sources is usually used. The model was tested in 105 instances of data,*

*being grouped into 5 cost categories with 21 different combinations of N-P-K. The analyzes focused on the total costs, correlation between total fertilizer quantity and costs, number of sources selected per instance and computational times.*

**Keywords:** *mathematical modeling in agriculture; management of agricultural production; application of fertilizers; operational research.*

**Resumen:** *Este artículo plantea las principales características, costos, demandas técnicas y algunas operaciones involucradas en la producción de soja. Con base en este estudio, se propone un modelo matemático mixto para optimizar la compra de fertilizantes necesarios en la etapa de corrección del suelo para la siembra. Se consideraron restricciones de compatibilidad entre fuentes y se simularon diferentes demandas de los principales nutrientes en la etapa de corrección, nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K). El lenguaje de programación utilizado fue Python 3.3.3 con modelado de ecuaciones a través de PuLP y resolución utilizando el solucionador CBC (COIN-OR). Los resultados obtenidos diferían de la práctica habitual, se encontraron soluciones con más combinaciones entre las fuentes disponibles, mientras que generalmente se utiliza una fuente formulada o una combinación entre fuentes simples. El modelo se probó con 105 instancias de datos, que se agruparon en 5 categorías de costos con 21 combinaciones diferentes de N-P-K. Los análisis se centraron en los costos totales, la correlación entre la cantidad total de fertilizantes y los costos, el número de fuentes seleccionadas por instancia y los tiempos de cálculo.*

**Palabras clave:** *modelado matemático en agricultura; gestión de producción agrícola; aplicación de fertilizantes; investigación operativa.*

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Embrapa (2016), o Brasil teve, em 2000, aproximadamente, 32,8 milhões toneladas de grãos de soja colhidos de 13,6 milhões de hectares. A cultura do grão teve crescimento, em 2016, tanto em produção quanto em área cultivada, passando a 96,2 milhões de toneladas em 33,1 milhões de hectares. O estado de Mato Grosso do Sul contribuiu com cerca de 7,7% do total da produção nacional, posicionando-o como 5º maior produtor de soja do Brasil. É relevante observar que os 5 maiores estados produtores, Mato Grosso, Goiás, Paraná, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul, juntos são responsáveis por mais de 75% de toda produção nacional, sugerindo um impacto regional muito forte na região Centro-Oeste.

Os custos atrelados à produção da soja são diferentes em vários parâmetros, a região produtiva é um dos mais impactantes, pois afeta diretamente a produtividade, em virtude das características geográficas e qualidade do solo, além disso a infraestrutura regional como estradas, mercado consumidor, existência de cooperativas de produção e outros fatores contribuem com a elevação dos custos produtivos. O Ministério da Agricultura por meio da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017) utiliza diversas metodologias para divulgação dos custos operacionais da produção agrícola em algumas regiões do Brasil. A Tabela 1 mostra os custos variáveis por hectare de soja, apresentados de maneira agregada, gerados via Conab (2017) para o estado de Mato Grosso do Sul na safra de 2017/18.

**Tabela 1:** Itens que impactam o custo variável da produção de soja

Item Custo	Custo Variável/ha (R\$)
Despesas Administrativas	56,05
Defensivos	596,31
Análises técnicas	37,83
Juros de financiamento	52,58
Sementes	213,50
Armazenamento e Transporte	111,80
Maquinário	138,00
Fertilizantes	679,32
Seguridade Social	71,87
<b>SOMA</b>	<b>1.957,26</b>

Fonte: Adaptada de CONAB (2019)

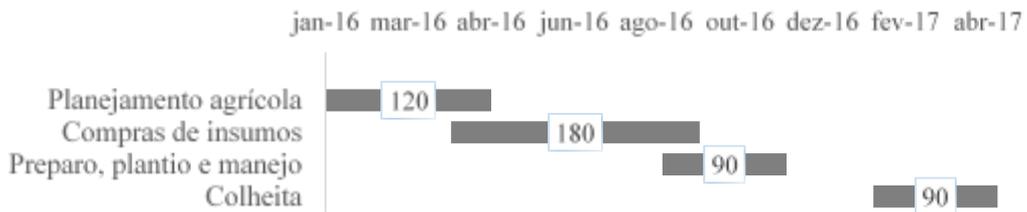
Nota-se a importância dos custos com fertilização, maior que 30% dos custos variáveis. Mesmo com as diferenças regionais o impacto com a fertilização mantém os níveis em todo país. O efeito do grande dispêndio financeiro para esta etapa da produção também vem sendo discutido em outros países produtores, como observam Fuck e Pelaez (2012) em um trabalho sobre a evolução do preço de commodities no mercado americano. Os autores ainda levantam hipóteses da escalada dos valores gastos com a aplicação de fertilizantes, considerando uma série histórica desde 1997, dentre estes fatores inserem-se características particulares das sementes, como modificação genética, mais utilizadas atualmente. Levando em consideração estas características estratégicas, o produtor não prescinde da aplicação de fertilizantes na cultura de soja, uma vez que a produtividade ficaria comprometida. As margens operacionais com o cultivo da soja no Brasil são estreitas e de difícil administração, como aponta o relatório do 1º trimestre de 2019 produzido pelo CEPEA (2019) que avança a possibilidade de que a produtividade (sacas/ha) média nacional não seja capaz de cobrir os custos atrelados a produção do grão.

A concentração deste trabalho está na proposição de um modelo matemático linear para otimização dos custos com a aplicação de fertilizantes. O modelo servirá para apoiar a seleção mais econômica do insumo que atenda as dosagens recomendadas pelos agrônomos após a análise de solo, bem como as restrições de compatibilidade entre as fontes disponíveis.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PLANTIO DA SOJA

Para simplificação, o processo produtivo da soja será descrito em 4 grandes fases que ocorrem entre dois anos, correspondendo a 1 safra, por isso denomina-se, por exemplo, safra 2016/17. Significa que as atividades ocorreram entre os dois respectivos anos. Na Figura 1, apresentam-se as 4 fases de acordo com seu calendário usual de ocorrência em um gráfico *Gantt*.

**Figura 1:** Programação das atividades de produção da soja safra 2016/17.



Fonte: Autores

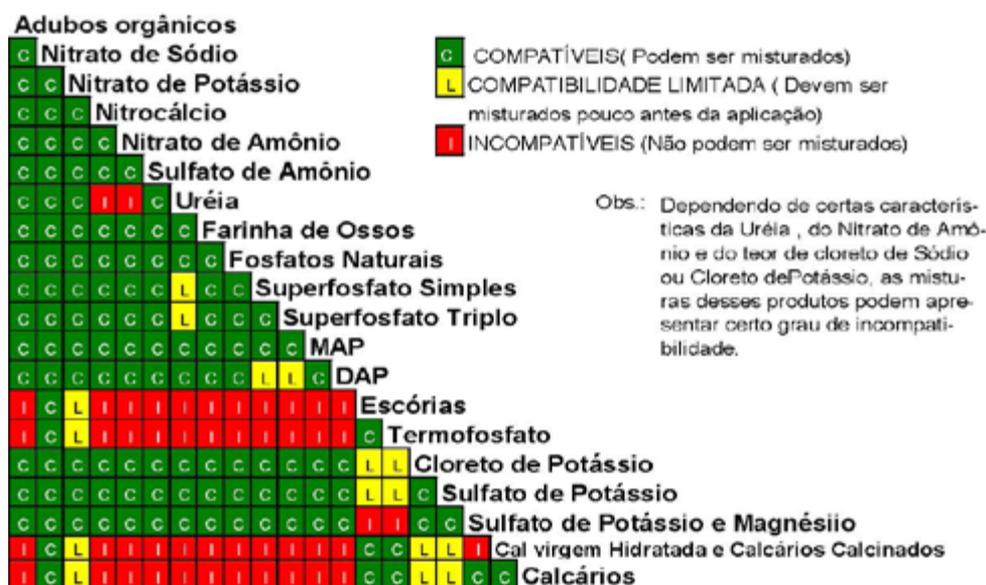
Para facilitar as análises a Figura 1 apresenta cada etapa com a duração aproximada em dias dentro da barra horizontal. O ciclo de produção se inicia no planejamento agrícola (aproximadamente 120 dias) com base no cenário nacional e internacional de commodities, previsões climáticas e custos de produção. Durante o planejamento definem-se a área destinada ao cultivo, as formas de contratação de mão de obra, definição de fornecedores e agrônomos para serviços técnicos. O planejamento agrícola permite estabelecimento de parâmetros essenciais para determinação da compra de insumos, como sementes, defensivos e fertilizantes. Após esta análise que envolve decisões estratégicas e táticas, as fazendas estão prontas para iniciar as etapas operacionais de plantio e colheita. É importante mencionar que na prática agrícola os produtores ainda terão a produção de uma cultura entressafras, em MS geralmente utiliza-se o milho safrinha, dentro da janela temporal exibida na Figura 1, porém não trataremos desta prática.

A proposta apresentada concentra-se na descrição e no planejamento relacionado ao uso dos fertilizantes, que são pré-determinados baseado na análise de solo, realizada durante o planejamento agrícola. Considerando os altos custos deste insumo, já discutido na introdução (Seção 1), grandes produtores têm capacidade ativa na negociação direta com os principais *players* do mercado, o que possibilita a escolha de pacotes de compras mais vantajosos. Os pequenos e médios produtores realizam suas compras nas praças mais próximas das fazendas, acabando por consumir os estoques comerciais, não sendo essa decisão, eventualmente, a mais econômica.

## 2.1. As decisões envolvidas na etapa de fertilização

Após a análise do solo, o agrônomo faz a sugestão de correção do solo baseado na proporção dos 3 principais nutrientes – nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P). Com a proporção sugerida, o produtor precisa fazer a compra dos produtos que podem ser fontes combinadas dos nutrientes ou fontes simples. A forma de combinação destes nutrientes segue uma decisão não muito bem definida e otimizada. Incorre em respeitar algumas restrições de interação entre as fontes e envolve um alto número de combinações possíveis dos nutrientes, esta miríade de possibilidades não é atendida com os produtos comerciais previamente preparados. A Figura 2 mostra a matriz de compatibilidade entre os fertilizantes que será utilizada na proposição do modelo matemático.

**Figura 2:** Matriz de Compatibilidade entre as fontes de nutrientes



Fonte: Lopes (1989)

As fórmulas, podem ser produzidas na propriedade agrícola, ou adquiridas prontas das fábricas e misturadoras, as quais possuem equipamentos que proporcionam boa uniformidade entre seus componentes. As fórmulas muito concentradas, com soma de N+P+K acima de 50% são difíceis de serem fabricadas, pois as matérias-primas mais disponíveis raramente atingem tais valores. Além do N, P e K, outros nutrientes como o enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e os micronutrientes também podem fazer parte das fórmulas, devendo ser indicadas sua presença e concentração (TRANI; TRANI, 2011).

Dentre as fórmulas formuladas de fertilizantes minerais mais encontradas no comércio citam-se: a) Para semeadura/plantio das culturas: 04-14-08; 08-28-16;

05-30-10; 05-30-15; 04-20-20 e 05-25-25; b) Para aplicação em cobertura (durante o desenvolvimento das culturas): 20-05-20; 20-0-20; 20-05-15; 14-07-28; 12-06-12; 10-10-10 e 15-15-15. Existem duas vantagens técnicas quando da utilização de fórmulas de baixa e média concentração (até 40%), a primeira é a possibilidade de utilizar quantidades maiores dos produtos, exigindo um maquinário mais simples, por exigir menor precisão, a segunda está na composição da fórmula que contém outros nutrientes também relevantes na nutrição de plantas. As fórmulas de alta concentração (acima de 40%) têm como principal vantagem permitir uma economia no frete. Os custos logísticos têm um alto impacto em vários pontos do planejamento produtivo, inclusive na composição dos custos do fertilizante. Apesar de não serem tratados neste trabalho é interessante notar que muitos fretes de escoamento da soja para os portos voltam carregados de fertilizantes, provenientes de importações. Esta característica permite entender as diferentes precificações entre as praças.

A intenção de fazer um planejamento agrícola, pautado na economicidade, visando minimizar o custo na compra do fertilizante, respeitar um conjunto de restrições de compatibilidade entre as fontes de fertilizantes, atendendo as proporções levantadas na análise técnica, coaduna com a proposição de um modelo algébrico que permita apoiar esta decisão gerencial.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

Propõe-se um modelo em que: a função objetivo  $Z$  minimiza o custo com aplicação de fertilizantes representados pelas variáveis reais  $X$  e o número de fontes diferentes na composição do *pool* de matérias primas a serem adquiridas, representado pelas variáveis binárias  $B$ . As restrições de compatibilidade foram modeladas de acordo com a matriz apresentada na Figura 2. Para obtenção destas equações utilizou-se como estratégia a inserção de variáveis binárias, que correspondem à utilização ou não de determinada fonte naquela rodada, esta estratégia foi adaptada de Arenales *et al.* (2011).

Os parâmetros e variáveis do modelo exibido nas equações de 1 a 5 são:

- a) o vetor  $CustoFert$  que armazena o custo de fertilizantes;
- b) os vetores  $NFert$ ,  $PhFert$  e  $KFert$  representam as garantias, em percentuais, de Nitrogênio, Fósforo e Potássio presentes em cada fonte de fertilizante;
- c)  $N$ ,  $P$  e  $K$  são os vetores unitários que armazenam as dosagens de nutrientes necessários, respectivamente, para nitrogênio, fósforo e potássio;
- d) Os índices foram agrupados por  $F$ : Fontes de Fertilizantes e  $Q_1$ : Fontes com restrições de compatibilidade com as fontes de  $Q_2$ .

e) As constantes para representarem valores grandes e pequenos. Os números  $Mass=10^6$  e  $epi=10^{-6}$ ;

f) As variáveis de decisão presentes no modelo são  $X$ : Quantidade em Kg de fertilizante e  $B$ : Variáveis binárias que assumem 0 ou 1 conforme a fonte é escolhida.

Função Objetivo Z

$$Z = \sum_{i \in F} (CustoFert(i) \cdot X(i) + B(i)) \quad (1)$$

Garantia das dosagens mínimas de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K)

$$\sum_{i \in F} NFert(i) \cdot X(i) \geq N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F} PhFert(i) \cdot X(i) \geq P \quad (3)$$

$$\sum_{i \in F} KFert(i) \cdot X(i) \geq K \quad (4)$$

Restrições que atribuem 1 ou 0 às variáveis binárias  $B(i)$  conforme a seleção ou não de  $X(i)$  pelo algoritmo Simplex

$$X(i) - B(i) \cdot Mass \leq 0, \quad \forall i \in F \quad (5)$$

Restrições do tipo “se-então” que impedem a aplicação de fontes incompatíveis

$$\sum_{i \in Q_1} B(i) \leq epi \cdot B_k, \quad \forall k \in Q_2 \quad (6)$$

Domínio das variáveis

$$X(i) \in R_+, B(i) \in \{0, 1\}$$

## 4. METODOLOGIA DOS TESTES

O vetor *CustoFert* representa o custo de fertilizantes levantados nas principais lojas da região de Nova Andradina – MS (entre 2018 e 2019) e no portal mantido pelo IEA (2019). As recomendações de dosagens de N, P e K foram obtidas na literatura (HICKMANN *et al.*, 2017; MILANESI, 2015) que discutem elementos técnicos como pH do solo e níveis regionais de chuvas para a formulação das dosagens, também foram considerados os levantamentos presentes em Resende (2014) que discute quais seriam os intervalos de dosagens mais adequados para altas produtividades do grão de soja.

A partir desta revisão bibliográfica e dos levantamentos in loco, foi possível planejar os testes a serem realizados com o modelo algébrico, definir quais intervalos de variação nas dosagens de N, P e K seriam comumente praticados, bem como compor vetores de custos com valores reais de mercado. Foram utilizadas 29 fontes de fertilizantes (variáveis reais), simples e formuladas, mais recorrentes no mercado. As variações dos vetores correspondentes às doses de nutrientes N, P e K foram, respectivamente, [0,200], [0,160] e [0,200], geradas randomicamente pelo gerador de números pseudoaleatórios Mersenne Twister, presentes na biblioteca SciPy do Python 3.3.3.

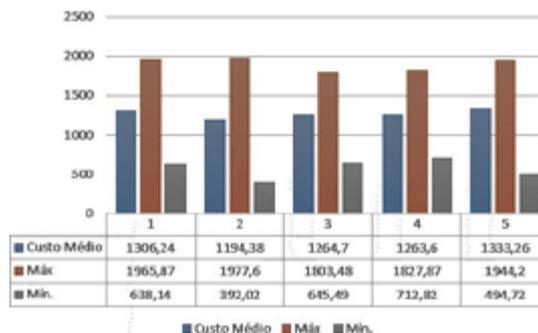
Considerando que custos de fertilizantes flutuam de acordo com a cotação do dólar, foram criados 5 patamares de preços para as matérias primas. Para cada um destes patamares foram geradas 21 diferentes combinações para as demandas de nutrientes (N, P e K), simulando diferentes necessidades de solos, período de plantação e outras estratégias técnicas. Dessa maneira foram geradas 105 (instâncias de testes, permitindo a criação de situações similares à realidade enfrentada no campo.

A modelagem do problema e o código de execução foi escrito em *Python 3.3.3* e sua biblioteca *PuLP*, parte do projeto COIN-OR (2004). O *solver* chamado para resolução do modelo foi a configuração padrão da biblioteca.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com relação aos custos totais houve pouca variação no custo médio entre cada um dos 5 grupos de instâncias. Porém esses resultados representam o custo por hectare, assim, a depender da área, a diferença entre custos médios de cada simulação será importante. Na Figura 3, apresenta-se o comportamento dos custos totais e os valores médios, máximos e mínimos, atingidos em cada um dos 5 patamares planejados.

**Figura 3:** Resumo dos custos totais



Fonte: Autores.

Nota-se a alta variabilidade com relação aos custos máximos e mínimos, refletindo o impacto desta decisão no planejamento da produção. A alta amplitude dos resultados com os custos totais, por exemplo no grupo 2 é maior que 500%. Guiando assim uma outra possibilidade para esta proposta, que seria a utilização do modelo para geração de cenários de planejamento de plantio. Garantindo maior controle e capacidade de visualizar em quais situações o produtor estaria no cenário de pior e melhor caso.

Na Tabela 2 é apresentado o número de vezes que cada fórmula de fertilizante foi selecionada. A codificação que se inicia com a letra F representa um formulado com as respectivas garantias de N-P-K, respectivamente. A letra T representa o Termofosfato que é uma fonte simples de Potássio.

**Tabela 2:** Número de seleções para cada fonte

Quantidade	Fórmula
83	F-19-10-19
40	F-21-0-21
37	F_5_25_25
27	F_4_30_10
22	F_14_7_28
14	F_2_20_18
8	T_0_17_0
1	F_4_30_16

Fonte: Autores

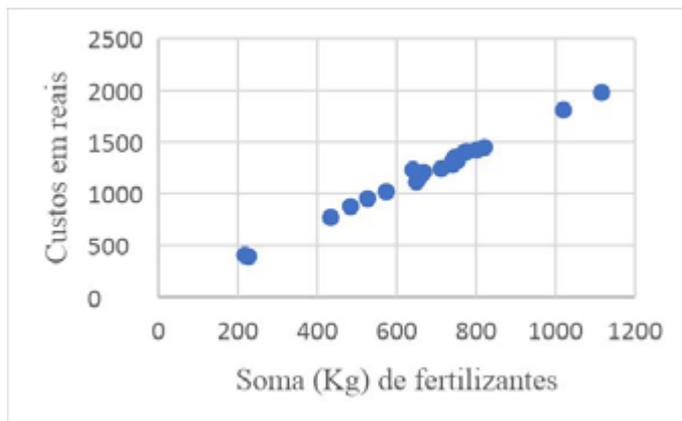
Durante os levantamentos foi percebido que apenas em 5 das 105 instâncias foi utilizada uma única fonte de fertilizante e, em um dos 5 grupos de custos, apareceu como opção a fonte simples de Potássio chamada Termofosfato. A diversidade de combinações das fontes indica que a utilização de modelos matemáticos avalia com maior economicidade a escolha dos produtos, pois é observado que, no cotidiano das propriedades produtoras, os gestores adquirem uma fonte por safra. Também foi verificado que fórmulas mais concentradas foram elencadas com maior frequência. Existe uma dificuldade inerente no cálculo tradicional em avaliar a viabilidade de se utilizar mais de uma fonte, assim produtores e agrônomos simplificam suas decisões escolhendo fontes simples ou uma única fonte formulada.

Apresentam-se, nas Figuras de 4 a 8, o comportamento dos custos totais  $C(x)$  em função do peso de fertilizantes em kg ( $x$ ). As respectivas funções de  $C$  em função de  $x$  foram geradas por regressão linear simples. Os gráficos foram organizados para cada um dos 5 grupos de custos. A correlação observada foi respectivamente, 0,993; 0,997; 0,896; 0,825 e 0,997 para os grupos 1 a 5. Reforçando uma correlação já esperada entre a soma

do peso de fertilizantes planejados pelo modelo e o custo total. Provavelmente quando forem incluídas restrições de logística essa correlação será ainda mais pronunciada. Nota-se nos grupos 3 e 4 uma certa disparidade entre a  $C(x)$  e  $x$  indicando que em determinadas situações haverá um planejamento com volumes de fertilizantes não diretamente relacionados aos custos.

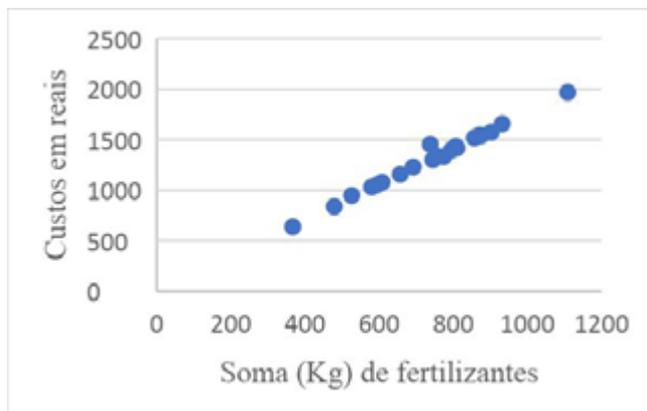
Como última análise citamos os tempos computacionais na execução dos testes, o *solver* utilizado foi o *Coin-OR-Branch-Cut* (CBC), para os grupos de 1 a 5 os tempos foram respectivamente 2,924s; 2,800s; 2,856s; 2,89s; 2,578s.

**Figura 4:** Grupo 2 de custos [ $C(x) = 1,778x$ ]



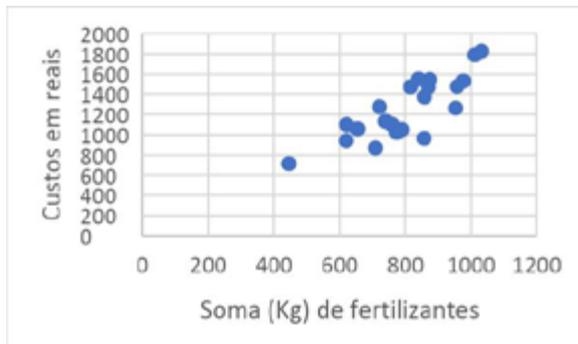
Fonte: Autores

**Figura 5:** Grupo 1 de custos [ $C(x)=1,772x$ ]



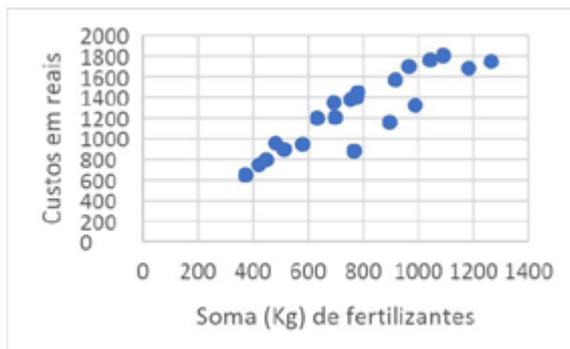
Fonte: Autores

**Figura 6:** Grupo 4 de custos [ $C(x) = 1,575x$ ]



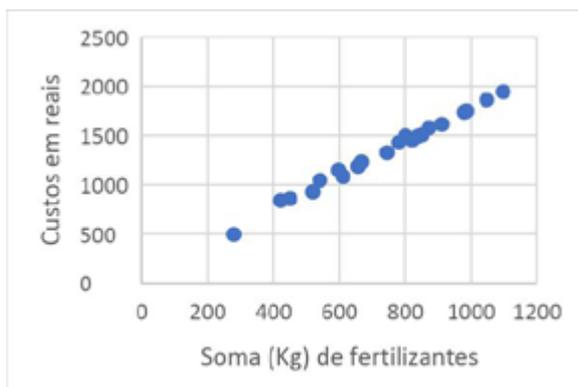
Fonte: Autores

**Figura 7:** Grupo 3 de custos [ $C(x) = 1,589x$ ]



Fonte: Autores

**Figura 8:** Grupo 5 de custos [ $C(x) = 1,802x$ ]



Fonte: Autores

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos resultados do estudo foi a obtenção de um modelo matemático, com variáveis reais e binárias, inédito para apoiar o planejamento da compra de fertilizantes na produção de soja, considerando demandas de nutrientes N-P-K levantadas a partir das análises de solo. Foram inseridas variáveis binárias que permitem a modelagem das restrições de compatibilidade entre as fontes de fertilizantes. Para validar o modelo foram usados dados reais levantados no comércio da microrregião de Nova Andradina, plataformas públicas da Embrapa (2016), do IEA (2019) e da CONAB (2019). Para simular situações reais de análise de solo e gerar valores realísticos de N-P-K aproveitou-se os trabalhos de (HICKMANN *et al.*, 2017) e Resende (2014). Foram gerados 5 grupos com diferentes valores de custos para cada uma das fontes de fertilizantes. Para capturar a melhor maneira de simular essa flutuação de preços utilizou-se o trabalho de Fuck e Pelaez (2012) que discute o impacto dos custos de insumos no preço de commodities. Em cada um dos 5 grupos foram geradas 21 diferentes combinações da demanda de N-P-K, baseado nos critérios propostos em Resende (2014). Totalizaram, portanto, 105 instâncias de dados para testes. A partir dos testes foi possível perceber a diferença das soluções obtidas com o modelo proposto e quanto a prática usual. Foram utilizadas combinações com 2 a 4 opções de fertilizantes em cada saída do modelo enquanto nas propriedades geralmente os produtores adquirem um único produto para atender as necessidades, uma vez que sem uma ferramenta de análise fica impraticável avaliar todas as opções. Foi discutido neste trabalho a correlação linear entre a quantidade de fertilizante utilizado e o custo total, apesar de 3 dos 5 grupos testados encontrarmos correlação praticamente igual a 1, houve duas instâncias que se notou uma menor correlação e maior dispersão dos dados. Este resultado indica que é importante incorporar novas restrições ao modelo, como restrições de logística. Este trabalho também conseguiu capturar uma necessidade dos produtores que é a geração de cenários antes do plantio, esta possibilidade permite que o gestor faça planejamentos de financiamentos, troca de culturas e análise prévia das dificuldades com esta etapa importante do cultivo. O modelo foi proposto para análise de produção de soja, porém ele pode ser facilmente adaptado para outras culturas. Para trabalhos futuros, além das restrições de logística, pretende-se inserir restrições próprias do maquinário de aplicação, granulometria da fonte selecionada, setup de preparação e consideração do número de operações necessárias com giros de tratores durante a aplicação. Também é importante citar que foi desenvolvido um código programado em Python através da biblioteca PuLP, sendo uma ferramenta passível de implementação Web que facilitaria e incorpora um caráter comercial, expandindo a pesquisa para utilização voltada ao usuário final. Por último, as análises de sensibilidade não foram apresentadas neste trabalho, uma vez que a principal contribuição é a proposição do modelo, eventualmente em trabalhos futuros que estejam resolvendo

casos específicos e comparando resultados, a análise de sensibilidade servirá como instrumento importante dentro do aspecto gerencial.

## Referências

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

CEPEA. Centro de Pesquisas Econômicas e Agropecuárias. **Relatórios Agrícolas**. Piracicaba, 2019.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. O comportamento dos preços dos insumos agrícolas na produção de milho e soja. **Compêndio de estudos Conab**, v. 17, p. 63, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Indicadores da Agropecuária**. Brasília, 2019.

EMBRAPA. **AGROPENSA - Produção agrícola**. Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <https://bi.sede.embrapa.br/BOE/BI/custom.jsp?i=31799024&u=boetrusted>. Acesso em: 30 jun. 2019.

COIN-OR Foundation. Disponível em: <https://www.coin-or.org>.

FUCK, M. P.; PELAEZ, V. Custos de produção de commodities. **Revista de Política Agrícola**, v. Único, n. 3, p. 65-80, 2012.

HICKMANN, C.; RESENDE, Á. V. DE; SILVA, C. A. Soybean response to NPK fertilization of sowing and potassium at topdressing in soil of improved fertility. **Revista Agrogeoambiental**, v. 9, n. 2, p. 37-48, 2017.

LOPES, A. S. **Manual de Fertilidade do Solo**. São Paulo, 1989.

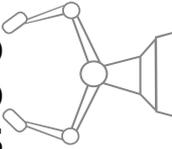
MILANESI, J. H. **Adubação da Cultura da Soja Baseada nos Teores Mínimos de Fósforo e Potássio no Solo**. 2015. 73 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

RESENDE, Á. V. **Repensando a adubação NPK em sistemas de alta produtividade de grãos**. FertBio - Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologias para todos. p.28, 2014. Araxá, MG. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/fertbio2014/anais/palestras/apresentacoes/AlvaroVilelaResende.pdf>.

IEA. Instituto de Economia Agrícola. **Indicadores da Agropecuária**. Disponível em: [http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea\\_Testes/pagos2.aspx?cod\\_sis=5](http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea_Testes/pagos2.aspx?cod_sis=5).

TRANI, P. E.; TRANI, A. L. **Fertilizantes: Cálculo de Fórmulas Comerciais**. Instituto Agronômico (IAC), p. 29, 2011. Disponível em: <http://www.biologico.sp.gov.br/>.

# PARTICIONAMENTO DE CONJUNTOS PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO CAPACITADO, PERIÓDICO E COM MÚLTIPLOS DEPÓSITOS



**Kellen Dayelle Endler**

kellen\_dayelle@hotmail.com; Universidade Federal do Paraná (UFPR)

**Cassius Tadeu Scarpin**

cassiusst@gmail.com; Universidade Federal do Paraná (UFPR)

**Maria Teresinha Arns Steiner**

maria.steiner@pucpr.br; Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

**Vinicius Martins Ton**

vinnimt@gmail.com; Universidade Federal do Paraná (UFPR)

**Resumo:** A distribuição de produtos através de uma rede de transportes das fábricas para os consumidores constitui-se em um papel chave dos sistemas logísticos. Esse é um dos motivos pelos quais o Problema de Roteamento de Veículos consiste em um dos temas mais estudados da Pesquisa Operacional. Este artigo busca avaliar a influência da técnica de Particionamento de Conjuntos na melhoria de soluções para o problema de roteamento de veículos capacitado, com múltiplos depósitos e periódico. A este método, associa-se técnicas de busca local para melhoria da solução. Para tanto, são sugeridas duas fases: melhoria de rota e melhoria entre padrões. Na primeira fase investiga-se a influência do número de clientes avaliados nos movimentos, alternativa que visa atingir uma maior eficiência da exploração do espaço da vizinhança. Espera-se que se possa contribuir com futuras pesquisas, que também buscam solucionar problemas de roteamento com características reais como as apresentadas. Sabe-se que mesmo pequenas melhorias nas soluções podem impactar em enormes consequências econômicas e ambientais.

**Palavras-chave:** Problema de roteamento de veículos. Múltiplos depósitos. Periódico. Particionamento de Conjuntos.

**Abstract:** *The distribution of products through a transport network of factories for consumers constitutes a key role of logistics systems. That is one of the two reasons why the problem of vehicle routing consists of the most studied topics in Operational Research. This paper attempt to evaluate the influence of the Partitioning Technique on the improvement of solutions for the multi-depot and periodic vehicle routing problem. Associating with this method, local search techniques for solution improvement. Therefore, two phases are suggested: route improvement and improvement between standards. Regarding the first phase, the influence of the number of customers evaluated on the movements is also evaluated, an alternative that aims to achieve a greater efficiency of the exploration of the*

*neighborhood space. It is hoped that this work can contribute to future research, which also seek to solve routing problems with real characteristics as presented. It is well known that even small improvements in solutions can impact huge economic and environmental consequences.*

**Keywords:** *Vehicle routing problem. Multiple depots. Periodic. Set Partitioning.*

**Resumen:** *La distribución de productos a través de una red de transporte desde las fábricas hasta los consumidores es un papel clave para los sistemas logísticos. Ésta es una de las razones por las que el problema de las rutas de los vehículos es uno de los temas más estudiados en la investigación operativa. Este artículo busca evaluar la influencia de la técnica Set Partitioning en la mejora de soluciones al problema de enrutamiento vehicular habilitado, con múltiples depósitos y periódicos. Las técnicas de búsqueda local están asociadas con este método para mejorar la solución. Para ello, se sugieren dos fases: mejora de ruta y mejora entre estándares. En una primera fase se investiga la influencia del número de clientes evaluados sobre los movimientos, una alternativa que busca lograr una mayor eficiencia en la exploración del espacio vecinal. Se espera que se pueda contribuir a futuras investigaciones, que también buscan resolver problemas de enrutamiento con características reales como las que se presentan. Se sabe que incluso pequeñas mejoras en las soluciones pueden tener enormes consecuencias económicas y medioambientales.*

**Palabras clave:** *Problema de enrutamiento del vehículo. Depósitos múltiples. Periódico. Particionamiento de conjuntos.*

## 1. INTRODUÇÃO

A distribuição de produtos desde as fábricas ou centros de distribuição através da rede de transportes para os consumidores constitui-se em um papel chave dos sistemas logísticos. Um estudo realizado pela Fundação Dom Cabral aponta que de 2015 até o ano de 2018, as companhias gastaram, em média, 12,37% do seu faturamento bruto com custos logísticos no Brasil (SANTOS, 2018). O Problema de Roteamento de Veículos ou *Vehicle Routing Problem* (VRP), consiste em um dos temas mais estudados da Pesquisa Operacional. O VRP é um nome genérico para uma classe de problemas de otimização combinatória em que os clientes devem ser atendidos por vários veículos. Os veículos deixam o depósito, servem os clientes na rede e retornam ao depósito após completar suas rotas. Cada cliente é descrito por uma certa demanda. Apesar do seu enunciado relativamente simples, apresenta elevada complexidade computacional. As formulações do VRP são usadas para modelar uma gama extremamente ampla de problemas como transporte, gerenciamento da cadeia de suprimento, planejamento de produção e telecomunicações (TOTH; VIGO, 2002). Uma revisão de literatura recente pode ser encontrada em Braekers *et al.* (2016). Os modelos atuais de VRP visam cada vez mais incorporar complexidades da vida real. Os atributos do problema consistem nas características adicionais ou restrições que visam melhor levar em conta as especificidades de aplicações. Endler *et al.* (2018) apresenta uma investigação das estratégias consideradas “vencedoras” para o VRP com diversas variantes.

Neste artigo, o problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos e periódico, ou (*Multi-Depot and Periodic Vehicle Routing Problems* - MDPVRP), com

veículos capacitados e duração de rota restrita, é estudado. Exemplos de aplicações relacionadas a este problema são o fornecimento de matérias-primas (ALEGRE *et al.*, 2007), coleta de lixo (TEIXEIRA *et al.*, 2004), coleta ou distribuição de alimentos (PARTHANADEE; LOGENDRAN, 2006), e operações de manutenção (BLAKELEY *et al.*, 2003; HADJICONSTANTINOU; BALDACCI, 1998). Dentre as possíveis técnicas a serem adotadas na solução deste problema, este artigo estuda um algoritmo de geração de soluções iniciais associado com o Problema de Particionamento de Conjuntos, em língua inglesa, *Set Partitioning* (SP).

Este artigo busca avaliar a influência do SP para o problema de roteamento de veículos capacitados, com múltiplos depósitos e periódico, associado a técnicas de busca local para melhoria da solução. Em relação a fase de Melhoria de Rota sugerida, avalia-se a influência do número de clientes avaliados nos movimentos. Alternativa que visa atingir uma maior eficiência da exploração do espaço da vizinhança.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma: Seção 2 apresenta uma descrição do problema MDPVRP; a seção 3 descreve a metodologia utilizada apresentando a formulação matemática proposta para o Particionamento de Conjuntos, juntamente com as técnicas de melhoria de solução utilizadas; a seção 4 apresenta os resultados computacionais obtidos, e por fim, apresentam-se na seção 5, as conclusões obtidas.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema de roteamento com múltiplos depósitos e periódico de veículos pode ser definido como um multigrafo  $G(V, A)$ , onde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  representa o conjunto de nós e  $A = \left\{ (v_i, v_j)^{k,l} : v_i, v_j \in V, i \neq j \right\}$  o conjunto de arcos, em que  $k$  e  $l$  referem-se ao número  $k, l$  do veículo e ao dia de visita, respectivamente. O conjunto de depósitos são representados por  $V^{dep}$ , sendo que  $v_0 \in V^{dep}$ . Em cada depósito  $v_0$  situam-se  $m$  veículos de capacidade  $Q_k$ , e os demais nós de  $V$  representam clientes a serem servidos. Para um horizonte de planejamento de  $T$  dias e um cliente  $i$ , a demanda de  $i$  é  $q_i$ , o tempo de serviço é  $d_i$ , a frequência de visitas é  $f_i$  e o padrão de dias permitidos para visitas é  $Pat_i$ . A cada arco  $(v_i, v_j)^{k,l}$  é associado um custo não negativo ou tempo de viagem  $c_{ijkl}$ . O MDPVRP consiste em programar as visitas aos clientes e em determinar as rotas dos veículos em cada dia do horizonte de tempo de forma que:

- a) cada rota inicia e termina no depósito;
- b) cada cliente no dia  $t$  pertence somente a uma rota;
- c) cada cliente deve ser atendido por um único depósito;

- d) a demanda total de uma rota não excede a capacidade do veículo;
- e) o tempo total de uma rota não excede a duração máxima permitida;
- f) o custo total das rotas ao longo de  $T$  é minimizado.

A Figura 1 exemplifica um problema com  $n = 9$  clientes, em um horizonte de  $T = 2$  dias, sendo disponibilizados  $k = 2$  veículos em cada dia do horizonte. Indica-se também, os padrões de dias de visitas, as frequências de visitas, e o depósito escolhido para cada cliente. Assim, uma representação de rotas para uma possível programação das visitas aos clientes foi apresentada para cada dia do horizonte de planejamento e cada depósito. Para exemplificar, as frequências de visitas de cada cliente é  $f_1 = f_2 = f_4 = f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = 2$  e  $f_3 = f_9 = 1$ . Considerando o  $pat_1 = 3$ , por exemplo, as combinações de dias são {1,2}.

Uma formulação matemática que representa o problema pode ser encontrada em Vidal, et al (2012). O MDPVRP consiste em uma versão expandida de outras variantes também tratadas neste artigo: VRP com múltiplos depósitos - MDVRP; periódico - PVRP e capacitado CVRP. A versão clássica dos VRPs, o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado, conhecido na língua inglesa como *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), pode ser definido como um problema MDPVRP com um único depósito e um único período. Da mesma forma que um PVRP, considera apenas um depósito, enquanto o MDVRP considera apenas um único período.

**Figura 1:** Exemplo de determinação das rotas em um MDPVRP.

	Dia 1	Dia 2	Considerando o seguinte Padrão de Dias:																														
Depósito 1			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Padrão de Dias</th> <th>Frequência</th> <th>Dias</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>{1}</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>{2}</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2</td> <td>{1,2}</td> </tr> </tbody> </table>	Padrão de Dias	Frequência	Dias	1	1	{1}	2	1	{2}	3	2	{1,2}																		
	Padrão de Dias	Frequência	Dias																														
1	1	{1}																															
2	1	{2}																															
3	2	{1,2}																															
Depósito 2			<p>Considerando o seguinte Padrão de Dias:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Depósito</th> <th>Padrão de Dias</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C1</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C2</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C3</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>C4</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C5</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C6</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C7</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C8</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>C9</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>		Depósito	Padrão de Dias	C1	1	3	C2	1	3	C3	1	1	C4	1	3	C5	1	3	C6	2	3	C7	2	3	C8	2	3	C9	2	2
		Depósito	Padrão de Dias																														
C1	1	3																															
C2	1	3																															
C3	1	1																															
C4	1	3																															
C5	1	3																															
C6	2	3																															
C7	2	3																															
C8	2	3																															
C9	2	2																															

Fonte: Autores

### 3. METODOLOGIA

A seguir apresenta-se a formulação matemática proposta para o Particionamento de Conjuntos, juntamente com o algoritmo proposto.

#### 3.1 Abordagem com Particionamento de Conjuntos

Seja  $R$  o conjunto de todas as possíveis rotas para todos os dias e depósitos.  $R_i \subseteq R$ , o subconjunto de rotas contendo o cliente  $i \in V$ . Define-se  $f_i$  como a frequência de atendimento do cliente  $i$  ao longo do horizonte de tempo  $T$  e  $Z_r$  como o custo associada a rota  $r$ . A Tabela 1 apresenta as notações utilizadas.

**Tabela 1:** Notações usadas

Conjuntos e Índices	
$V$	Todos os vértices; $V = V^{DEP} \cup V^C$
$V^{DEP} \in V$	Depósitos; $d \in \{1, \dots,  V^{DEP} \}$
$V^C \in V$	Clientes; $i \in \{1, \dots,  V^C \}$
$t \in T$	Dias; $t \in \{1, \dots,  T \}$
$r \in R$	Rotas possíveis para cada dia e depósito; $r \in \{1, \dots,  R \}$
$R_i \in R$	Rotas que pertencem ao cliente $i$ ;
$pat \in P$	Padrões de dias; $pat \in \{1, \dots,  P \}$
Parâmetros	
$Z_r$	Custo associada à rota $r$
$T$	Número total de dias no horizonte de planejamento
$f_i$	Frequência de atendimento do cliente $i$ ao longo de $T$
$m$	Número de veículos disponíveis em cada dia, cada um com capacidade $Q_k$
$n$	Total de números de clientes para visitar
$C_i$	O conjunto de dias válidos para cada cliente $i \in \{1, \dots, n\}$
Variáveis	
$Y_r$	= 1, se a rota $r \in R$ estiver na solução. =0, c.c.
$p_{i, pat}$	= 1 se o cliente $i$ estiver designado ao padrão de dias $pat$ na solução. =0, c.c.
$\theta_{i, d}$	= 1 se o cliente $i$ estiver designado ao depósito $d$ na solução. =0, c.c.
$\Omega_{i, t, d}$	= 1 se o cliente $i$ estiver designado ao dia $t$ e depósito $d$ na solução. =0, c.c.

Fonte: Autores

A formulação do Particionamento de Conjuntos para o problema é implementada como segue.

$$\text{Min} \sum_{r \in R} Y_r * Z_r \tag{01}$$

$$\sum_{r \in R_i} Y_r = \Omega_{i,t,d}, \quad \forall i \in V^C, t \in T, d \in V^{DEP} \quad (02)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{d \in V^{DEP}} \Omega_{i,t,d} \geq f_i * p_{i,pat}, \quad i \in V^C, pat \in P \quad (03)$$

$$\sum_{t \in P} \sum_{d \in V^{DEP}} \Omega_{i,t,d} \leq f_i, \quad i \in V^C, pat \in P \quad (04)$$

$$\sum_{pat \in P} p_{i,pat} = 1, \quad i \in V^C \quad (05)$$

$$\sum_{t \in T} \Omega_{i,t,d} = f_i * \theta_{i,depot}, \quad i \in V^C, d \in V^{DEP} \quad (06)$$

$$\sum_{d \in V^{DEP}} \theta_{i,d} = 1, \quad i \in V^C \quad (07)$$

$$\sum_{r \in R} Y_r \leq m \quad (08)$$

$$Y_r \in \{0, 1\}, \quad r \in R \quad (09)$$

$$\Omega_{i,t,d} \in \{0, 1\}, \quad i \in V^C, t \in T, d \in V^{DEP} \quad (10)$$

$$p_{i,pat} \in \{0, 1\}, \quad i \in V^C, pat \in P \quad (11)$$

$$\theta_{i,t} \in \{0, 1\}, \quad i \in V^C, d \in V^{DEP} \quad (12)$$

A função objetivo (01) minimiza a soma dos custos escolhendo a melhor combinação das rotas. As restrições (02) garantem que uma única rota do subconjunto  $R_i$ , esteja associada ao cliente  $i$ , caso ele esteja designado ao dia  $day$  e depósito  $depot$  na solução. As restrições (03) determinam para todo cliente  $i$  e para o padrão de dias  $pat$  que ele pertença, que as variáveis  $\Omega_{i,day,depot}$  assumam o valor de 1 para todos os dias  $day$  do padrão de dias e para algum depósito  $depot$  selecionados para  $i$ , no mínimo igual a sua frequência, caso o padrão seja selecionado. As restrições (04) garantem que a frequência de visitas não seja ultrapassada para todo cliente  $i$ . As restrições (05) garantem que cada cliente  $i$  seja atendido em apenas um padrão de dias  $pat$ . As restrições (06) determinam para cada cliente  $i$  e para cada depósito  $depot$ , que as variáveis  $\Omega_{i,day,depot}$  assumam o valor de 1 caso o depósito  $depot$  seja selecionado para  $i$  garantindo que o cliente  $i$  seja atendido na frequência de dias desejada. As restrições (07) garantem que cada cliente  $i$  esteja associado a apenas um depósito  $depot$ . As restrições (08). As restrições (09) a (12) definem o domínio das variáveis de decisão.

### 3.2 Técnicas de Melhoria de Solução Utilizadas

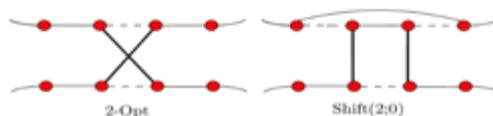
Esta etapa foi realizada em duas fases: Melhoria de Rota e Melhoria de Padrões. Assim como em Vidal *et al.* (2014), para a primeira fase, foram selecionados nove tipos de vizinhanças. Destas, seis são baseadas em movimentos  $\lambda$ -interchanges (ver OSMAN (1993)) considerada a troca de até  $\lambda=2$  clientes entre duas rotas. Essas trocas são melhores explicadas como duplas  $(\lambda_1, \lambda_2)$  (com  $\lambda_1 < \lambda$  e  $\lambda_2 < \lambda$ ), sendo que  $\lambda_1$  clientes são transferidos da rota  $r_1$  para a rota  $r_2$  e  $\lambda_2$  clientes da rota  $r_2$  para a rota  $r_1$ .

Um vértice  $u$  selecionado aleatoriamente e um vértice próximo  $v$  (selecionado segundo um **limite de granularidade** – conceito explicado na sequência) são examinados em ordem aleatória. Sendo  $x$  e  $y$  os vértices subsequentes a  $u$  e  $v$  na rota. Os seguintes movimentos são utilizados:

- a) Se  $u$  é um cliente, remova-o e coloque-o depois de  $v$  (*Shift* (1; 0));
- b) Se  $u$  e  $x$  são clientes, remova-os e coloque  $u$  e  $x$  depois de  $v$  (*Shift* (2; 0));
- c) Se  $u$  e  $x$  são clientes, remova-os e, coloque  $x$  e  $y$  depois de  $v$  (*Shift* (2; 0));
- d) Se  $u$  e  $v$  são clientes, troque  $u$  e  $v$  (*Swap* (1; 1));
- e) Se  $u$ ,  $x$  e  $v$  são clientes, troque  $u$  e  $x$  por  $v$  (*Swap* (2; 1));
- f) Se  $u$ ,  $x$ ,  $v$  e  $y$  são clientes, troque  $u$  e  $x$  com  $v$  e  $y$  (*Swap* (2; 2));
- g) Se  $r(u) = r(v)$ , substitua  $(u, x)$  e  $(v, y)$  por  $(u, v)$  e  $(x, y)$  (*2-Opt* intra-rota);
- h) Se  $r(u) \neq r(v)$ , substitua  $(u, x)$  e  $(v, y)$  por  $(u, v)$  e  $(x, y)$  (*2-Opt* inter-rota);
- i) Se  $r(u) \neq r(v)$ , substitua  $(u, x)$  e  $(v, y)$  por  $(u, y)$  e  $(x, v)$  (*2-Opt* inter-rota).

Essas vizinhanças foram implementadas usando um procedimento *Randomized Variable Neighborhood Descent* (RVND) (vide SUBRAMANIAN *et al.*, 2010). Assim, ao invés de usar uma ordem pré-definida de vizinhanças para explorar o espaço de soluções, utiliza uma ordem aleatória a cada chamada. Mais especificamente, sempre que em uma determinada vizinhança não for possível melhorar a solução corrente, o RVND seleciona, aleatoriamente, outra vizinhança para continuar a busca pelo espaço de soluções. Esta abordagem, segundo Penna (2013) produz, em média, resultados melhores do que a versão com ordem determinística das vizinhanças e tem vantagem de não necessitar de um estudo de qual a melhor ordem de vizinhanças. A Figura 2 apresenta a ilustração de movimentos realizados.

**Figura 2:** Ilustração do movimento de 2-Opt e *Shift(2;0)*. Os arcos deletados/inseridos estão indicados com tracejado/linhas em negrito.



Fonte: Autores

A primeira fase tem fim quando todos os movimentos possíveis são testados sucessivamente sem sucesso. Já para a fase de Melhoria de Padrões, avalia-se para cada cliente selecionado em ordem aleatória, o custo mínimo para satisfazer os requisitos de visita  $i$  do depósito  $d$  de acordo com o padrão de visita  $pat$ . Se existir uma combinação de menor custo todas as visitas ao cliente  $i$  serão removidas e uma nova visita será inserida na melhor localização em cada sequência correspondente ao depósito e ao período. O procedimento pára quando todos os clientes forem sucessivamente considerados sem uma modificação.

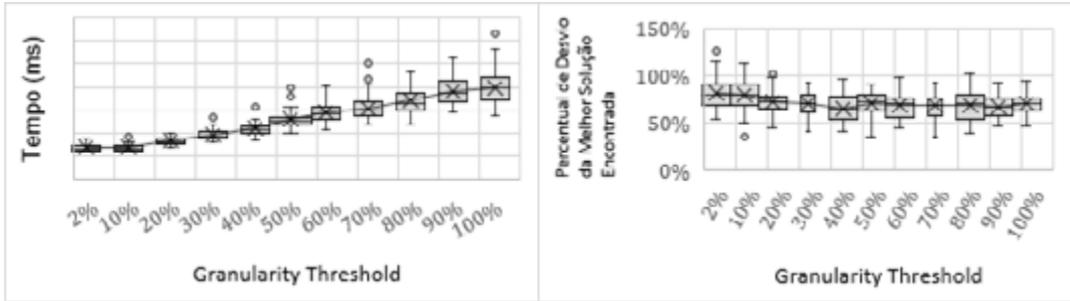
Devido ao grande esforço computacional que demanda esta etapa, técnicas que visam restringir a vizinhança, ou utilizá-la de forma mais eficiente a exemplo da **busca granular** de Toth e Vigo (2003). A busca granular, com coeficiente de granularidade ( $h$ ) busca reduzir o número de clientes avaliados nos movimentos. O benefício da vizinhança granular reside na maior eficiência da exploração do espaço da vizinhança, pois restringe a busca aos vizinhos com maior probabilidade de pertencerem a soluções de boa qualidade.

## 4. RESULTADOS

O algoritmo foi desenvolvido em C++, e os testes foram executadas em um computador *Intel®Core™ i7 2,6GHz* com 8GB de memória principal com o sistema operacional *Windows 64bits*. O Resolvedor de PIM adotado foi o *Gurobi Optimizer* versão 8.0.

A fim de investigar a influência do coeficiente de granulometria no tempo computacional e na qualidade da solução, realizou-se testes com  $h$  igual a 2% a 100% distribuídos de acordo com o que se apresenta na Figura 3. Os testes foram realizados aplicando-se o procedimento de Melhoria de Rota em soluções geradas de forma aleatória. Observa-se que o tempo de solução cresce linearmente com  $h$ . Por outro lado, o mesmo não se pode afirmar em relação a qualidade da solução, que acaba estagnando independente do aumento de  $h$ . Assim, pode-se constatar que utilizar um valor de  $h$  em torno de 20% a 40% poderia ser vantajoso em termos de tempo computacional em relação a coeficientes superiores que não garantem soluções melhores.

**Figura 3:** Impacto do coeficiente de granulometria em termos de qualidade de solução e tempo computacional.

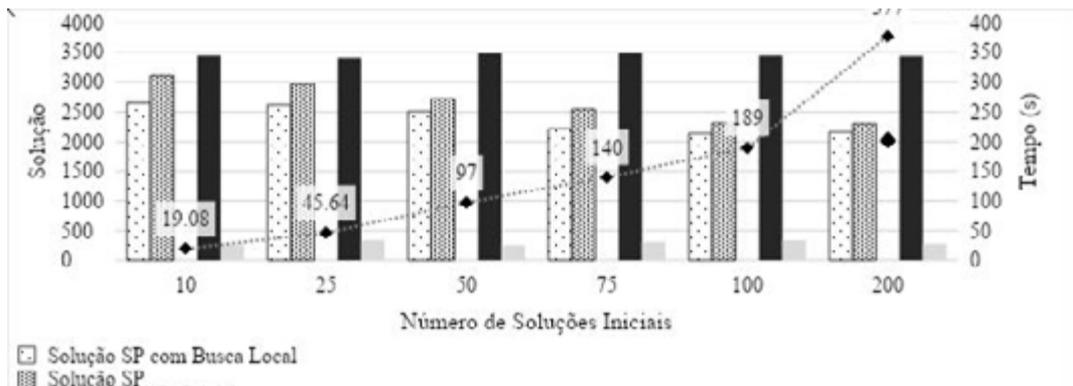


Fonte: Autores

Com a finalidade de avaliar os resultados com o Particionamento de Conjuntos, foram realizados testes com e sem este mecanismo. Inicialmente utilizou-se, para os testes a instância p01 para o MDPVRP, de Vidal *et al.* (2012), com 4 dias, 4 depósitos e  $m=1$  veículo disponível. Para os testes, considerou-se a inicialização de um conjunto de soluções de tamanho  $n$ . Seguido do SP a fim de avaliar a interferência do número de soluções.

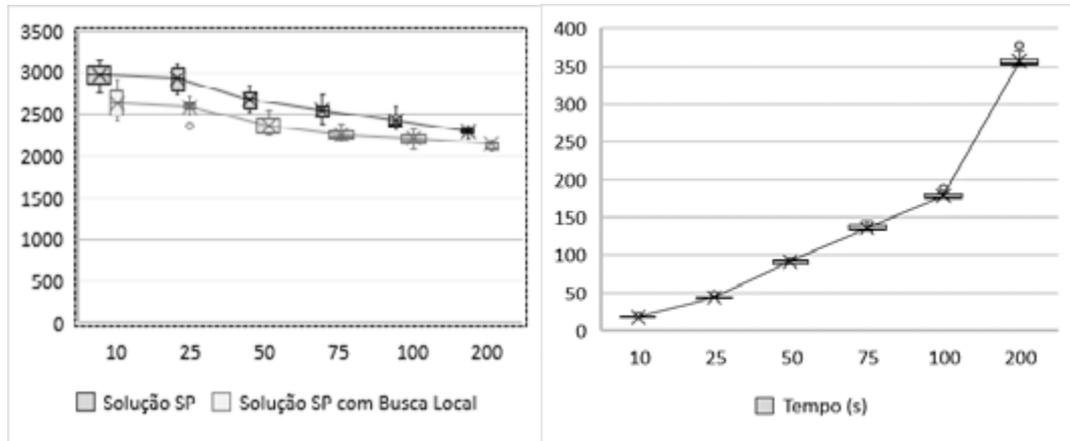
Assim, a melhor solução obtida para um conjunto de soluções de tamanho  $n$  (com  $n = 10, 25, 50, 75, 100$  e  $200$ ), foi armazenada (“Menor Solução Inicial” na Figura 4), bem como a média e o desvio-padrão das soluções. Em seguida, aplicou-se o SP para a verificação da nova solução. Os valores da solução SP e da solução após as técnicas de Melhoria de Solução foram descritos na Figura 4. O que se pode observar é que a utilização do SP traz consideráveis melhorias para as soluções do problema, independentemente do número de soluções geradas.

**Figura 4:** Testes com instância p01 para MDPVRP.



Fonte: Autores

**Figura 5:** Testes com instância p01 para MDPVRP.

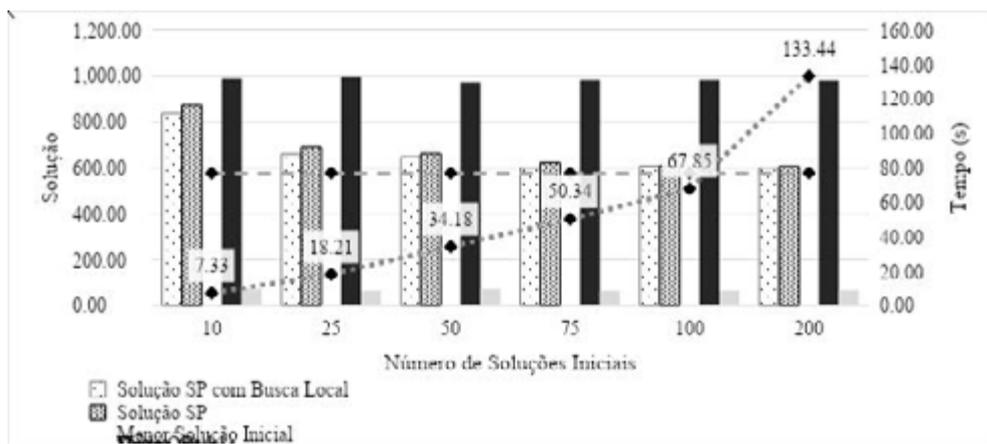


Fonte: Autores

Os mesmos testes foram replicados 10 vezes a fim de se observar a dispersão em torno das soluções obtidas e em relação ao tempo computacional de acordo com o número de soluções iniciais (ver Figura 5). Observa-se a partir de um determinado tamanho do conjunto de soluções  $n$  a melhoria na solução passa a ser relativamente não compensatória quando comparado ao tempo de execução necessário.

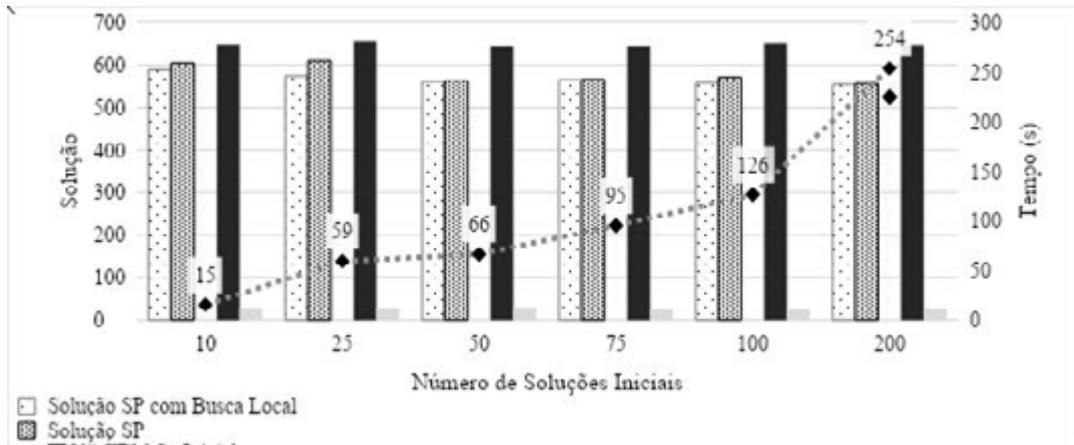
As mesmas análises foram replicadas para as instâncias p01 para o MDVRP, com 50 clientes, 4 veículos, 4 dias; vrpnc1 com 50 clientes para o CVRP e a p01 para o PVRP com 3 veículos, 51 clientes e 2 dias. Pelo fato de apresentarem constatações similares, não são realizadas de cada uma individualmente. Seguem as Figuras 6 a 8 com os resultados relacionados a aplicação do SP ao conjunto de  $n$  soluções geradas.

**Figura 6:** Testes com instância p01 para MDVRP.



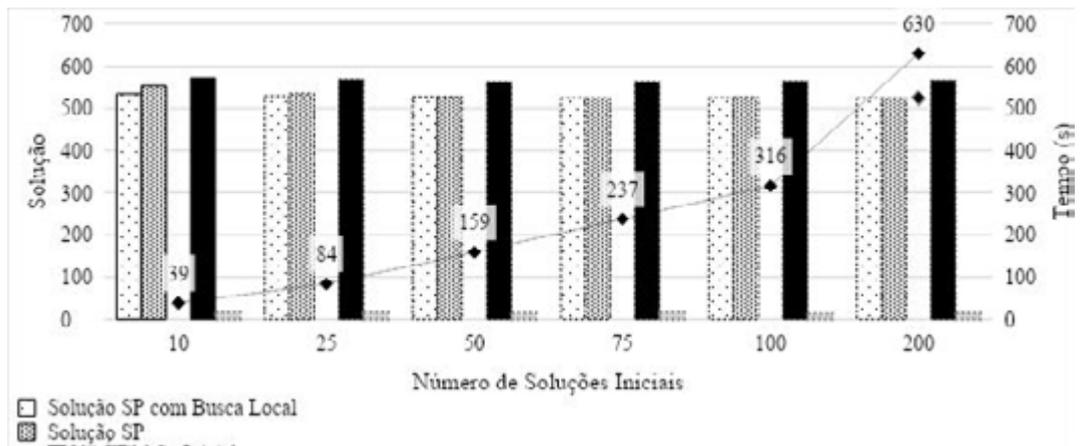
Fonte: Autores

**Figura 7:** Testes com instância p01 para PVRP.



Fonte: Autores

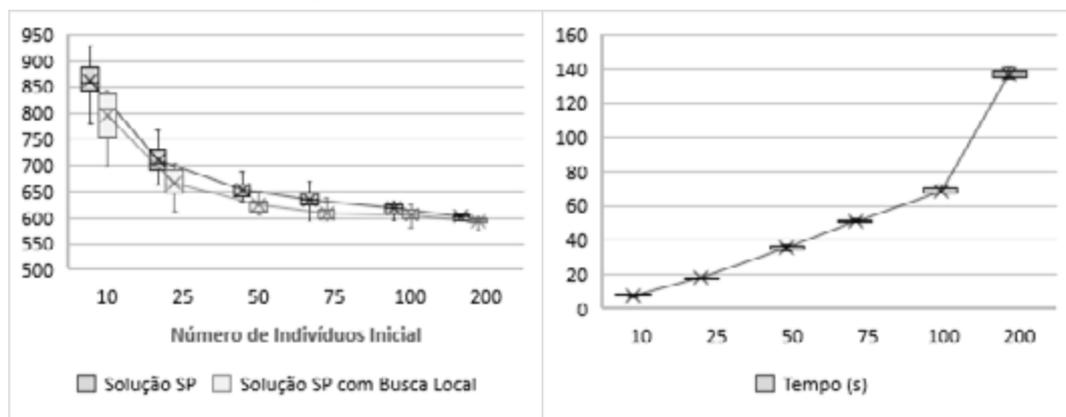
**Figura 8:** Testes com instância vrpnc1 para CVRP.



Fonte: Autores

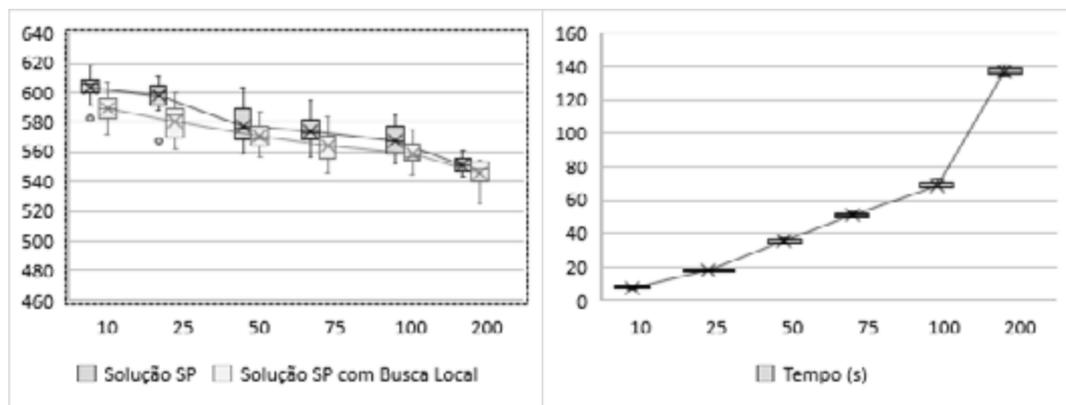
Da mesma forma a dispersão em torno das soluções obtidas e em relação ao tempo computacional de acordo com o número de soluções iniciais foram avaliadas para cada respectiva variante (ver Figura 9 a 11).

**Figura 9:** Testes com instância p01 para PVRP.



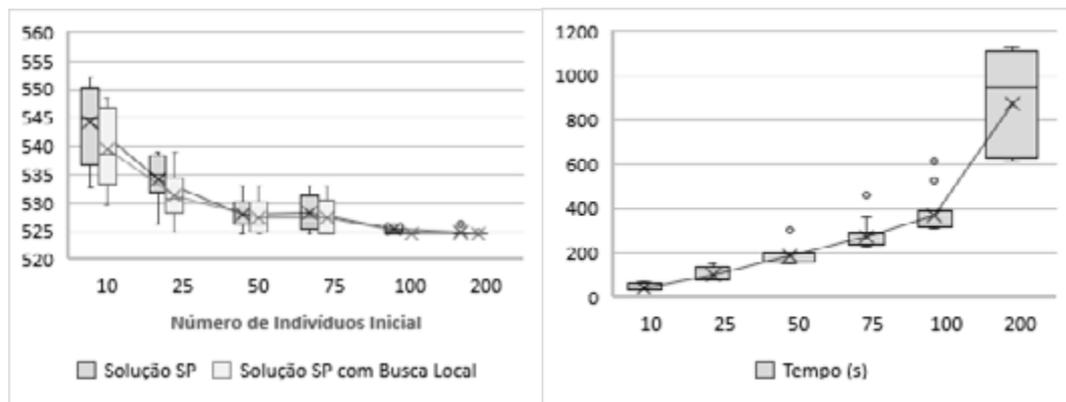
Fonte: Autores

**Figura 10:** Testes com instância p01 para PVRP.



Fonte: Autores

**Figura 11:** Testes com instância vrpncl para CVRP.



Fonte: Autores

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foram apresentados testes computacionais para a avaliação da influência do SP para o problema de roteamento de veículos capacitado, com múltiplos depósitos e periódico. Considerou-se a inicialização de um conjunto variável de soluções iniciais geradas aleatoriamente seguido do SP a fim de avaliar a interferência do número de soluções para a obtenção de soluções com melhor qualidade.

Em uma primeira análise, avaliou-se a influência do coeficiente de granulometria no tempo computacional e na qualidade da solução. Constatou-se que o tempo de solução cresce linearmente com  $h$ . Por outro lado, o mesmo não se pode afirmar em relação a qualidade da solução, que acaba de certa forma, estagnando independente do aumento de  $h$ , sendo suficiente aplicar um valor de  $h$  variando de 20% a 40%. Outra constatação foi referente ao fato de que a utilização do SP traz consideráveis melhorias para as soluções do problema, independentemente do número de soluções geradas. Além disso, a aplicação de técnicas de melhoria de soluções apresentada, contribui ainda mais com a melhoria dos resultados das soluções apresentadas. Exceto para o CVRP, devido ao fato de que já com a aplicação do SP, encontra o valor ótimo esperado.

Este artigo concentrou resultados até uma determinada etapa de pesquisa dos autores, em que se avaliam técnicas que possam contribuir com a eficiência de métodos para os problemas estudados. Espera-se com este trabalho, que se possa contribuir com futuras pesquisas, que também buscam solucionar problemas de roteamento com características reais como as apresentadas. Sabe-se que mesmo pequenas melhorias nas soluções podem impactar em enormes consequências econômicas e ambientais.

## Referências

- ALEGRE, J.; LAGUNA, M.; PACHECO, J. Optimizing the periodic pick-up of raw materials for a manufacturer of auto parts. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 3, p. 736-746, 2007.
- BLAKELEY, F.; ARGÜELLO, B.; CAO, B., HALL, W.; KNOLMAJER, J. Optimizing periodic maintenance operations for Schindler Elevator Corporation. **Interfaces**, v. 33, n. 1, p. 67-79, 2003.
- BRAEKERS, K.; RAMAEKERS, K.; VAN NIEUWENHUYSE, I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 99, p. 300-313, 2016.
- ENDLER, K. D.; SCARPIN, C. T.; ARNS STEINER, M. T.; CHOUËIRI, A. C. Investigação de características de algoritmos vencedores para o problema de roteamento de veículos com múltiplos atributos. In: **III Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia**, 2018, Curitiba. III Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná, 2018.

HADJICONSTANTINO, E.; BALDACCI, R. A multi-depot period vehicle routing problem arising in the utilities sector. **Journal of the Operational Research Society**, v. 49, n. 12, p. 1239-1248, 1998.

OSMAN, I. H. "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem." **Annals of operations research** 41.4 (1993): 421-451.

PARTHANADEE, P.; LOGENDRAN, R. Periodic product distribution from multi-depots under limited supplies. **IIE Transactions**, v. 38, n. 11, p. 1009-1026, 2006.

PENNA, P. H. V. **Um algoritmo unificado para uma classe de problemas de roteamento de veículos com frota heterogênea**. Diss. PhD thesis, Universidade Federal Fluminense-UFF, 2013.

SANTOS, G. Gastos com logística consomem 12,37% do faturamento das empresas. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/gastos-com-logistica-consomem-1237-do-faturamento-das-empresas/> Acesso em: 14 ago. 2018.

SUBRAMANIAN, Anand et al. A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 11, p. 1899-1911, 2010.

TEIXEIRA, J.; ANTUNES, A. P.; DE SOUSA, J. P. Recyclable waste collection planning—a case study. **European Journal of Operational Research**, v. 158, n. 3, p. 543-554, 2004.

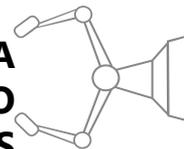
TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). The vehicle routing problem. **Society for Industrial and Applied Mathematics**, 2002.

TOTH, P.; VIGO, D. "The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem." **Inform Journal on computing** 15.4 (2003): 333-346.

VIDAL, T., CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., LAHRICHI, N., REI, W. A Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Depot and Periodic Vehicle Routing Problems. **Operations Research**, v. 60, n. 3, p. 611-624, 2012.

VIDAL, Thibaut et al. A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 234, n. 3, p. 658-673, 2014.

# CONDUÇÃO DE UM PROJETO SEIS SIGMA PARA A REDUÇÃO DOS CUSTOS DA NÃO QUALIDADE NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BALAS



**Juliano Endrigo Sordan**

julianosordan@yahoo.com.br; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Mariana Máximo**

mariana.s.maximo@gmail.com; Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)

**Marcelo Cesar de Moura**

marcelomoura1979@yahoo.com.br; Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS)

**Pedro Carlos Oprime**

pedro@dep.ufscar.br; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Recebido em:** 04/12/2019

**Aceito em:** 11/05/2020

**Resumo:** Projetos de excelência operacional no âmbito da indústria de alimentos representam uma importante estratégia para aumentar a competitividade de uma organização por meio da redução de custos e aumento da qualidade e velocidade. Neste contexto, a abordagem Seis Sigma surge como uma alternativa para alcançar esses resultados e criar uma cultura de melhoria contínua apoiada por equipes capacitadas na condução de projetos de melhoria com impacto financeiro. O presente artigo tem como objetivo demonstrar uma aplicação de um projeto Seis Sigma estruturado pelo método DMAIC, com o objetivo de reduzir os custos da não qualidade no processo de produção de balas mastigáveis. Para isso, adotou-se como método de pesquisa o estudo de caso único em profundidade, onde foram evidenciadas as técnicas, ferramentas e resultados obtidos com a implementação do projeto. A análise dos resultados obtidos com o projeto revela que as técnicas empregadas, tais como gráficos básicos, mapas de processo e análise de correlação, permitiram a identificação das causas de variabilidade na umidade do produto, incluindo a dosagem de uma determinada matéria-prima e temperatura de cozimento. Este artigo pode contribuir com a execução de futuros projetos de excelência operacional, cujo propósito seja a melhoria dos processos de fabricação de alimentos estruturados por meio do modelo DMAIC.

**Palavras-chave:** Seis Sigma; DMAIC; custos da qualidade; indústria de alimentos.

**Abstract:** *Operational excellence projects within the food industry represent an important strategy to improve the competitiveness of an organization by reducing costs and increasing quality and speed. In this context, the Six Sigma approach emerges as an alternative to achieve these results and create a culture of continuous improvement supported by teams capable of conducting improvement projects with financial impact. This paper aims to demonstrate an application of a Six Sigma project, structured by the DMAIC model, developed to reduce the costs of quality in the production process of candy. For this, the research follows the method of single case study, which highlights the techniques, tools and results obtained with the implementation of the project. The analysis reveals that the employed techniques, such as statistical graphs, process maps and correlation analysis, allowed the identification of the causes of variability in the product moisture content, including the dosage of a raw material and temperature of baking. This article can contribute to the implementation of six sigma projects, whose purpose is to improve the manufacturing processes of food industry through the DMAIC model.*

**Keywords:** *Six Sigma; DMAIC; cost of quality; food industry.*

**Resumen:** *Este artículo plantea las principales características, costos, demandas técnicas y algunas operaciones involucradas en la producción de soja. A partir de este estudio, se propone un modelo matemático mixto para optimizar la compra de fertilizantes necesarios en la etapa de corrección del suelo para la siembra. Se consideraron restricciones de compatibilidad entre fuentes y se simularon diferentes demandas de los principales nutrientes en el paso de corrección, Nitrógeno, Fósforo y Potasio (N-P-K). El lenguaje de programación utilizado fue Python 3.3.3 con modelado de ecuaciones vía PuLP y resolución usando el solucionador CBC (COIN-OR). Los resultados obtenidos difirieron de la práctica habitual, se encontraron soluciones con más combinaciones entre las fuentes disponibles, mientras que generalmente se utiliza una fuente formulada o una combinación entre fuentes simples. El modelo se probó con 105 instancias de datos, que se agruparon en 5 categorías de costos con 21 combinaciones N-P-K diferentes. Los análisis se centraron en los costos totales, la correlación entre la cantidad total de fertilizantes y los costos, el número de fuentes seleccionadas por instancia y los tiempos de cálculo.*

**Palabras clave:** *Six Sigma; DMAIC; costos de calidad; industria de alimentos.*

## 1. INTRODUÇÃO

Estratégias de excelência operacional vem sendo amplamente disseminadas em diversos setores econômicos com o propósito de alcançar melhores resultados em termos de custo, qualidade e velocidade. A adoção de princípios, técnicas e ferramentas inerentes às abordagens *Lean Manufacturing* e Seis Sigma (SS) está diretamente associada a esse tipo de estratégia e requer a implementação de mudanças nos processos de manufatura por meio da condução de projetos com impacto financeiro e implementação de ações de melhoria.

A indústria de alimentos pode ser caracterizada por meio de rupturas tecnológicas de produto e melhorias incrementais associadas à aquisição de novas tecnologias de processo (RAIMUNDO *et al.*, 2017). A perecibilidade dos produtos alimentares e as distâncias percorridas na cadeia de abastecimento, demandam inovações nas áreas de logística, organização, produção e marketing (DE MORI, 2011). Embora fatores como segurança alimentar, qualidade e nível de serviços sejam fundamentais nesse setor, os custos industriais devem ser cuidadosamente controlados para a manutenção da competitividade organizacional (DUDBRIDGE, 2011).

Pyzdek e Keller (2003) explicam que a seleção de projetos SS pode ser conduzida com base no sistema de medição da organização, onde a análise da distância entre o desempenho atual e o desempenho esperado dos indicadores estratégicos, permite a priorização dos temas para os projetos. De acordo com esses autores, essa análise pode considerar indicadores de eficiência, incluindo custos e utilização de ativos, ou melhoria da efetividade, decorrente do aumento no lucro e *market share*.

A produção científica a respeito da abordagem SS na indústria de alimentos revela estudos estruturados pelo método DMAIC com foco na redução da variação de peso do alimento processado (DESAI *et al.*, 2005; DORA; GELLYNCK, 2005), na redução de *lead time* e reclamações de clientes (NABHANI; SHOKRI, 2009) e diminuição da variação dimensional do produto (SEOW *et al.*, 2004). Contudo, observa-se uma escassez de estudos empíricos envolvendo projetos SS em processos de fabricação de balas mastigáveis. Desse modo, o presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso envolvendo a condução de um projeto SS por meio da estrutura DMAIC para a redução dos custos da não qualidade no processo de produção de balas.

## 2. ABORDAGEM SEIS SIGMA

A abordagem SS foi concebida na Motorola em 1987 com o intuito de melhorar drasticamente a qualidade de seus produtos. Dois anos após essa iniciativa, a empresa recebeu o prêmio *Malcolm Baldrige National Quality Award* (PANDE *et al.*, 2001). Contudo, o sucesso dessa abordagem foi reforçado na década seguinte, a partir dos resultados obtidos na General Electric, sob a liderança de Jack Welch, que na **época** ocupava a posição de CEO na empresa (BLACK; REVERE, 2006). Desde então, o SS tem sido adotado por organizações de manufatura e serviços em vários países, com o propósito de melhorar produtos, serviços e processos (EVANS; LINDSAY, 2014).

O termo “Seis Sigma” é utilizado para descrever a capacidade de um processo em gerar apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), assumindo uma distribuição normal e média deslocada de  $1,5\sigma$  dos limites de especificação (MONTEGOMERY; WOODALL, 2008). A ideia central a respeito da abordagem SS é que a qualidade dos produtos e processos pode ser melhorada drasticamente por meio da compreensão das relações entre as entradas ( $x$ 's) que influenciam significativamente as métricas pertinentes às saídas do processo ( $y$ 's), assim como do controle dessas entradas, a partir dos limites especificados (MEHRJERDI, 2011).

No entendimento de Snee (2004) os projetos Seis Sigma apresentam quatro características: (i) foco em resultados, com impacto financeiro; (ii) integração do elemento

humano com o processo de melhoria, reforçando o trabalho em equipe e a cultura de mudança; (iii) metodologia específica orientada para a melhoria de produtos e processos existentes (DMAIC) ou para o desenvolvimento de novos produtos e processos (DMADV); e (iv) infraestrutura técnica, que envolve um grupo de profissionais capacitados que desempenham papéis específicos para liderar, desenvolver e implementar os projetos, incluindo *Champions*, Master Black Belts (MBB), Black Belts (BB) e Green Belts (GB).

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

Tendo em vista os objetivos estabelecidos para esta pesquisa, optou-se pela condução de um estudo de caso único e longitudinal, visto que esse tipo de pesquisa propicia um aprofundamento com maior riqueza na coleta de dados (YIN, 2009). Além disso, tal método pode ser compreendido como um estudo de natureza empírica, dedicado a investigar um fenômeno contemporâneo, dentro de um contexto real de vida (MIGUEL, 2007).

O estudo foi realizado no primeiro semestre de 2019 na “Alpha”, uma empresa fabricante de balas e biscoitos, localizada no interior do estado de São Paulo. Atualmente, a empresa emprega 550 colaboradores e implementa diversos projetos SS e eventos *kaizen* como parte de sua estratégia de excelência operacional.

Os dados foram coletados e registrados por meio de entrevistas envolvendo os colaboradores que participaram do projeto e análise documental. As entrevistas foram conduzidas de forma semiestruturada. Após a coleta dos dados procedeu-se uma análise da abordagem adotada pela empresa para a condução do projeto SS, suas etapas e técnicas utilizadas. A análise foi norteada pelo modelo DMAIC e contraposta com as práticas recomendadas na literatura sobre o tema.

## 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO DMAIC

### 4.1. Fase Definição

As primeiras ações na condução de um projeto SS devem ser norteadas para a sensibilização das partes interessadas quanto ao impacto do projeto na organização. Essas ações geralmente são sintetizadas em um documento denominado *Project charter* (carta de projeto) que apresenta uma definição clara do problema ou oportunidade de

melhoria observado, a equipe envolvida, o escopo do projeto, os fatores críticos para a qualidade (CTQs), os benefícios esperados e o cronograma das etapas previstas no método DMAIC.

Desta forma, o projeto para a redução dos custos da não qualidade no processo de fabricação de balas foi selecionado pela alta direção da Alpha e liderado por uma Analista de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – PD&I, como parte de um programa interno de certificação *green belt*. O Quadro 1 apresenta as principais informações contidas no *Project Charter*.

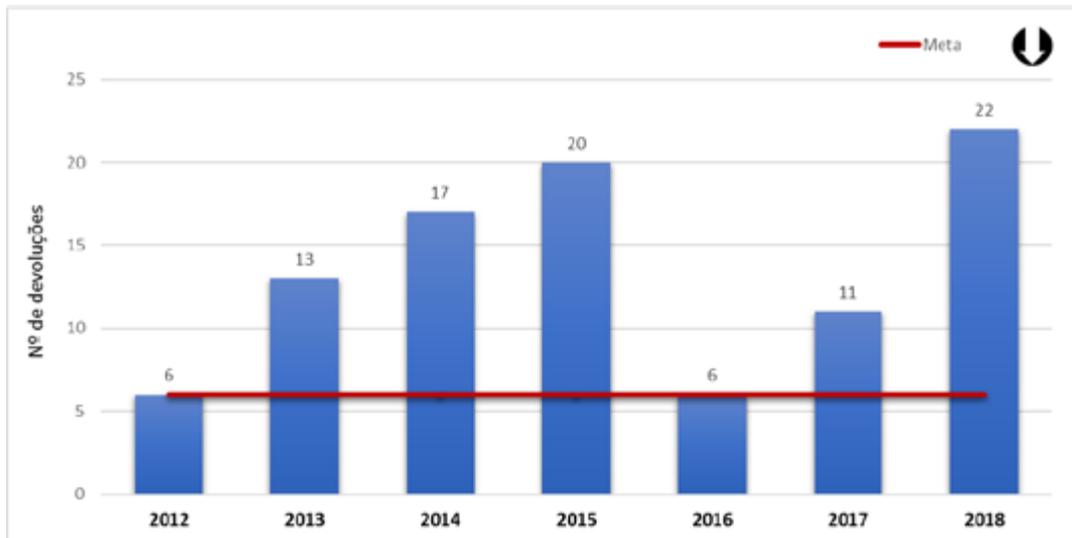
**Quadro 1:** Síntese do *Project Charter*

<b>Título do projeto</b>	Redução dos custos da não qualidade decorrentes da devolução de balas meladas na linha de mastigáveis.	
<b>Descrição do problema</b>	No ano de 2018 foram registradas vinte e duas ocorrências de devolução de balas mastigáveis meladas. Esse número é três vezes maior do que a média registrada nos últimos 3 anos. Tal problema resulta no aumento dos custos da não qualidade do produto e pode afetar negativamente a satisfação e a fidelidade dos clientes.	
<b>Equipe do projeto</b>	1 Analista PD&I (líder do projeto), 1 Técnico Mecânico e 3 operadores de processo.	
<b>CTQs</b>	Balas íntegras, não meladas, sem aspecto mole ou derretido.	
<b>Escopo do projeto</b>	O projeto tem como escopo a etapa de cozimento e exclui as etapas de embrulhamento, empacotamento e estoque.	
<b>Benefícios esperados</b>	Além do benefício financeiro classificado como custo evitado associado aos custos da não qualidade por devolução de balas, o projeto contribuirá com a manutenção da fidelidade e satisfação dos clientes.	
<b>Cronograma</b>	Definição: Uma semana Medição: Quatro semanas Análise: Quatro semanas	Melhoria: Oito semanas Controle: Doze semanas

Fonte: Autores.

Logo após a estruturação do *Project Charter*, a Equipe do Projeto (EP) decidiu elaborar um gráfico de barras para descrever as ocorrências de devoluções de balas meladas registradas no período de 2012 a 2018. A Figura 1 ilustra o gráfico de barras elaborado na fase Definição. Com base nesse gráfico, a EP definiu a meta para o projeto de acordo com o melhor desempenho observado no período (*process entitlement*), sendo o número de devoluções igual a 6 ocorrências. Dessa forma, a meta foi estabelecida da seguinte forma: “Reduzir em 73% o número de devolução de balas meladas nos próximos quatro meses”.

**Figura 1:** Devolução de balas meladas.



Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

## 4.2. Fase Medição

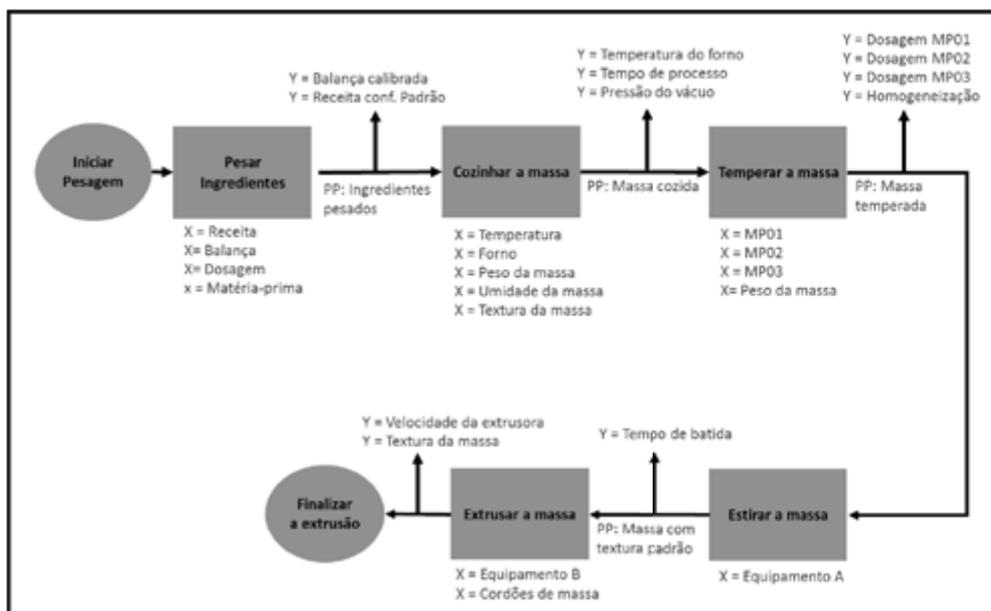
A fase Medição tem como propósito a tradução do problema abordado no projeto em uma forma mensurável, assim como a medição e o cálculo da capacidade do processo. Uma atividade essencial nesta fase é a formulação da função de transferência, que pode ser explicada em termos matemáticos como  $Y = f(x^1, x^2, \dots, x_n)$ , onde as prováveis causas “x’s” são convertidas em saídas do processo “Y’s” (PYZDEK; KELLER, 2003). Após a validação do *Project Charter*, a EP elaborou uma matriz SIPOC (Quadro 2) para identificar as principais entradas e saídas do processo. Essa matriz foi complementada com um mapa de processo (Figura 2), de modo a aumentar o número das variáveis inerentes à função de transferência.

**Quadro 2:** Matriz SIPOC para o processo de produção de balas.

Suppliers	Input	Process	Output	Customers
Almoxarifado / Qualidade	Receita / Matéria-prima	Pesar ingredientes	Ingredientes pesados	Cozinheiro
Balança / Tanque misturador	Ingredientes pesados e misturados	Cozinhar a massa	Massa cozida	Batedeiras
Cozinheiro / Vácuos 1 e 2	Massa cozida e parâmetros corretos	Temperar a massa	Massa temperada	Estiramento
Batedeiras e Dosador	Massa temperada	Estirar a massa	Massa cortada	Extrusora
Batedeiras	Massa descansada	Extrusar a massa	Cordões de massa	Embrulhadeira

Fonte: Autores.

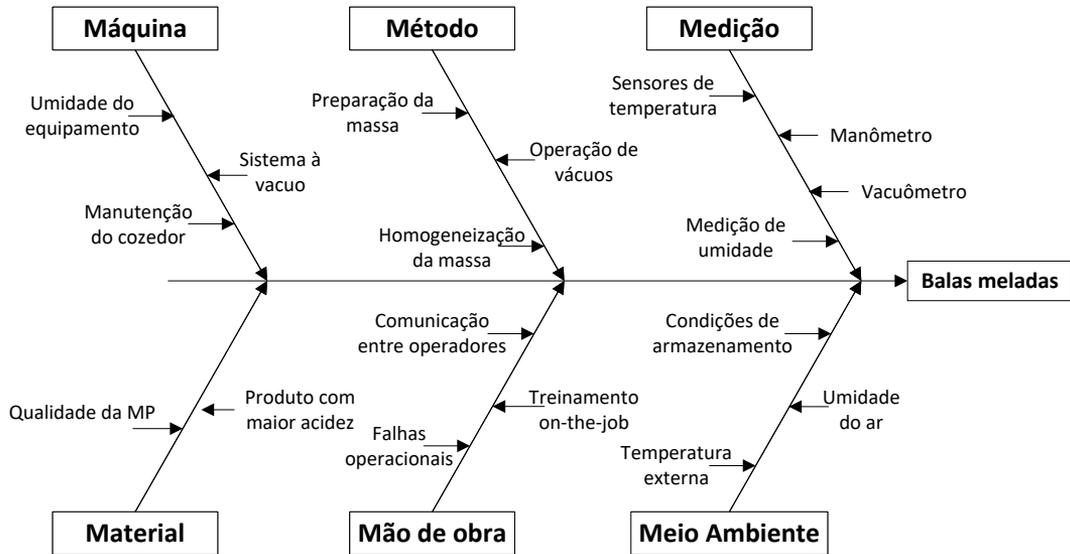
**Figura 2:** Mapa do processo de produção de balas.



Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Com o propósito de priorizar as prováveis causas relacionadas ao problema de devolução das balas meladas, a EP conduziu uma reunião de *brainstorming* para a elaboração de um diagrama de causa e efeito (Figura 3). Após a elaboração desse diagrama, as informações foram agrupadas e analisadas em uma matriz de priorização esforço-impacto (Quadro 3). Das doze causas prováveis identificadas, seis foram priorizadas para posterior investigação na fase Análise, a respeito das relações de causa e efeito.

Figura 3: Diagrama de causa e efeito.



Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Quadro 3: Matriz Esforço-Impacto

Nº	Causas prováveis	Esforço	Impacto	Decisão
1	Umidade da massa	Baixo	Alto	Implementar
2	Temperatura de cozimento	Baixo	Alto	Implementar
3	Tempo de cozimento	Baixo	Alto	Implementar
4	Pressão de vácuo	Baixo	Alto	Implementar
5	Quantidade de MP01	Alto	Alto	Complexo
6	Armazenagem do produto	Alto	Baixo	Descartar
7	Transporte do produto	Alto	Baixo	Descartar
8	Homogeneização da massa	Baixo	Alto	Implementar
9	MP02 na formulação do produto	Alto	Alto	Complexo
10	Padrão operacional	Baixo	Alto	Implementar
11	Umidade relativa do ar	Alto	Alto	Complexo
12	Solda dos pacotes	Baixo	Baixo	Descartar

Fonte: Autores

A etapa Medição foi finalizada com a estimativa da capacidade atual do processo utilizando o nível sigma. Considerando que o número de devoluções de balas é uma variável discreta, o nível sigma foi calculado com base no rendimento final do processo, a partir do índice de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), conforme expressões 1, 2 e 3. O valor DPMO foi então convertido para o nível sigma por meio de um ta-

bela de equivalência entre níveis  $\sigma$  e DPMO (PYZDEK; KELLER, 2003), que considera o “desconto” de  $1,5\sigma$  para a variação de longo prazo ( $Z_{LP}$ ). Deste modo, a capacidade atual do processo ( $Z_{CP}$ ) foi reportada como **2,04 $\sigma$** , o que corresponde a 292.994 DMPO, sendo 471 unidades inspecionadas, 1 oportunidade de defeito (bala melada por umidade) e 138 defeitos observados na amostra.

$$DPU = \frac{\text{Número de defeitos}}{\text{Número de unidades}} \quad (01)$$

$$DPO = \frac{\text{Número de defeitos}}{(\text{Número de unidades} \times \text{Número de oportunidades})} \quad (02)$$

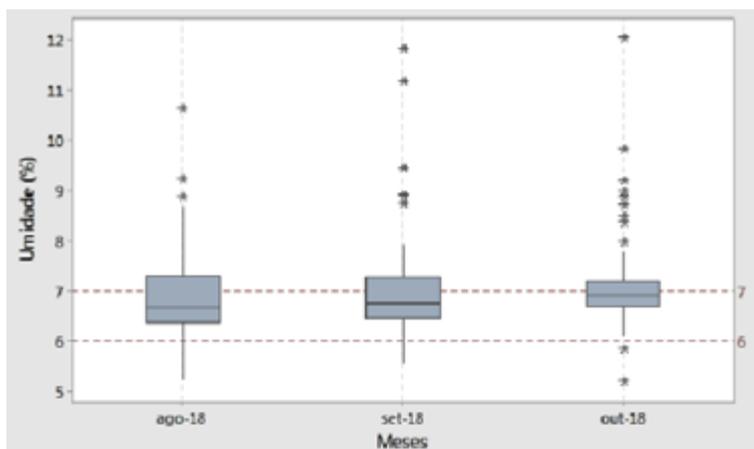
$$DPMO = DPO \times 10^6 \quad (03)$$

### 4.3. Fase Análise

A fase Análise tem como objetivo a identificação das fontes de variação do processo e compreensão das causas raízes do problema investigado, podendo-se recorrer à diversas técnicas, incluindo a aplicação de testes de hipóteses, análise de regressão simples e múltipla, Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos (FMEA), planejamento de experimentos, entre outras (MONTGOMERY; WOODALL, 2008).

Considerando a importância do fator umidade para o indicador do projeto, assim como a priorização deste fator na etapa Medição, a EP decidiu analisar a variabilidade do processo usando um gráfico BoxPlot. A Figura 4 ilustra o gráfico BoxPlot para o percentual de umidade comparando os lotes produzidos nos meses de agosto, setembro e outubro de 2018. Desta forma, observou-se uma grande variabilidade nos três períodos mensurados, bem como a presença *outliers* e valores fora da faixa ideal de umidade (entre 6 e 7%).

**Figura 4:** Gráfico BoxPlot para análise da umidade.



Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Complementando a análise da variabilidade no teor de umidade, foram elaborados e analisados gráficos de dispersão e calculados os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ). Tal coeficiente é uma medida da força e direção de uma relação linear entre duas variáveis, calculada a partir da expressão 4, onde “ $y$ ” representa a variável resposta e “ $x$ ” a variável preditora:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (04)$$

Desse modo, a correlação linear entre a variável resposta “umidade (%)” *versus* a variável preditora “temperatura (°C)” foi interpretada como forte e negativa ( $r = -0,943$ ), onde a diminuição da temperatura de cozimento da massa na qual o produto é exposto, aumenta a umidade residual do produto. Por outro lado, a correlação linear entre a variável resposta “umidade (%)” *versus* a variável preditora “dosagem de MP01” foi interpretada como fraca e positiva (0,596), sendo portando, desconsiderada para análises posteriores.

A análise de correlação foi complementada com um estudo de *shelf life*, onde o ciclo de vida do produto é acelerado e observam-se os diferentes resultados na umidade do produto, obtidos a partir de variações na temperatura de cozimento. Esse estudo comprovou que os produtos submetidos a uma determinada faixa de temperatura e umidade aumentaram as reações químicas fazendo com que o produto apresentasse maior ocorrência de bala melada.

#### 4.4. Fase Melhoria

A fase Melhoria visa a geração de ideias e a priorização de soluções para atuar nas causas-raízes do problema. Nesta etapa do trabalho deve-se selecionar as melhores soluções e criar um plano de ação para a implementação das mudanças necessárias. As ferramentas e técnicas mais utilizadas nesta fase incluem Plano de Ação, geração de ideias, Planejamento de Experimentos (DOE) e técnicas de priorização de ações.

Após o entendimento das principais causas de devolução de balas meladas, a EP elaborou um plano de ação com as contramedidas necessárias. Dentre essas ações, destacam-se a padronização das faixas de controle do processo, de modo a garantir que o produto seja processado dentro dos níveis ideais de umidade, assim como a elaboração e teste piloto de um procedimento operacional para a preparação da massa (temperagem), cujo objetivo foi assegurar a dosagem dos ingredientes de maneira uniforme para cada batelada produzida.

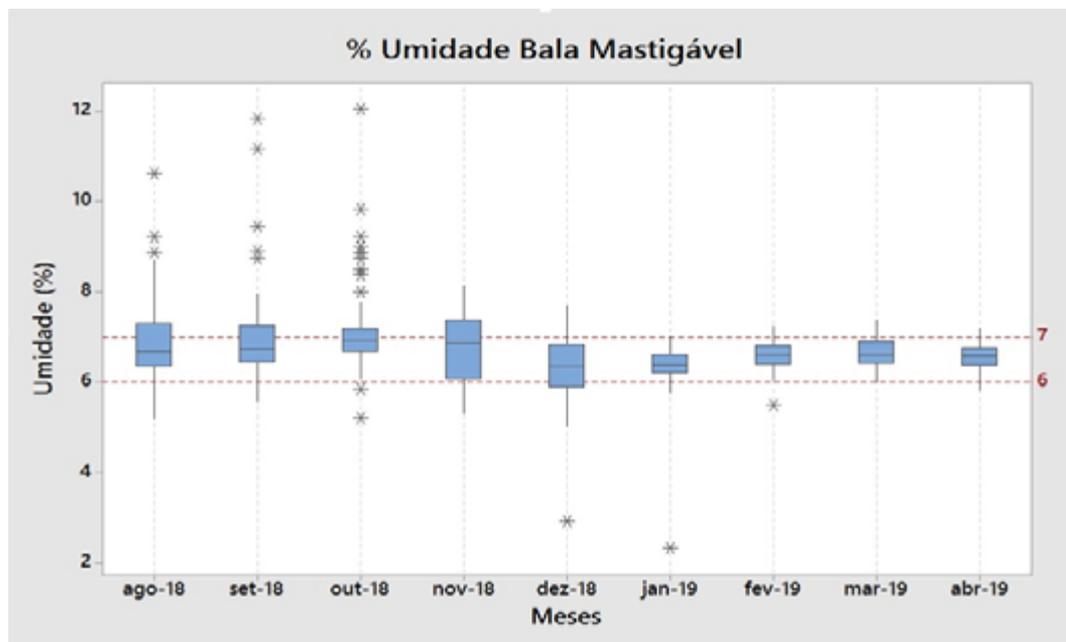
Seguindo o mesmo procedimento apresentado na fase Medição, a EP refez o cálculo do nível sigma, evidenciando a melhoria da capacidade do processo para o nível

2,69 $\sigma$ , o que corresponde a 117.117 DMPO, considerando uma amostra de 119 unidades, 1 oportunidade de defeito (bala melada por unidade) e 13 defeitos observados na amostra. Essa redução de aproximadamente 175.877 DMPO serviu de base para a apuração dos ganhos financeiros do projeto (*saving*). Observando o gráfico BoxPlot apresentado na Figura 5, percebe-se claramente o efeito das ações implementadas na redução da variabilidade na umidade do produto, assim como a centralização do processo após o período de janeiro de 2019.

#### 4.5. Fase Controle

A fase Controle deve garantir que os ganhos obtidos com a implementação das ações de melhoria sejam sustentáveis. As ferramentas e técnicas comumente aplicadas nessa fase incluem cartas de controle, padronização, auditorias, plano de controle e um novo estudo de capacidade para evidenciar a melhoria de desempenho obtida com o projeto.

**Figura 5:** Gráfico BoxPlot atualizado. Fonte: Dados fornecidos pela empresa.



Fonte: Autores

Para assegurar a sustentabilidade dos ganhos obtidos com as mudanças implementadas, a EP decidiu sistematizar os padrões operacionais elaborados na fase anterior, assim como atualizar o plano de controle do processo com as novas faixas de ope-

ração. Além disso, foi implementada uma carta de controle para o monitoramento da média e amplitude ( $\bar{X}$  e  $R$ ) do teor de umidade, mensurado pelo método de Karl Fischer.

Além das melhorias observadas, é importante destacar que até o encerramento desta pesquisa (agosto de 2019), a Alpha não havia registrado nenhuma ocorrência de devolução de produto ou registro de reclamação do cliente decorrente de balas meladas. Deste modo, a EP concluiu que o projeto atendeu às expectativas registradas no *Project Charter* e recomendou a certificação *green belt* para a líder do projeto.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da abordagem SS pode contribuir com as estratégias de excelência operacional na indústria de alimentos. O presente artigo apresentou um estudo empírico a respeito da condução de um projeto SS voltado para a redução dos custos da não qualidade no processo de produção de balas. O projeto analisado foi implementado por meio do método DMAIC e definido a partir de uma perspectiva *bottom-up*, como parte de um programa de certificação *green belt* na empresa pesquisada.

O estudo de caso revela a aplicação de várias técnicas e ferramentas nas fases de definição, medição, análise, melhoria e controle do projeto SS, incluindo mapas de processo, estatística descritiva, cálculo do nível sigma, análise de correlação, entre outras. O resultado da fase Análise destaca a verificação da correlação linear entre as variáveis teor de umidade e temperatura de cozimento.

Profissionais da área de excelência operacional poderão utilizar os resultados deste artigo para comparar suas práticas na condução de projetos SS com a abordagem descrita neste estudo. Além disso, o estudo de caso aqui apresentado poderá fornecer *insights* ou incentivar outras empresas inseridas na cadeia de produção de alimentos, tais como indústrias de processamento de carnes, produção de alimentos congelados e bebidas, laticínios, entre outras, a conduzirem projetos SS com o propósito de melhorar o desempenho empresarial.

## Referências

BLACK, K.; REVERE, L. Six Sigma arises from the ashes of TQM with a twist. **International Journal of Health Care Quality Assurance**, v. 19, n. 3, p. 259-266, 2006.

DE MORI, C. **Capacidade tecnológica em sistemas agroindustriais**: proposição de índice e aplicação a empresas dos segmentos de trigo e leite. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

DESAI, D. A; KOTADIYA, P; MAKWANA, N.; PATEL, S. Curbing variations in packaging process through Six Sigma way in a large-scale food-processing industry. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 11, n. 1, p. 119-129, 2015.

DORA, M.; GELLYNCK, X. Lean Six Sigma implementation in a food processing SME: a case study. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 31, n. 7, p. 1151-1159, 2015.

DUDBRIDGE, M. **Handbook of lean manufacturing in the food industry**. John Wiley & Sons, 2011.

EVANS, J. R.; LINDSAY, W. M. **An introduction to Six Sigma and process improvement**. Cengage Learning, 2014.

MEHRJERDI, Y. Z. Six-sigma: methodology, tools and its future. **Assembly Automation**. v. 31, n. 1, p. 79-88, 2011.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Revista Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MONTGOMERY, D. C.; WOODALL, W. H. An overview of six sigma. **International Statistical Review**, v. 76, n. 3, p. 329-346, 2008.

NABHANI, F.; SHOKRI, A. Reducing the delivery lead time in a food distribution SME through the implementation of six sigma methodology. **Journal of manufacturing technology Management**, v. 20, n. 7, p. 957-974, 2009.

PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **Estratégia Seis Sigma**. Como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PYZDEK, T.; KELLER, P. A. **The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Level**. New York: McGraw-Hill, 2003.

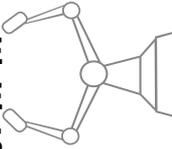
RAIMUNDO, L. M. B.; BATALHA, M. O.; TORKOMIAN, A. L. V. Dinâmica tecnológica da Indústria Brasileira de Alimentos e Bebidas (2000-2011). **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 24, n. 2, p. 423-436.4, 2017.

SEOW, C.; KNOWLES, G.; JOHNSON, M.; WARWOOD, S. Medicated sweet variability: a six sigma application at a UK food manufacturer. **The TQM Magazine**, 2004.

SNEE, R. D. Six sigma: the evolution of 100 years of business improvement methodology. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**, v. 1, n.1 p. 4-20, 2004.

YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. 4. ed. Applied social research methods series, 5. SAGE Publication, Inc., 2009.

# DIAGNÓSTICO DE MATURIDADE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR: UM ESTUDO MULTICASOS



**Juliano Endrigo Sordan**

julianosordan@yahoo.com.br; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Flávio Augusto Custódio**

flav976@gmail.com; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Roberto Antônio Martins**

ram@dep.ufscar.br; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Pedro Carlos Oprime**

pedro@dep.ufscar.br; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

**Resumo:** As recentes transformações tecnológicas e o constante aumento na oferta de cursos superiores, têm alterado significativamente o modus operandi das Instituições de Ensino Superior (IES) brasileiras. Essa condição reforça a importância do desenvolvimento de estratégias organizacionais e implementação de Sistemas de Medição de Desempenho (SMD). O presente trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação de um modelo de diagnóstico de maturidade dos SMD em quatro IES. Para alcançar este objetivo, um instrumento de diagnóstico de maturidade em SMD foi construído a partir do referencial teórico. A pesquisa resultou em um estudo de caso múltiplo por meio de entrevistas semiestruturadas envolvendo profissionais que atuam em diferentes áreas gerenciais nas IES selecionadas. Os resultados revelam insights sobre a maturidade dos SMD nessas instituições. Conclui-se que as IES que atuam na modalidade presencial apresentaram maior maturidade em seus SMD, quando comparadas às IES que atuam na modalidade EAD. Contudo, não se pode generalizar os resultados para além dos casos estudados.

**Palavras-chave:** Sistemas de Medição de Desempenho, modelos de maturidade, ensino superior.

**Abstract:** *Recent technological changes and the constant increase of higher education services have significantly changed the modus operandi of Higher Education Institutions (HEI) operating in Brazil. This scenario reinforces the importance of developing organizational strategies and implementing Performance Measurement System (PMS). This paper aims to present the application of a diagnostic model of MDS maturity in four HEI. To achieve this goal, a maturity diagnosis tool in PMS was built from the literature. The research resulted in a multiple case study through semi-structured interviews involving professionals working in different management areas. The results reveal insights into the maturity of PMS in these institutions. It was concluded that the HEI that act in the present modality presented higher maturity in their PMS, when compared to the HEI that act in the distance learning modality. However, the results cannot be generalized beyond the studied cases.*

**Keywords:** *Performance Measurement System, maturity models, Higher Education.*

**Resumen:** Los cambios tecnológicos recientes y el aumento constante en la oferta de cursos de educación superior, han alterado significativamente el *modus operandi* de las Instituciones de Educación Superior (IES) brasileñas. Esta condición refuerza la importancia de desarrollar estrategias organizacionales e implementar Sistemas de Medición de Desempeño (SMD). El presente trabajo tiene como objetivo presentar la aplicación de un modelo de diagnóstico para la madurez de SMD en cuatro IES. Para lograr este objetivo, se construyó un instrumento de diagnóstico de madurez en DME a partir del marco teórico. La investigación resultó en un estudio de caso múltiple a través de entrevistas semiestructuradas que involucran a profesionales que trabajan en diferentes áreas gerenciales en las IES seleccionadas. Los resultados revelan conocimientos sobre la madurez de SMD en estas instituciones. Se concluye que las IES que trabajan en la modalidad presencial presentaron mayor madurez en su SMD, en comparación con las IES que trabajan en la modalidad a distancia. Sin embargo, los resultados no se pueden generalizar más allá de los casos estudiados.

**Palabras clave:** Sistemas de medición del desempeño, modelos de madurez, educación superior.

## 1. INTRODUÇÃO

Após um longo período de estagnação, o ensino superior brasileiro deu sinais de recuperação no final da década de 1990 por meio do aumento no número de matrículas, decorrente da expansão do ensino médio e também pela pressão de uma parcela de adultos já integrados no mercado de trabalho, que enxergaram no ensino superior, uma oportunidade para melhorar suas chances profissionais com a obtenção de um título acadêmico (MARTINS, 2000). Tal conjuntura resultou no aumento da oferta de cursos de graduação e pós-graduação fazendo com que muitas Instituições de Ensino Superior (IES) reformulassem suas estratégias de negócio para oferecer seus serviços de massa para um mercado emergente.

A reestruturação do ensino superior brasileiro gerou uma importante contradição do ponto de vista organizacional e institucional, visto que a administração pública não diferencia esses fatores entre as instituições privadas focadas em práticas de mercado, instituições públicas, e instituições privadas sem fim lucrativos, que destinam seus resultados financeiros em atividades educacionais (LOEBEL, 2009).

Considerando a expansão dos cursos superiores nas diversas modalidades e a concorrência entre os *players* da educação superior, assim como as exigências governamentais e sociais, as IES têm observado a necessidade de mensurar a qualidade dos serviços prestados, tanto como uma prática gerencial, como um instrumento de prestação de contas à sociedade e aos órgãos reguladores, incluindo o Ministério da Educação (RODRIGUES *et al.*, 2004).

Estudos sobre Sistemas de Medição de Desempenho (SMD) em IES podem ser evidenciados na literatura (EVANS, 2007; YU *et al.*, 2009; SECUNDO; ELIA, 2014; SMULOWITZ, 2015; TASOPOULOU; TSIOTRAS, 2017). A vanguarda na pesquisa sobre SMD apresenta como desafio, a observação das interações com outros importantes temas

pertinentes à gestão das organizações, como por exemplo, a medição de desempenho em organizações públicas e sem fins lucrativos, a medição de desempenho em Pequenas e Médias Empresas (PME), o desempenho ambiental e social, entre outros (BITITCI, 2012).

Nesse contexto, o presente trabalho busca diagnosticar, por meio de um estudo de caso múltiplo e descritivo, os níveis de maturidade dos SMD implementados em quatro IES que possuem diferentes categorias e modalidades de ensino. Busca-se desta forma, compreender melhor os atributos que possam aumentar os níveis de maturidade em SMD para as IES.

## 2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO

Um Sistema de Medição de Desempenho pode ser definido como “um conjunto de medidas utilizadas para quantificar a eficiência e a efetividade das ações” (NEELY *et al.*, 1995). Neste sentido, as medidas de desempenho podem representar “sinais vitais” para um negócio, visto que elas comunicam o que é importante por toda a organização, desde a alta gerência até os níveis operacionais, e viabilizam o controle e a melhoria dos processos (HRONEC, 1994).

Embora o tema Medição de Desempenho tenha sido amplamente discutido nas últimas décadas com ênfase em aspectos financeiros, nos últimos anos o enfoque vem sendo direcionado para uma combinação de medidas financeiras e não-financeiras, assim como para uma perspectiva que inclui os *stakeholders* (WETTSTEIN; KUENG, 2002). Ferramentas e estruturas de análise amplamente conhecidos, incluindo *Balanced Scorecard - BSC* (KAPLAN; NORTON, 2001), *Performance Prism* (NEELY *et al.*, 2002), Prêmio Nacional da Qualidade (FNQ, 2010), entre outros, evidenciam a importância deste novo enfoque para a gestão dos SMD.

Com o propósito de definir as características essenciais para os SMD, bem como revisar as diversas definições sobre o conceito de medição de desempenho, Franco-Santos *et al.*, (2007) realizaram um importante estudo teórico que revela três atributos-chave sobre o tema:

- a) Características** do SMD. Referem-se as propriedades ou elementos que permitem diferenciar um SMD de outros sistemas, tais como métricas ou medidas de desempenho e infraestrutura para apoiar a operacionalização das medidas;
- b) Processos** que constituem o SMD. Representam o conjunto de ações para a efetiva implementação de um SMD, como por exemplo, a sistemática de seleção, coleta e análise de dados, o sistema de incentivos e recompensas, entre outros;

**c) Funções** do SMD. Referem-se aos papéis ou ao propósito do SDM para a organização e podem incluir a capacidade para avaliar a estratégia e influenciar o comportamento organizacional, a comunicação do desempenho e o aprendizado decorrente da medição.

Para Neely (1998), a Medição de Desempenho pode ser justificada por meio de quatro ações ou “funções” denominadas “CPs”. São elas: (i) **Checar Posição**, onde as medidas de desempenho podem ser implementadas para estabelecer posição no mercado, comparar o desempenho com outros negócios (*benchmarking*) e monitorar o progresso; (ii) **Comunicar Posição**, por meio da divulgação interna do desempenho organizacional e também para comunicar o desempenho aos reguladores do negócio; (iii) **Confirmar Prioridades**, utilizando as medidas para gerenciar o negócio, melhorar a tomada de decisão e controlar custos e investimentos; e (iv) **Compelir Progresso**, por meio da motivação para alcançar resultados, da comunicação das prioridades e uso das medidas como base para recompensa.

A recente literatura sobre o tema apresenta trabalhos que abordam Modelos de Maturidade em SMD. Wettstein e Kueng (2002) desenvolveram uma estrutura de análise para avaliar a maturidade dos SMD e acelerar o processo de implementação. Tal modelo combina quatro níveis de maturidade com seis dimensões atribuídas ao desenvolvimento de um SMD. São elas: (i) escopo de medição; (ii) coleta de dados, (iii) armazenagem de dados; (iv) comunicação do desempenho, (v) uso das métricas; e (vi) qualidade dos processos de medição de desempenho.

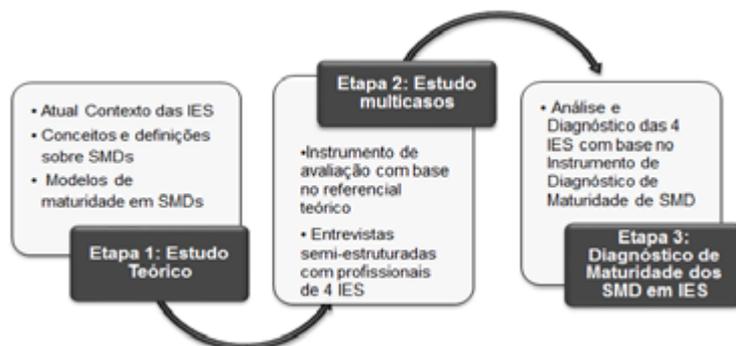
Em um estudo envolvendo empresas italianas e escocesas, Garengo *et al.* (2007), investigaram a relação entre SMD e Sistemas de Informação Gerenciais (SIG) com base em um modelo de maturidade. Os autores observaram que a maturidade organizacional influencia a implementação dos SMD de forma expressiva, e que o ambiente externo é essencial para estimular a adoção de SMD em organizações com menor maturidade. Van Aken *et al.*, (2015) apresentaram a aplicação de uma ferramenta para avaliação da maturidade e efetividade de SMD, elaborada a partir de modelos de Excelência (Malcolm Baldrige e EFQM) capaz de ser utilizada em uma organização com o propósito de aumentar a maturidade de seu SMD.

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

A abordagem de pesquisa adotada neste estudo é de natureza qualitativa-descritiva abrangendo múltiplos casos. O método escolhido para este trabalho é o estudo multicase, por permitir a identificação de evidências relevantes e de maior confiabili-

dade, quando comparado aos estudos de casos únicos (YIN, 2001). O estudo de um único caso oferece como vantagem a amplitude das observações e maior riqueza na coleta de dados. Contudo, é limitado quanto ao grau de generalização, além de ser recomendado para estudos exploratórios e longitudinais (MIGUEL; SOUZA, 2012). A Figura 1 descreve as etapas da pesquisa.

**Figura 1:** Delineamento da pesquisa.



Fonte: Autores

Para alcançar os objetivos da pesquisa, o estudo foi estruturado em três etapas e conduzido no primeiro semestre de 2018. Na primeira etapa, buscou-se a identificação do atual contexto das IES de modo a compreender algumas especificidades deste setor para posterior análise. A partir do referencial teórico sobre SMD, foram identificados conceitos-chave sobre o tema, assim como a identificação de estudos que versam sobre modelos de maturidade em SMD.

Na segunda etapa da pesquisa, os autores deste artigo construíram o instrumento de avaliação, com base no referencial teórico investigado. Em seguida, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas envolvendo profissionais que atuam em diferentes funções nas IES investigadas. A seleção das IES priorizou os seguintes aspectos: (i) o porte das instituições, considerando a necessidade de uma estrutura adequada à implementação de SMD; (ii) a localização das IES; e (iii) a diversidade quanto à natureza e modalidade de ensino, de modo a cobrir os principais tipos de competidores no segmento estudado. Por fim, de posse dos dados obtidos nas entrevistas, uma análise sobre o desempenho das quatro IES foi conduzida com o propósito de gerar *insights* sobre a maturidade dos SMD nessas instituições.

## 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O estudo multicase envolveu quatro IES de natureza, modalidade de ensino, porte, perfil de cursos e abrangência geográfica diferentes entre si. As principais características das quatro IES são resumidamente apresentadas no Quadro 1. Para cada IES foram utilizados dados secundários baseados em documentos internos, manuais e *website*. A seguir, apresenta-se, de forma sintética, o perfil das quatro IES pesquisadas.

**Quadro 1:** Características das IES pesquisadas.

IES	Natureza	Modalidade de Ensino	Porte da IES*	Número de alunos	Perfil dos Cursos Superiores	Abrangência Geográfica
IES (A)	Pública	Presencial	Grande	964	Graduação em Tecnologia	Região de Ribeirão Preto, SP
IES (B)	Privada	Presencial	Grande	5.700	Graduação e pós-graduação	Noroeste do estado de São Paulo
IES (C)	Pública	EAD	Grande	18.000	Graduação e especialização	Estado de São Paulo
IES (D)	Privada	EAD	Grande	100.000	Graduação e pós-graduação	14 estados e Distrito Federal

\* Segundo método de classificação por número de empregados no setor de serviços (SEBRAE, 2018).

Fonte: Autores

### 4.1. IES (A)

A IES (A) é uma instituição pública mantida pelo Governo do Estado de São Paulo, que faz parte de um grupo de 68 faculdades de tecnologia, distribuídas em 62 municípios paulistas. Oferece cursos de graduação na modalidade presencial na região noroeste do estado de São Paulo, Brasil. Iniciou suas atividades em 2010 e hoje conta com 128 funcionários e aproximadamente 964 alunos. Atualmente são oferecidos os seguintes cursos: gestão empresarial, manutenção industrial, mecatrônica industrial e mecânica – processos de soldagem. O entrevistado na instituição atua no cargo de diretor acadêmico da unidade.

A implementação do SMD foi iniciada em 2016 com o propósito de melhorar a gestão da unidade, observando os requisitos das partes interessadas. Para isso, a instituição optou por desenvolver um mapa estratégico considerando os processos internos diretos (ensino, pesquisa e extensão), bem como os processos de apoio, incluindo gestão de pessoas, suprimentos e tecnologia da informação. Atualmente os indicadores de desempenho são atualizados e verificados mensalmente. Contudo, o SMD não é informatizado e sua operacionalização é feita em planilhas e quadros de gestão visual.

## 4.2. IES (B)

Fundada na década de 1920 na região metropolitana de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, a IES (B) oferece hoje 28 cursos de graduação (incluindo cursos superiores de tecnologia) e 10 cursos de pós-graduação em nível de especialização (*Lato Sensu*). Emprega cerca de 550 funcionários e possui mais de 5.700 alunos matriculados. O entrevistado na instituição atua no cargo de coordenador de cursos tecnológicos.

A partir de 2002, a instituição registrou uma queda acentuada no número de alunos matriculados devido ao aumento da concorrência direta, local e regional, decorrente da instalação de novas IES com cursos semelhantes, assim como a expansão dos cursos superiores na modalidade EAD. A lacuna entre as metas estabelecidas no Plano de Desenvolvimento e os resultados observados pela instituição, assim como o esvaziamento de alguns cursos e a extinção de outros, resultaram na estruturação de um novo SMD, construído de forma coletiva e democrática, a partir da redefinição de metas, diagnósticos e relatórios internos e resultados obtidos nos ciclos do Exame Nacional de Desempenho de Estudantes - ENADE.

## 4.3. IES (C)

Criada em 2012 como Fundação, a IES (C) é uma universidade pública voltada para a Educação a Distância (EAD) e semipresencial, mantida pelo Governo do Estado de São Paulo. Oferece seis cursos de graduação e licenciatura, além de cursos de especialização para a formação de docentes. Emprega atualmente cerca de 330 tutores para apoiar os alunos nas atividades pedagógicas e conta com a participação de 806 professores de outras instituições públicas do estado, que participam das videoaulas. Além disso, possui mais de 18.000 alunos distribuídos em 242 polos voltados ao desenvolvimento de atividades presenciais, que contam com infraestrutura física e tecnológica.

A pesquisa na IES (C) foi realizada em um de seus polos, localizado na região central do estado, por meio de entrevistas com o coordenador local. Embora o desempenho da instituição ainda não tenha sido totalmente medido, visto que o processo incluirá a avaliação dos cursos a partir da formatura das primeiras turmas, foi possível realizar o diagnóstico de maturidade do SMD com base nas rotinas de verificação das metas de curto prazo, nas parcerias com outras IES e no uso intensivo de tecnologia de informação.

## 4.4. IES (D)

Fundada em 2006, a IES (D) oferece diversos cursos de graduação e pós-graduação a distância em 14 estados brasileiros e no Distrito Federal. Emprega mais de 800

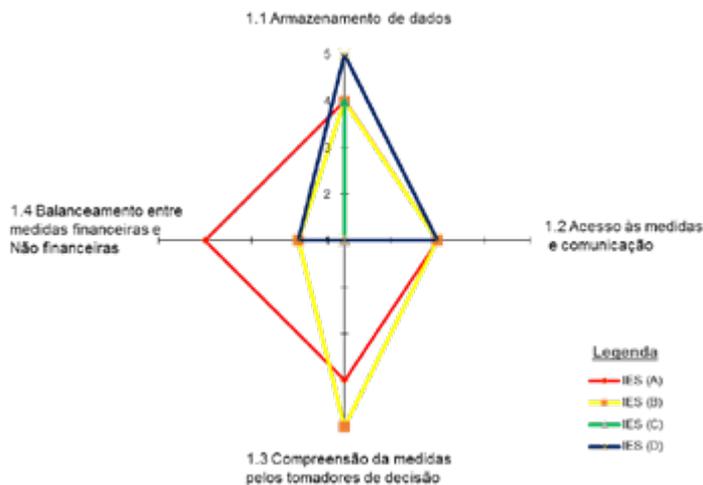
colaboradores e possui mais de 100.000 alunos matriculados nos 40 polos de estudo distribuídos no país. As aulas são realizadas com o uso de mídias *on-line* e os encontros presenciais são exigidos apenas para a realização de provas, exames e apresentação de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). A entrevista foi conduzida com o coordenador de curso de administração.

A IES (D) acredita na estratégia de auto estudo para promover a qualificação das pessoas a baixo custo. Para isso, investe na plataforma digital de ensino e aplicativos para *smartphones* com o propósito de integrar o aluno ao ambiente pedagógico, mesmo em locais sem acesso à internet. Contudo, todas as operações são gerenciadas por meio de uma estrutura hierarquizada e os coordenadores de cursos são responsáveis por reportar o desempenho da instituição à alta administração.

#### 4.5. Maturidade dos SMD

O instrumento de avaliação utilizado para diagnosticar a maturidade dos SMD nas IES foi desenvolvido a partir de dimensões identificadas no referencial teórico, agrupadas em três critérios: características, processos e funções. A Figura 2 apresenta os níveis de maturidade de cada IES em um gráfico polar, sob quatro perspectivas que definem as características dos SMD: armazenamento de dados; acesso às medidas e comunicação; compreensão das medidas pelos tomadores de decisão; e balanceamento entre medidas financeiras e não financeiras. Quanto maior a pontuação (que varia entre 1 e 5), maior a maturidade do SMD.

**Figura 2:** Gráfico polar para o critério “Características”.



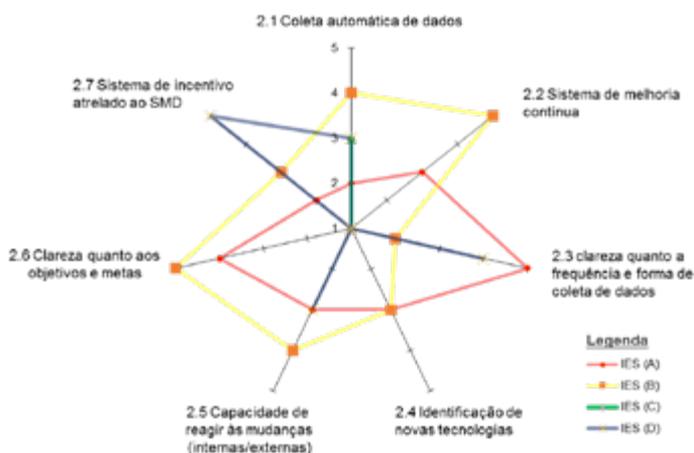
Fonte: Autores

Ao observar a Figura 2 percebe-se o bom desempenho de todas as IES quanto ao armazenamento dos dados. Contudo, ao verificar o balanceamento entre as medidas financeiras e não financeiras, apenas a IES (A) evidencia nível maturidade nesta dimensão. Isso pode ser explicado, já que a instituição implementou o BSC em seu SMD com o propósito de monitorar o progresso em indicadores não financeiros, como por exemplo, o número de projetos sociais realizados dentro da unidade, a quantidade mensal de visitas na plataforma *on-line*, entre outros.

As IES (A) e (B) apresentaram um bom desempenho quanto a compreensão das medidas pelos tomadores de decisão. Essas instituições atuam na modalidade de ensino presencial, fato que pode favorecer a interação entre os tomadores de decisão e o processo de ensino. Dentre as quatro dimensões do critério características, percebe-se que o “acesso às medidas e comunicação” representa uma importante limitação presente nas quatro IES investigadas.

A Figura 3 compara os níveis de maturidade das IES no critério Processos sob 7 perspectivas: coleta automática de dados, sistema de melhoria contínua, clareza quanto a frequência e forma de coleta de dados, identificação de novas tecnologias, capacidade de reagir às mudanças internas e externas, clareza quanto aos objetivos e metas, e sistema de incentivo atrelado ao SMD. Percebe-se uma clara heterogeneidade de desempenho entre as quatro instituições, sendo que a IES (B) demonstra maior maturidade, quando comparada às demais IES, principalmente com relação ao “sistema de melhoria contínua” e “clareza quanto aos objetivos e metas”. Contudo a IES (B) apresenta menor maturidade nas dimensões “Sistema de incentivo atrelado ao SMD” e “Clareza quanto a frequência e forma de coleta de dados”.

**Figura 3:** Gráfico polar para o critério “Processos”.

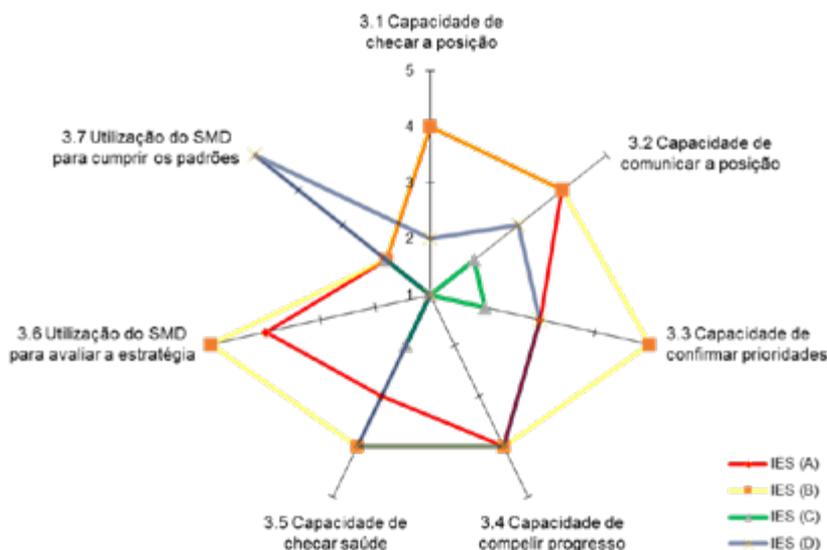


Fonte: Autores

Cabe ressaltar que as IES que atuam na modalidade EAD, embora disponham de plataformas digitais para operacionalizar suas atividades pedagógicas, não apresentaram um bom nível de maturidade nas dimensões “coleta automática de dados”, “identificação de novas tecnologias” e “clareza quanto aos objetivos e metas”.

A Figura 4 apresenta o critério “funções”, que é constituído por 7 dimensões, incluindo os 4 CPs, mais a “capacidade de checar saúde” e a utilização do SMD para “avaliar a estratégia” e “cumprir os padrões”. Observa-se que o SMD da IES (B), obteve maior pontuação em 5 dimensões. Além disso, verifica-se a proximidade das IES (A) e (B), em 6 das 7 dimensões inerentes ao critério. Destaca-se aqui, que ambas IES atuam na modalidade de ensino presencial.

**Figura 4:** Gráfico polar para o critério “Funções”



Fonte: Autores

O gráfico também mostra o desempenho das quatro IES quanto aos 4 CP's, que demonstram a maturidade quanto à utilização dos SMD. Percebe-se que o CP “capacidade de compelir progresso” é o mais atendido pelas IES, enquanto o CP “checar a posição” evidencia menor maturidade entre essas instituições. Novamente, observa-se a proximidade entre as IES (A) e (B), que apresentam maior maturidade nos critérios.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo apresentar um modelo de diagnóstico de maturidade dos SMD em IES. O referencial teórico utilizado na pesquisa possibilitou a construção de um instrumento de diagnóstico que foi extremamente útil para identificar os níveis de maturidade dos SMD nas quatro IES investigadas. Os dados foram levantados por meio de entrevistas semiestruturadas envolvendo profissionais que atuam em diferentes funções nas IES.

Pode-se considerar que as principais contribuições deste estudo se referem à construção de um instrumento para diagnosticar os níveis de maturidade em SMD, assim como a apresentação de alguns *insights* sobre a maturidade dos SMD nas IES. A análise dos quatro casos revelou que, das 18 dimensões associadas aos SMD, apenas duas apresentaram elevada maturidade nas quatro IES. São elas: “armazenamento de dados” e “capacidade de compeler progresso”. As dimensões que refletem menor maturidade são “identificação de novas tecnologias” e “utilização do SMD para cumprir padrões”, embora nesta última dimensão seja possível constatar um excelente nível de maturidade da IES (D).

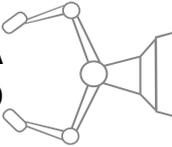
Conclui-se que as IES que atuam na modalidade presencial apresentaram maior maturidade, quando comparadas às IES que atuam na modalidade EAD. Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas dos SMD quanto à natureza das IES (pública ou privada). O acesso às informações estratégicas das IES representa uma importante limitação deste trabalho, visto que nas IES (C) e (D), os dados foram coletados em apenas um polo, o que pode significar perda de informação relevante quanto ao desempenho global das IES.

## Referências

- BITITCI, U.; GARENGO, P.; DÖRFLER, V.; NUDURUPATI, S. Performance measurement: challenges for tomorrow. **International journal of management reviews**, v. 14, n. 3, p. 305-327, 2012.
- EVANS, J. R. Impacts of information management on business performance. **Benchmarking: An International Journal**, v. 14, n. 4, p. 517-533, 2007.
- FNQ - FUNDAÇÃO NACIONAL DA QUALIDADE. **Crítérios de excelência**. São Paulo: FNQ, 2010.
- FRANCO-SANTOS, M.; KENNERLEY, M.; MICHELI, P.; MARTINEZ, V.; MASON, S.; MARR, B.; GRAY, D.; NEELY, A. Towards a definition of a business performance measurement system. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 27, n. 8, p. 784-801, 2007.
- GARENGO, P.; NUDURUPATI, S.; BITITCI, U. Understanding the relationship between PMS and MIS in SMEs: An organizational life cycle perspective. **Computers in Industry**, v. 58, p. 677-686, 2007.

- HRONEC, S.M. **Sinais vitais**. São Paulo: Makron Books, 1994.
- KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. Transforming the balanced scorecard from performance measurement to strategic management: part I. **Accounting Horizons**, v. 15, n. 1, p. 87-107, 2001.
- LOEBEL, E. Ensino superior brasileiro. **GV-executivo**, v. 8, n. 1, p. 62-65, 2009.
- MARTINS, C. B. O ensino superior brasileiro nos anos 90. **São Paulo em Perspectiva**, v. 14, n. 1, p. 41-60, 2000.
- MIGUEL, P. A. C.; SOUZA, R. Estudo de caso na engenharia de produção. In: CAUCHICK, P.M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.
- NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. Performance measurement system design: A literature review and research agenda. **International journal of operations & production management**, v. 15, n. 4, p. 80-116, 1995.
- NEELY, A. **Measuring Business Performance**. The Economist Books Ltd. 1998.
- NEELY, A.D.; ADAMS, C.; KENNERLEY, M. **The performance prism**: The scorecard for measuring and managing business success. London: Financial Times/Prentice Hall, 2002.
- RODRIGUES, C.M.C; RIBEIRO, J. L. D; MILAN, G.S. A condução da avaliação institucional em uma universidade comunitária. In: RIBEIRO, J. L. D; MILAN, G. S. **Entrevistas individuais**: teoria e aplicações. Porto Alegre: FEENG/UFGRS, 2004. cap. 5, p. 85-106.
- SECUNDO, G.; ELIA, G. A performance measurement system for academic entrepreneurship: a case study. **Measuring Business Excellence**, v. 18, n. 3, p. 23-37, 2014.
- SEBRAE - SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Definição e porte de estabelecimentos segundo o número de empregado**. Disponível em: [https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/SP/Pesquisas/MPE\\_conceito\\_empregados.pdf](https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/SP/Pesquisas/MPE_conceito_empregados.pdf). Acesso em: 10 jan. 2018.
- SMULOWITZ, S. Evidence for the performance prism in higher education. **Measuring Business Excellence**, v. 19, n. 1, p. 70-80, 2015.
- TASOPOULOU, K.; TSIOTRAS, G. Benchmarking towards excellence in higher education. **Benchmarking: An International Journal**, v. 24, n. 3, p. 617-634, 2017.
- VAN AKEN E. M.; LETENS, G.; COLEMAN, G. D.; FARRIS, J.; VAN GOUBERGEN, D. Assessing maturity and effectiveness of enterprise performance measurement systems. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 54, n. 5, p. 400-418, 2005.
- WETTSTEIN, T.; KUENG, P. A maturity model for performance measurement systems. **Management Information Systems**, p. 113-122, 2002.
- YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e método. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- YU, M. L.; HAMID, S.; IJAB, M. T.; SOO, H. P. The e-balanced scorecard (e-BSC) for measuring academic staff performance excellence. **Higher Education**, v. 57, n. 6, p. 813-828, 2009.

# ANÁLISE DO CONSUMO MENSAL DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO



**Cleber Bisognin**

cleber.bisognin@ufsm.br; Universidade Federal de Santa Maria

**Liane Werner**

werner.liane@gmail.br; Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Resumo:** A energia elétrica contribui com o desenvolvimento. A energia elétrica é uma necessidade básica da população, deixando a margem da inclusão social quem ainda não possui. Neste setor, a tomada de decisão e os desdobramentos para o desenvolvimento da infraestrutura de uma região dependem fundamentalmente de previsões acuradas da demanda. Para tanto, este trabalho visa para prever os futuros valores da série temporal do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo como base em modelos de séries temporais e combinações de previsões. No estudo foram utilizadas 183 observações mensais disponíveis, de janeiro de 2004 a março de 2019 visando obter as previsões para o período de janeiro a dezembro de 2019. Foram utilizados 4 modelos individuais: SARIMA, com tendência estocástica e determinística, Holt-Winters com efeitos sazonais aditivos e multiplicativos e após realizou-se todas as combinações de dois, três e os quatros modelos, para os métodos de combinação de previsões: média, mediana, regressão MQO, regressão robusta MM e variância mínima. As melhores medidas de acurácia foram encontradas para a combinação via regressão MQO com base nos quatro modelos, sendo esta então usada para obter as previsões do ano de 2019.

**Palavras-chave:** energia elétrica; previsão; combinação de previsões.

**Abstract:** *Electricity contributes to development. Electric energy is a basic need of the population, leaving the margin of social inclusion to those who do not have it. In this sector, decision-making and developments for a region's infrastructure development depend fundamentally on accurate demand forecasts. To this end, this work aims to predict the future values of the Monthly Electricity Consumption time series in the State of São Paulo based on time series models and forecast combinations. The study used 183 available monthly observations from January 2004 to March 2019 to obtain forecasts for the period January to December 2019. Four individual models were used: SARIMA, with stochastic and deterministic tendency, Holt-Winters with additive and multiplicative seasonal variables and then all two, three and four model combinations were performed for the forecast combination methods: mean, median, OLS regression, robust MM regression and minimum variance. The best accuracy measures were found for the combination via OLS regression based on the four models, which was then used to obtain 2019 forecasts.*

**Keywords:** *electric energy, forecasting, combining forecast.*

**Resumen:** *La energía eléctrica contribuye al desarrollo. La electricidad es una necesidad básica de la población, dejando el margen de inclusión social a quienes aún no la tienen. En este sector, la toma de decisiones y los desarrollos para el desarrollo de infraestructura en una región dependen fundamentalmente de pronósticos precisos de la demanda. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo predecir los valores futuros de las series de*

*tiempo de Consumo Mensual de Electricidad en el Estado de São Paulo como base para modelos de series de tiempo y combinaciones de pronósticos. En el estudio se utilizaron 183 observaciones mensuales disponibles, de enero de 2004 a marzo de 2019 para obtener los pronósticos para el período de enero a diciembre de 2019. Se utilizaron cuatro modelos individuales: SARIMA, con tendencia estocástica y determinista, Holt-Winters con efectos aditivos estacionales y multiplicativos y después de que se realizaron todas las combinaciones de dos, tres y cuatro modelos, para los métodos de combinación de pronóstico: media, mediana, regresión OLS, regresión MM robusta y varianza mínima. Las mejores medidas de precisión se encontraron para la combinación a través de la regresión OLS basada en los cuatro modelos, que luego se utilizó para obtener pronósticos para el año 2019.*

**Palabras clave:** *energía eléctrica; pronóstico; combinación de pronósticos.*

## 1. INTRODUÇÃO

Para Tidre *et al.* (2013) a energia elétrica visa contribuir com o desenvolvimento da população humana, bem como proporcionar uma comodidade nas várias atividades. Na realidade a energia elétrica é uma necessidade básica, deixando a margem da inclusão social quem ainda não a possui. Conforme Reis; Cunha (2014) ainda em pleno século XXI cerca de dois bilhões de pessoas não tem acesso a ela. Já no Brasil de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), serão beneficiados pelo programa Luz para todos, em 2019, 380 mil moradores que vivem sem acesso à rede elétrica no meio rural (NASCIMENTO, 2018). Contudo pelo fato de haver uma perda na capacidade de financiamento para investimentos estatais, e pelo fraco desempenho econômico do País, no período de 1980 a 2000, o setor foi afetado por uma crise que abalou sua expansão (IRFFI *et al.*, 2009).

Com a privatização da infraestrutura iniciada na década de 90, o setor de energia elétrica, que apresenta características de monopólio natural em alguns dos seus segmentos (transmissão e distribuição), a preocupação em expandir e modernizar todos os segmentos contribuiu para estimular os investimentos no setor e possibilitar as projeções de crescimento do país (SCHMIDT; LIMA 2004; SIQUEIRA *et al.*, 2006).

A partir deste novo marco institucional, o planejamento da expansão do sistema, realizado pelo MME, deixou de ser indicativo para determinativo. Visto que a energia elétrica é um bem não-estocável, esse planejamento deve ser feito com antecedência. Sendo assim, previsões da demanda serão subsídio ao planejamento estratégico necessário para captar o comportamento do sistema e avaliar a sistemática de contratação de energia elétrica junto às transmissoras, imposta às distribuidoras (SIQUEIRA *et al.*, 2006; FOGLIATTO *et al.*, 2005).

No setor de energia, incluindo o de energia elétrica, a tomada de decisão e os desdobramentos para o desenvolvimento da infraestrutura do País dependem fundamentalmente de previsões acuradas da demanda. Uma previsão de qualidade para a demanda futura de energia elétrica, além de ser um insumo indispensável ao desenvolvimento

econômico das sociedades atuais, é também fundamental para aprimorar a gestão do sistema energético e seus processos operacionais. (CASTRO; MONTINI, 2010; MOREIRA *et al.*, 2011)

Para Moreira *et al.* (2011) realizar a previsão da curva de demanda de carga de um determinado dia, o processo baseia-se nas curvas de consumo de dias já conhecidos. Os autores usaram um modelo que demonstrou uma boa capacidade de extração de características das componentes envolvidas na combinação, verificando que os resultados obtidos na maior parte das vezes, superava numericamente ou muito se aproximava do resultado da melhor componente individual.

Para tanto, este trabalho visa prever os futuros valores da série temporal do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo como base em modelos de séries temporais e combinações de previsões.

## 2. TÉCNICAS DE PREVISÃO

Nesta seção são apresentados os modelos utilizados para atingir o objetivo deste estudo, a saber, os modelos SARIMA( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$  e Suavização Exponencial, além dos métodos para realizar combinações de previsões: média, mediana, regressão via mínimos quadrados ordinários, regressão via MM e variância mínima. A seguir são definidos os processos SARIMA( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$  proposto por Box; Jenkins (1976).

**Definição 1:** Seja  $\{X_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$  um processo estocástico satisfazendo a equação (1)

$$\Phi(B^s)\phi(B)(1-B^s)^D(1-B)^d(X_t - \mu) = \theta(B)\Theta(B^s)\varepsilon_t, \quad (1)$$

onde:  $\mu$  é a média do processo,  $\{\varepsilon_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$  é o processo ruído branco,  $s \in N$  é a sazonalidade,  $B$  é o operador defasagem ou de retardo, isto é,  $B^j(X_t) = X_{t-j}$  e  $B^{sj}(X_t) = X_{t-sj}$ , para  $j \in N$ ,  $\phi(\cdot)$ ,  $\theta(\cdot)$ ,  $\Phi(\cdot)$  e  $\Theta(\cdot)$  são os polinômios de ordem  $p$ ,  $q$ ,  $P$  e  $Q$ , respectivamente, definidos pelas equações (2) e (3).

$$\phi(z) = \sum_{l=1}^p (-\phi_l)z^l, \quad \theta(z) = \sum_{m=1}^q (-\theta_m)z^m, \quad (2)$$

$$\Phi(z) = \sum_{r=1}^P (-\Phi_r)z^r, \quad \Theta(z) = \sum_{l=1}^Q (-\Theta_l)z^l, \quad (3)$$

com  $\phi_l$ ,  $1 \leq l \leq p$ ,  $\theta_m$ ,  $1 \leq m \leq q$ ,  $\Phi_r$ ,  $1 \leq r \leq P$  e  $\Theta_l$ ,  $1 \leq l \leq Q$ , constantes reais e  $\phi_0 = \Phi_0 = -1 = \Theta_0 = \theta_0$ . Então  $\{X_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$  é um processo sazonal autorregressivo integrado de média móvel de ordem ( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$  com sazonalidade  $s$ , denotado por SARIMA( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$ , onde  $e$  e  $s$  são, respectivamente, o grau de diferenciação e o grau de diferenciação sazonal.

Também serão utilizados os modelos de suavização exponencial devido a sua simplicidade e facilidade de ajustes além da boa acurácia (PELEGRINI; FOGLIATTO, 2000). A seguir são definidos os modelos de Holt-Winters para efeitos sazonais aditivos e multiplicativos. Maiores detalhes podem ser encontrados em Morettin; Tolo (2006).

Considere uma série temporal  $\{X_t\}_{t=1}^n$  com período  $s$ .

**Definição 2:** Os Modelos de Holt-Winters para efeitos sazonais aditivos, consideram que tal série é formada pela soma do nível, tendência e um fator sazonal, como apresentado pela equação (4).

$$X_t = L_t + T_t + S_t + \varepsilon_t, \text{ para } t = s + 1, \dots, n. \quad (4)$$

As estimativas do nível da série no tempo  $t$ , denotado por  $L_t$ , da tendência, denotada por  $T_t$  e do fator sazonal, denotado por  $S_t$ , cada um destes componentes é dado por uma equação que tem, respectivamente, como parâmetro  $\alpha$  é o coeficiente de ponderação exponencial do nível ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $\beta$  é o coeficiente de ponderação exponencial da tendência ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) e  $\gamma$  é o coeficiente de ponderação exponencial do fator sazonal ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ).

**Definição 3:** Os Modelos de Holt-Winters para efeitos sazonais multiplicativos, considera-se que tal série é formada por uma tendência aditiva, por um fator sazonal multiplicativo, como apresentado pela equação (5).

$$X_t = L_t \times T_t + S_t + \varepsilon_t, \text{ para } t = s + 1, \dots, n. \quad (5)$$

As estimativas do nível da série no tempo  $t$ , denotado por  $L_t$ , da tendência, denotada por  $T_t$  e do fator sazonal, denotado por  $S_t$ , cada um destes componentes é dado por uma equação que tem, respectivamente, como parâmetro  $\alpha$  é o coeficiente de ponderação exponencial do nível ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $\beta$  é o coeficiente de ponderação exponencial da tendência ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) e  $\gamma$  é o coeficiente de ponderação exponencial do fator sazonal ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ).

Existem métodos utilizados para melhorar a acurácia das previsões, tais métodos são chamados de combinação de previsões. Estes métodos consistem em utilizar mecanismo para captar os diversos fatores que afetam cada técnica de previsão individual usada como base de obtenção da previsão combinada. Os precursores dos métodos de combinação de previsões foram Bates; Granger (1969), combinando duas previsões. Newbold; Granger (1974) estenderam os métodos dos precursores para  $k$  previsões.

Neste trabalho, além das combinações de previsão por média aritmética e mediana, também será utilizada a combinação por variância mínima, conforme estabelecido por Newbold; Granger (1974), a qual satisfaz a equação (6), sujeita a condição  $\sum_{j=1}^k w_j = 1$ , onde  $w_j \geq 0$  é o peso da previsão  $F_j$ , para  $j = 1, \dots, k$ .

$$F_{ct} = w_1 F_{1t} + \dots + w_k F_{kt}, \text{ para } k \geq 2 \text{ e } t = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Segundo Granger; Ramanathan (1984), alguns métodos de combinação de previsões podem também ser interpretados como um modelo de regressão linear, onde a previsão combinada é a variável resposta e as previsões dos modelos como variáveis explicativas. Tal modelo satisfaz a equação (7), sujeita as condições onde  $\beta_0 \neq 0$  e  $\beta_j \geq 0$  é o peso da previsão  $F_j$ , para  $j=1, \dots, k$ .

$$F_{ct} = \beta_0 + \beta_1 F_{1t} + \dots + \beta_k F_{kt} + \varepsilon_t, \text{ } k \geq 2 \text{ e } t = 1, \dots, n. \quad (7)$$

As estimativas dos pesos  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ , para  $k \geq 2$ , podem ser encontradas pelo método dos mínimos quadrados ordinários, além de inúmeros métodos de regressão robusta, tal como o método MM, proposto por Yohai (1987). Os estimadores baseados neste último método são altamente eficientes quando os erros possuem distribuição normal e são qualitativamente robustos.

Porém para encontrarmos qual técnica de previsão - individual ou combinação - é a melhor, faz-se necessário obter medidas de acurácia. Dentre as existentes, as mais utilizadas são: o RMSE (a raiz quadrada do erro quadrático médio) e a MAPE (erro percentual absoluto médio) (MAKRIDAKIS *et al.*, 1998). Também será utilizado, para análise o coeficiente U de Theil que analisa a qualidade das previsões. Segundo Blemiel (1973), quanto mais próximo for esta medida de zero, significa que o erro de previsão gerado por determinado modelo ou combinação é menor que da previsão ingênua.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A etapa da obtenção de dados consistiu em resgatar dados históricos do site da EPE - Empresa de Pesquisa Energética (<http://www.epe.gov.br>). Serão utilizadas as 183 observações mensais disponíveis, de janeiro de 2004 a março de 2019, ou seja,  $n=183$ . O uso deste período deve-se ao fato de ser o período mais completo disponíveis na internet e encontrado pelos autores. Inicialmente utilizaremos o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2018 para ajuste dos modelos e obteremos as predições (dentro da amostra) a um passo. Após serão calculadas as previsões para o período de janeiro a dezembro de 2019 (previsão fora da amostra com base em dezembro de 2018) e as medidas de acurácia para o período de janeiro a março de 2019.

A análise da série temporal foi realizada usando as rotinas dos pacotes *forecast*, *lmtest*, *randtests*, *tseries*, *fpp*, *ggplot2*, *ForecastCombinations*, *GeomComb* e *stat* do software R Core Team (2018), para ajustar os seguintes modelos: SARIMA( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$  consideran-

do tendência estocástica; SARIMA( $p,d,q$ ) $\times$ ( $P,D,Q$ ) $_s$  considerando tendência determinística; Holt-Winters para efeitos sazonais aditivos e Holt-Winters para efeitos sazonais multiplicativos.

Definidos os modelos, estimados os seus parâmetros e feita a análise de resíduos, serão aplicadas as técnicas de combinação de previsão: média, mediana, regressão via mínimos quadrados ordinários, regressão via MM e variância mínima. A verificação da acurácia da técnica ou modelo a ser escolhido para realizar as previsões para o período de janeiro a dezembro de 2019, se dará por meio das medidas RMSE, MAPE e U de Theil. Tais medidas foram calculadas utilizando-se a rotina *accuracy* do pacote *forecast* do R Core Team (2018).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

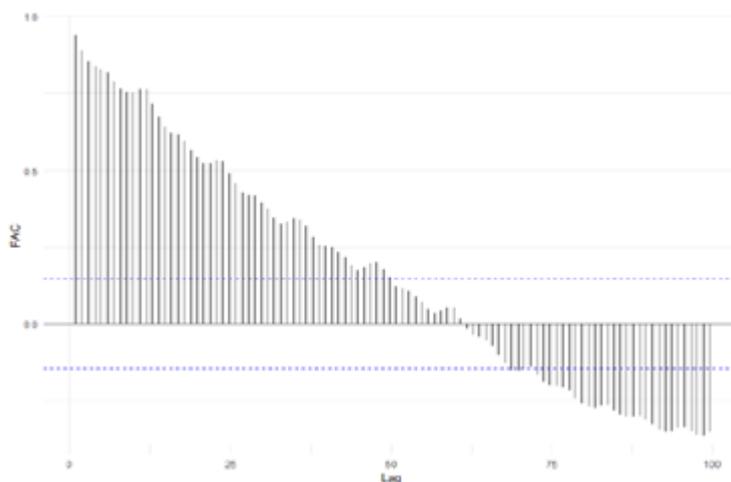
Estamos interessados em encontrar um modelo ou uma técnica adequada para a série temporal Consumo Mensal de Energia Elétrica do Estado de São Paulo, de janeiro de 2004 a março de 2019, visando prever tal consumo para os meses de abril a dezembro de 2019. As Figura 1a e 1b apresenta o gráfico e a função de autocorrelação amostral da série temporal que será alvo de estudo neste trabalho.

**Figura 1a:** Gráfico da Série Temporal - Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de SP, no período de janeiro de 2004 a março de 2019



Fonte: Autores

**Figura 1b:** Função de Autocorrelação Amostral - Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de SP, no período de janeiro de 2004 a março de 2019



Fonte: Autores.

Uma vez que utilizaremos o período de janeiro de 2004 a dezembro de 2018 para ajuste dos modelos e calcular as combinações e obter as medidas de acurácia. Podemos perceber, pelo gráfico da série temporal (Figura 1(a)) que se trata de uma série não estacionária. Foram aplicados os testes de raiz unitária de Dickey-Fuller [p-valor=0,6409] e de Phillips-Perron [p-valor=0,0971]. Os testes foram realizados utilizando, respectivamente, as rotinas *adf.test* e *pp.test*, do pacote *tseries* do software R Core Team (2018). Os resultados dos testes de raiz unitária comprovam a não estacionariedade da série temporal. Em ambos os testes a hipótese nula ( $H_0$ ) significa que a série temporal apresenta raiz unitária. Analisando a função de autocorrelação amostral (ver Figura 1(b)) também nos leva a concluir que a série temporal é não estacionária. Analisando a Função de Autocorrelação da série temporal (Figura 1(b)) podemos perceber que a mesma apresenta sazonalidade.

Por tratar-se de uma série temporal não estacionária e com sazonalidade e, como o objetivo deste trabalho é prever, iremos tratar a tendência desta série temporal como estocástica, utilizando os modelos  $SARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ , e como determinística, ou seja, a tendência é tratada através de um modelo linear e após é ajustado um modelo  $SARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ , com  $d=0=D$ .

Serão ajustados ainda os modelos Holt-Winters onde a componente sazonal será tratada com aditiva e multiplicativa. Ambas as sazonalidades foram calculadas utilizando a rotina *decompose*, do R Core Team (2018). Analisando os resíduos de ambas as decomposições, obtemos que a soma dos quadrados das autocorrelações amostrais, para 100 lags, é

3,0989, para efeitos sazonais aditivos, e 3,0174, para efeitos sazonais multiplicativos. Desta forma percebemos uma pequena vantagem em usarmos o modelo multiplicativo. Mesmo assim, neste trabalho, optamos em analisar a predição utilizando os dois modelos de Holt-Winters. A seguir são apresentados os quatro modelos que foram ajustadas à Série Temporal do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo.

**Modelo 1** - Modelo SARIMA  $(p,d,q)(P,D,Q)_s$ . Considerando tendência estocástica, foi ajustado o modelo SARIMA  $(2,1,2) \times (1,0,1)_{12}$ . Sendo que as estimativas dos 6 parâmetros, foram todas significativas [p-valor<0,0001]. Para este modelo, obtivemos a log-verossimilhança: -2490,63 e Critério de Informação de Akaike (AIC) igual a 4995,26. Para a análise de resíduos utilizamos o teste de Box-Pierce com  $df = 15$ , cujo p-valor encontrado foi de 0,2626. Assim, ambos indicam que os resíduos do modelo são não correlacionados.

**Modelo 2** - Considerando tendência determinística, foi ajustado o modelo linear  $X_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5 + Y_t$ , onde  $t=1, \dots, n$ , que obteve um  $R^2 = 0,9091$ .

As Figuras 2a e 2b apresentam a série temporal sem tendência e sua respectiva função de autocorrelação amostral. Foram aplicados os testes de raiz unitária de Dickey-Fuller [p-valor<0,01] e de Phillips-Perron [p-valor<0,01], indicando que a série temporal ficou estacionária, após retirada a tendência determinística.

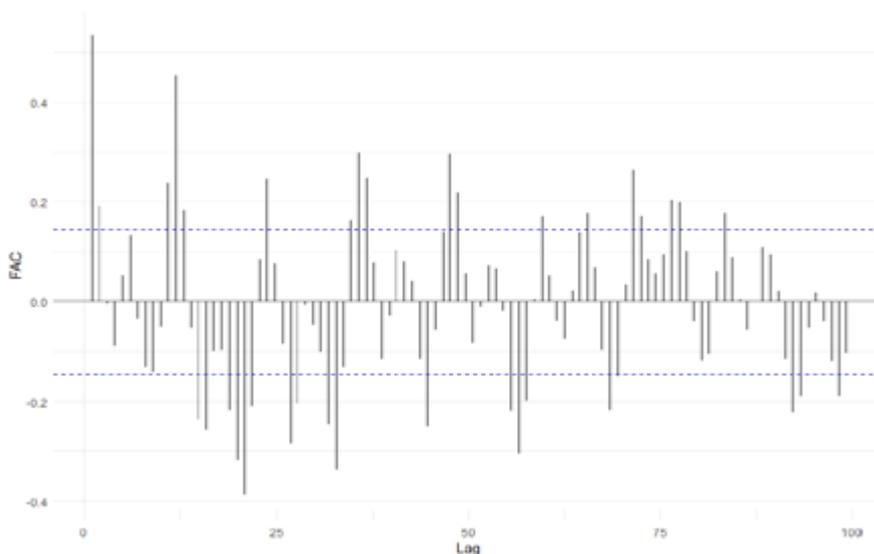
A seguir, foi ajustado um modelo SARIMA  $(3,0,2) \times (1,0,1)_{12}$ . As estimativas dos coeficientes foram todas significativas [p-valor<0,001] e pelo Teste de Ljung-Box [p-valor=0,7272], os resíduos do modelo são não correlacionados, indicando que o modelo é adequado aos dados.

**Figura 2a:** Gráfico da Série Temporal sem Tendência - Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo entre de jan/2004 e dez/2018, depois de retirada da tendência determinística.



Fonte: Autores.

**Figura 2b:** Função de Autocorrelação Amostral sem Tendência - Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo entre de jan/2004 e dez/2018, depois de retirada da tendência determinística.



Fonte: Autores.

**Modelo 3** - Modelo de Suavização Exponencial Holt-Winters (Aditivo): as estimativas para os parâmetros do modelo foram: do coeficiente de ponderação exponencial do nível  $\alpha$  igual a 0,5027; do coeficiente de ponderação exponencial da tendência  $\beta$  igual a 0,0051 e do coeficiente de ponderação exponencial do fator sazonal  $\gamma$  é igual a 0,5476.

**Modelo 4** - Modelo de Suavização Exponencial Holt-Winters (Multiplicativo): as estimativas para os parâmetros do modelo foram: do coeficiente de ponderação exponencial do nível  $\alpha$  igual a 0,4667; do coeficiente de ponderação exponencial da tendência  $\beta$  igual a 0,0069 e do coeficiente de ponderação exponencial do fator sazonal  $\gamma$  é igual a 0,5753.

Estabelecidos os modelos, estimado os seus parâmetros, foram calculadas as previsões - estimativa da série temporal um passo à frente, para o período observado - e previsões necessárias. Feito este passo, passamos ao cálculo dos métodos de combinações de previsão. No caso do método da variância mínima foram obtidas as estimativas dos pesos  $w_1, \dots, w_k$ , para  $k = 2, 3$  e 4 obtendo todas as combinações possíveis com os modelos estimados e pelos métodos de regressão (MQO e MM) as estimativas dos coeficientes  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$  para  $k = 2, 3$  e 4 obtendo todas as combinações possíveis com os modelos estimados. Da mesma forma, obtivemos as respectivas previsões das combinações média e mediana.

Por fim, foram calculadas as médias de acurácia RMSE, MAPE e U de Theil. Na tabela 1 são apresentadas estas medidas para os modelos individuais. Na Tabela 2 são apresentadas estas medidas para as combinações com as melhores medidas, porém cabe destacar que apresentamos as duas melhores combinações: de dois modelos, de 3 modelos e para a combinação dos 4 modelos, para cada método de combinação do estudo.

**Tabela 1:** Medidas de acurácia dos Modelos 1 a 4.

Modelo	RMSE	MAPE	U de Theil
1	202789.7640	1.5224	0.00971
2	<b>190035.3295</b>	<b>1.4004</b>	<b>0.00910</b>
3	231917.8800	1.7766	0.01110
4	231956.9162	1.7816	0.01110

Fonte: Autores

Legenda: RMSE e U de Theil são medidas adimensionais e MAPE, em kWh.

Na Tabela 2 estão realçadas as melhores medidas de acurácia para cada método de combinação. Percebemos analisando tal tabela que o menor RMSE e menor U de Theil foram obtidos ao combinar todos os quatro modelos usando o método de Regressão via MQO, já o menor MAPE foi obtido usando os quatro modelos utilizando o método de Regressão Robusta MM. Estes resultados corroboram os achados de Makridakis & Winkler (1983), em seu estudo os autores verificaram que a acurácia aumenta de acordo com o número de técnicas combinadas, embora o grau de saturação tenha sido com o emprego de quatro ou cinco. Desta forma é esperado que combinar todos os modelos fornecesse melhores medidas.

Ainda com base na Tabela 2, podemos observar que os métodos de combinação pela média e mediana, técnicas mais simples e que levam em conta apenas os modelos 1 e 2, apresentam um desempenho inferior de 2,03%, 3,42% e 2,07%, respectivamente sobre as melhores medidas de acurácia das combinações consideradas mais acuradas (que combinam os quatro modelos). Tal fato, pode levar o previsor a escolher técnicas mais simples, assumindo um erro maior.

**Tabela 2:** Medidas de acurácia para as Combinações de Previsão.

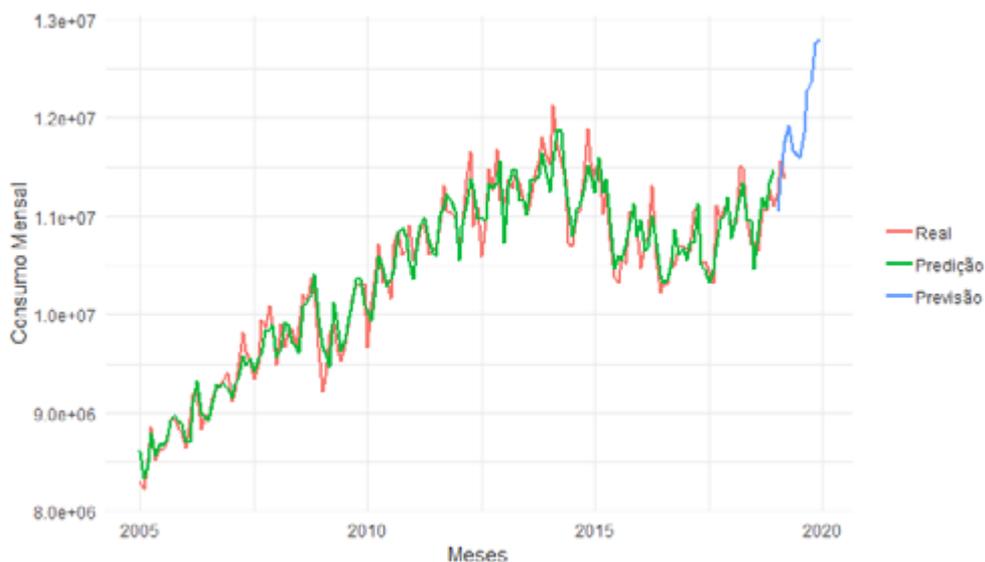
Combinação	Modelos	RMSE	MAPE	U de Theil
Média Aritmética	<b>1 e 2</b>	<b>191642,64</b>	<b>1,4269</b>	<b>0,00918</b>
	2 e 3	201339,87	1,5074	0,00964
	1, 2 e 4	196684,82	1,4770	0,00941
	2, 3 e 4	209252,31	1,5862	0,01001
	Todos	202966,60	1,5330	0,00971
Mediana	<b>1 e 2</b>	<b>191642,64</b>	<b>1,4269</b>	<b>0,00918</b>
	1, 2 e 4	196660,54	1,4569	0,00942
	1, 2 e 3	197606,16	1,4708	0,00946
	2 e 3	201339,87	1,5074	0,00964
	Todos	207110,59	1,5632	0,00991
Regressão - MQO	<b>Todos</b>	<b>187752,10</b>	<b>1,3802</b>	<b>0,00899</b>
	2, 3 e 4	188726,30	1,3827	0,00904
	2 e 4	189832,80	1,3939	0,00909
	1 e 2	189377,00	1,3955	0,00907
	1, 3 e 4	197755,90	1,5018	0,00947
Regressão Robusta - MM	<b>Todos</b>	<b>188072,91</b>	<b>1,3781</b>	<b>0,00901</b>
	2, 3 e 4	189029,23	1,3830	0,00905
	2 e 3	190046,33	1,3910	0,00910
	1 e 2	189451,26	1,3941	0,00907
	1, 3 e 4	197827,68	1,4998	0,00948
Variância Mínima	<b>1 e 2</b>	<b>191239,01</b>	<b>1,4222</b>	<b>0,00916</b>
	1, 2 e 4	194544,63	1,4558	0,00931
	Todos	199511,60	1,4995	0,00955
	1, 3 e 4	210883,43	1,6041	0,01009
	3 e 4	231587,78	1,7767	0,01108

Legenda: RMSE e U de Theil são medidas adimensionais e MAPE, medido em kWh.

Fonte: Autores.

Contudo como o previsor sempre busca o menor erro possível, realizamos as previsões utilizando o método de Regressão via MQO dos quatro modelos, visto que apresentou duas das melhores medidas de acurácia e o segundo melhor MAPE (Tabela 2). Na Figura 3 são apresentadas a série do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo e as previsões para o período de janeiro a dezembro de 2019, com base em dezembro de 2018.

**Figura 3:** Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo, no período de janeiro de 2004 a março de 2019 e as previsões para ano 2019.



Fonte: Autores.

**Tabela 3:** Previsões para o período de janeiro a dezembro de 2019.

Período	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Previsão	11045192	11388709	11768740	11913750	11666150	11642684
Período	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Previsão	11595579	11849601	12281587	12358904	12751567	12800499

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo usar técnicas de previsões para averiguar qual a mais adequada para prever do Consumo Mensal de Energia Elétrica no Estado de São Paulo. Para isto, foi utilizado a série temporal de janeiro de 2004 a março de 2019.

Inicialmente foi realizada uma análise preliminar da série temporal visando avaliar a estacionariedade da série. Após, foram ajustados quatro modelos aos dados do consumo de energia. O primeiro que foi ajustado, considerando tendência estocástica, foi o SARIMA  $(2,1,2) \times (1,0,1)_{12}$ . O segundo modelo ajustado foi SARIMA  $(3,0,2) \times (1,0,1)_{12}$ , com tendência determinística. Os outros dois modelos ajustados foram Holt-Winters com sazonalidade aditiva e multiplicativa. De posse dos quatro modelos individuais foram obtidas as previsões que deram suporte ao cálculo, dos coeficientes e pesos das com-

combinações por regressão (MQO e robusta MM) e variância mínima, e após foram obtidas todas as combinações de previsões para estes métodos, além dos métodos de combinação da média e da mediana. Realizaram-se as combinações levantando em conta todos os resultados possíveis de combinação de dois modelos, de três modelos e para os quatro modelos, para todas as cinco técnicas de combinação de previsões.

Para avaliar qual a técnica mais acurada entre as combinações e os modelos individuais foram obtidas três medidas de acurácia, a saber: RMSE; MAPE e U de Theil. Dentre as medidas de acurácia dos modelos ajustados e todas as combinações, o menor RMSE e menor U de Theil foram obtidos ao combinar todos os quatro modelos usando Regressão via MQO, já o menor MAPE foi obtido usando os quatro modelos utilizando Regressão Robusta MM. Diante disto e, lembrando que o previsor sempre deseja sempre o menor erro possível, as previsões foram realizadas com o método de Regressão via MQO dos quatro modelos.

## Referências

BATES, J. M.; GRANGER, C. W. J. The Combining of Forecasts. **Operational Research Quarterly**, v. 20, n. 4, p. 451-468, 1969.

CASTRO, J. B.; MONTINI, A. A. Previsão do consumo residencial de energia elétrica no Brasil: aplicação do modelo ARX. **Future Studies Research Journal**, v.2, n.2, p. 3-16, 2010.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.; WERNER, L.; LEMOS, F. O.; BRUM, M. P. Previsão de demanda de energia elétrica – método e aplicação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre, 2005. p. 3100-3107.

IRFFI, G.; CASTELAR, I.; SIQUEIRA, M. L.; LINHARES, F. C. Previsão de demanda por energia elétrica para classes de consumo na região nordeste, usando OLS dinâmico e mudança de regime. **Economia Aplicada**, v. 13, n.1 p. 69-98, jan/mar 2009.

GRANGER, C. W. J.; RAMANATHAN, R. Improved Methods of Forecasting. **Journal of Forecasting**, v. 3, n. 2, p.197-204, 1984.

MAKRIDAKIS, S.; WINKLER, R. L. Averages of Forecasts: Some Empirical Results. **Management Science**, v. 29, n. 9, p. 987-996, 1983.

MOREIRA, M. O.; SALGADO, R. M.; OHISHI, T.; FERREIRA, E. B. Modelo baseado em combinação de previsores para previsão de séries temporais de carga elétrica. **Revista GEINTEC**, v. 1, n. 2, p. 20-31, 2011.

MORRETIN, P. A.; TOLOI, C. M. de C. **Previsão de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006.

NASCIMENTO, L. **Orçamento do Luz para Todos em 2019 será de R\$ 1,07 bilhão**. Agência Brasil de Brasília. Publicado em 14 set. 2018. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-09/orcamento-do-luz-para-todos-em-2019-sera-de-r-107-bilhao> Acesso em: 12 ago. 2019.

NEWBOLD, P.; GRANGER, C. W. J. Experience with Forecasting Univariate Time Series and Combination of Forecasts. **Journal Royal Statistical Society**, series A, v. 137, n. 2, p. 131-165, 1974.

PELLEGRINI, F.; FOGLIATTO, F. Estudo Comparativo entre os Modelos de Winters e de Box-Jenkins para Previsão de Demanda Sazonal. **Produto & Produção**. v. 4, n. especial, p. 72-85, abril 2000.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2018. Disponível em: <https://www.R-project.org>

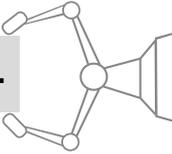
REIS, L. B. ; CUNHA, E.C.N. **Energia elétrica e sustentabilidade**: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. 2. ed. Ed. Manole, 2014.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. A demanda por energia elétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 58, n. 1, p. 67-98, jan/mar 2004.

SIQUEIRA, M. L.; CORDEIRO Jr., H. H.; CASTELAR, I. A demanda por energia elétrica no nordeste brasileiro após o racionamento de 2001-2002: previsões de longo prazo. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 36, n. 1, p. 137-178, abril 2006.

TIDRE, P. V.; BIASE, N. G.; SILVA, M. I. S. Utilização dos modelos de séries temporais na previsão do consumo mensal de energia elétrica da região norte do Brasil. **Revista Eletrônica de Matemáticas e Estatística em Foco**, v. 1, n. 1, p. 57 - 66, jun. 2013.

YOHAI, V. J. High breakdown point and high efficiency robust estimates for regression. **Annals of Statistics**, v. 15, p. 642-656, 1987.



### FOCO E ESCOPO

A Revista de Engenharia de Produção (REP) se propõe a divulgar trabalhos acadêmicos empíricos ou teóricos que contribuam para ampliação do conhecimento nas 11 grandes áreas e subáreas da Engenharia de Produção segundo classificação da ABEPRO (Associação Brasileira de Engenharia de Produção):

1. **GESTÃO DA PRODUÇÃO**; 1.1. Gestão de Sistemas de Produção; 1.2. Planejamento e Controle da Produção; 1.3. Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos e Distribuição; 1.4. Projeto de Fábrica e de Instalações Industriais; 1.5. Gestão da Manutenção; 1.6. Simulação da Produção; 1.7. Gestão de Processos Produtivos; 1.8. Gestão de Operações e Serviços; 2. **GESTÃO DA QUALIDADE**; 2.1. Controle Estatístico da Qualidade; 2.2. Normalização e Certificação para a Qualidade; 2.3. Organização Metrológica da Qualidade; 2.4. Confiabilidade de Processos e Produtos; 2.5. Qualidade em Serviços; 3. **GESTÃO ECONÔMICA**; 3.1. Engenharia Econômica; 3.2. Gestão de Custos; 3.3. Gestão Financeira de Projetos; 3.4. Gestão de Investimentos; 3.5. Gestão de Desempenho de Sistemas de Produção e Operações; 4. **ERGONOMIA E SEGURANÇA DO TRABALHO**; 4.1. Projeto e Organização do Trabalho; 4.2. Psicologia do Trabalho; 4.3. Biomecânica Ocupacional; 4.4. Projeto e Gestão da Segurança do Trabalho; 4.5. Análise e Prevenção de Riscos de Acidentes; 4.6. Ergonomia do Produto; 4.7. Ergonomia dos Processos de Produção; 5. **GESTÃO DO PRODUTO**; 5.1. Pesquisa de Mercado; 5.2. Planejamento do Produto; 5.3. Metodologia de Projeto do Produto; 5.4. Engenharia de Produto; 5.5. Marketing do Produto; 6. **PESQUISA OPERACIONAL**; 6.1. Programação Matemática; 6.2. Decisão Multicriterial; 6.3. Processos Estocásticos; 6.4. Modelagem, Análise e Simulação; 6.5. Teoria da Decisão e Teoria dos Jogos; 6.6. Análise de Demandas por Produtos; 7.

**GESTÃO ESTRATÉGICA E ORGANIZACIONAL**; 7.1. Planejamento Estratégico e Operacional da Estrutura Organizacional; 7.2. Estratégias de Produção; 7.3. Organização Industrial; 7.4. Gestão e Estratégia de Mercados e Produtos; 7.5. Redes de Empresas e Gestão da Cadeia Produtiva; 8. **GESTÃO DO CONHECIMENTO ORGANIZACIONAL**; 8.1. Gestão da Inovação; 8.2. Gestão da Tecnologia; 8.3. Gestão da Informação de Produção e Operações; 8.4. Gestão de Projetos; 8.5. Gestão do Conhecimento em Sistemas Produtivos; 9. **GESTÃO AMBIENTAL DOS PROCESSOS PRODUTIVOS**; 9.1. Gestão de Recursos Naturais; 9.2. Gestão Energética; 9.3. Produção mais Limpa e Ecoeficiência; 9.3. Gestão de Resíduos Industriais e Prevenção de Poluição; 10. **EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**; 10.1. Estudo do Ensino de Engenharia de Produção; 10.2. Estudo do Desenvolvimento e Aplicação da Pesquisa em Engenharia de Produção; 10.3. Estudo da Prática Profissional em Engenharia de Produção; 11. **ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, SUSTENTABILIDADE E RESPONSABILIDADE SOCIAL**; 11.1. Ética e Transparência nas Decisões Organizacionais; 11.2. Governança Organizacional; 11.3. Responsabilidade Social Organizacional; 11.4. Sustentabilidade e Sistemas de Indicadores; 11.3. Desenvolvimento Sustentável em Engenharia de Produção.

### SUBMISSÃO

Os trabalhos são recebidos em fluxo contínuo e devem ser encaminhados pelo endereço eletrônico <https://periodicos.ufms.br/index.php/REP>.

### DIRETRIZES PARA AUTORES

Idioma: Serão aceitos artigos escritos em português, espanhol ou inglês americano.

Formato do arquivo: O artigo deve ser enviado no formato de arquivo do programa Microsoft Office Word.

## FORMATAÇÃO

O artigo deve conter a seguinte formatação:

- Deve ser elaborado em folha tamanho A4 (210mm x 297mm), com margens superior e esquerda de 3cm e inferior e direita de 2cm.
- A fonte deve ser Arial tamanho 12 e espaço entre linhas de 1,5 cm em todo o trabalho, exceto:
  - resumo, que deve aparecer com fonte tamanho 11 e espaço entre linhas simples. O resumo deverá ter de 100 a 250 palavras. É um elemento obrigatório.
  - abstract é a tradução do resumo para o inglês e na mesma formatação. É um elemento obrigatório.
  - resumen é a tradução do resumo para o espanhol e na mesma formatação. É um elemento obrigatório.
  - palavras-chave devem ser em número máximo de cinco e na mesma formatação do resumo. É um elemento obrigatório.
  - keywords são a tradução das palavras-chave para o inglês e na mesma formatação. É um elemento obrigatório.
  - palabras clave são a tradução das palavras-chave para o espanhol e na mesma formatação. É um elemento obrigatório.
  - legendas, que devem ser inseridas com fonte tamanho 10 e espaço entre linhas simples.
- A numeração das páginas deve figurar no canto superior direito, iniciando pela página de título.
- O trabalho deve conter entre 4000 e 8000 palavras, incluindo as referências.
- O título e o resumo não devem conter abreviações. No texto as abreviações devem ser utilizadas apenas após terem sido citadas por extenso.
- Todas as referências devem estar citadas no texto.
- Não são permitidas notas de rodapé.
- Será permitida a submissão de trabalhos com até no máximo 5 (cinco) autores.
- O arquivo eletrônico do trabalho não deve conter informações sobre os autores.
- Um modelo eletrônico do artigo final será enviado ao autor principal após aprovação do artigo.

## AVALIAÇÃO

A revista conta com um corpo editorial permanente e avaliadores *ad hoc*. Procura-se evitar concentração institucional, geográfica e temática de seus membros. Os artigos submetidos são enviados para dois avaliadores por meio do sistema *double-blind review process* (sem identificação dos autores). Havendo discordância entre os pareceristas, o trabalho é encaminhado a um terceiro avaliador.

## CONDIÇÕES PARA SUBMISSÃO

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir: - As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores. - A contribuição é original e inédita, e não está sendo avaliada para publicação por outra revista. - O arquivo da submissão está em formato Microsoft Word e contém no máximo 5 autores. - URLs para as referências foram informadas quando possível. - O texto segue os padrões de estilo e requisitos bibliográficos descritos em Diretrizes para Autores. - Em caso de submissão a uma seção com avaliação pelos pares (ex.: artigos), as instruções disponíveis em Assegurando a avaliação pelos pares cega foram seguidas.

## PERIODICIDADE

A Revista de Engenharia de Produção (REP) é uma publicação trimestral, da área de Engenharia de Produção, que visa publicar artigos de alcance regional, nacional e internacional, em português, espanhol ou inglês. A revista tem como prioridade a indexação, objetivando garantir a perpetuação das publicações em versão online. Publica artigos originais com contribuições relevantes e inéditas de pesquisadores nacionais e internacionais. A revista tem acesso livre e não há cobrança de taxas para submissão e/ou leitura dos artigos publicados.

## POLÍTICA DE ACESSO LIVRE

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento.