



ENGENHARIA: SOLUÇÕES E INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO

VOLUME IX



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: soluções e inovações para o desenvolvimento

9ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

9ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Editora Conhecimento Livre, 2024

217 f.: il

DOI: 10.37423/2024.edcl901

ISBN: 978-65-5367-487-5

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

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

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2024.edcl901>

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

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Wesley Pacheco Calixto

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli
MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior
Dra. Suely Lopes de Azevedo
MSc Francisco Odecio Sales
MSc Ezequiel Martins Ferreira
MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio
MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo
MSc Rainei Rodrigues Jadejiski
Dr. Rodrigo Couto Santos
Dra. Milena Gaion Malosso
PHD Marcos Pereira Dos Santos

CAPÍTULO 1	6
ARGAMASSA E CONCRETO COM AGREGADO ÁCIDO:ASPECTO MICROESTRUTURAL DA MATRIZ CIMENTÍCIA E COMPARATIVO DE DESEMPENHO	
Ayrton Vianna Costa	
Paulo Roberto Gomes Brandão(in memorian)	
DOI 10.37423/240308768	
CAPÍTULO 2	42
ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE UM NOVO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES	
Maria Eduarda Rodrigues Muniz	
Nayanna Cristina Cabral dos Santos	
Durval Henrique Bubola da Silva	
DOI 10.37423/240308771	
CAPÍTULO 3	67
DESENVOLVIMENTO DE SENSORES VIRTUAIS PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM MOTORES ELÉTRICOS	
Ramon da Silva Alves	
Cassius Zanetti Rezende	
Leonardo Azevedo Scardua	
DOI 10.37423/240308774	
CAPÍTULO 4	90
ALGORITMO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL EM UM SISTEMA BIM - AQUISIÇÃO DE INSUMOS PARA CONSTRUÇÃO NO BRASIL	
LUDMILA SANTOS DE ANDRADE	
DOI 10.37423/240308785	
CAPÍTULO 5	104
PROPOSTA DE NOVA TOPOLOGIA DE CONEXAO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE VISANDO A OTIMIZACAO DA EXATIDÃO	
RODRIGO CERQUEIRA CIARLINI	
Francisco Kleber de A. Lima	
DOI 10.37423/240308789	
CAPÍTULO 6	123
MÓDULOS DE PERMEAÇÃO PARA PURIFICAÇÃO DE HIDROGÊNIO: UM ESTUDO DE REVISÃO	
Camila Pereira Girotto	
Clara Elisa Simões Bassetto	
Aline Domingues Gomes	
Ramiro Picoli Nippes	
Marcos de Souza	
DOI 10.37423/240308796	

CAPÍTULO 7	141
MONITORAMENTO ESTATÍSTICO MULTIVARIADO E DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE DE UMA CALDEIRA	
Carmela Maria Polito Braga	
Anísio Rogério Braga	
Bruno Monteiro de Sousa	
DOI 10.37423/240308833	
CAPÍTULO 8	161
POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE MICRO E MINICOGERAÇÃO EM CENTROS URBANOS – ANÁLISE DE CASO	
Elio Vicentini	
Ricardo Caneloi dos Santos	
Ricardo da Silva Benedito	
DOI 10.37423/240308835	
CAPÍTULO 9	176
AUMENTO NO ÍNDICE OEE EM UMA INDÚSTRIA DE CALÇADOS DE SEGURANÇA COM O MÉTODO PDCA DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS	
JOEL CORDEIRO JÚNIOR	
MATEUS FELIPE HOLZBACH	
ROBSON LUCIANO DE ALMEIDA	
MAURÍCIO BEDIM DOS SANTOS	
DOI 10.37423/240308855	
CAPÍTULO 10	190
APLICAÇÃO DA FILOSOFIA DO LEAN MANUFACTURING EM EMPRESAS DE ALTO RENDIMENTO COM A FERRAMENTA KAIZEN	
JOEL CORDEIRO JÚNIOR	
AMANDA DE FREITAS	
ROBSON LUCIANO DE ALMEIDA	
ADRIANA APARECIDA DAMBROS DA SILVA	
MAURÍCIO BEDIM DOS SANTOS	
DOI 10.37423/240308856	
CAPÍTULO 11	199
TRANSIÇÃO DE UM ATELIER SOB MEDIDA PARA LOJA EM UM MARKETPLACE: UM PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO SEGUINDO OS CONCEITOS DA CAUDA LONGA	
ANGELE MAINE RHODEN	
FERNANDA HÄNSCH BEUREN	
SILENE SEIBEL	
ICLEIA SILVEIRA	
DOI 10.37423/240408861	

Capítulo 1



10.37423/240308768

ARGAMASSA E CONCRETO COM AGREGADO ÁCIDO: ASPECTO MICROESTRUTURAL DA MATRIZ CIMENTÍCIA E COMPARATIVO DE DESEMPENHO

Ayrton Vianna Costa

*Universidade Federal de Minas Gerais –
UFMG*

Paulo Roberto Gomes Brandão (in memorian)

*Universidade Federal de Minas Gerais –
UFMG*



Resumo: O objetivo geral do estudo foi explorar a ocorrência observada na morfologia das fases cimentícias hidratadas com cimento Portland comum, o composto, os agregados convencionais e os oriundos dos rejeitos de mineração, bem como conhecer seu desempenho para os cuidados necessários. O material foi rejeito de *sínter feed* da Mina de Jangada, Itaminas, Sarzedo, MG, mineral particulado rico em Fe, com medidas de pH variando de 4,11 a 4,98 nos ensaios de solubilização e lixiviação, evidenciando seu caráter ácido quando comparado aos demais agregados de origem quartzosa, calcárea ou gnáissica. Alguns dos cimentos Portland compostos apresentaram significativos teores de escória de alto forno, alguns ácidos e/ou escórias de aciaria em substituição ao clínquer convencional, material com elevada alcalinidade. A bibliografia a respeito das matrizes cimentícias com o cimento Portland faz referência ao seu caráter essencialmente básico e elevado pH, nas quais se desenvolvem os produtos da hidratação do cimento, com exuberância de suas formas (euédricas). A presença do rejeito de *sínter feed* e os cimentos com teores de escória de alto forno, eventualmente também ácidos, conduziram à observação de fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, apresentando certo atrofiamento em sua morfologia clássica, sendo algumas até subédricas e/ou anédricas. Foram observados desempenhos reduzidos em suas performances nos diversos ensaios comparativos devido a eventuais ocorrências também de goethita terrosa. Uma relação de causa e efeito foi estabelecida, sendo que essa redução de desempenho sinaliza a necessidade de ser minimizada, adotando-se parâmetros específicos da tecnologia do concreto em suas dosagens.

Palavras-chave: mineração, rejeito, *sínter feed*, morfologia, performance.

1. INTRODUÇÃO

O rejeito de minério gerado em mineradoras tem criado enormes dificuldades e problemas em sua gestão e descarte. Sua utilização como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, é questão pouco estudada, mas além de dirimir despesas às mineradoras na gestão de seu estoque, controle e descarte, pode beneficiar o meio ambiente de maneira significativa.

O Brasil é um país que apresenta enorme vocação e desempenho para a atividade minerária, tendo na exportação do minério de ferro uma de suas *commodities* de maior expressão e um dos mais relevantes papéis em sua balança comercial. A demanda de aço no mundo é crescente, mas tem passado por uma realidade de mercado em que seu preço reflete menor índice de cotação nos mercados internacionais. Impõe-se, desta forma que, para a manutenção ou minoração desse efeito sobre a balança de pagamentos e necessidades do país, o aumento do volume exportado seja considerado. Contudo, com a consequente geração de rejeitos sempre associada, será inevitável a ampliação dos dispositivos e áreas necessários à contenção e deposição de seus respectivos volumes. Nos últimos anos, têm ocorrido acidentes de ruptura de barragens de rejeitos nas plantas de mineração em épocas nas quais se processam aumentos do volume barrado ou de obras de alteamento dessas barragens para o consequente aumento de suas capacidades.

Este estudo não aborda rejeito de barragens, mas rejeito estocado em pilhas, prevalecendo as mesmas preocupações em função dos respectivos aumentos dos rejeitos particulados.

A relevância deste trabalho se cinge às conclusões que poderão contribuir para instruir ainda mais sobre o emprego e a utilização desse material, cujas preocupações de danos ao meio ambiente são evidentes pela quantidade de seu volume gerado. Para cada tonelada de minério de ferro, é produzida em média de 0,5 tonelada de rejeitos, sendo a razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos produzidos de 2:1 [1]. Dentre outros requisitos e condicionantes, seu estoque em pilhas impõe a supressão de extensas áreas de cobertura vegetal causadora de desequilíbrio localizado nas condições naturais ambientais e paisagísticas e, tal como para todos os demais rejeitos e resíduos, são necessários mais estudos e pesquisas que visem ampliar seu conhecimento e aproveitamento, minorando essas consequências e gerando ganho e riquezas decorrentes da sua utilização responsável.

A presente pesquisa tem convergência total com os princípios que estimulam e norteiam os critérios de preservação do meio ambiente e os que preconizam a Lei 12.305 [2], que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e que destaca, dentre os aspectos em consonância com os conceitos modernos de gestão de resíduos sólidos contidos na Lei, os objetivos de diminuição do uso de recursos naturais no processo de produção de novos produtos - obtido por meio da redução do consumo das areias naturais; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos - obtida por meio da utilização de rejeito do processo de mineração, com a consequente redução do seu volume estocado e custos operacionais; e incentivo à pesquisa e à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados obtidos por meio de análise e validação de procedimento e tecnologia até então pouquíssimo utilizados;

Neste particular, cabe reiterar o que já foi citado em trabalhos anteriores [3,4]: (1) estabelecer, divulgar e desenvolver o mercado para este insumo, explorando como apelo de convencimento suas vantagens ecológicas e, certamente, as viabilidades econômicas e de preços de sua utilização; e (2) buscar estabelecer uma política de incentivos fiscais por meio de vantagens tributárias, coordenada em nível estadual e municipal, para os produtos ecologicamente corretos produzidos com esse material (junto às secretarias estaduais de meio ambiente e fazenda).

O desenvolvimento de tais processos e tecnologias recomendam o direcionamento a instituições com incontestável competência instalada e postura isenta não contaminada por interesses e ações de mercado sendo, sem dúvida, a Academia seu ente mais credenciado. A propósito dessas considerações, o presente trabalho alinhou-se com pesquisa deliberada pelo Ministério Público Federal (MPF) em sua Resolução 014/2016-MPF/GAB/FT, direcionada ao aproveitamento técnico e econômico de estéreis e rejeitos de mineração.

Os últimos e trágicos acidentes ocorridos em atividades mineradoras estabeleceram o aceleração das discussões referentes ao novo Marco Regulatório da Mineração e ao programa Inova Mineral que, entre outras providências, estabelecem também o desenvolvimento de tecnologias e processos para redução e mitigação dos impactos ambientais, que incluem a recuperação e aproveitamento de resíduos e elementos dispersos, recuperação, reutilização, redução ou eliminação de água nos processos da mineração. Enfim, o aprimoramento do conhecimento sobre sua utilização e sua aplicabilidade prática, inclusive e especialmente no tocante ao respeito ao meio ambiente, devem ser meta e responsabilidade de todos.

A utilização do rejeito de minério gerado em mineradoras, como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, não é prática razoavelmente corrente. As poucas experiências limitam-se a casos isolados, de motivação muito específica, mas guardam alguma semelhança com o material objeto da presente pesquisa. Recentemente, há informações acerca de emprego semelhante de bloquetes produzidos com um rejeito de minério no Instituto Cultural Inhotim, Brumadinho, MG. Trata-se de um espaço cultural internacionalmente conhecido, que abriga um museu de arte contemporânea, um jardim botânico e extenso acervo ambiental, no qual também vêm sendo aplicadas peças pré-fabricadas com a utilização de rejeito de minério em áreas de sua pavimentação interna. Poucas experiências práticas vêm sendo desenvolvidas sem maiores cuidados experimentais e sem o necessário estudo científico-tecnológico do material rejeito e de seu comportamento no compósito concreto ou argamassa.

Este trabalho tem por objetivo geral explorar de forma mais ampla a ocorrência observada na morfologia das referidas fases cimentícias hidratadas tendo como parâmetros o cimento Portland comum, o composto, os agregados convencionais e os oriundos dos rejeitos de mineração, bem como conhecer seu desempenho para os cuidados necessários.

Os objetivos específicos envolvem: (1) caracterizar, fisicamente, o novo rejeito final do minério de ferro, por meio de análises granulométricas, de área superficial específica e de porosimetria de adsorção/condensação de nitrogênio; (2) realizar análises mineralógicas e microestruturais no rejeito; (3) moldar corpos de prova de concreto produzidos com e sem o material em estudo para atender os ensaios físicos comparativos previstos; (4) desenvolver análise microestrutural em ambas as amostras dos corpos de prova produzidos, avaliando a microestrutura da interface pasta-agregado com a utilização da microscopia eletrônica de varredura convencional, utilizando a microanálise por dispersão de energia durante estes estudos; (5) enfatizar os aspectos microestruturais referentes à interface entre a pasta e os agregados, tanto no rejeito como na areia utilizada; (6) ampliar os estudos, estabelecendo ensaios comparativos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e de abrasão sob água (*Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)* [5], entre outros, nos concretos produzidos com e sem este agregado, o rejeito de *sinter feed*.

Na construção civil, essa aplicação pode ser estendida a blocos de concreto para alvenarias, assentes sobre o terreno em baldrame ou sapatas corridas, onde o aumento de peso do agregado não representa qualquer inconveniente. Nas estruturas de contenção em alvenaria, ao contrário, o aumento de peso decorrente do agregado é fator preponderante de melhoria do desempenho destas

construções. No saneamento básico, em galerias de esgotos e águas pluviais onde, periodicamente, são demandadas ações de recuperação estrutural devido ao desgaste por abrasão hídrica, esta pesquisa tende a trazer informações e alternativas que, uma vez comprovadas, podem alterar o quadro de periodicidade dessas intervenções, estabelecendo prazos mais longos de recuperação gerando, conseqüentemente, economias significativas. Nos diversos ramos das indústrias, especialmente as ligadas ao emprego do concreto, o campo pode ser vasto e outras aplicabilidades importantes poderão ser vislumbradas no decorrer ou a partir desta pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem situacional tem como referência as plantas de mineração operadas pela empresa Itaminas (ITM), no município de Sarzedo/MG, as quais representam bem o perfil de mineração de ferro desenvolvido nos demais complexos da região. Na Mina de Jangada, a Itaminas alimenta em suas unidades de tratamento de minério de ferro ITM 4, 5 e 6 cerca de 550.000t/mês, produzindo de 80 a 85% de minério de ferro e gerando de 20 a 15% de rejeito fino, também chamado “finos de barragem”, que é direcionado para barragens de rejeito e que, por sua característica, não constitui objeto desta pesquisa. A produção dessas unidades é totalmente direcionada à exportação pela empresa Vale S.A. O rejeito de *sinter feed* em sua configuração final, obtida, atualmente, depois de submetido a um processamento complementar em instalação de jigagem, que propicia uma maior separação do minério de ferro através de sistema gravimétrico, ainda contém significativa quantidade de ferro. Este método de concentração propicia maior recuperação do ferro em relação a processos usados anteriormente, o que constitui o agregado ácido objeto do presente artigo (FIG.1).



Figura 1 – Aspecto do rejeito de *sinter feed*

Os demais materiais envolvidos na pesquisa são os cimentos Portland, CP II - E 32 da Holcim (fabricado em Pedro Leopoldo/MG) e o CP IV - 40 RS da Soeicom (fabricado em Vespasiano/MG), a areia normal do IPT (beneficiada pelo IPT em São Paulo/SP), a areia comum quartzosa lavada média de Esmeraldas (procedente de Areias Fernato em Esmeraldas/MG), as britas calcárias 0 e 1 da Ical (procedente da

mineração Ical em São José da Lapa/MG), aditivo plastificante polifuncional Mastermix BF 40 (fabricado pela BASF S.A.) e água comum distribuída pela Copasa/MG.

Ocorreu ampla caracterização física, química, mineralógica e microestrutural dos materiais envolvidos na pesquisa. Os métodos de análise dos materiais da pesquisa foram baseados na normalização brasileira e aplicáveis aos materiais constituintes dos concretos e argamassas de Cimento Portland.

Foram preparados dois traços de argamassa, produzidos com o rejeito de *sinter feed* e com a areia normal do IPT (com sua granulometria ajustada à granulometria do rejeito), e os demais constituintes mantidos fixos e iguais. Este procedimento, num primeiro instante, visou conhecer e avaliar aspectos diferenciais da reologia destes materiais. Amostras foram extraídas dos corpos de prova de ambas as argamassas para seu exame macroscópico e por microscopia eletrônica de varredura convencional, com ênfase na região de sua interface no estado endurecido. Os corpos de prova moldados foram cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 10cm de altura. Procedimento semelhante foi desenvolvido em uma dosagem pré-estabelecida, desta feita em concretos com e sem o rejeito, este último como substituição total ou parcial da areia comum quartzosa, visando atender à mescla pré-definida da dosagem dentro do parâmetro convencional de concreto plástico (*slump na faixa de 14 +/- 2cm*). Amostras dos respectivos concretos, extraídas dos corpos de prova moldados Ø 10 x 20cm, foram objeto das mesmas análises já referidas.

Também em procedimento semelhante ao anterior foram moldados, com os mesmos traços de concreto, corpos de prova Ø 30 x 10cm, tendo sido submetidos a ensaios comparativos de abrasão hídrica, de acordo com as prescrições do método ASTM C 1138 [5].

O foco da pesquisa se situa no ambiente da interface (zona de transição) da pasta de cimento hidratado - superfície do agregado, com o intuito de buscar o estudo comparativo e o conhecimento de suas especificidades em duas situações bem definidas: com agregados de emprego corrente em concretos e obras da engenharia civil e com agregados oriundos dos rejeitos das atividades de mineração na produção do *sinter feed*.

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas principais: (1) a primeira se constituiu em abrangente abordagem de caracterização físico-química do novo rejeito (rejeito jigado), estado final de seu processamento na mina, que nessa etapa atingiu sua massa unitária no intervalo esperado (cerca de 1,50 a 1,60kg/dm³); (2) a segunda etapa teve como foco os estudos comparativos descritos nos objetivos desta pesquisa com a utilização de materiais de uso corrente na construção civil e com o resíduo em estudo.

Para as argamassas foram tomados como base os parâmetros da Norma Brasileira que estabelece critérios para Ensaio de Qualidade de Agregado Miúdo (NBR-7221) [6]. Para os concretos foram tomados como base os parâmetros de dosagem de uma indústria de pré-fabricados da região de Belo Horizonte, priorizando a manutenção da mescla granulométrica estabelecida do agregado no traço (módulo de finura da mescla).

Seguem-se tabelas com as características dos materiais:

A Tabela 1 demonstra os resultados do ensaio químico do rejeito.

Tabela 1 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada

Itaminas – Mina Jangada – Laboratório do Controle de Qualidade							
Elementos / Compostos	Rejeito <i>sinter feed</i> jigado – Teores %						
	Jan.2015	Fev.2015	Mar.2015	Abr.2015	Maio 2015	Jun.2015	
Fe	55,55	57,31	57,57	57,03	56,52	55,65	
SiO ₂	10,4	9,71	9,11	10,87	10,24	13,28	
Al ₂ O ₃	2,90	1,87	2,07	1,97	1,28	1,89	
P	0,065	0,073	0,073	0,074	0,079	0,083	
Mn	0,14	0,156	0,183	0,196	0,193	0,250	
ppc*	6,50	6,23	5,87	5,12	6,22	4,63	

Massa unitária: variando de 1,58 a 1,62kg/dm³

*ppc = perda por calcinação ou perda ao fogo

A Tabela 2 apresenta a granulometria do rejeito conforme a ABNT NBR 7211 [7].

Tabela 2 – Granulometria do rejeito

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
Ocorrência n°.	01	Peneira	% Retida Acumulada
Material	Rejeito lavado	(mm)	Amostra 01
Natureza	Ferro-quartzoso	9,50	0,0
Procedência	Sarzedo	6,30	0,0
Proprietário	Itaminas	4,75	12,0
Utilização	Argam/Concr.	2,36	41,8
Impureza Orgânica	<= 300ppm	1,18	66,8
Argila em Torrões	1,30%	0,60	80,9
Material Pulverulento	7,38%	0,30	86,1
Coefficiente de Vazios	52,25%	0,15	9,9
Módulo de Finura	3,78	fundo	100

Observa-se que o rejeito se encontra fora das faixas ótima e utilizável recomendadas para os agregados miúdos, o que leva a pressupor a conveniência de se estabelecer um mix com as areias convencionais para a obtenção de uma mescla mais adequada.

A Tabela 3 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da areia comum utilizada na pesquisa.

Tabela 3 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da areia utilizada

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
Agregado	01	Peneira	% Retida Acumulada
Material	Areia lavada	(mm)	Amostra 01
Natureza	Quartzosa	9,50	0,0
Procedência	Esmeraldas	6,30	0,0
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	4,75	0,8
Utilização	Argam./Concr.	2,36	3,4
Impureza Orgânica	<= 300ppm	1,18	11,4
Argila em Torrões	0,65%	0,60	42,7
Material Pulverulento	2,86%	0,30	79,6
Massa Unitária	1,339 kg/dm ³	0,15	93,9
Módulo de Finura	2,3184	fundo	100

A Tabela 4 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 utilizada, cuja massa específica apresentou-se em 2,68Kg/dm³.

Tabela 4 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 – ABNT NBR 7211

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
Agregado	01	Peneira	% Retida Acumulada
Material	Brita zero	(mm)	Amostra 01
Natureza	Calcária	9,50	6,5
Procedência	Ical	6,30	46,2
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	4,75	78,2
Utilização	Argam./Concr.	2,36	98,6
Impureza Orgânica	0%	1,18	99,2
Argila em Torrões	0%	0,60	99,3
Material Pulverulento	1,0%	0,30	99,3
Massa Unitária	1,461 kg/dm ³	0,15	99,3
Módulo de Finura	5,80	fundo	100

A Tabela 5 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 1 utilizada na pesquisa.

Tabela 5 – Dados físicos da brita 1 – ABNT NBR 7211

Informações Gerais	Análise Granulométrica		
Agregado	01	Peneira	% Retida Acumulada
Material	Brita 1	(mm)	Amostra 01
Natureza	Calcária	25,00	0,0
Procedência	Ical	19,00	6,7
Proprietário	Dep. Sta. Rosa	12,50	73,1
Utilização	Argam/Concr.	9,60	95,9
Impureza Orgânica	0	6,30	99,0
Argila em Torrões	0%	4,80	99,4
Material Pulverulento	0%	2,40	99,4
Massa Unitária	1,406 kg/dm ³	1,20	99,4
Massa Específica	2,659 kg/dm ³	0,60	99,4
		0,30	99,4
		0,15	99,4
Módulo de Finura	6,99	fundo	100

Diante de alterações apresentadas pelo novo rejeito após as operações de jigue, novos ensaios de caracterização ambiental foram executados no Laboratório de Resíduos Sólidos do CETEC (Centro Tecnológico de Minas Gerais) (TAB.6; TAB.7).

Tabela 6 – Resultado dos ensaios de solubilização da amostra e respectivos limites

Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)	Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)
Prata	< 0,01	0,05	Sódio	0,439	200,0
Alumínio	< 0,10	0,2	Zinco	< 0,02	5,0
Bário	0,0124	0,7	Mercúrio	<0,20 (µg/l)	0,001
Cromo	< 0,04	0,05	Selênio	<0,0005	0,01
Cobre	< 0,004	2,0	Arsênio	<0,0003	0,01
Ferro	< 0,30	0,3	Chumbo	<0,005	0,01
Manganês	0,264	0,1	Cádmio	<0,0005	0,005

Em virtude dos valores apresentados pelo manganês, foi conduzida contraprova no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Engenharia Química da Escola de Engenharia da UFMG, tendo sido obtido o resultado de <0,01 µg/g (TAB.7).

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de lixiviação da amostra e respectivos limites

Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)	Parâmetro	Amostra (mg/l)	Limite Máximo (mg/l)
Prata	< 0,01	5,0	Cádmio	<0,0005	0,5
Bário	0,0321	70,0	Chumbo	<0,005	1,0
Cromo	< 0,04	5,0	Mercúrio	<0,20 (µg/l)	0,1
Arsênio	<0,0003	1,0	Selênio	<0,0005	1,0

Quanto à reatividade potencial álcali-agregado do rejeito, a análise considerou os parâmetros da norma ABNT NBR 9774, atualmente fora de vigência, mas que registrou para o rejeito sua condição de *inócuo*, apresentando para a sílica dissolvida (milimoles/litro) o valor de 3 e para a redução de alcalinidade (milimoles/litro) o valor de 500. No ensaio de durabilidade do agregado, segundo o método DNER 8994, o rejeito apresentou bom desempenho, tendo sido registrada perda total corrigida de 7,1%, bem inferior ao limite da Norma, estabelecido em 12%.

A Figura 2 apresenta a difratometria de raios-x em fração representativa do rejeito.

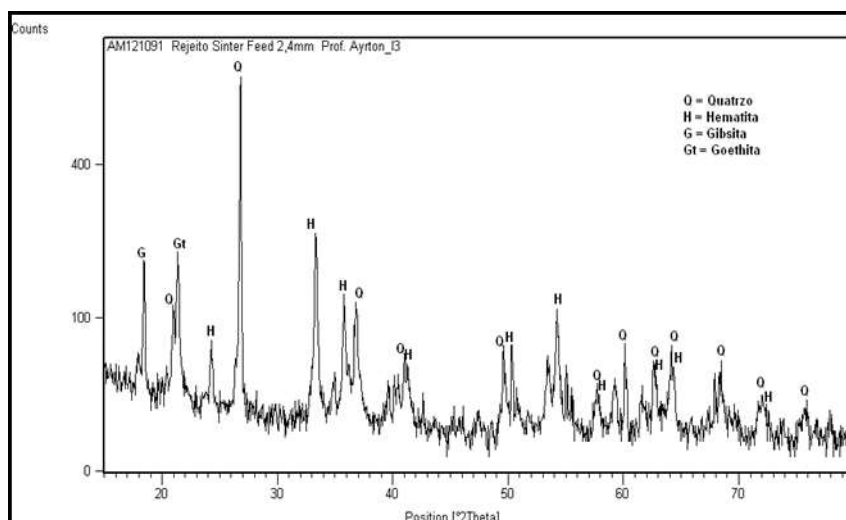


Figura 2 – Difratoograma da amostra pulverizada do rejeito

Fonte: Dados de pesquisa.

Na Figura 3 é apresentado o difratograma da amostra pulverizada da areia normal do IPT, sendo destacados os elementos mais significativos.

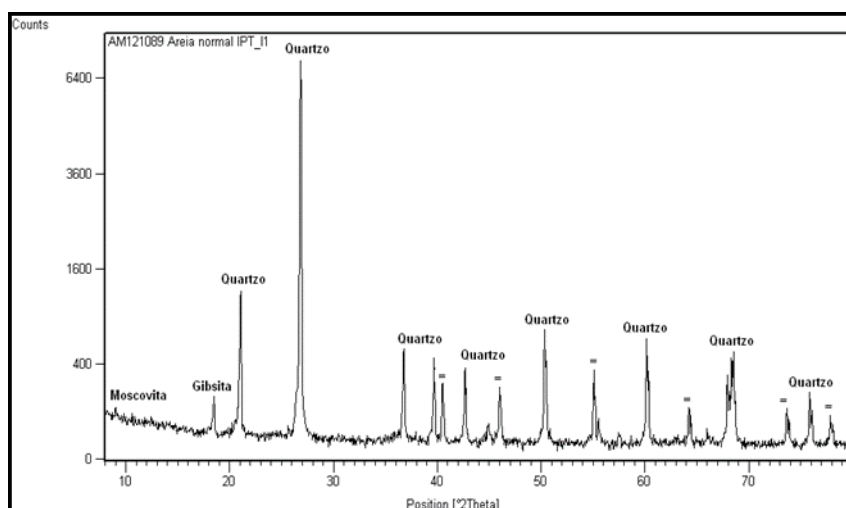


Figura 3 – Difratoograma da amostra pulverizada da areia normal do IPT

Fonte: Dados de pesquisa.

Quanto à área superficial específica (adsorção gasosa) e porosimetria (condensação gasosa) do rejeito e da areia normal do IPT, foram preparadas, respectivamente, as amostras hm20508 e hm9308, que apresentaram os seguintes resultados: área superficial específica de $8,372\text{m}^2/\text{g}$ e o maior volume de poros se encontrou na dimensão de $36,817\text{\AA}$, com pequenas porções acima dos $200\text{\AA}$, demonstrando ser um material com características maiores de mesoporos do que de macroporos (classificação IUPAC). O volume total de poros foi de $0,0149\text{cm}^3/\text{g}$, com diâmetro médio dos poros de $71,41\text{\AA}$, sob o limite de detecção máximo deste ensaio de $1322,8\text{\AA}$, a uma relação de pressão (P/P_0) de $0,985265$.

Quanto à técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV), procedeu-se análise microestrutural por meio de imagens de uma amostra determinada. Sequencialmente à obtenção de imagens, através do dispositivo de microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV, foram obtidas informações químicas da amostra em estudo.

Foi preparada uma seção polida montada, em resina, de uma amostra do rejeito em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análise microestrutural por meio de imagens, com apoio da microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS) (Fig.4).

OBS.: Em todos os espectogramas seguintes, onde necessário, foram destacados os picos mais significativos, face a redução das imagens.



Figura 4 – Seção polida de amostra do rejeito de *sinter feed*

As Figuras 5, 6 e 7 correspondem a algumas imagens geradas de elétrons retroespalhados (IER-BSE - *backscattering electrons*), que apresentam um contraste mais intenso devido não apenas à densidade, mas também ao nº atômico dos elementos, imagens adequadas ao conhecimento da topografia/morfologia dos componentes da amostra, uma vez que amplia aspectos de seu relevo, além de propiciar informações sobre a diferença composicional do material.

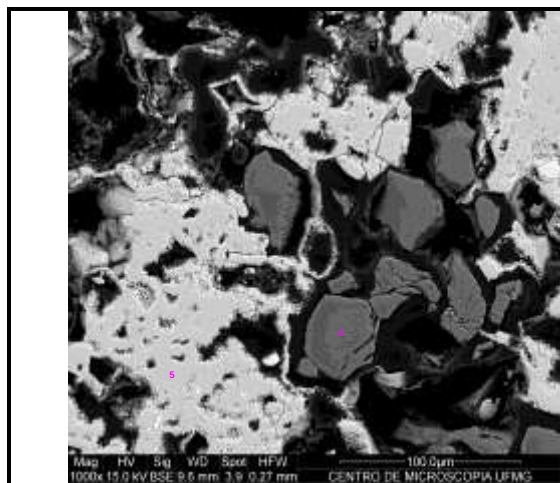


Figura 5 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas 4, 5. Área muito porosa, contendo goethita botrioidal e terrosa, com quartzo minoritário.

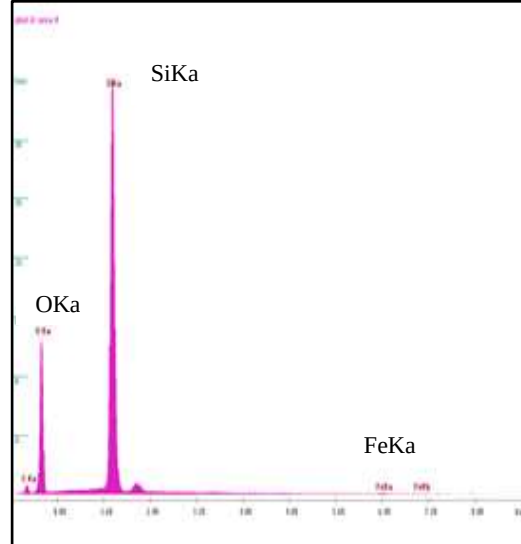


Figura 6 – Espectrograma da área 4; grão de quartzo

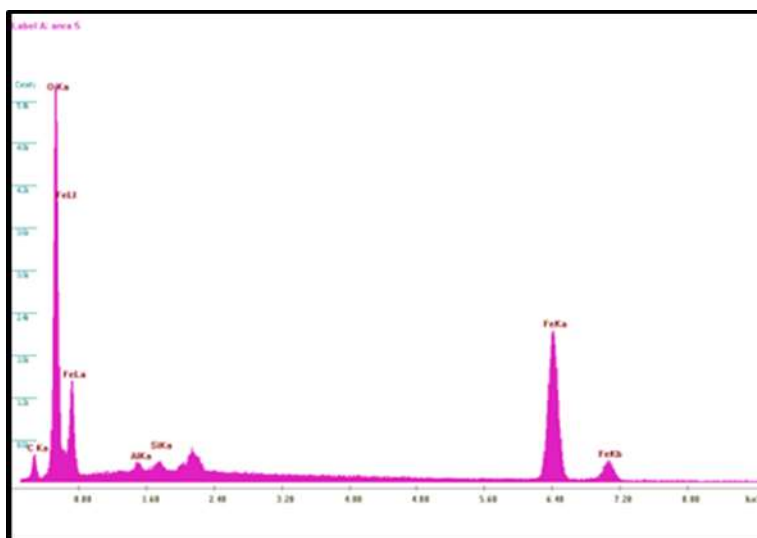


Figura 7 – Espectrograma da área 5; grão de goethita botrioidal

Na Figura 8 são apresentadas algumas imagens sequenciadas (com destaques) que propiciam um conhecimento mais ampliado de alguma das especificidades morfológicas do material. Um dos minerais mais abundantes no rejeito de *sinter feed* é a goethita, constituída por óxido de ferro hidroxilado que ocorre associada ao quartzo, podendo apresentar inclusões de hematita, gibsitita ou caulinita.

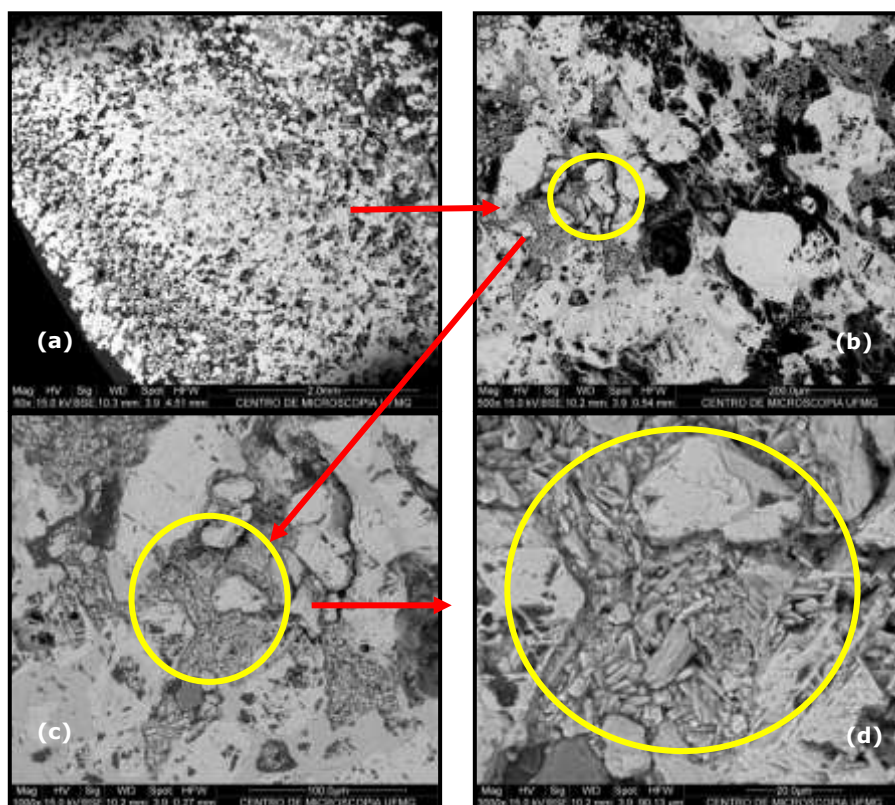


Figura 8 – Aspectos morfológicos do material. IER. (a) partícula muito porosa composta de hematita e goethita; (b), (c), (d) detalhe com área microporosa composta por minerais de ferro

A goethita apresenta clivagem, estrias e formas fibrosas, maciças, radiais, estalactíticas, tem dureza de 5–5,5 na escala Mohs e densidade relativa que varia de 3,3 a 4,3. Observa-se também, em função de intemperismo de minerais de ferro, a ocorrência da goethita terrosa de cor marrom-alaranjada ou ocre. Esta apresenta dureza de 4–5,5 e densidade relativa que varia de 2,7 a 4,3, considerável volume de poros e em consequência mais friável que a goethita compacta, de acordo com Santos e Brandão (2003) e Santos, Brandão e Sampaio (2005).

Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas informações sobre os cimentos utilizados na pesquisa. São curvas de Abrams fornecidas pelos fabricantes, a partir das quais foram definidos os parâmetros de dosagem dos concretos, resistência aos 28 dias (f_{c28}) e o necessário fator água-cimento (a/c).

- Rejeito de *sinter feed* 9.600g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32.....1.919g = 1,480 litros
- Água.....fator a/c = 0,60

A primeira argamassa preparada foi a produzida com a areia normal do IPT, que apresentou boa plasticidade e com a qual foram moldados corpos de prova de $\varnothing$ 5 x 10 cm para rompimento à compressão axial simples aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade. A segunda argamassa preparada foi produzida com o rejeito em estudo, recebendo o mesmo tratamento da argamassa anterior.

Depois de 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desformados e conduzidos à câmara úmida por um período de 7 dias, de lá retirados e continuada sua cura em atmosfera natural no ambiente interno do laboratório, protegidos contra o sol, correntes de vento e outros condicionantes/agentes indesejados. Desse 1º lote de argamassas foram moldados os corpos de prova $\varnothing$ 5x10 cm para o rompimento à compressão simples aos 3, 7, 14 e 28 dias.

Neste ponto uma sensível diferença foi observada. Enquanto a argamassa com a areia normal do IPT apresentou boa plasticidade, boa moldabilidade, propiciando corpos de prova de aspecto normal e superfície lisa, regular, a argamassa produzida com o rejeito de *sinter feed*, já em sua mistura, absorveu de forma acelerada a água adicionada, proporcionando reduzidas plasticidade e moldabilidade e, ao contrário da primeira, gerou corpos de prova de superfície irregular, não lisa, apresentando muitos orifícios. A Figura 13 ilustra este registro.



Figura 13 – Corpos de prova $\varnothing$ 5x10 cm do 1º lote de argamassas

Nota: argamassa com areia normal do IPT (esq.); argamassa com rejeito (dir.)

Assim, com os mesmos materiais e em idênticas condições, foram confeccionados novos traços de argamassas, porém iniciando-se as misturas pela argamassa que continha o rejeito e fornecendo-lhes água até que atingissem a condição requerida. Uma vez obtida essa condição desejada, o mesmo procedimento foi conduzido com a argamassa contendo a areia normal do IPT e avaliadas as respectivas consequências.

Designou-se então de **2º lote das argamassas** e os traços se constituíram de:

Argamassa com o rejeito de *sinter feed* em estudo:

- Rejeito de *sinter feed* 9.600g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32 1.919g = 1,480 litros
- Água 1.551g = 1,551 litros

Argamassa de referência com areia normal do IPT:

- Areia Normal do IPT.....9,367g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32.....1.919g = 1,480 litros
- Água.....1.551g = 1,551 litros



Figura 14 – Corpos de prova Ø 5x10 cm do 2º lote de argamassas

Nota: argamassa com rejeito (esq.); argamassa com areia normal do IPT (dir.).

Fonte: Dados de pesquisa.

3. RESULTADOS

Foi constatado o que, de alguma forma, já seria esperado: ao serem obtidas as boas condições de plasticidade na argamassa com o rejeito de *sinter feed*, com um acréscimo de 400ml de água, correspondente a um aumento do fator a/c em 34,7% (que se mostrou necessário), consequentemente se obteve na argamassa com a areia normal uma excessiva plasticidade em condição acentuadamente mais fluida. Percebeu-se, ainda, que um percentual de aumento da água um pouco mais elevado poderia ainda ter sido assumido, conduzindo à obtenção de uma superfície mais regular do corpo de prova contendo o rejeito.

Desse 2º lote de argamassas foram também moldados os corpos de prova Ø 5x10cm para o rompimento à compressão simples aos 3, 7, 14 e 28 dias, além de extraída e preparada de cada argamassa um do corpo de prova para, após a idade de 28 dias, constituir a amostra para o ensaio

comparativo de microscopia eletrônica (MEV). A Tabela 8 apresenta os valores dos ensaios simples de resistência à compressão obtidos nas duas argamassas (dois lotes executados).

Tabela 8 – Comparativo da resistência à compressão das argamassas (Mpa) CP II-E32

COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS (MPa) - CP II E - 32									
ARGAMASSAS	LOTE	1º LOTE ARGAMASSA (a/c=0,60)				2º LOTE ARGAMASSA (a/c=0,80)			
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CIMENTO E AREIA NORMAL (na granulometria do rejeito)	cp 1	17,02	19,23	29,72	36,88	9,25	16,68	18,69	21,61
	cp 2	19,46	24,26	22,11	27,01	11,17	15,96	21,63	23,30
	cp3	13,15	18,00	26,90	32,75	9,82	13,11	17,41	19,17
	cp4	15,40	21,71	31,42	38,37	12,18	14,75	16,30	24,78
	média	16,26	20,80	27,54	33,75	10,61	15,13	18,51	22,22
CIMENTO E REJEITO	cp 1	12,17	15,82	16,62	19,77	10,18	13,30	16,03	19,95
	cp 2	9,76	13,40	19,46	18,75	9,55	14,58	16,17	21,12
	cp3	10,21	13,01	15,85	19,52	11,53	16,73	17,40	19,35
	cp4	9,44	12,82	18,66	17,31	13,13	17,01	18,20	20,77
	média	10,40	13,76	17,65	18,84	11,10	15,41	16,95	20,30

A partir da Tabela 8 foram desenvolvidos também testes variados de consistência das argamassas produzidas, com o objetivo de verificar seus comportamentos reológicos de forma a estabelecer procedimentos a ser empregados na fase dos ensaios em concreto. Definiu-se, ao final, que deveria ser utilizado o aditivo plastificante polifuncional Mastermix-DF40 e que a adição do rejeito, por sua porosidade, deveria ocorrer por último, quando já obtida uma mistura molhada, mais coloidal.

Do total de argamassas que integraram a pesquisa, foram separados 2 corpos de prova de $\varnothing 5 \times 10$ cm, um de cada tipo de agregado do 2º lote de argamassas, com idade superior aos 28 dias, os quais apresentaram um aspecto e morfologia mais regulares. Posteriormente foram serrados transversalmente para um preparo final, tendo em vista as dimensões da mesa porta-amostra do MEV.

As amostras preparadas foram submetidas às análises de microscopia de varredura de elétrons (MEV) e aos ensaios de espectrometria por dispersão de energia (EDS) nas instalações do Centro de Microscopia da UFMG. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura FEG - 200 FEI acoplado com um microanalisador EDS, o espectrômetro de raios-X por dispersão de energia. As Figuras 15 a 17 demonstram micrografias e espectrogramas autoexplicativos. Segue a legenda dos principais compostos e elementos presentes nas imagens das micrografias apresentadas: **P** = portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; **C** = calcita – CaCO_3 ; **E** = calcita – CaCO_3 ; **CSH** = silicatos de cálcio hidratados – C-S-H ou CSH; **Q** = quartzo – SiO_2 ; **FE** = óxidos de ferro.

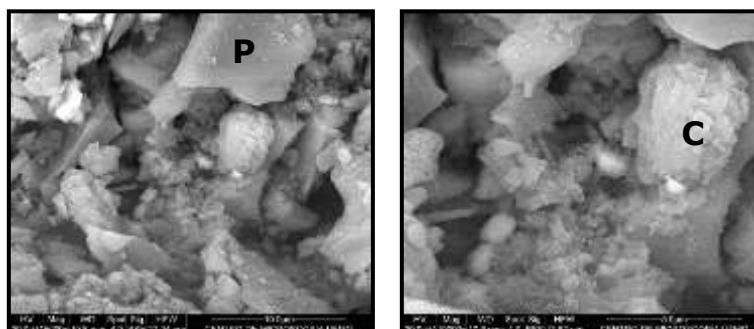


Figura 15 – Micrografias em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais euédricos, em argamassa com a areia normal do IPT; IER

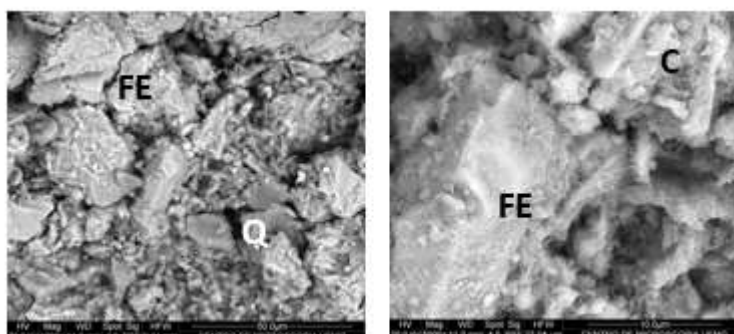


Figura 16 – Micrografia em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais subédricos; IER

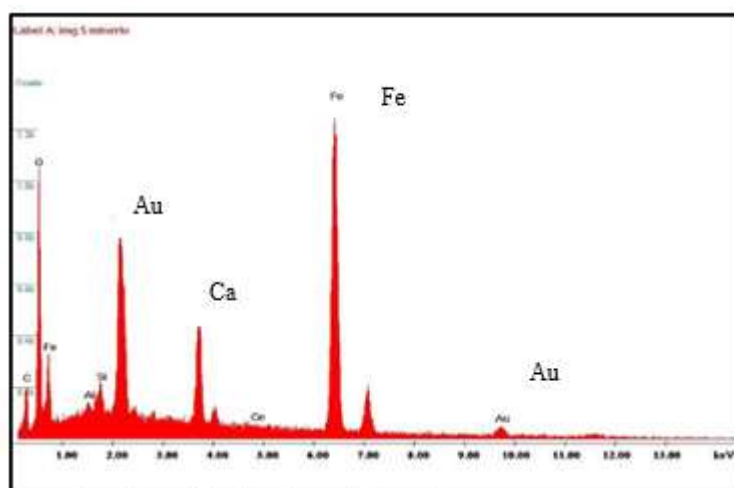


Figura 17 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior. Nota: Destaca-se a sílica do quartzo, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e o ferro devido à goethita. O ouro é devido ao preparo de metalização da amostra.

Fonte: Dados de pesquisa.

Para os ensaios comparativos com os concretos estabeleceu-se como parâmetro da análise um traço que apresentasse características de concreto plástico, com uma medida de *slump* que propiciasse

inclusive o seu lançamento bombeado (14 +/- 2 cm), atendendo uma tensão de dosagem aos 28 dias de valor usual utilizado pelo mercado, no intervalo de 30 a 35MPa (considerado 32,5MPa). Este valor constitui, aproximadamente, cerca de 90% das demandas de concreto pré-misturado, classe C25 a C30, informação obtida em consulta oficiosa formulada a algumas concreteiras e com a mera finalidade de se estabelecer um parâmetro com alguma procedência.

Para a definição do fator água/cimento que atendesse as premissas anteriores foi utilizada a curva de Abrams do CP II - E 32 fornecida pelo respectivo fabricante.

Utilizando-se os critérios de dosagem do INT os dados básicos dos concretos ficaram assim definidos: (1) Com o cimento CP II - E 32: $x = 0,63$; $A\% = 10,5$; $m = 5$; Argamassa no traço $\geq 50\%$; (2) Com o cimento CP IV - 40 RS: $x = 0,63$; $A\% = 10,5$; $m = 5$; Argamassa no traço $\geq 50\%$. Com o objetivo também de ampliar as observações foram dosados concretos respeitando o mesmo parâmetro de resistência ($f_{c28} = 32,5\text{MPa}$) para o cimento CP IV - 40 RS, com base em sua curva de Abrams específica: com o cimento CP IV-40 RS: $x = 0,52$; $A\% = 10,5$; $m = 4$; Argamassa no traço $\geq 50\%$. A proporção dos agregados nos respectivos traços foi obtida por tentativas estabelecidas sobre um gráfico de mesclas calculadas em planilhas eletrônicas, tendo como referência a Curva II de Bolomey para agregados de $\phi_{\text{max}} 25\text{mm}$. Trabalhando-se sobre a mescla granulométrica do concreto sem rejeito e buscando no mix areia/britas/rejeito, a proporção que melhor se encaixa na Curva II de Bolomey foi estabelecida como sendo: 21% de areia, 19% de brita 0, 30% de brita 1 e 30% de rejeito, obtendo-se um módulo de finura da mescla de 4,77, idêntica à do concreto sem rejeito.

E assim, finalmente, os traços dos concretos resultantes para os ensaios comparativos foram: (1) Concreto sem rejeito: TUP = 1: 2,1: 1,05: 1,85, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; $a/c = 0,63$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”; (2) Concreto com rejeito: TUP = 1: 1,05: 0,95: 1,50: 1,50, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; $a/c = 0,63$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

O emprego do aditivo teve o objetivo de reduzir a tensão superficial da água, dotando-a de maior capacidade de molhação face à maior área superficial do rejeito e no sentido de prevenir a ocorrência verificada na fase dos ensaios desenvolvidos exclusivamente com argamassa.

Para os concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, com fator água/cimento = 0,52 os traços unitários em peso ficaram assim constituídos: (1) Concreto sem rejeito: TUP = 1: 1,68: 0,84: 1,48, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; $a/c = 0,52$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”; (2) Concreto com rejeito: TUP = 1: 0,84: 0,76: 1,20:

1,20, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; $a/c = 0,52$; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

Quanto aos estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator $a/c = 0,63$, ocorreu o seguinte: para as análises comparativas das zonas de transição (interface pasta/agregado) foram escolhidos aleatoriamente, dentre os concretos produzidos e descritos anteriormente, com os quais foram preparadas as amostras a serem levadas ao microscópio.

A Figura 18 ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP II - E 32, **sem o rejeito de *sinter feed***.

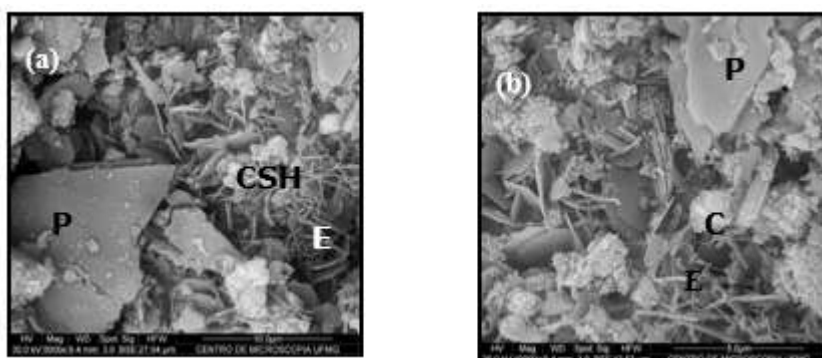


Figura 18 – Micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto sem o rejeito de *sinter feed*, destacando detalhes da microestrutura na zona de transição, formação de cristais euédricos; a e b = IER

A Figura 19 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto, apresentando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado.

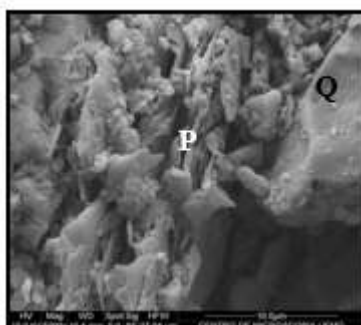


Figura 19 – Micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior, destacando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado; IES

Pode ser observada na Figura 18 uma microestrutura de concreto padrão bastante compacta, com presença predominante de cristais muito pequenos, principalmente de portlandita, com sua morfologia tipicamente lamelar.

A Figura 20 mostra espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 19, destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita.

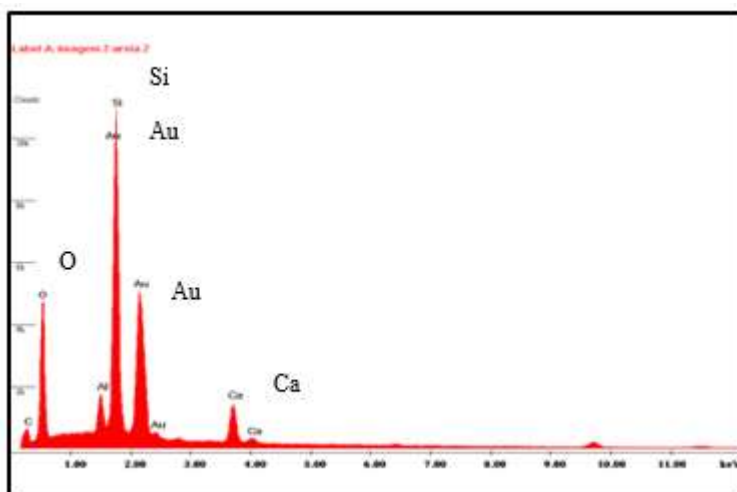


Figura 20 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (d) destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita

A Figura 21 apresenta micrografia de regiões de interface obtidas em amostras do concreto produzidos com o cimento CP II - E 32 com o rejeito de sinter feed.

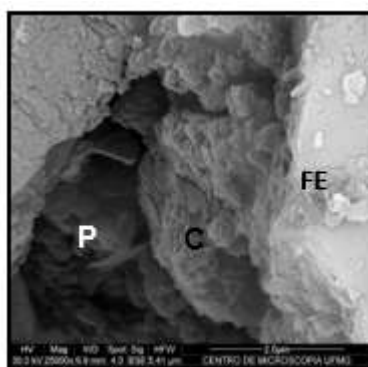


Figura 21 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto, com rejeito de *sínter feed*, destacando em (d) detalhes da microestrutura na interface; IER

A Figura 22 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia acima.

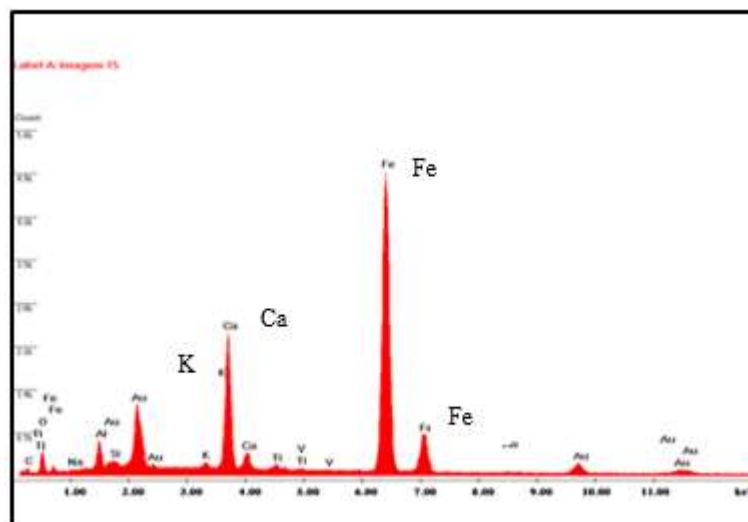


Figura 22 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior, destacando elemento de cristalização do cimento

A Figura 23 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto.

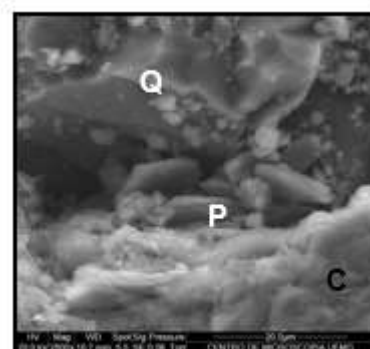


Figura 23 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto com rejeito de *sinter feed*; detalhes da microestrutura; IES

Na Figura 23 pode-se observar CSH fraturado na interface com o agregado quartzoso com resquícios de portlandita/carbonato de cálcio.

A Figura 24 demonstra o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 23. A Figura 25 apresenta parte da sequência de micrografias anteriores, ressaltando-se a presença de CSH e grãos anédricos de calcita/portlandita.

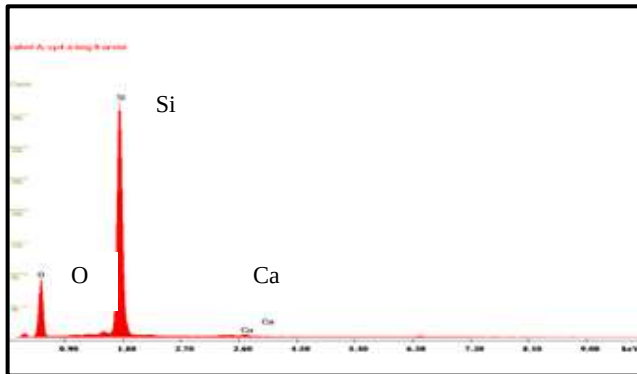


Figura 24 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

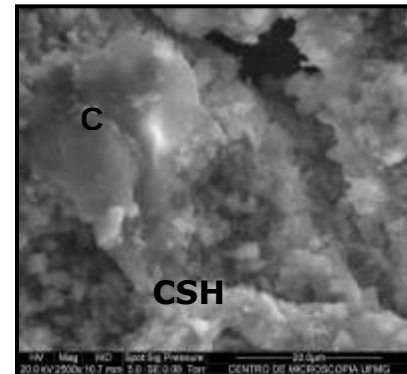


Figura 25 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto com rejeito de *sinter feed*, destacando detalhes da microestrutura; IES

A Figura 26 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior. Pode-se notar presença de CSH e grãos anédricos de calcita/portlandita.

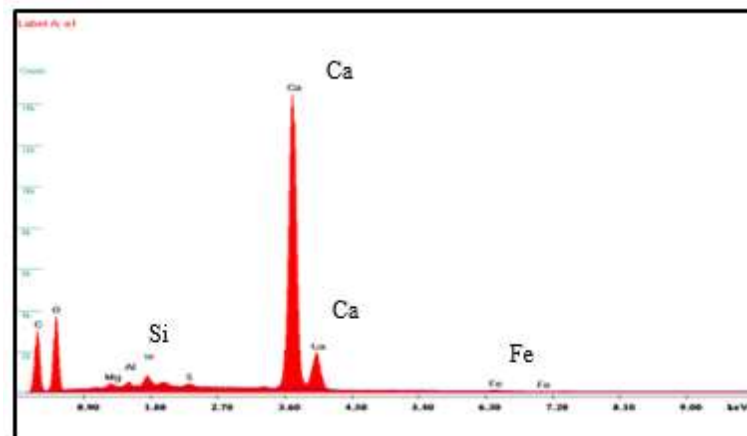


Figura 26 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

O conjunto de imagens seguintes (a,b) ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, **com o rejeito de *sinter feed*** (Fig. 27).

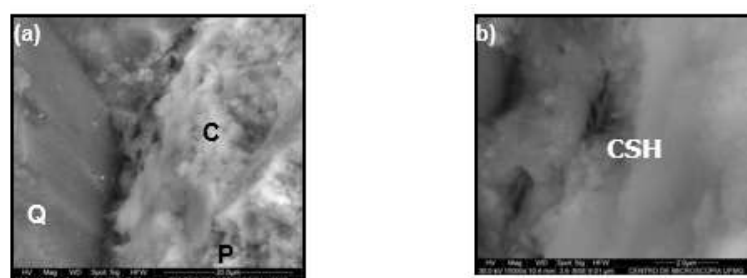


Figura 27 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto

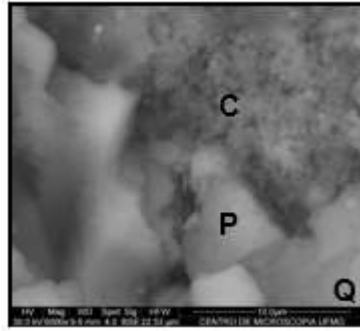


Figura 28 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER

A Figura 29 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

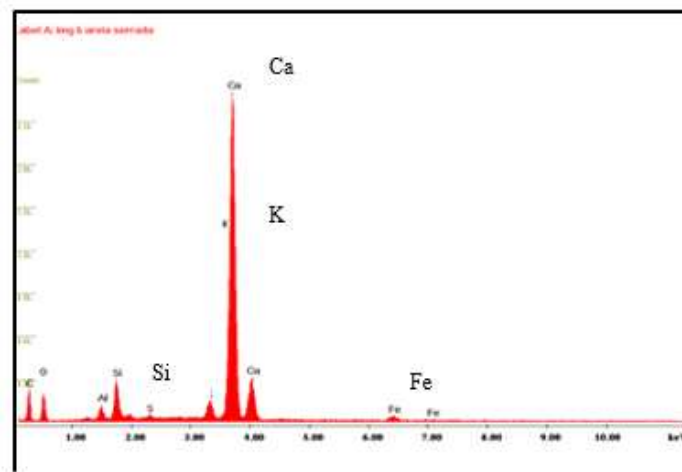


Figura 29 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

O conjunto de imagens seguintes (Fig. 30) (a,b) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS com o rejeito de *sinter feed*.

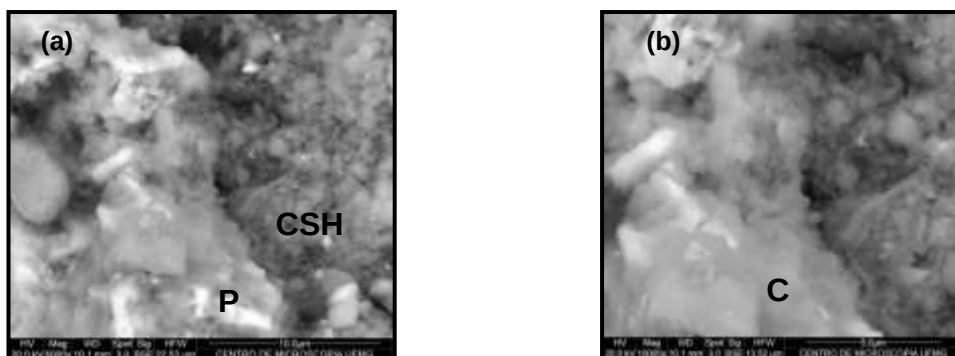


Figura 30 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (a) e (b) detalhes da microestrutura; IER

A Figura 31 a seguir integra a sequência anterior.

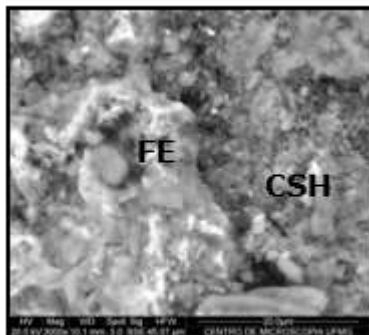


Figura 31 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER

A Figura 32 apresenta o espectrograma da Figura 31.

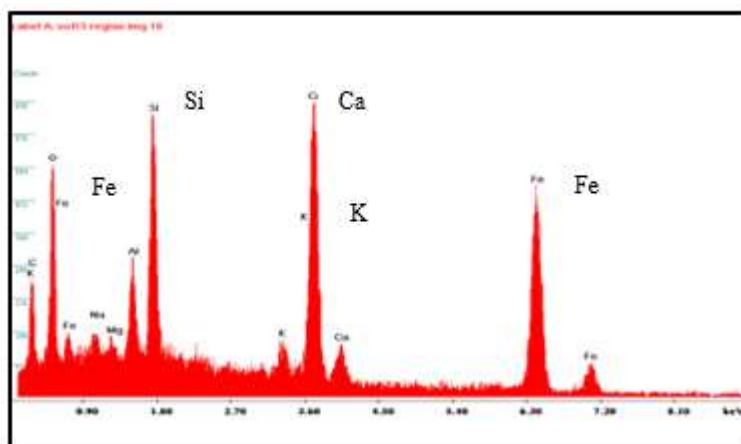


Figura 14 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior

É possível observar que a falta de organização morfológica dos cristais na microestrutura é grande quando se tem a presença do cimento CP IV-40 RS. Possivelmente, isto se deve a sua composição específica e variada, pois é obtido a partir do uso de gesso, escória de alto-forno (ácida e/ou básica sendo granulada e/ou bruta) e clínquer.

Assim sendo, de forma resumida, foram observadas as seguintes tendências de cristalização, de morfologia e de tamanho de grãos: (1) Concreto sem rejeito, $a/c=0,63$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, com presença tímida nas zonas de interface agregado x pasta. Foram observados CSH e etringita, igualmente, de forma tímida e em tamanhos pequenos; (2) Concreto sem rejeito de *sinter feed*, $a/c=0,52$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho corrente usual quando localizado fora da zona de interface. Nas zonas

de interface observou-se um emaranhado de CSH, etringita e carbonato de cálcio um pouco mais refinado. O tamanho de pouquíssimos silicatos e monossulfatos observados é diminuto/pequeno; (3) Concreto com rejeito de *sinter feed*, $a/c=0,63$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, caracterizada por região de refinamento de grãos cristalizados e se comparada com a morfologia dos carbonatos de misturas sem rejeito, apresenta menores tamanhos. Em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, $a/c=0,52$; (4) Concreto com rejeito, $a/c=0,52$: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho reduzido tal como aquela observada em concreto com rejeito, $a/c=0,63$. Igualmente, em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, $a/c=0,52$.

Como comentários adicionais, a literatura consultada faz referência aos seguintes comportamentos/tendências: (1) O fator a/c interfere nas características da zona de transição; (2) Maior fator a/c conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa; (3) Maior ϕ do agregado conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa; (4) Por conseguinte, em ambos os casos a densidade da ITZ é inferior em relação ao corpo da matriz (*bulk*), situações que foram identificadas na observação das imagens, o que, certamente, se deve também aos materiais utilizados nas misturas, com ênfase na sua mineralogia, finura, morfologia do grão, polaridade.

Há registro de nucleação e crescimento de carbonato de cálcio a partir dos finos do rejeito em zonas de transição. Observam-se cristais de CaCO_3 , morfologicamente modificados, apresentados mais arredondados. A presença da goethita contribui para a redução no tamanho dos cristais formados, sobretudo em zona de transição.

Comparativamente, pode-se perceber que a presença de cristais de minério gera uma microestrutura refinada de grãos mais finos, mantendo a morfologia típica de cada um dos cristais. A portlandita foi observada em todas as amostras, com morfologia típica e, comumente muito adensada nas zonas de transição, fato que, motivado pela idade, propiciou a precipitação de carbonatos de cálcio mais refinados.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Com relação às análises comparativas das performances dos concretos ensaiados, as Figuras 33 a 50 apresentam a variedade dos ensaios e seus resultados plotados graficamente:



Figura 33 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E – 32, a/c 0,63

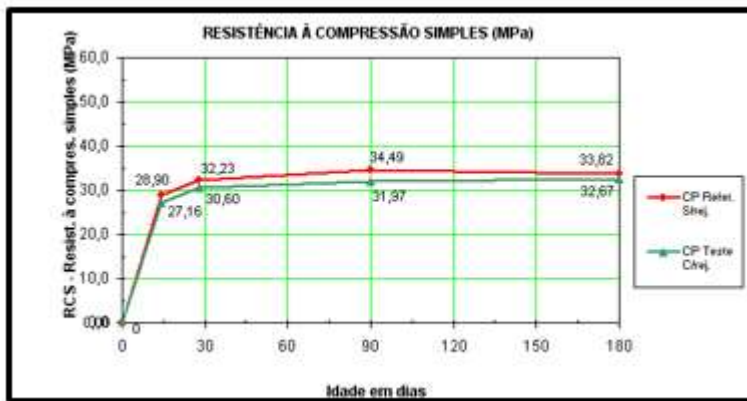


Figura 34 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

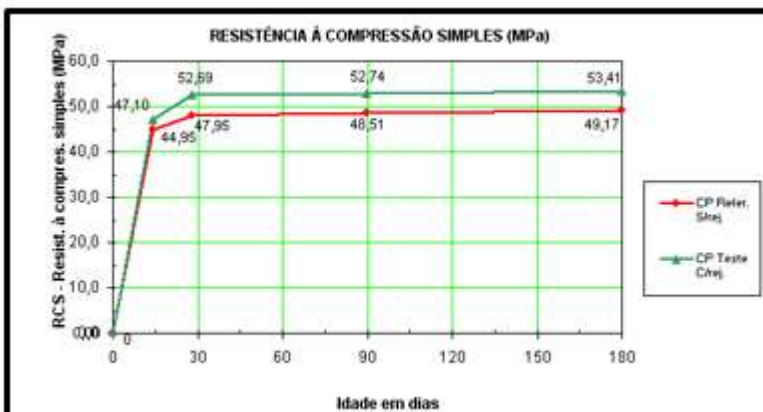


Figura 35 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

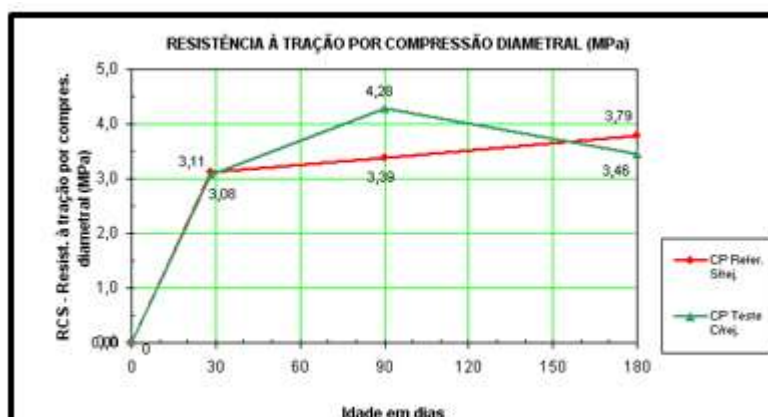


Figura 36 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63.



Figura 37 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

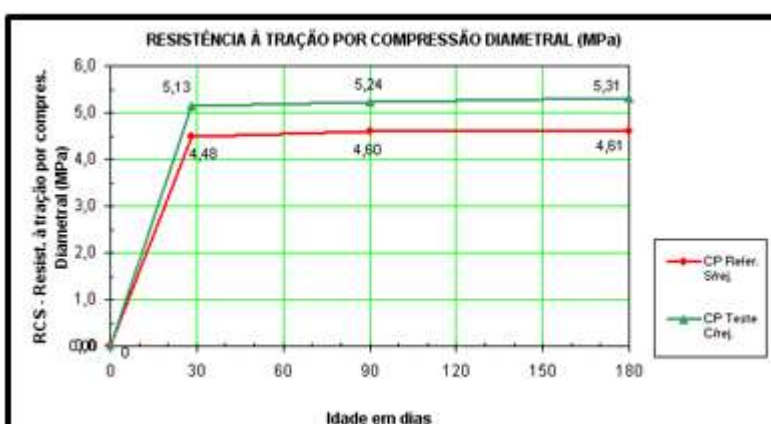


Figura 38 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

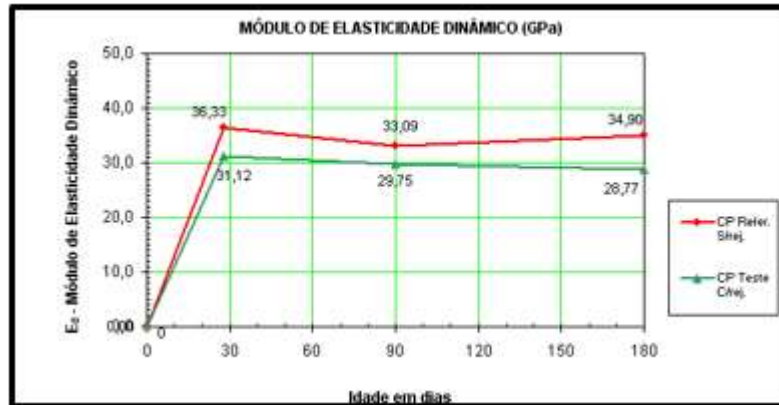


Figura 39 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63

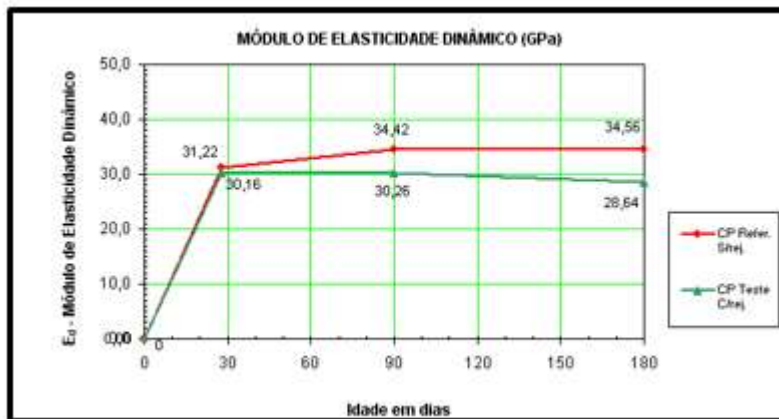


Figura 40 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63

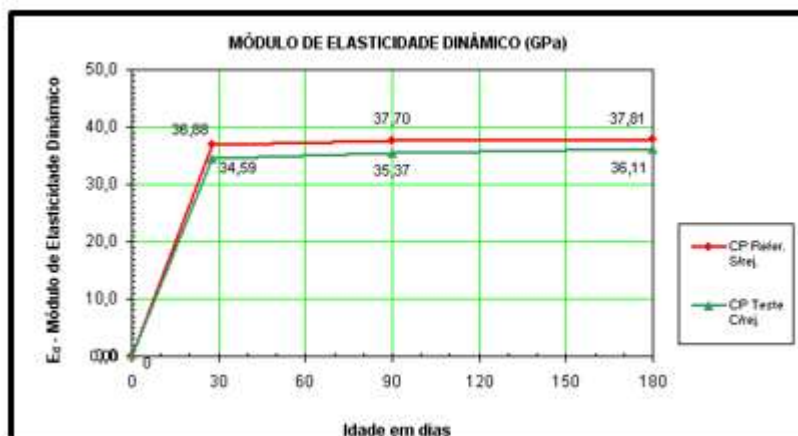


Figura 41 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

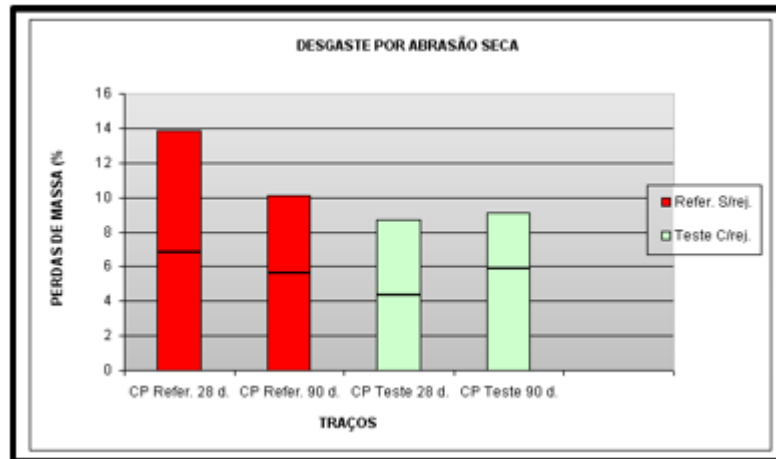


Figura 42 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de massa

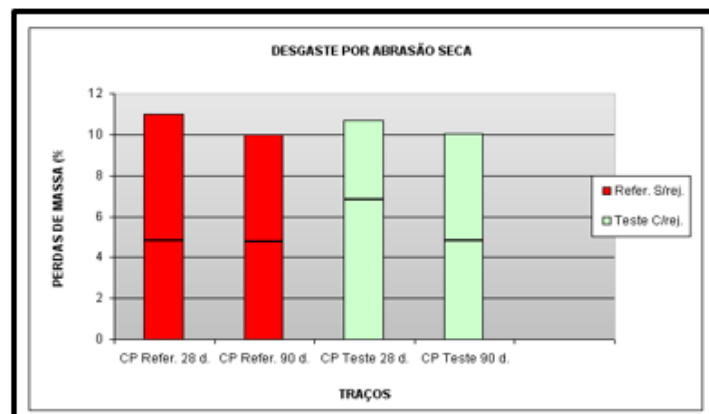


Figura 43 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de massa

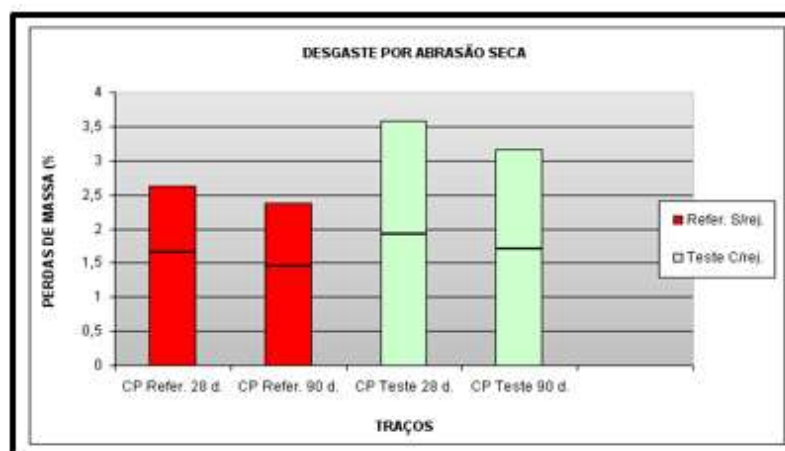


Figura 44 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 – Desgaste expresso em percentual de massa

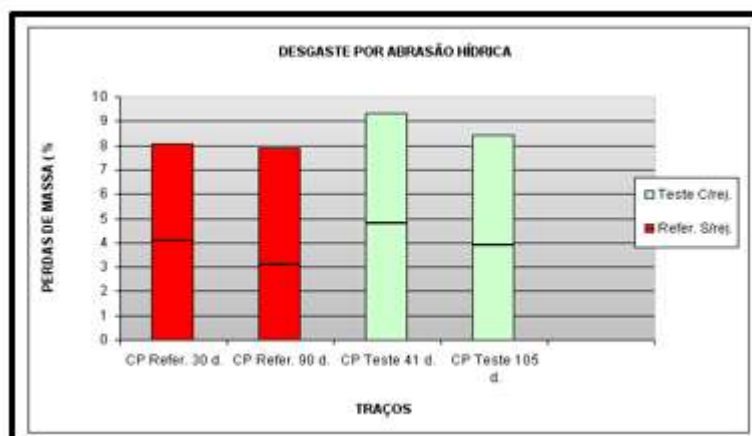


Figura 45 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

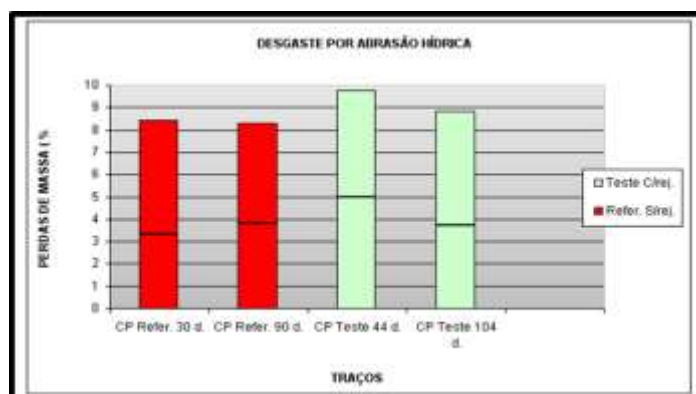


Figura 46 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II 40 RS, a/c 0,63 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

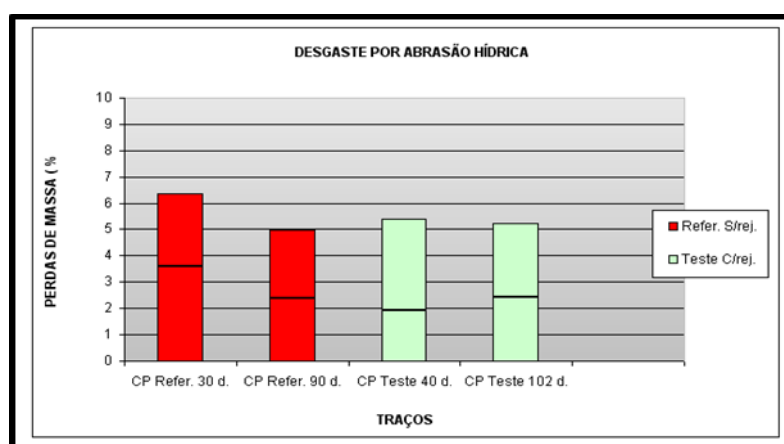


Figura 47 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 – Desgaste expresso em percentual de peso (g)

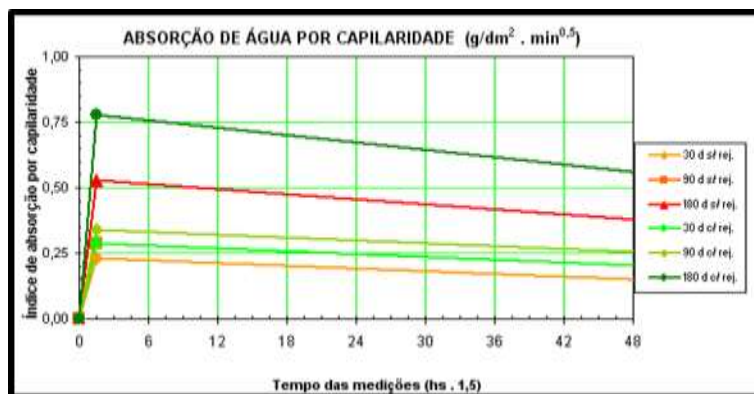


Figura 48 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63

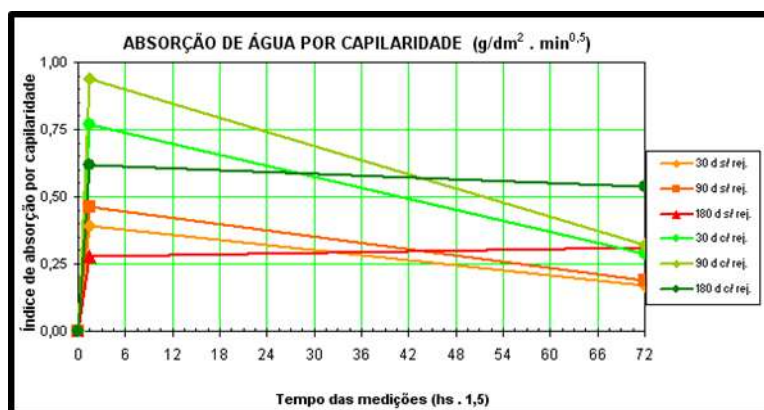


Figura 49 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63.

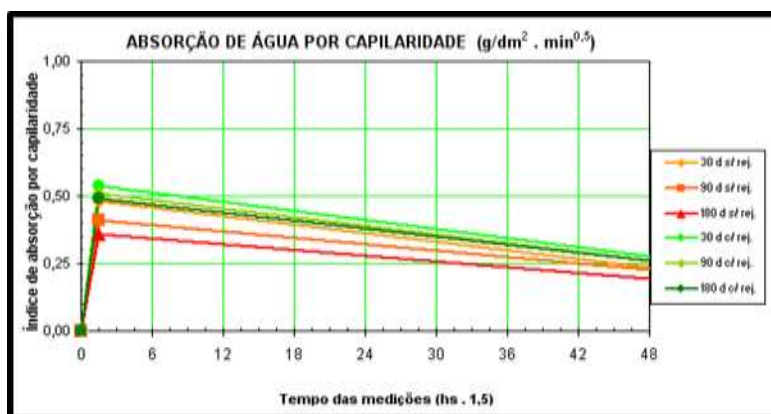


Figura 50 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52

A tabela 9 foi montada a partir dos gráficos dos resultados anteriores de cada desempenho obtido nos respectivos ensaios. Apresenta uma visão dos desvios percentuais obtidos nos concretos em estudo

(*com o rejeito*) em relação aos respectivos concretos de referência (*sem o rejeito*), propiciando uma das performances verificadas em função do emprego do rejeito de *sinter feed* como adjuvante na redução de consumo das areias naturais em traços de concreto.

Tabela 9 – Percentuais de Desempenho em relação ao traço referência, ou seja, sem rejeito

Ensaio	Traço	Condição		Desempenho	Idades (dias)						
					14	28	30	40	90	100	180
Resistência Compressão	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito		(+) = satisfatório (-) = insatisfatório	-27,5	-7			-7		-2,5
	CP 40 a/c 0,63				-6	-5			-7,5		-3,5
	CP 40 a/c 0,52				+5	+10			+9		+9
Resistência Tração	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito		(+) = satisfatório (-) = insatisfatório		-1			+26		-9,5
	CP 40 a/c 0,63					-3			-1		-0,5
	CP 40 a/c 0,52					+14,5			+14		+15
Módulo Elasticidade	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito		(+) = satisfatório (-) = insatisfatório		-14,5			-10		-17,5
	CP 40 a/c 0,63					-3,5			-12		-17
	CP 40 a/c 0,52					-6			-6		-4,5
Abrasão seca	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito		(+) =insatisfatório (-) = satisfatório		-37			-9		
	CP 40 a/c 0,63					-3			+1		
	CP 40 a/c 0,52					+36			+33		
Abrasão hídrica	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito		(+) =insatisfatório (-) = satisfatório				+15		+7	
	CP 40 a/c 0,63							+15		+6	
	CP 40 a/c 0,52							-15		+4,5	
Absorção Capilaridade	CP 32 a/c 0,63	Com Rejeito	1,5hs 72hs	(+) =insatisfatório (-) = satisfatório			+26 +45		+17 +31		+47 +50
	CP 40 a/c 0,63		1,5hs 72hs				+97 +70		+104 +68		+121 +74
	CP 40 a/c 0,52		1,5hs 72hs				+12 +27		+24 0		+36 +27

Nos ensaios físicos, são relevantes as observações detectadas na microestrutura da matriz cimentícia dos traços, constantes da descrição das Figuras 15 e 16.

De forma análoga, nos ensaios de absorção hídrica, há que se considerar a porosidade elevada do rejeito e o fato não raro de se apresentar ainda botrioidal e terrosa, constantes da descrição das Figuras 5 e 8.

Contudo, uma análise individualizada dos desvios apresentados induzirá às condutas, também específicas de dosagem dos concretos, com vistas a prevenir performances indesejáveis.

5. CONCLUSÕES

Os objetivos foram alcançados em virtude da especificidade e da amplitude da pesquisa desenvolvida. Os aspectos relativos à microestrutura das matrizes cimentícias analisadas, sua tipologia e morfologia, bem como os resultados dos ensaios realizados, foram suficientes para serem colimados nas seguintes observações:

- A microestrutura da interface pasta/agregado da argamassa e dos concretos estudados, particularmente, aquelas nas quais se registra o emprego do rejeito de *sinter feed*, apresenta as fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, apresentando certo atrofiamento em sua morfologia clássica, diferente da exuberância observada na vasta bibliografia e trabalhos conhecidos.
- O emprego do rejeito de *sinter feed* como agregado nos concretos de consistência plástica, com vistas à melhoria de seu desempenho na abrasão hídrica, carece de avaliação mais ampla, inclusive, quanto à caracterização específica e escolha do rejeito de *sinter feed* empregado (incidência das variedades conhecidas do mineral goethita).
- Técnicas, procedimentos e experimentação de dosagem dos concretos podem compensar fragilidades do agregado rejeito de *sinter feed*, devido as ocorrências da goethita terrosa e sua porosidade.
- É viável o emprego do rejeito de *sinter feed* como coadjuvante integrante das mesclas dos agregados na produção de concretos, em circunstâncias e finalidades específicas, não apenas em função dos desempenhos observados, mas, principalmente, pelas conveniências ecológicas e de sustentabilidade que o seu emprego propicia.
- O emprego do rejeito de *sinter feed* em estruturas convencionais de edificações (pilares, vigas e lajes), ou ainda alvenarias sobre estas estruturas, pela própria característica de peso do agregado, pode não se mostrar interessante uma vez que demandaria acréscimos no dimensionamento estrutural das mesmas. Uma avaliação que envolva aspectos de custo envolvidos tornar-se-á pertinente.
- Como conclusão final deste trabalho fica viabilizado, com o devido cuidado, o uso e emprego do rejeito de *sinter feed* na produção de concretos convencionais (f_{ck} até 30MPa).

REFERÊNCIAS

- [1] BOSCOV, M. E. G. Geotecnia Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p.185-207.
- [2] BRASIL. Lei 12.305. 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, 03 de agosto de 2010.
- [3] COSTA, A. V. Utilização do Rejeito de Sinter Feed como Agregado na Produção de Peças de Concreto para Pavimentação. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil] – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [4] COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v.7, n.2. p.228-259, 2014.
- [5] ASTM C 1138 M. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. Disponível em: www.astm.org. Acesso em: 30ago.2022.
- [6] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 1987
- [7] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ORCID

Ayrton Vianna Costa <https://orcid.org/0000-0002-2316-9795>

Paulo Roberto Gomes Brandão <https://orcid.org/0000-0002-5893-1073>

Capítulo 2



10.37423/240308771

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE UM NOVO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES

Maria Eduarda Rodrigues Muniz

Universidade Estadual do Paraná

Nayanna Cristina Cabral dos Santos

Universidade Estadual do Paraná

Durval Henrique Bubola da Silva

Universidade Estadual do Paraná



Resumo: Os custos com energia elétrica no setor industrial representam grande parcela do desembolso mensal de uma organização. Nesse sentido, estratégias em tentar reduzir esse custo e ganhar eficiência no ambiente pode ser um caminho interessante. Portanto, este estudo, teve como objetivo desenvolver uma análise econômica de um novo projeto de iluminação em três setores de uma fábrica de fertilizantes localizada em Paranaguá/PR. Inicialmente, foi realizado um comparativo do investimento necessário para cada sistema disponível, apresentando os custos de implementação, bem como os custos de manutenção e de consumo elétrico. Os dados necessários para aplicação foram coletados em campo através de entrevistas para realizar o levantamento. O estudo aplicou os seguintes indicadores: valor presente líquido, índice de lucratividade, *payback*, e custo anual uniforme. O projeto resultou uma viabilidade econômica positiva de optar pelo novo sistema. Os resultados mostram que a soma dos valores presentes supera o investimento inicial, obtendo uma taxa interna de retorno de 1%, e um índice de lucratividade de 112%. O *payback* resultou que o retorno do investimento ocorrerá em pouco mais de 5 anos. Dessa forma, o projeto de instalação pode resultar em contribuições significativas, tais como, redução nos custos de energia elétrica mensal; eficiência energética para a fábrica pelo uso de lâmpadas de LED; economia em manutenção elétrica; melhoria do ambiente de trabalho levando em conta aspectos da ergonomia; potencial aumento da produtividade, devido a iluminação; redução de potenciais impactos ambientais pelo descarte das lâmpadas incandescentes; e redução do consumo de eletricidade.

Palavras-chave: viabilidade econômica; lâmpadas de LED; eficiência energética; energia elétrica; sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A participação dos insumos energéticos no custo de produção industrial, que representa mais de um terço dos custos diretos, torna a indústria sensível ao preço e à estabilidade do suprimento de energia elétrica. A falta de modernização regulatória no setor, a elevada carga tributária, os encargos setoriais e o alto custo dos subsídios embutidos na Conta de Desenvolvimento Energético, são entraves para alcançarmos a eficiência energética. (Confederação Nacional da Indústria, 2023).

Nesse aspecto, a ecoeficiência busca incorporar a eficiência ambiental em uma análise de eficiência e produtividade tradicional, sendo a interação entre os impactos ambientais e a teoria microeconômica da produção (Silva et al., 2022; Moreno et al., 2020). O conceito de ecoeficiência foi introduzido e amplamente reconhecido pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) em 1992. Ele reúne os aspectos econômicos e ambientais necessários para promover a prosperidade econômica, usar os recursos de forma mais eficiente e reduzir as emissões ao meio ambiente.

Existe um processo de análise de impacto ambiental que tem o objetivo de identificar, prever e avaliar os efeitos de uma atividade humana proposta sobre o meio ambiente, sendo assim, pode ser considerada um instrumento efetivo no gerenciamento de planos. Podendo ser usada para detectar o tipo, tamanho e as possíveis mudanças no ambiente causadas por atividades ou negócios (Toro et al., 2012).

Pode-se afirmar que a energia elétrica é um bem primordial para a sociedade, pois trouxe com ela transformações importantes e permanentes. É, portanto, um bem de grande importância para o desenvolvimento social e econômico de um país (Masaro, 2016). Diante dos custos gerados pela energia elétrica dentro das grandes indústrias, é de suma importância analisar toda e qualquer possibilidade de alternativas que possam reduzir esse consumo em seus sistemas de iluminação (Polonskii e Seidel, 2008). Muitas organizações e residências ainda utilizam as lâmpadas de vapor de sódio convencionais, que possuem diversos pontos negativos, como o impacto causado pelo descarte inadequado dos tubos ao final de sua vida útil, visto que, o mercúrio utilizado na fabricação dessas lâmpadas é um metal pesado e altamente tóxico (Fiocruz, 2011).

No ambiente da temática deste trabalho, alguns estudos estão estabelecidos na literatura. Pereira et al. (2020) realizou uma proposta de diminuição do consumo de energia elétrica e redução dos impactos ambientais através da análise de viabilidade de substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED em um supermercado. Cordeiro (2023) analisou a viabilidade econômica de uma

parceria público-privada de iluminação pública em LED na cidade de Porto Alegre/RS. Além deste, Ferreira (2018) examinou a viabilidade econômica da adoção de LED e sistemas fotovoltaicos na iluminação pública da Praça do Viva Angelim, em São Luis/MA. Outro trabalho realizado por Lima (2013) na cidade de Curitiba, realizou um comparativo entre as lâmpadas de LED e lâmpadas comuns, e considerou a viabilidade econômica entre elas. Ucker et al. (2023) tratou da avaliação da eficiência energética, econômica e ambiental da substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas de LED em uma instituição de ensino.

Diante do cenário atual das tecnologias que vem surgindo como opção sustentável e econômica para as indústrias, este estudo contribui para solucionar um problema real do setor produtivo, ou seja, a baixa qualidade da iluminação, a baixa eficiência, e a redução dos custos mensais com energia elétrica em uma indústria localizada na cidade de Paranaguá/PR. Este estudo tem o foco em desenvolver uma pesquisa quali-quantitativa, e faz uso da ferramenta do Microsoft Excel para realizar a aplicação de indicadores de análise da viabilidade econômica, mostrando o lucro, e em quanto tempo terá retorno do investimento inicial (*payback*) realizado na implantação de um novo sistema de iluminação em três áreas industriais. O setor de atuação do estudo de caso refere-se a uma fábrica de fertilizantes agrícolas.

Dado esse panorama, o objetivo geral deste estudo é: Desenvolver uma análise econômica de um novo projeto de iluminação em três setores de uma fábrica de fertilizantes localizada em Paranaguá/PR. Os objetivos específicos são: (i) Realizar uma análise na literatura sobre a temática de projeto de iluminação com lâmpadas LED em ambientes industriais a partir de uma análise econômica e ambiental; (ii) Desenvolver uma análise econômica associados à implementação do sistema de iluminação com lâmpadas LED em uma fábrica de fertilizantes localizada em Paranaguá/PR; (iii) Realizar um estudo de iluminação em três setores de uma fábrica de fertilizantes localizada em Paranaguá/PR; (iv) Entregar um relatório técnico, com um estudo de eficiência energética para o gerente da unidade.

Além disso, este estudo está vinculado a área de Engenharia Econômica, uma das dez áreas da ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção, pois a área envolve as análises referente aos custos associados a um investimento (ABEPRO, 2023). Isso inclui custos iniciais, custos operacionais, custos de manutenção, tempo de retorno do investimento, valores presentes e valores futuros. Portanto, entender e quantificar esses custos é essencial para avaliar a viabilidade econômica do projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPORTÂNCIA DAS LÂMPADAS DE LED NO AMBIENTE INDUSTRIAL

A utilização do LED (*Light Emitting Diode* - Diodos Emissores de Luz) na indústria apesar de possuir um custo inicial mais elevado, consegue ser justificada pela economia que esse sistema de iluminação proporciona pela tecnologia dos (LED) os quais podem ser até 82% mais econômicos que uma lâmpada incandescente (Santos, 2015). Com isso, é evidente que as lâmpadas LEDs não são alternativas viáveis somente as residências, pois no setor industrial ela pode ser fator determinante na busca por um desenvolvimento mais sustentável.

Portanto, o LED, é um diodo emissor de luz, de alta durabilidade e eficiência energética, é um tipo de diodo semicondutor em estado sólido, sua luz é produzida dentro de um chip cujo tamanho é inferior a 0,25 mm². Este chip é um cristal também em estado sólido (Lopes, 2014).

A busca pela eficiência energética no Brasil, se estiver investindo em fontes renováveis, está se alinhando com os compromissos globais de redução de emissões de carbono e combate às mudanças climáticas, pois o aumento do consumo de energia, se proveniente de fontes limpas, contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de energia, com isso espera-se que o consumo de energia per capita no Brasil aumente em 18% de 2019 a 2029. O país já produz uma grande parcela de sua eletricidade a partir de fontes renováveis de energia (ANEEL, 2023).

Com o crescente nível de consciência da população em relação ao consumo de energia e a busca por sua redução, a tecnologia de iluminação LED experimentou uma expansão significativa. Essa tecnologia tornou-se uma fonte luminosa eficiente e econômica (Rodrigues, 2012). Um estudo realizado em 2008 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos comprovou que o sistema LED consegue ser mais efetivo que as de vapor de sódio, pois mesmo que as quantidades de lumens por metro quadrado (lux) do LED serem numericamente inferiores, o resultado obtido da iluminação é igual ou superior a do vapor de sódio, devido a sensibilidade humana aos comprimentos de ondas de luz. Contudo, foi comprovado que a percepção maior se dá devido aos dois tipos de células que o ser humano possui, uma chama de Bastonetes, responsável pela visão noturna (escotópica) e outra chamada de Cones, responsável pela visão diurna (fototópica). Dessa maneira, o estudo mostra que a lâmpada de vapor de sódio demonstra sua ineficiência em ambientes noturnos, pois seus comprimentos de onda não conseguem cobrir a área total de escotópica necessária. (Admin 2019)

2.2 PERSPECTIVA ECONÔMICA DE PROJETOS DE ILUMINAÇÃO EM FÁBRICAS

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019) destaca o uso da eletricidade como de extrema importância na indústria nacional, e que o consumo de energia na indústria é influenciado pelo aumento das atividades, por isso é necessário a aplicação da eficiência energética e mudanças na estrutura econômica a fim de reduzir o consumo.

Há um estudo de plano de expansão de energia publicado pela EPE, que afirma que os segmentos como alumínio, pelletização e fertilizantes se destacam pela expectativa de crescimento de atividade através de retomada da utilização da capacidade instalada, além de celulose e da cadeia siderúrgica com expectativas de adições de capacidade. Através do estudo é possível identificar que o aprimoramento das políticas existentes e a aplicação dos novos mecanismos propostos, estima-se que a eficiência do setor industrial poderia aumentar cerca de 2%, equivalente a 3 milhões de tep em 2031 (energia total) e 10 TWh (energia elétrica). Portanto, as indústrias que adotam práticas eficientes em termos de energia muitas vezes se tornam mais competitivas no mercado ao longo do tempo, resultando em ganhos de produtividade e até mesmo em vantagens competitivas no mercado.

Um estudo realizado por Salomão (2010) criou uma metodologia para análise de projetos luminotécnicos em indústrias, voltado à eficiência energética com o objetivo de avaliar alternativas para sistemas de iluminação em plantas industriais, que visa orientar a escolha do sistema de iluminação mais eficiente considerando todos os aspectos técnicos e econômicos, de forma que se adeque a realidade de cada empresa. Visto que este estudo foi realizado há mais de 10 anos, observa-se que em seus resultados os sistemas em LED ainda não eram tão implementados e apresentavam diversas limitações, sendo assim, possível observar a evolução dos sistemas de iluminação ao longo dos anos e a relevância que estes estudos possuem para a indústria.

Um trabalho realizado por Santos (2021) também voltado para análise de eficiência energética, aplicou indicadores econômicos para descobrir a viabilidade econômica de um novo projeto de iluminação em uma indústria de produtos de limpeza. O estudo utilizou-se dos mesmos métodos e indicadores proposto neste presente artigo. Diante dos resultados no trabalho, evidenciou-se que a utilização das lâmpadas LED na iluminação da indústria traz consigo uma ótima eficiência energética se comparada a instalação atual demonstrada no estudo, tendo uma redução de 65,20% no consumo anual de energia.

2.3 INDICADORES DE ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Diferentes tipos de indicadores de viabilidade econômica podem ser utilizados de acordo com as características de cada projeto. Neste estudo, que objetiva analisar a viabilidade econômica financeira de um novo sistema de iluminação em LED, foram aplicados o valor presente líquido, a taxa interna de retorno, índice de lucratividade, payback e custo anual uniforme.

2.3.1 VALOR PRESENTE LÍQUIDO E TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE:

O valor presente líquido (VPL) leva em consideração o valor do dinheiro no tempo, utilizando técnicas que descontam os fluxos de caixa, aplicado sobre uma taxa mínima de atratividade (TMA), que representa o retorno mínimo necessário para um projeto ser considerado viável. (Silva e Janni, 2021).

2.3.2 TAXA INTERNA DE RETORNO E ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE:

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa que faz com que o valor presente das receitas seja igual ao valor presente dos custos ou despesas de um projeto, sendo assim, é a taxa no qual o valor presente líquido é igual a zero, ou seja, é o ponto em que o retorno esperado se iguala ao custo do capital investido. Representando a atratividade do investimento (Silva e Janni, 2021).

O índice de lucratividade é um indicador que oferece uma medida em percentual, indicando se a empresa recebeu valores monetários o suficiente para cobrir o investimento inicial, determinando o lucro previsto em um determinado período (SEBRAE, 2022).

2.3.3 PAYBACK E CUSTO ANUAL UNIFORME:

O *payback* representa o tempo necessário para que a empresa recupere o investimento inicial realizado em um projeto com base em fluxos de caixa recebidos, sendo encontrado o valor do *payback* a partir das entradas somadas até o período em que o valor começa a ser positivo, recuperando o investimento (Silva e Janni, 2021).

3. MÉTODOS

Foi utilizado um estudo de caso em uma indústria localizada em Paranaguá/PR, onde o sistema atual está instalado, realizado através de entrevista, coletando dados desse sistema, características do ambiente de iluminação e os custos associados. Paralelamente, estabeleceu-se o contato com a empresa de eletricidade encarregada da implementação da nova tecnologia, para obter informações detalhadas sobre os custos de aquisição e instalação das lâmpadas LED, assim como os padrões de

consumo elétrico esperados. A coleta dos dados elétricos e custos da implementação foi realizada por meio de entrevistas online e também e inspeções em campo nas áreas da empresa.

A análise quantitativa financeira baseou-se na utilização de indicadores na ferramenta do Microsoft Excel, considerando custos iniciais, economias operacionais e tempo de retorno do investimento. A metodologia integrativa e abrangente permitiu uma avaliação holística da viabilidade econômica da transição, garantindo a robustez e a confiabilidade dos resultados apresentados.

3.1 BREVE ANÁLISE DA LITERATURA

Para a realização da análise de literatura, foi feita a busca por artigos científicos nas bases de dados do Google Acadêmico e Scopus utilizando algumas palavras-chaves, como “eficiência energética”, “viabilidade econômica”, “*payback*”, “taxa interna de retorno”, “índice de lucratividade”, “valor presente”, “valor presente líquido”, “lâmpadas de LED”, “sistema de iluminação”, “indústria de fertilizantes”, e termos relacionados. Posteriormente realizou-se a leitura dos principais documentos encontrados que estavam relacionados com a temática deste estudo. Além disso, foram realizadas buscas externas a documentos científicos, a fim de aprofundar a teoria sobre o tema.

3.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA EMPRESA DE FERTILIZANTES

A empresa em estudo trata-se de uma misturadora de fertilizantes de grande porte, localizada em Paranaguá/PR. A organização atua no contexto global nos processos de processamento, armazenamento e transportador. No Brasil, opera em mais de 60 unidades industriais e logísticas, empregando aproximadamente 11 mil pessoas. Neste caso, a unidade em estudo é industrial, e lida com o produto fertilizante. Nela são realizadas todo o processo produtivo, desde o recebimento do pedido, mistura do produto, armazenamento e distribuição.

A Figura 1 representa a planta da empresa onde é possível ter uma visão geral da organização, separadas por cores e legendas. Na área em amarelo estão localizados os estruturados e os *box* que servem como armazenamento de matérias-primas que são recebidas.

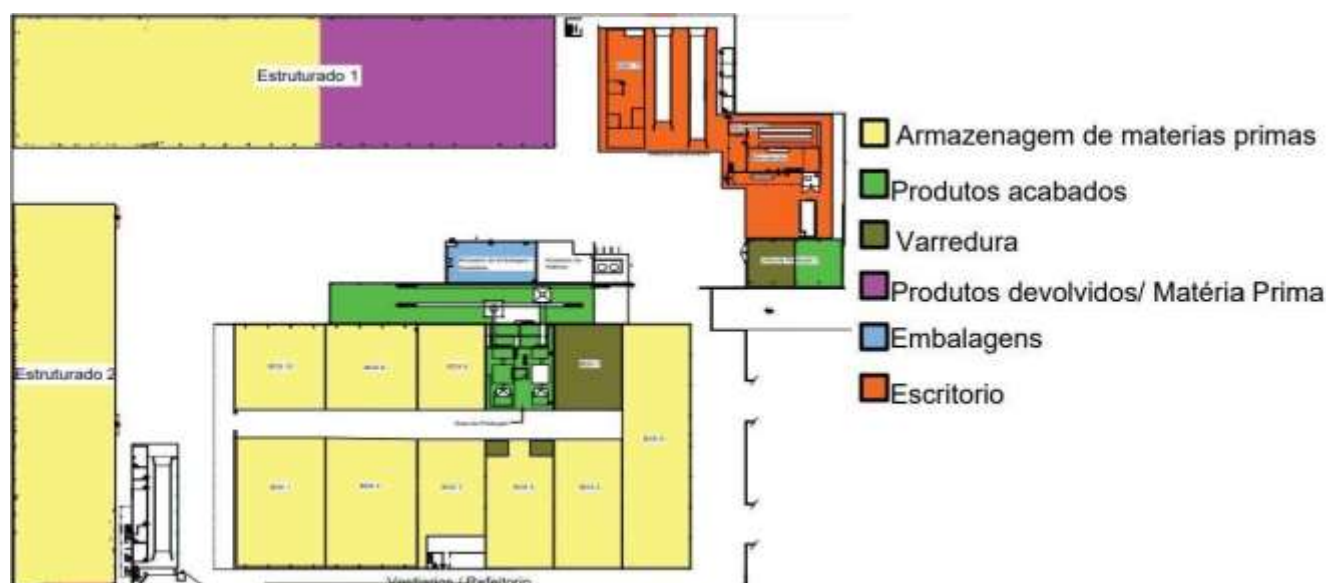


Figura 1. Planta da empresa de fertilizantes em Paranaguá - uma visão geral

Nota: Documento particular da empresa

Em verde bandeira, encontra-se os produtos acabados, que são as misturas de fertilizantes localizados no maquinário e nas linhas de produção/carregamento. No verde musgo, é o setor de varredura, onde ficam os restos de fertilizantes que por algum motivo foram contaminados e não podem mais ser utilizados. Em roxo, são os produtos devolvidos, sendo fertilizantes avariados impróprios para venda. Em azul, uma pequena área do setor de embalagens e que fica localizada a qualidade da empresa, onde são realizados os testes e armazenadas os sacos de bags para envazar o fertilizante. Logo ao lado, temos em branco o armazém de aditivos, onde ficam os totens de óleo que servem para realizar a mistura dos produtos, caso haja necessidade. Em laranja, encontram-se os escritórios, contendo o prédio administrativo; as balanças rodoviárias, onde ocorre a passagem de entrada e saída dos caminhões; o almoxarifado onde ficam as peças e materiais necessários para o funcionamento da fábrica; e, a manutenção, onde se encontra a oficina que serve como espaço para realizar serviços mecânicos e elétricos, bem como armazenar equipamentos da equipe. Por fim, nos entornos os vestiários e o refeitório.

3.3 COLETA DE DADOS

Os locais onde foram coletados os dados referentes a iluminação são divididos em três ambientes. Os ambientes possuem iluminações em lâmpadas de vapor de sódio, um sistema de iluminação antigo, que não oferece uma boa iluminação, e são considerados ineficientes em termos de consumo de energia elétrica, pois convertem uma quantidade significativa de energia em calor, o que não é

eficiente em termos de iluminação, especialmente em área industrial onde a iluminação é essencial e o consumo de energia pode ser alto

Além disso, essas lâmpadas têm uma vida útil mais curta do que as lâmpadas de LED, o que resulta em mais manutenção e custos operacionais mais elevados a longo prazo, além de emitir uma luz de baixa qualidade, com uma tonalidade amarelada que pode distorcer as cores e reduzir a clareza visual, podendo dificultar a realização das tarefas rotineiras, aumentando o cansaço visual e ficando suscetível a erros.

O primeiro local é a área fabril. Nesse ambiente, encontra-se os dois maquinários que são responsáveis por realizar a mistura das matérias primas antes de serem enviadas ao cliente. No segundo local, as linhas de carregamento, onde os caminhões se concentram para receberem os produtos de acordo com cada pedido. O terceiro local de coleta é o armazém, onde possui a maior quantidade de lâmpadas a serem substituídas. Neste local, são armazenados os produtos (fertilizantes) que recebem dos navios.

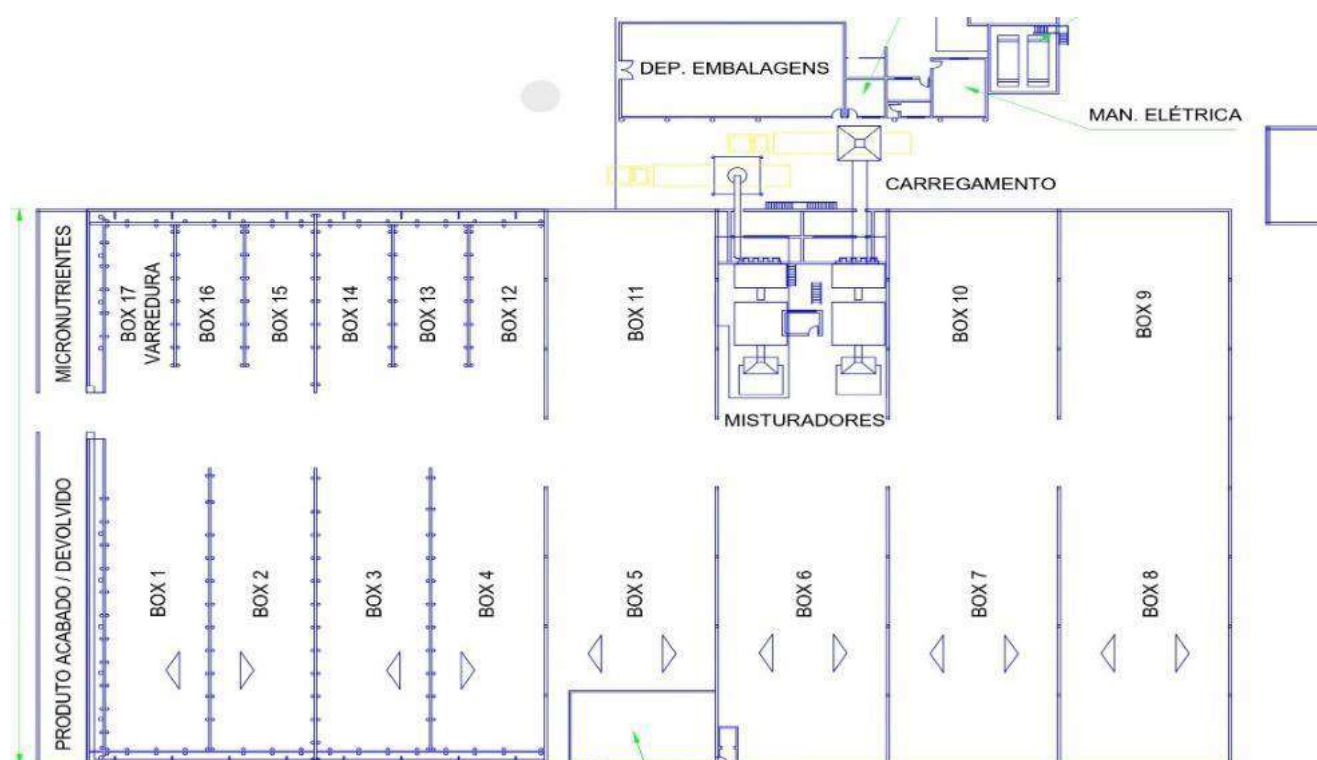


Figura 2. Planta das três áreas da empresa (armazém)

Nota: Documento particular da empresa

Nessa área está localizada os maquinários da indústria. Nele encontra-se diversos equipamentos que o compõe, como elevadores de canecas, correia transportadora, silos de dosagem, peneiras

vibratórias etc. A Figura 3 apresenta lâmpada de vapor de sódio localizada na área fabril próximo ao maquinário da empresa, local de circulação e passagem dos operários.

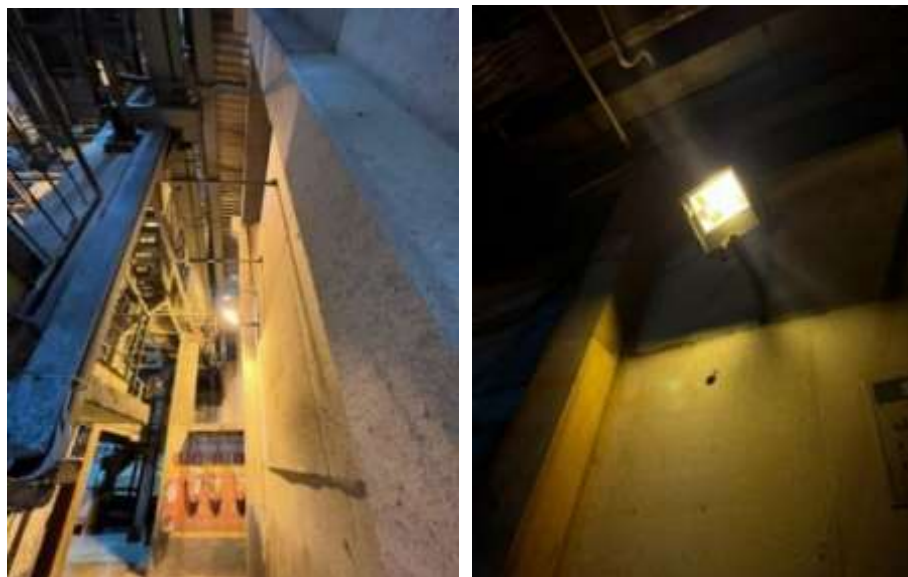


Figura 3. Lâmpadas da área fabril.

Nota: Autoria própria

A linha de carregamento possui duas linhas, chamadas de L1 e L2. Em ambas ocorrem todo o processo que os operadores realizam de colocar o produto dentro dos sacos de *bag*, conferir pedido e alocar dentro dos caminhões. Na sequência, o motorista é liberado para seguir viagem e realizar entrega dos pedidos. A Figura 4 apresenta as lâmpadas localizadas nas linhas que facilitam o trabalho noturno ou em dias de chuva.



Figura 4. Lâmpadas da linha de carregamento.

Nota: Autoria própria

O armazém possui 10 *box* separados, onde são armazenados todo o produto acabado recebido. A fábrica opera em turno diurno, porém existem processos no período noturno, sendo necessária uma boa iluminação em todas as áreas, principalmente no armazém. 6 dos 12 *box* possuem as duas lâmpadas de vapor sódio em cada, responsáveis por iluminar os demais boxes que ficam a sua frente. A Figura 5 mostra as lâmpadas do armazém, sendo que no primeiro *box* a imagem foi captada durante o dia, e no segundo *box* a imagem mostra a iluminação da lâmpada de vapor de sódio ligada durante a noite.



Figura 5. Lâmpadas do armazém

Nota: Autoria própria

3.4 COLETA DE DADOS NA EMPRESA DE FERTILIZANTES

Para a coleta de dados foi construída uma ficha a partir de pesquisas realizadas nos estudos encontrados e através de conversas com um eletricista da unidade, que reforçou as informações que poderiam ser encontradas durante o levantamento e quais as relevâncias de cada uma delas. O formato da coleta de dados foi desenvolvido através de uma entrevista com o responsável da manutenção para o levantamento da instalação atual. Os conteúdos da entrevista foram: dados elétricos e custos da instalação atual (potência total instalada, custos de manutenção, custo de iluminação etc.).

3.5 COLETA DE DADOS EM EMPRESAS DE SERVIÇOS DE ELETRICIDADE

A ficha de coleta de dados foi construída a partir de pesquisas realizadas nos estudos encontrados na análise da literatura realizada. A partir dos dados, foi possível identificar quais informações seriam

necessárias coletar para realizar a análise e aplicar o método escolhido para a análise da viabilidade econômica. O formato da coleta de dados foi desenvolvido através de uma entrevista com o responsável da manutenção para o levantamento da instalação atual. Os conteúdos da entrevista foram: dados elétricos, e investimento total (custos por LED, custo de mão de obra, custos de manutenção, garantia, frete etc.).

Para coletar os dados, foi realizado uma entrevista com o responsável pela empresa de fertilizantes e o responsável pela empresa de eletricidade. O método de pesquisa foi estruturado em quatro seções: (i) Escopo da pesquisa, (ii) Coleta de dados, (iii) Análise de dados, e (iv) Interpretação dos resultados. As fichas de coleta estão anexadas no Apêndice – A no final deste estudo.

3.5.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA: INDICADORES APLICADOS

A fim de realizar a análise econômica, foi definido quais os métodos seriam utilizados. Inicialmente, foi identificado as premissas para aplicação: investimento inicial, taxa mínima de atratividade (ao mês), e número de períodos (em meses). Na sequência, foi realizado o fluxo de caixa mensal da econômica gerada com a troca do sistema de iluminação, seguido da utilização da fórmula de valor presente, e valor presente líquido. Após a criação da tabela com os resultados, foi realizado a soma dos valores, seguido da aplicação da fórmula de taxa interna de retorno, índice de lucratividade, *payback*, e custo anual uniforme.

Durante o levantamento dos custos para a aplicação do sistema de iluminação em LED, também foi possível obter os dados dos custos de um novo sistema das lâmpadas já existentes. Dessa forma, foi possível encontrar a diferença de custo entre os dois sistemas e realizar uma segunda análise com base nessa diferença, utilizando os mesmos indicadores da primeira análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresenta os resultados obtidos, fornecendo uma base sólida para a discussão dos impactos econômicos da transição proposta e perspectiva sustentável para esse projeto, com base em fatores da sustentabilidade.

4.1 ILUMINAÇÃO CONVENCIONAL DA EMPRESA DE FERTILIZANTES

Inicialmente, foram coletados os dados referentes a quantidade e potência das lâmpadas de vapor (lâmpadas convencionais) encontradas nos ambientes da fábrica. Através desses dados, foi possível realizar os cálculos dos custos mensais e de manutenção, além de identificar as despesas totais que a

fábrica possui com esse sistema de iluminação. A Tabela 1 mostra o levantamento obtido na empresa referente ao tipo e quantidade de lâmpadas em cada área fabril.

Tabela 1 - Resumo do sistema de iluminação atual das áreas da fábrica

Levantamento do sistema de iluminação convencional instalado					
Local	Tipo da lâmpada	Quantidade	Dias da semana	Horas na ponta ou gerador	Horas fora de Ponta
Área fabril	Vapor sódio 250w	8	6	3	12
Armazém	Vapor sódio 1000w	13	6	3	12
Linha de carregamento	Vapor de sódio 400w	10	6	3	12
Total Geral		31			

Nota: Autoria própria

A empresa possui uma distribuição de potências entre as lâmpadas de vapor de sódio nos três ambientes de estudo, sendo um total de 13 lâmpadas de 1000W no armazém, 10 lâmpadas de 400W na linha de carregamento, e 8 lâmpadas de 250W na área fabril. Além disso, a Tabela 1 apresenta os custos de manutenção referente as respectivas áreas do estudo da empresa.

Tabela 2 - Especificações dos custos mensais com manutenção

Cálculo de custo de manutenção no sistema de iluminação							
Tipo de lâmpada	Quantidade	Trocas por mês	Custo das Lâmpadas	Custo Reator	Perda Reator	% Trocas Ano	Manutenção mensal
Vapor de sódio. 1000W	13	0,22	R\$ 840,00	R\$ 650,00	0,2	0,2	R\$ 1.297,83
Vapor de sódio. 400W	8	0,13	R\$ 250,00	R\$160,00	0,2	0,2	R\$ 654,67
Vapor de sódio. 250W	10	0,17	R\$ 264,00	R\$ 264,00	0,2	0,2	R\$ 838,00
Total							R\$ 2.790,50

Nota: Autoria própria

Foi realizado um levantamento dos custos mensais de manutenção, pois é um ponto relevante na hora de avaliar se a troca do sistema será viável para a empresa. Os resultados revelam um custo total mensal de manutenção, incluindo a lâmpada, o reator e a troca, que atinge o valor R\$2.790,50. Esses valores mostram a importância de considerar não apenas a eficiência energética, mas também os custos associados à manutenção ao avaliar o sistema de iluminação dos ambientes.

Com a coleta de dados na empresa de fertilizantes, obtivemos informações referentes a instalação atual e as utilizamos para conseguir apresentar um sistema mais econômico e eficiente. Portanto, a próxima seção apresenta uma proposta para a substituição das lâmpadas convencionais para as de LED.

4.2 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO PARA O NOVO SISTEMA

Conforme a entrevista realizada na coleta de dados com a empresa que pode ser a responsável pela possível troca do sistema de iluminação, obteve-se as informações necessárias para realizar o estudo de viabilidade econômica para este estudo. A Tabela 3 apresenta o orçamento realizado pela empresa que poderá prestar o serviço de instalação do novo sistema de iluminação.

Tabela 3 - Proposta da empresa prestadora de serviço para a substituição do sistema elétrico

Custos da implantação	
Preço fornecido pela empresa de eletricidade: (materiais + mão de obra)	R\$ 140.220,00
Preço fornecido direto: (fábrica, refletores x Empresa de Fertilizantes)	R\$ 68.407,00
Preço final: (materiais + mão de obra)	R\$ 208.627,00
Horário de trabalho:	Segunda a Sábado das 08:00 às 12:00 / 13:00 as 18:00
Prazo de execução:	30 dias
Incluso:	Imposto, alimentação, transporte + Plataforma elevatória

Nota: Autoria própria

Na parte interna do armazém, propõe-se a instalação de 23 refletores de 300 Watts e 5 refletores de 200 Watts na área de circulação de máquinas e caminhões, todos com temperatura de cor de 4000K. Na linha de carregamento, sugere-se a substituição de refletores de vapor por 10 refletores de 200 Watts e 1 refletor de 300 Watts, todos com temperatura de cor de 5000K. Para a área fabril, propõe-se a substituição de refletores de vapor por 7 refletores de 150 Watts, com temperatura de cor de 5000K.

4.3 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO PARA LÂMPADAS DE LED

Essa seção apresenta a nova proposta de instalação e as quantidades de lâmpadas de LEDs necessárias para uma boa iluminação nas respectivas áreas em estudo, sendo assim na área fabril haverá 7 lâmpadas de LED de 150W, no armazém serão instaladas 24 lâmpadas de LED de 300W, e na linha de

carregamento 16 lâmpadas de LED de 200W, totalizando 47 lâmpadas instaladas. A Tabela 4 mostra detalhadamente este levantamento.

Tabela 4 - Resumo do levantamento do novo sistema em led

Proposta do novo sistema de iluminação em LED					
Local	Equivalente Led	Quantidade	Dias Semana	Horas Ponta	Horas F. Ponta
Armazém	Industrial sobrepor 300w	24	6	3	12
Linha de carregamento	Industrial sobrepor 200w	16	6	3	12
Área fabril	Industrial sobrepor 150w	7	6	3	12
Total Geral		47			

Nota: Autoria própria

A Tabela 5 representa a projeção do novo sistema de iluminação em LED, contendo os dados elétricos após a instalação, mostrando os dados que a empresa obterá após a implantação do novo sistema de iluminação, e compara os dois sistemas de iluminação, o atual e o novo, demonstrando os dados do consumo de eletricidade e os custos totais mensais.

Tabela 5 - Dados elétricos e custos das lâmpadas de LED após implantação do sistema comparando com o antigo sistema

Projeção da possível troca do sistema de iluminação em LED comparando com o sistema convencional					
Dados elétricos			Dados elétricos		
LED			Convencional		
Potência total a ser instalada		11450,00	Potência total a ser instalada		22800,00
Consumo total fora de ponta (Kwh):		3721,25	Consumo total fora de ponta (Kwh):		7410,00
Consumo total na ponta (KWh):		744,25	Consumo total na ponta (KWh):		1482,00
Custo KWh na ponta ou gerador:	R\$	0,58	Custo KWh na ponta ou gerador:	R\$	0,58
Custo KWh fora de ponta:	R\$	0,37	Custo KWh fora de ponta:	R\$	0,37
Conta de luz com iluminação (R\$):	R\$	1.808,53	Conta de luz com iluminação (R\$):	R\$	3.601,26
Despesa mensal com manutenção:	R\$	-	Despesa mensal com manutenção:	R\$	2.790,50
Despesa mensal total com iluminação:	R\$	1.808,53	Despesa mensal total com iluminação:	R\$	6.391,76
Economia mensal:	R\$	4.583,23			

Nota: Autoria própria

Se comparar os custos da instalação atual, com os custos projetados para a instalação do sistema em LED, há uma economia de R\$4.583,23 mensais. Além disso, ao considerar a conta de energia, com

média de R\$3.601,26, os custos de iluminação atingem R\$6.391,76 mensais. A potência total instalada, composta por 21.660W de lâmpadas convencionais e 10.250W de lâmpadas LED, oferecem a possibilidade de futuras ampliações, com uma potência disponível para 11,4 kW. Esses dados coletados revelam a importância de uma gestão e análise adequada de toda a iluminação, considerando diversos fatores que podem influenciar, tanto a economia de energia, quanto os custos associados à manutenção, para otimizar e contribuir com o desempenho da indústria.

É essencial ressaltar que a taxa de luminância das lâmpadas em LED tem eficiência 123 L/W, que indica a eficiência luminosa do dispositivo, medida em lumens por watt (L/W), considerando-se muito eficiente em termos de iluminação, pois quanto maior o número, mais eficiente a lâmpada é em transformar a energia elétrica em luz.

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO

Inicialmente, a Tabela 6 mostra o custo das duas instalações disponíveis, sem considerar a mão de obra e a diferença do investimento entre elas.

Tabela 6 - Custo bruto das lâmpadas convencionais e de LED

Sistemas de instalação disponíveis para implementação	Custo total de cada sistema	
Investimento de nova instalação convencional	R\$	27.930,00
Investimento em instalação de LED	R\$	68.406,28
Diferença de investimento entre as duas instalações	R\$	40.476,28

Nota: Autoria própria

Constatou-se que a diferença entre um novo sistema de lâmpadas convencionais teria um custo de R\$27.930,00, enquanto o investimento em LED teria um custo de R\$68.406,28, sendo necessário investir R\$40.476,28 a mais se optarmos pelo sistema LED. Com isso, a fim de analisarmos a viabilidade econômica desse investimento, foi calculado o valor presente (VP), valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), índice de lucratividade, *payback* e custo anual uniforme (CAU) baseando-se na diferença do custo de investimento entre os dois sistemas disponíveis para troca. A Tabela 7 mostra os resultados da aplicação da diferença de custo de investimento entre os dois sistemas de iluminação convencional e LED.

Tabela 7 - Resultados dos indicadores de análise utilizados referentes a diferença de custo entre dois sistemas de iluminação disponíveis

Indicadores	Resultados
Soma dos valores presentes	R\$ 234.434,01
Valor presente líquido	R\$ 193.957,73
Taxa interna de retorno	11%
Índice de lucratividade	579%
<i>Payback</i>	9,29
Custo anual uniforme	R\$ 3.791,91

Nota: Autoria própria

De acordo com a os cálculos é possível visualizar na tabela os resultados obtidos de que a soma dos valores presentes ao fim do 6º ano, conforme é possível visualizar no Apêndice B, onde mostra que esse cálculo se baseou na soma da economia que a empresa terá optando pelo LED, devido a isenção de custos em manutenção e eficiência energética da lâmpada. Com isso ao final do mês 72 terá uma quantia de R\$234.434,01. O valor presente líquido, sendo o valor presente com o desconto do investimento inicial, tem-se o resultado de R\$193.957,73, demonstrando um valor positivo que indica que se optarmos pelo LED temos um investimento viável.

Na taxa interna de retorno tem-se um resultado de 11%, sendo que a taxa mínima exigida para um projeto ser considerável atrativo ele precisa ser superior a taxa mínima de atratividade de 1%, sendo assim, isso sugere que o optar pelo LED é viável. No *payback* tem-se um resultado de 9,29, indicando que existe o retorno dessa diferença entre os sistemas de iluminação em 9 meses e 8 dias. No custo anual uniforme, resultou uma quantia de R\$3.791,91, o que indica o custo anual médio do investimento ao longo da sua vida útil. A Figura 6 apresenta o gráfico do *payback* da diferença de custo entre o sistema convencional e o sistema em LED, demonstrando o aumento do retorno ano após ano.

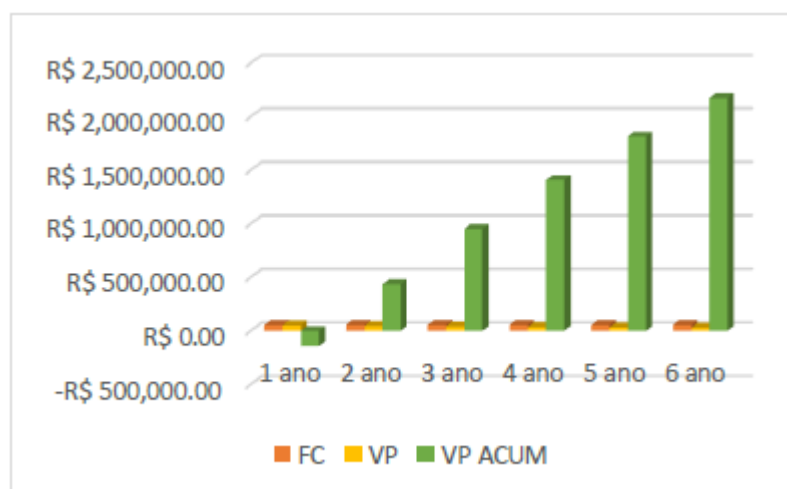


Figura 6. Gráfico do payback da diferença entre os dois sistemas de iluminação

Nota: Autoria própria

Após os resultados é considerado que o optar pelo sistema LED é viável. Diante disso, foi realizada a análise de viabilidade econômica da implantação de todo o projeto, incluindo todos os custos de materiais e mão de obra. Portanto, utilizamos os mesmos indicadores para analisar a viabilidade. A Tabela 8 mostra o resultado da aplicação no Excel, referente ao investimento inicial total do novo sistema proposto.

Tabela 8 - Resultados dos indicadores de análise referente ao investimento total

Indicadores	Resultados
Soma dos valores presentes	R\$ 234.434,01
Valor presente líquido	R\$ 25.807,01
Taxa interna de retorno	1%
Índice de lucratividade	112%
Payback	61,04
Custo anual uniforme	R\$ 504,53

Nota: Autoria própria

Na soma dos valores presentes foi encontrado o mesmo resultado da primeira aplicação, devido ao fluxo de caixa da economia gerada ser o mesmo. Já o valor presente líquido, tem-se um resultado de R\$25.807,01, isso significa que, ao descontar todos os fluxos de caixa futuros do projeto para o presente, a soma dos valores presentes desses fluxos de caixa é maior que o investimento inicial de R\$208.627,00, demonstrando que esse projeto é rentável e que seu retorno líquido é maior do que o capital investido.

Na sequência, obtém uma TIR de 1% e um IL de 112%, indicando que o projeto atende a taxa mínima exigida, e que o índice de lucratividade excede ao investimento inicial. O *payback* alcançado é de 61,04 meses, que seria em torno de 61 meses e 1 dia, demonstrando que o projeto é lucrativo. Com isso, ao considerarmos o mesmo período de 72 meses, é possível visualizar que terá o retorno a partir do mês 62, recuperando todo o investimento do novo sistema de iluminação, incluindo todos os custos para implantação.

Portanto, pode afirmar-se que a troca é viável, pois o tempo de retorno é consideravelmente curto se comparado com a durabilidade do sistema. Vale ressaltar, que não necessariamente o sistema necessitaria de manutenção nos primeiros anos ou do acionamento da garantia, podendo então durar longos períodos sem intercorrências. A Figura 7 apresenta o gráfico do retorno do investimento inicial, observando-se que após o ano 6 começa a obter o retorno.

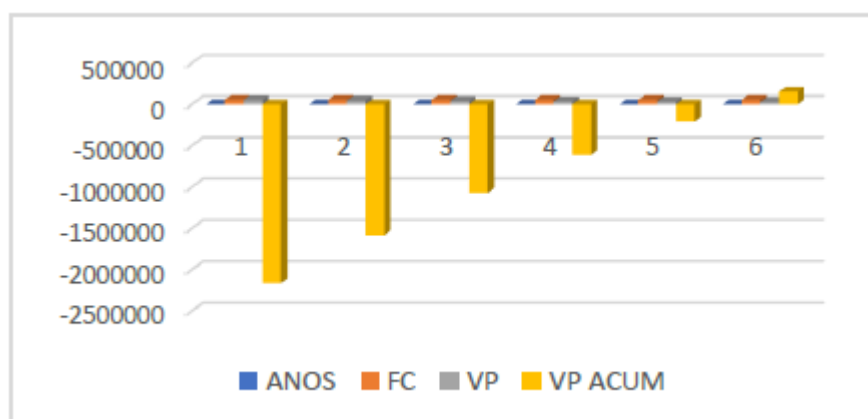


Figura 7. Gráfico do *payback* do investimento total do novo sistema proposto em LED Legenda - FC: fluxo de caixa; VP: valor presente; VP ACUM: valor presente acumulado

Nota: Autoria própria

4.5 SUSTENTABILIDADE DO PROJETO DE ILUMINAÇÃO

O tema de energia elétrica tem sido pauta de investigação científica, de ações nas políticas públicas, e aplicações nas indústrias. O tema é atual e visa o desenvolvimento de caminhos energéticos mais limpos. Por isso, por meio do desenvolvimento tecnológico, as energias renováveis ganham destaque por serem mais limpas (Wang et al., 2023). O Brasil e as organizações aqui instaladas possuem um caminho promissor nesse campo, devido a geração ser majoritariamente proveniente de fonte renovável, como hidrelétrica, solar e eólica (Bastos et al., 2023).

Nesse aspecto, os sistemas de iluminação, como as lâmpadas de LED, são considerados eficientes, e propõe uma redução percentual de 71,71% no consumo de energia elétrica se comparado a lâmpadas tradicionais. O descarte das lâmpadas tradicionais ambientalmente errado também pode ser considerado um problema para o planeta.

Entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que foram estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), alguns deles estão em linha com este trabalho. O ODS 7 trata de energia acessível e limpa, visando garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos. Este estudo contribui diretamente a manter as metas previstas devido a eficiência energética que propõe. Além disso, o ODS 12 visa assegurar padrões e de consumo sustentáveis, devido a implementação de um sistema de iluminação, o que pode reduzir a liberação de lâmpadas obsoletas ao meio ambiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito principal desse estudo foi de desenvolver uma análise econômica de um novo projeto de iluminação em três setores de uma fábrica de fertilizantes localizada em Paranaguá/PR. O estudo apresenta também uma pegada ambiental da sustentabilidade referente a redução do consumo de eletricidade, e evitar potenciais impactos ambientais referentes a manutenção e o descarte das lâmpadas convencionais. A eficiência energética e os benefícios decorrentes da substituição das lâmpadas convencionais de vapor de sódio pela tecnologia LED foram evidenciadas pela pesquisa.

Ao realizar o comparativo entre os sistemas, foi possível constatar que, embora o custo inicial da instalação atual seja inferior à nova proposta, a eficiência do LED oferece um custo- benefício ao longo dos meses futuros. Este resultado reforça a viabilidade do projeto, destacando a economia financeira, bem como o comprometimento da indústria com práticas sustentáveis, e a contribuição com legislações ambientais. A implementação da iluminação em LED representa uma escolha econômica inteligente, e um passo significativo em direção a um modelo mais sustentável e responsável.

Com base nas aplicações realizadas, existem limitações neste estudo, como o custo de implementação do sistema ser elevado; a proposta de orçamento de somente uma empresa; os cálculos consideram o cenário atual do Brasil, e no futuro os custos podem sofrer variação. Como sugestão de trabalhos futuros é recomendável realizar um estudo mais aprofundado, mostrando informações específicas da viabilidade econômica. Também vale estimular os fabricantes e prestadores de serviços a fornecer

materiais com todas informações necessárias para que sejam realizadas análises mais precisas, facilitando as aplicações.

REFERÊNCIAS

- A história do termo Ecoeficiência.Ecoeficientes. Retrieved January 13, 2024, from <https://www.ecoeficientes.com.br/a-historia-do-termo-ecoeficiencia/>
- ABEPRO (2023). Associação Brasileira de Engenharia de Produção. Disponível em: <https://portal.abepro.org.br/>. Acesso em: 11/01/2024.
- Admin. (2019, January 23). LED ou Vapor de Sódio: descubra qual é a melhor escolha para iluminar. AALOK. <https://aalok.com.br/blog/led-ou-vapor-de-sodio-descubra-qual-e-a-melhor-escolha-para-iluminar/#:~:text=Em%202008%2C%20o%20Departamento%20de>
- ANEEL (2023). Estudo inédito avalia resultados do Programa de Eficiência Energética. (n.d.). Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/estudo-inedito-avalia-resultados-do-programa-de-eficiencia-energetica> . Acesso em: 05/02/2024
- Barbeli, M. C. (2015). A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. *Empreendedorismo, Gestão e Negócios*, 4(4), 238-246.
- Bastos, A. S., Souza, T. R. C. D., Ribeiro, D. S., Melo, M. D. L. N. M., & Martinez, C. B. (2023). Wave Energy Generation in Brazil: A Georeferenced Oscillating Water Column Inventory. *Energies*, 16(8), 3409.
- Batista, O. E. (2013). Redução do custo da energia elétrica em ambientes industriais por meio de uma estratégia de baixo custo em gestão energética (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- CNI (2022). Infraestrutura - Mapa Estratégico da Indústria 2023-2032. (s.d.). Disponível em: <https://www.mapadaindustria.cni.com.br/infraestrutura> . Acesso em: 25/01/2024.
- Cordeiro, M. P. D. S. (2023). Análise de viabilidade econômica de uma PPP de iluminação pública em LED: estudo de caso em Porto Alegre.
- de Assis Silva, J. V., Vasconcellos, K. R., & Ferraz, R. D. S. C. (2023). Eficiência energética: planejamento de conservação de energia nas empresas. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(5), 1076-1094.
- de Oliveira Silva, P. H., & Janni, V. (2021). Relação da taxa mínima de atratividade no cenário econômico atual com a viabilidade econômica de projetos. *Boletim do Gerenciamento*, 25(25), 68-75.
- Department of Energy. (2018). Department of Energy. Energy.gov. Disponível em: <https://www.energy.gov/> . Acesso em 04/02/2024.
- dos Santos, A. P., Felici, E. M., & dos Santos, V. R. (2020, June). Proposta de diminuição do consumo de energia elétrica e redução dos impactos ambientais através da análise de viabilidade de substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas led em um supermercado. In *Colloquium Exactarum*. ISSN: 2178-8332 (Vol. 12, No. 1, pp. 62-72).
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. (2019). Epe.gov.br; EPE. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt> . Acesso em: 13/01/2024.

Ferreira, E. A. (2018). Estudo de viabilidade econômica para instalação de leds e sistemas fotovoltaicos na iluminação pública da Praça do Viva Angelim.

Fiocruz, Fundação Osvaldo Cruz (2011) INVIVO. Lâmpada Fluorescente ou eletrônica. Disponível em: <https://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1173&sid=9> . Acesso em: 06/02/2024.

GIZ. Construindo Sistemas de Energia do Futuro. Disponível em:

<https://www.giz.de/en/worldwide/119057.html>. Acesso em: 20/01/2024.

IPEA. (ANO). ODS 12 - Consumo e Produção Sustentáveis - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html> . Acesso em: 01/02/2024.

IPEA. (ANO). ODS 7 - Energia Acessível e Limpa - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>. Acesso em 01/02/2024.

Lima, V. A. A. (2013). Estudo comparativo entre lâmpada com led de alta potência e lâmpadas comuns, considerando a viabilidade econômica (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

Magalhães, A. S., & Domingues, E. P. (2016). Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono? Economia Aplicada.

Marquesin Junior, N. (2011). Estudo de eficiência energética em uma planta industrial.

Martins, F. L. (2016). Eficiência energética: gestão metodológica para a redução de energia elétrica na indústria.

Pires, D. M. G., & Magri, L. P. (2023). Eficiência energética na indústria. Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica, 4(2).

Portal Embrapa. (2018) O que são os ODS? Disponível em: <https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods/o-que-sao-osods#:~:text=Os%2017%20Objetivos%20de%20Desenvolvimento> . Acesso: 05/02/2024.

Portaldaindustria (2015). Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/>. Acesso em: 10/01/2024.

Ribeiro, A. M. N. C. (2022). Gerenciamento de energia elétrica de uma indústria de resinas termoplásticas.

Rodrigues⁵², J. A. C., de Lima Chico⁵³, F. D., & Peters⁵⁴, L. lâmpada de LED para uso doméstico: um breve estudo de viabilidade econômica. Universidade do Contestado-UnC, 47.

Salomão, T. M. (2010). Eficiência energética: projetos luminotécnicos em plantas industriais (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Santos, G. A. D. (2021). Eficiência energética da iluminação em uma indústria de produtos de limpeza.

Santos, T. S. D., Batista, M. C., Pozza, S. A., & Rossi, L. S. (2015). Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20, 595-602.

SEBRAE. (2022) Descubra se o seu negócio é rentável ou lucrativo. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/ descubra-se-o-seu-negocio-e-rentavel-ou-lucrativo,655fad100e643810VgnVCM100000d701210aRCRD> . Acesso em: 29/01/2024.

Ucker, F., Esteves, D. C., Esteves, L. R., Ucker, L., & Matias, R. (2023). Avaliação da eficiência energética, econômica e ambiental da substituição de lâmpadas fluorescentes por LED em uma instituição de ensino—um estudo de caso. *Enciclopedia biosfera*, 20(46), 45-58.

Vargas, M. C., & Mestria, M. (2015). Eficiência energética em edificações residenciais: Iluminação e Refrigeração. Fortaleza—CE: XXXV Encontro de Engenharia de Produção.

Wang, S., Hausfather, Z., Davis, S., Lloyd, J., Olson, E. B., Liebermann, L., ... & McBride, J. (2023). Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios. *Joule*, 7(2), 309-332.

WBCSD. (2019). World Business Council For Sustainable Development (WBCSD). Wbcsd.org. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/> . Acesso em: 03/02/2024.

Capítulo 3



10.37423/240308774

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES VIRTUAIS PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM MOTORES ELÉTRICOS

Ramon da Silva Alves

Instituto Federal do Espírito Santo

Cassius Zanetti Rezende

Instituto Federal do Espírito Santo

Leonardo Azevedo Scardua

Instituto Federal do Espírito Santo



Resumo: O monitoramento em tempo real da temperatura desempenha um papel essencial em várias instalações industriais, exercendo impacto direto na qualidade do produto e desempenhando um papel crucial na redução de riscos, tanto para os colaboradores quanto para evitar perdas de tempo causadas por falhas no processo industrial. Assim, incontáveis são os sensores de temperatura espalhados dentro de um processo industrial. Cada um desses sensores requer instalação física e manutenção contínua, especialmente quando empregados em processos de fabricação agressivos. Com a falta de manutenção surgem problemas de medição decorrentes de más conexões, interferência eletromagnética e da degradação dos cabos dos sensores devido a fatores ambientais, resultando até na perda de sinal, afetando a precisão dos dados. Diante dessas questões, a implementação de sensores virtuais emerge como uma alternativa promissora, reduzindo custos de implementação e manutenção, fortalecendo a confiabilidade do *feedback* e aumentando a segurança nas operações industriais. Este trabalho propõe a modelagem computacional de sensores virtuais, utilizando técnicas de *machine learning* para inferir a temperatura em motores CC com base em dados reais, visando enfrentar esses desafios.

Palavras-chave: Sensores Virtuais, Predição de Temperatura, Inteligência Computacional, Machine Learning, Redes Neurais, LSTM, ConvLSTM, GRU.

1 INTRODUÇÃO

Com base na crescente necessidade de compreender profundamente os processos industriais e buscar a redução dos custos de implementação, operação e manutenção dos parques industriais, tem havido muitos estudos dedicados à extração de características das plantas industriais. O objetivo principal desses estudos é criar modelos computacionais que representem de forma precisa o processo real, permitindo a otimização dos processos, o treinamento de profissionais sem a necessidade de acesso direto à planta física e a detecção preditiva de anomalias. Além disso, uma área de estudo promissora busca substituir os sensores reais das plantas por sensores virtuais.

Segundo Brunello et. al (2021), o sensoriamento virtual é um conjunto de técnicas para substituir um subconjunto de sensores físicos por sensores virtuais, permitindo o monitoramento de locais inacessíveis, reduzindo os custos de implantação de sensores e fornecendo uma solução de plano de contingência para falhas de sensores.

Em seu trabalho Fortuna et al. (2007), ressalta que os sensores virtuais, frente aos sensores físicos, apresentam características muito vantajosas, dentre elas, a possibilidade de estimar valores de variáveis difíceis de serem obtidas em tempo real devido à lentidão de seu tempo de resposta, previsão das próximas medidas, tempo de resposta baixo e possui a característica de serem mais fáceis manter, na maioria dos casos, pois, precisão apenas de ajuste de parâmetros frente aos sensores físicos que necessitam de substituição.

Este trabalho investigou a viabilidade da utilização de redes neurais recorrentes na modelagem desses sensores. O estudo de caso selecionado envolve a modelagem de um sensor de temperatura utilizado para monitorar a temperatura de um motor de corrente contínua de uma ponte rolante, situada na área de lingotamento contínuo em uma siderúrgica. Dessa forma, pretende-se explorar o potencial das redes neurais recorrentes nesse contexto específico e avaliar sua eficácia na criação de um sensor virtual capaz de substituir o sensor real existente.

Durante a operação regular, os motores utilizados neste trabalho operam com correntes em torno de 700 A, enquanto nas partidas, esses valores podem chegar a mais de 1200 A. Para garantir o adequado resfriamento dos motores, é utilizado um sistema de ventilação forçada acionado por ventiladores, os quais são ativados com base na temperatura interna do motor.

O sistema de medição de temperatura adotado na planta é baseado em sensores do tipo PT-100. Os sinais analógicos gerados por esses sensores são transmitidos por cabos até a entrada analógica de

um cartão de CLP (Controlador Lógico Programável) responsável pela lógica de acionamento do ventilador do motor de içamento.

A implementação de um sensor virtual pode proporcionar a continuidade segura das operações da ponte rolante, mesmo em casos de falhas no sensor, cabo ou cartão analógico. Isso significa que, caso ocorra uma falha em algum desses componentes, a operação da ponte pode prosseguir de forma segura até que a equipe de manutenção possa corrigir a falha no momento mais apropriado.

Além disso, a comparação entre a resposta do sensor virtual e do sensor real oferece uma camada adicional de segurança, permitindo uma manutenção preditiva para corrigir pequenas divergências no funcionamento do sensor real. Essa abordagem contribui para o aumento da confiabilidade do sistema de monitoramento de temperatura, garantindo que qualquer desvio ou anomalia seja prontamente identificado e corrigido.

Frente a esse desafio, utilizou-se a rede LSTM (*Long Short-Term Memory*) para realização da predição da temperatura. Esta escolha é respaldada pela capacidade comprovada da LSTM em lidar eficientemente com sequências temporais complexas, como apresentado nos trabalhos de Li et al. (2020) e Jing et al. (2021), um atributo crítico para modelar o comportamento dinâmico da planta industrial em termos de temperatura. A natureza recorrente da LSTM permite capturar padrões de longo prazo nos dados, tornando-a particularmente adequada para antecipar variações e aprimorar a precisão das previsões. Dessa maneira, a aplicação da LSTM nesta solução busca otimizar a robustez e eficácia do modelo em cenários industriais desafiadores.

A rede LSTM possui suas particularidades em relação à capacidade de capturar relações temporais e lidar com dependências de longo prazo. Portanto, é fundamental conduzir experimentos e avaliar métricas de desempenho, como erro médio ou taxa de acerto, para determinar se a rede apresenta bom desempenho na previsão dos valores de temperatura no estudo de caso em questão.

Além disso, é importante considerar fatores como a quantidade e qualidade dos dados disponíveis, a complexidade do sistema e as restrições computacionais, pois esses elementos podem influenciar a escolha da rede neural recorrente mais adequada.

1.1 TRABALHOS CORRELATOS

Na literatura, existem trabalhos que abordam modelos de previsão de temperatura. Um exemplo é o estudo de Mengyi, Wang et al. (2020), que apresentou um modelo de previsão, em tempo real, da temperatura interna em uma bateria de lítio-íon utilizando Redes Neurais Convolucionais (CNN). Esse

modelo demonstrou resultados satisfatórios em comparação com o uso de Regressão Linear (LR). Os resultados obtidos com a CNN mostraram um R^2 (Coeficiente de Determinação) maior em comparação com a LR, indicando uma melhor capacidade de previsão. Além disso, o MSE (Erro Médio Quadrático) da CNN foi menor do que o obtido com a LR.

A comparação entre as temperaturas internas reais e as temperaturas previstas pela CNN revelou uma concordância significativa. Observa-se que nesse trabalho em questão não há o uso das técnicas mais indicadas como as redes neurais recorrentes.

Outro estudo relevante é o de Modirnia e Boulet (2013), que propõem a modelagem de sensores virtuais de temperatura em um processo de termoformagem. Essa abordagem permite a medição adicional da temperatura da superfície da folha de plástico e melhora a precisão no controle da distribuição de temperatura, eliminando a necessidade de sensores infravermelhos. Os resultados desse estudo mostraram que os sensores virtuais se comportaram de maneira semelhante aos sensores físicos, acompanhando a variação da temperatura de entrada e alcançando os pontos de ajuste desejados, o que evidencia um controle preciso da temperatura.

Neto et al. (2019), apresenta uma abordagem interessante, que propõem um modelo de rede neural recorrente como alternativa para imputação de dados faltantes em estações meteorológicas. Os testes compararam o desempenho das redes LSTM e GRU (*Gated Recurrent Unit*), sendo que a GRU apresentou uma convergência mais rápida que a LSTM. Ambos os modelos apresentaram um erro satisfatório.

Outra aplicação relevante é apresentada por Kusiak et al. (2010), que propõem um modelo baseado em dados para sensores virtuais de qualidade do ar (IAQ) em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVCA), com o objetivo de detectar e diagnosticar falha nos sensores. Os autores empregaram quatro técnicas, incluindo redes neurais artificiais, máquina de vetores de suporte e regressão. Os resultados obtidos utilizando o algoritmo Multilayer Perceptron (MLP) produziu os melhores resultados dentre todos os algoritmos testados. Os sensores virtuais desenvolvidos foram capazes de validar e calibrar sensores físicos.

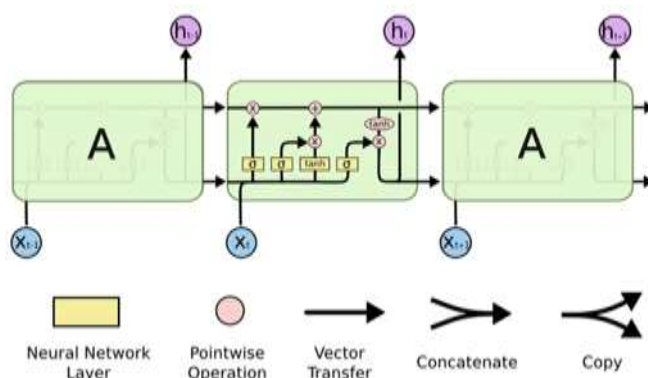
2 REDES NEURAIS DO TIPO LONG SHORT-TERM MEMORY (LSTM)

Segundo HAYKIN (2001), o cérebro pode ser comparado a um computador convencional, mas com uma complexidade maior, sendo capaz de executar tarefas com impressionante rapidez. Essa característica tem sido uma grande motivação para pesquisas científicas acerca das redes neurais artificiais, pois o cérebro possui a habilidade de organizar os neurônios de forma a processar informações, desde as mais simples até as mais complexas, em velocidades extremamente rápidas.

As Redes Long Short-Term Memory (LSTM), introduzidas inicialmente por Hochreiter e Schmidhuber (1997) e com o objetivo de resolver o problema da dependência a longo prazo das redes neurais recorrentes convencionais. Assim a LSTM é uma rede do tipo RNN, porém, com modificações em sua estrutura e em suas camadas. Ela possui inúmeras aplicações práticas, tais como: geração automática de texto, linguagem natural e, neste trabalho, análise de séries temporais.

Diferente das RNNs comuns, a LSTM dispõe de quatro camadas de interação em cadeia ao invés de apenas uma, dispondo de diferentes blocos de memória também chamados e células, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Estrutura da rede LSTM

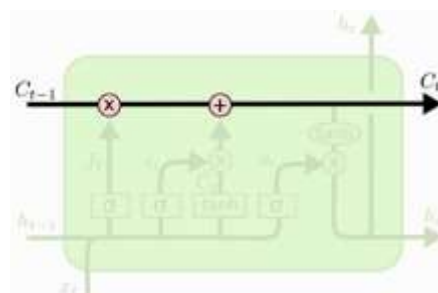


Fonte: Olah, 2015.

Os portões na LSTM ajudam a solucionar o problema do gradiente (problema que surge quando os gradientes calculados durante o treinamento se tornam muito pequenos “gradientes próximos de zero” ou muito grandes “gradientes explodindo”), devido ao componente aditivo dos portões de atualização e mantêm a maior parte do estado oculto existente enquanto adicionam novo conteúdo sobre ele. Tal fato possibilita que os erros dos gradientes sejam propagados de volta sem desaparecer ou explodir muito rapidamente devido às operações de adição (ACADEMY, 2021).

O segredo para a LSTM encontra-se no estado da célula, a linha horizontal que passa pelos pontos de multiplicação e soma na parte superior da Figura 2. O estado faz a translação dos dados e sofre algumas poucas interações lineares, definindo assim sua importância. Contudo, as informações são transportadas quase que inalteradas (OLAH, 2015).

Figura 2: Transporte de informação da rede LSTM.

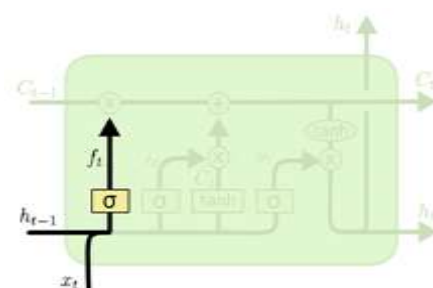


Fonte: Olah, 2015.

- **Portão de Esquecimento (forget gate)**

Olah (2015), afirma que o primeiro passo de uma LSTM consiste em escolher quais informações de cada estado da célula descartar. É tomada de decisão é atribuição da camada sigmoide. Essa camada tem como saída um número entre zero e um, que reflete um percentual, que será multiplicado por um valor informando o quanto continuará passando. O valor um significa “manter o dado” e o valor zero significa “descartar o dado”. Na LSTM, dentro de cada nó, existem três desses portões para controlar o estado. Essa primeira etapa do nó dentro da LSTM, mostrado na Figura 3, decide qual informação será ou não esquecida pela rede, tendo em vista sua relevância. Essa decisão é tomada pelo primeiro portão.

Figura 3: Portão de esquecimento da LSTM.



Fonte: Olah, 2015.

A equação que define o portão de entrada da LSTM está descrita na Equação 1:

$$F_t = \sigma(w_f \times [h_{t-1}, xt] + b_f) \quad (1)$$

onde:

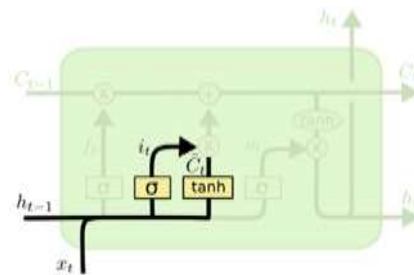
- f_t é a saída do portão de esquecimento no instante t .
- σ é a função de ativação sigmoide, que transforma o resultado da soma ponderada para um valor entre 0 e 1.
- W_f é a matriz de pesos do portão de esquecimento.
- h_{t-1} é o vetor de saída da célula no instante $t-1$ (estado oculto anterior).
- x_t é o vetor de entrada no instante t .
- b_f é o vetor de viés (bias) associado ao portão de esquecimento.

• Portão de Entrada (input gate) e a Informação Candidata

Para Olah (2015), o segundo passo define quais novas informações serão armazenadas no estado da célula. Esta etapa é dividida em duas partes. A primeira camada sigmoide, chamada de portão de entrada, faz a escolha dos valores a serem utilizados.

Posteriormente, a segunda camada tang que, é a função de ativação, constrói um vetor de novos valores candidatos, que são adicionados ao estado, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Segundo portão da LSTM.



Fonte: Olah, 2015.

As equações de que definem o segundo portão da LSTM estão descritas nas equações 2 e 3, respectivamente:

$$I_t = \sigma(w_i \times [h_{t-1}, xt] + b_i) \quad (2)$$

$$\vec{C}_t = \tanh(WC \times [h_{t-1}, xt] + bC) \quad (3)$$

A equação 3 refere-se ao portão de entrada. Nesta equação, calcula-se o vetor candidato que representa as novas informações que podem ser adicionadas ao estado da célula. Em resumo, este vetor candidato será usado juntamente com o portão de esquecimento para atualiza o estado da célula.

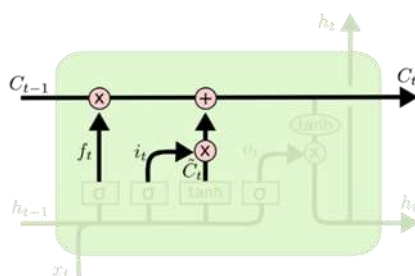
onde:

- f_t é o vetor ativação do portão de entrada no instante t .
- $\vec{C}^t$ é o vetor candidato calculado com a função tang.
- σ é a função de ativação sigmoidal, que transforma o resultado da soma ponderada para um valor entre 0 e 1.
- W_i é a matriz de pesos para o portão de entrada.
- WC é a matriz de pesos para o candidato a ser adicionado à célula.
- b_i e bC são vetores de viés para o portão de entrada para o candidato.
- h_{t-1} é o vetor de saída da célula no instante $t-1$ (estado oculto anterior).
- x_t é o vetor de entrada no instante t .
- **Célula de Memória**

Nas etapas anteriores foi definido o que fazer. Nesta etapa será executado o que fazer.

O estado anterior da célula C_{t-1} será atualizado para o novo estado C_t e o estado antigo será multiplicado por F_t , decidindo o quanto de informação será mantida, exemplificado na Figura 5 (OLAH, 2015).

Figura 5: Atualização do peso da LSTM.



Fonte: Olah, 2015.

A equação de que define a atualização do peso da LSTM está descrita na Equação 4:

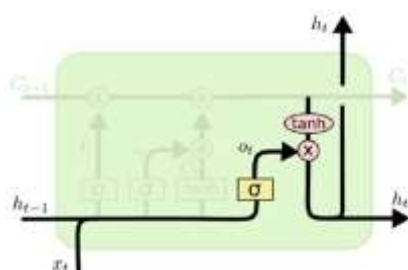
$$Ct = ft \times C_{t-1} + it \times \vec{C}t \quad (4)$$

onde:

- Ct é o estado da célula no instante t .
- ft é a saída do portão de esquecimento no instante t .
- C_{t-1} é o estado da célula no instante $t-1$.
- it é o vetor ativação do portão de entrada no instante t .
- $\vec{C}t$ é o vetor candidato calculado com a função tang.
- **Portão de Saída (output gate)**

Na última etapa, mostrado na Figura 6, Olah (2015), conclui que no portão de saída é executado uma camada sigmoide que decidi quais partes do estado da célula produzir. Esta saída é uma versão filtrada do estado da célula e a ela é adicionado à camada sigmoide que decidirá quais dados deixará passar. Em seguida, os dados são comprimidos entre -1 e 1 por uma função de ativação com uma tangente hiperbólica. E, posteriormente, multiplicados pelo portão de saída sigmoide.

Figura 6: Portão de saída da rede LSTM.



Fonte: Olah, 2015

As equações de que definem a atualização do peso da LSTM estão descritas nas equações 5 e 6, respectivamente:

$$Ot = \sigma(w_0 \times [h_{t-1}, xt] + b_0) \quad (5)$$

$$ht = Ot \times \tanh(Ct) \quad (6)$$

onde:

- O_t é vetor de ativação do portão de saída no instante t .
- σ é o vetor de ativação do portão de saída no instante t .
- W_o é a matriz de pesos para o portão de saída.
- h_{t-1} é o vetor de saída da célula no instante $t-1$ (estado oculto anterior).
- x_t é o vetor de entrada no instante t .
- b_o é o vetor de viés para o portão de saída.
- h_t é o vetor de saída da célula no instante t .
- C_t é o estado da célula no instante t .

3 METODOLOGIA

3.1 COLETA E FILTRAGEM DOS DADOS

O primeiro passo em direção à solução foi estabelecer uma compreensão prévia do processo, visando iniciar a coleta dos dados. Esse processo foi orientado para garantir que os dados selecionados estivessem diretamente relacionados à temperatura do motor. Nesse contexto, identificadas e mapeadas as variáveis potenciais que apresentariam uma correlação mais significativa com a temperatura, delineando assim as bases para os testes subsequentes.

A investigação da variação da temperatura do motor foi realizada para a tarefa de elevação da carga. A Tabela 1 apresenta as variáveis registradas para a construção do modelo do sensor virtual. Além das grandezas elétricas corrente e tensão da armadura, o desenvolvimento do modelo incorporou a velocidade do eixo, o torque de carga, a temperatura interna do motor e o funcionamento de um ventilador externo encarregado do resfriamento.

Tabela 1 – Variáveis correlacionadas à temperatura:

Variável	Unidade
Velocidade do motor	RPM
Corrente de Armadura	A
Tensão de Armadura	V
Temperatura	°C
Peso da carga de elevação (torque de carga)	Ton
Estado do Ventilador de Resfriamento	On/off

Fonte: Próprio autor.

3.2 SELEÇÃO DOS MODELO

Foi desenvolvido um código em Python para implementar o modelo de séries temporais (LSTM). Utilizou-se para tal a divisão de 70:30 dos dados de treinamento e teste, respectivamente. Para o forecast, utilizou-se 70 dados para prever o próximo valor. Também usou-se 75 unidades de células de LSTM, definindo assim o dimensionamento do espaço de saída e dropout = 0.2. Já na construção do modelo, foram usadas 16 epochs, batch_size = 250, validation_split = 0.2, otimizador = adam. Também foi usado o Early Stopping para monitorar a função de perda no conjunto de validação (patience = 10), de modo a interromper o treinamento caso não houvesse melhora do desempenho. Dessa maneira, os pesos do modelo seriam restaurados para os melhores valores. E, por último, como medida de desempenho, as funções de perda Mean Absolut Error (MAE) e Mean Square Error (MSE) foram utilizadas.

A eficácia do procedimento de treinamento está intrinsecamente ligada à seleção apropriada dos dados de entrada, que se baseiam em métodos de coleta, filtragem e escolha de informações. Caso a escolha dos dados tenha sido bem-sucedida, será viável adquirir um modelo de séries temporais de alta qualidade. Nem sempre a quantidade reflete qualidade. Adicionalmente, caso os dados de entrada não estejam suficientemente correlacionados com a variável de saída, ou seja, a temperatura, será desafiador alcançar um modelo de desempenho satisfatório. Assim, é enfatizada, mais uma vez, a importância crítica das etapas iniciais deste trabalho, ou seja, a coleta de dados, a filtragem e a seleção de atributos.

3.3 ETAPA DE TREINAMENTO

A etapa de treinamento de algoritmos para séries temporais é um processo fundamental no desenvolvimento de modelos capazes de entender e prever padrões em dados que variam ao longo do tempo. Essa fase envolve várias etapas, cada uma desempenhando um papel crucial no ajuste do modelo para otimizar suas previsões.

3.4.1 TREINAMENTO DO MODELO

A LSTM recebe os dados de entrada em um arranjo sequencial de tempo. Essas informações são organizadas de modo a preservar a ordem e conexões temporais e, cada unidade LSTM na sequência processa uma entrada ao mesmo tempo em que mantém uma memória interna para reter dados importantes de longo prazo. Abaixo, são descritas as configurações da rede LSTM, que nada mais são

quea maneira como os dados são estruturados na rede, para que ela possa processá-los adequadamente:

Sequência Temporal: A entrada é formada por uma série de intervalos de tempo, onde cada intervalo representa um ponto na sequência temporal. Cada ponto pode incluir várias características ou dimensões, dependendo do tipo de dados envolvido.

Entrada em um Passo de Tempo: Para um determinado intervalo, a unidade LSTM recebe um vetor de entrada contendo as informações a esse ponto na sequência temporal.

Entrada e Memória Interna: A unidade LSTM combina a entrada atual com os dados armazenados em sua memória interna, que guarda informações de longo prazo.

Cálculo dos Gating Mechanisms: As LSTMs possuem mecanismos de controle, como os portões de esquecimento, entrada e saída. Esses mecanismos regulam o fluxo de informações através da unidade LSTM, auxiliando na decisão de quais dados são pertinentes para armazenar na memória.

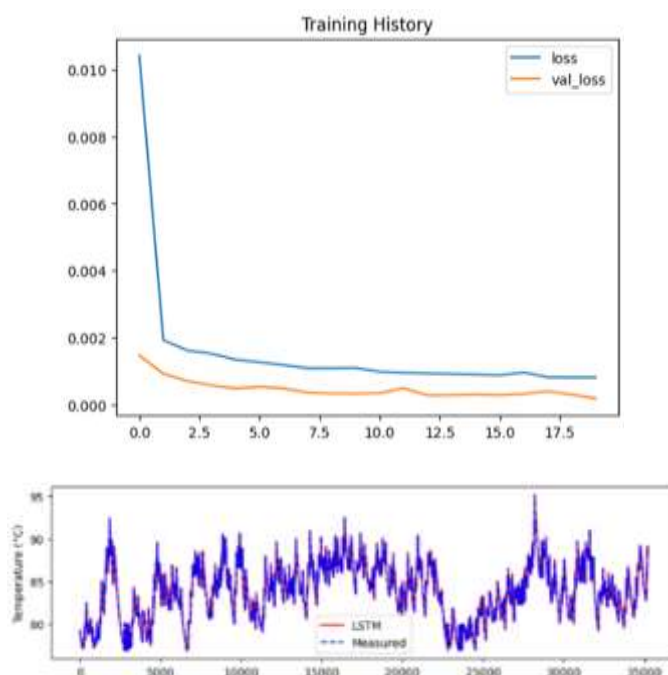
Atualização da Memória e Saída: Com base nos cálculos dos mecanismos de controle, a memória interna da unidade LSTM é atualizada para armazenar informações relevantes do intervalo de tempo atual. Ao mesmo tempo, a unidade LSTM gera uma saída que pode ser utilizada para previsões ou análises subsequentes.

Propagação para o Próximo Intervalo de Tempo: A saída da unidade LSTM no intervalo de tempo atual pode ser empregada como entrada para a unidade LSTM no intervalo subsequente. Isso possibilita à rede considerar a dependência temporal entre os intervalos.

A Figura 7, mostra o treinamento e teste, respectivamente, do modelo após a execução da rede LSTM. Neste, tendo em vista que a quantidade de variáveis de entrada é pequena e, com o intuito de sabermos a contribuição de cada uma delas na explicação do modelo, foram realizadas combinações das variáveis de entrada e, posteriormente avaliação do comportamento do modelo em cada situação. Sendo assim, optou-se por testar o comportamento do modelo retirando e colocando as features uma a uma.

- Utilização dos 5 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Corrente de Armadura, Tensão de Armadura, Peso e Ventilador mais a saída) para verificação do comportamento do algoritmo. A Figura 7 apresenta os gráficos de treinamento e teste, respectivamente para a rede LSTM.

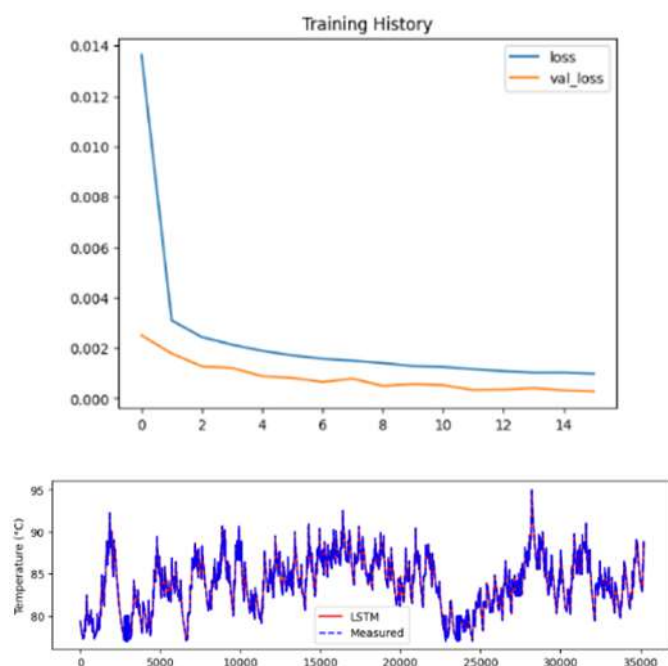
Figura 7: Gráficos da perda e teste utilizando todo o conjunto de dados na LSTM.



Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 4 atributos de entrada (Corrente de Armadura, Tensão de Armadura, Peso e Ventilador mais a saída) para verificação do comportamento do algoritmo. A Figura 8 apresenta os gráficos de treinamento e para a rede LSTM.

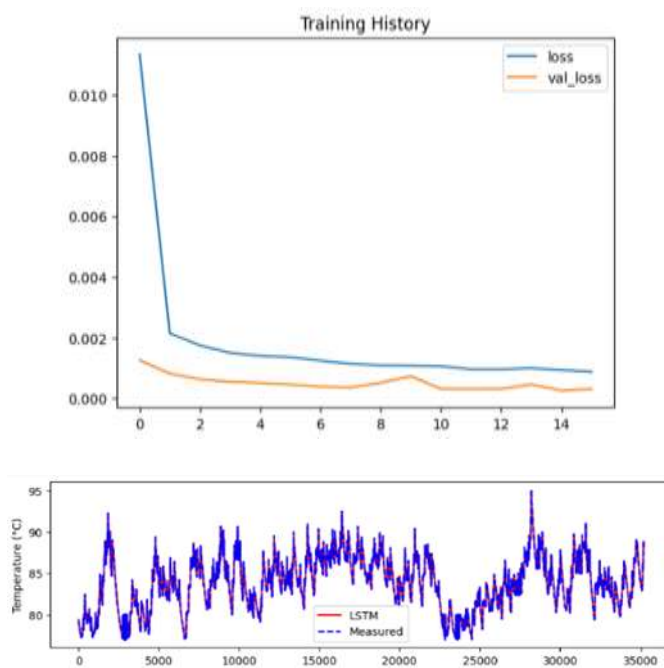
Figura 8: Gráficos da perda e teste sem o atributo Velocidade do Motor na LSTM.



Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 4 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Tensão de Armadura, Peso e Ventilador mais a saída) para verificação do comportamento do algoritmo. A Figura 9 apresenta os gráficos de treinamento e teste respectivamente, para a rede LSTM.

Figura 9: Gráficos da perda e teste sem o atributo Corrente de Armadura na LSTM.

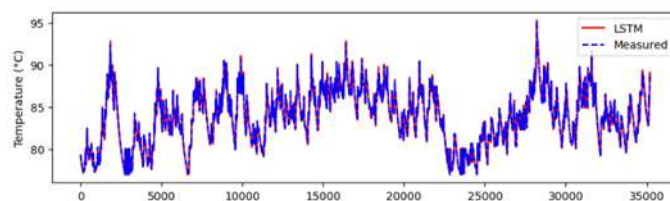


Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 4 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Corrente de Armadura, Peso e Ventilador mais a saída) para verificação do comportamento do algoritmo. A Figura 10 apresenta os gráficos de treinamento e teste respectivamente, para a rede LSTM.

Figura 10: Gráficos da perda e teste sem o atributo Tensão de Armadura na LSTM.

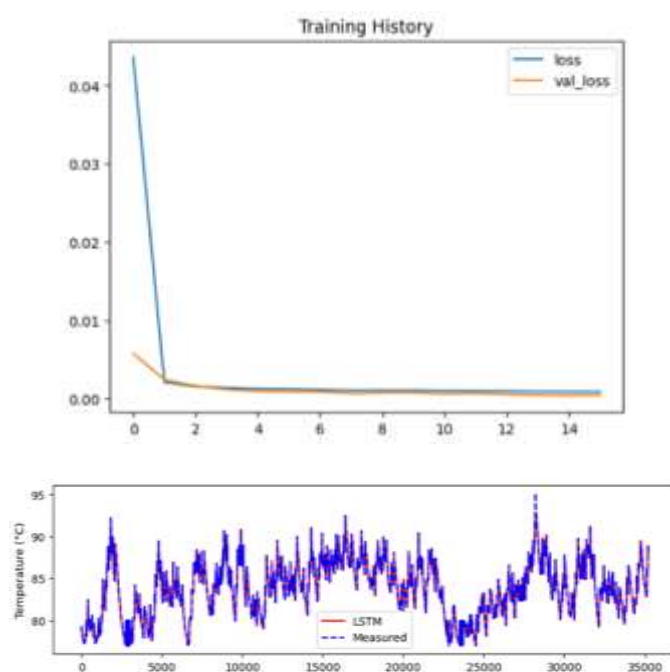




Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 4 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Corrente de Armadura, Tensão de Armadura e Ventilador mais a saída) para verificação do comportamento do algoritmo. A Figura 11 apresenta os gráficos de treinamento e teste, respectivamente, para a rede LSTM.

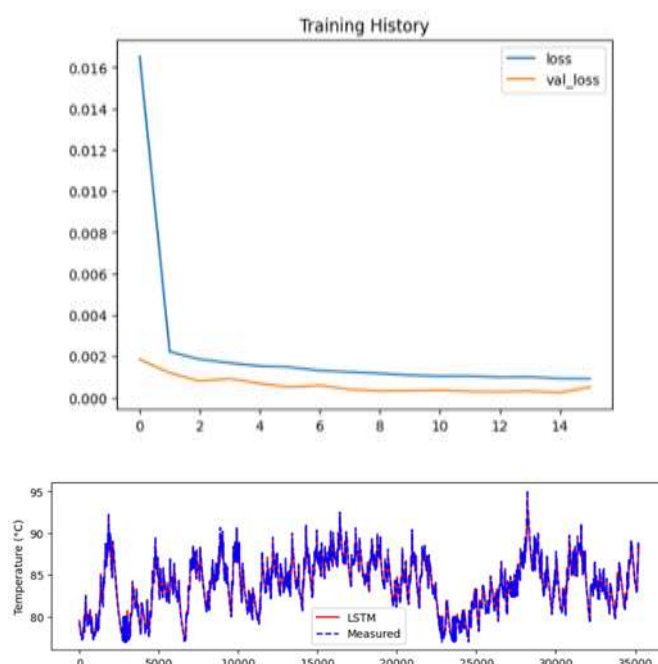
Figura 11: Gráficos da perda e teste sem o atributo Peso na LSTM.



Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 4 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Corrente de Armadura, Tensão de Armadura, Peso e mais a saída) para verificação do desempenho do algoritmo. A Figura 12 apresenta os gráficos de treinamento e teste, respectivamente, para a rede LSTM.

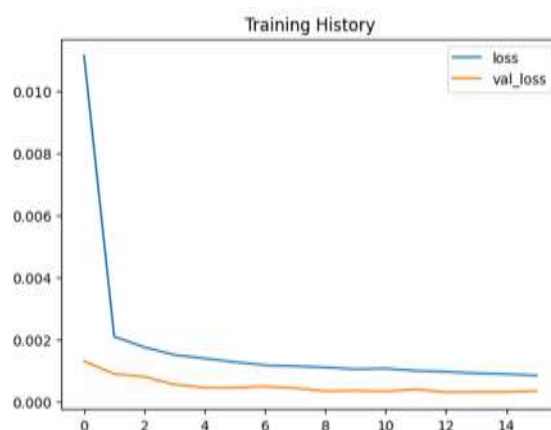
Figura 12: Gráficos da perda, teste e validação sem o atributo Ventilador na LSTM.

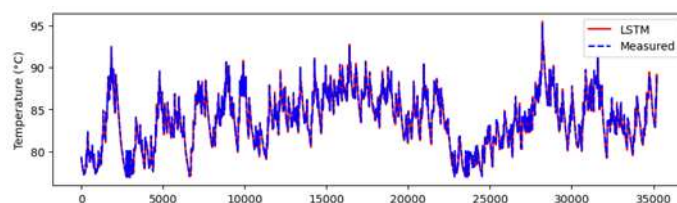


Fonte: Próprio autor.

- Utilização dos 5 atributos de entrada (Velocidade do Motor, Corrente de Armadura, Tensão de Armadura, Peso e Ventilador mais a saída) para verificação do desempenho do algoritmo. Adicionado a biblioteca *Autokeras* para “Tunar” o algoritmo afim de melhorar a precisão dele. A Figura 13 apresenta os gráficos de treinamento, teste e validação, respectivamente, para a rede LSTM.

Figura 13: Gráficos da perda e teste com todas as variáveis de entrada na LSTM.





Fonte: Próprio autor.

O treinamento do modelo mostrou-se promissor, tendo como parâmetro o comportamento da rede em relação aos dados reais da planta. Além disso, as curvas das perdas tendenciaram uma queda rápida, pressupondo maior convergência.

Para alcance dos resultados, foram usadas todas as variáveis de entrada nas etapas de previsão e forecast. A justificativa para utilização dessas variáveis está na análise dos dados, realizada pelo especialista, que observou a relação entre elas e a variável predita.

4 RESULTADOS

"Previsão" e "forecast" são termos frequentemente utilizados de forma intercambiável, mas podem ter nuance diferentes em certos contextos. Quando se trata de uma rede LSTM (Long Short-Term Memory) ou qualquer modelo de séries temporais, ambos os termos geralmente se referem à capacidade do modelo de antecipar valores futuros com base em padrões aprendidos a partir de dados históricos. No entanto, serão apresentadas algumas distinções gerais que podem ser feitas entre os dois a fim de facilitar a compreensão dos resultados.

4.1 RESULTADOS DE PREVISÃO

Na previsão, a saída da rede LSTM é gerada a partir de uma sequência de dados reais anteriores para prever o próximo valor na série temporal. Essa rede processa as informações, considerando os padrões que foram identificados durante seu treinamento.

Em contraste, no processo de forecast (ou previsão de longo prazo), cada previsão realizada pela rede LSTM é subsequentemente integrada ao conjunto de dados de entrada para a previsão do próximo passo temporal. Enquanto a previsão tradicional se apoia exclusivamente em dados históricos reais, o forecast avança ao utilizar os valores previamente estimados como alicerce para as futuras previsões. Esse método possibilita a projeção de estados futuros, permitindo, por exemplo, a continuação das previsões de temperatura mesmo sem novos dados provenientes do sensor de temperatura real.

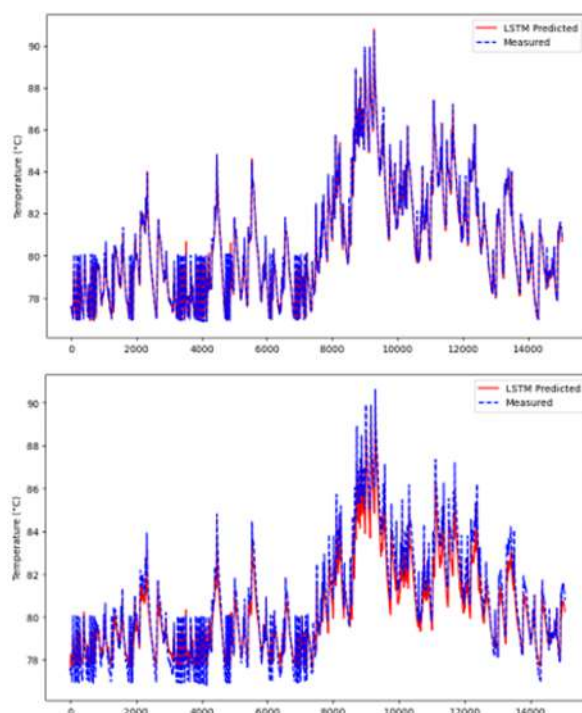
4.2 RESULTADOS DE FORECAST

O forecast assim como a previsão utiliza a janela de dados passados para realização de estimativas futuras. Porém, diferente do exposto na Seção 4.1, o forecast neste trabalho é usado para prever a temperatura após a perda dos dados de entrada (falha no sensor de temperatura do motor). Por exemplo: como informado na Seção 3.2, foram usados 70 dados da planta para prever o próximo valor. O forecast utiliza os dados reais de 1 a 70 e prevê o 71. Depois ele usa os dados de 2 até 71 para prever o próximo dado, que seria o 72. Note que os dados após o dado de número 70 já não são mais dados reais da planta e sim, dados estimados.

Os resultados obtidos a seguir, foram alcançados utilizando os parâmetros de rede, definidos na Seção 3.2 e considerando os quatorze mil dados na etapa de forecast (Figura de 14) e, tendo em vista que a base de dados está em 5 segundos a cada coleta, tem-se uma previsão de até 19,44 horas.

Por fim, a Figura 14 e a Tabela 2 apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo na etapa de previsão e forecast com todas as variáveis de entrada somado à utilização do Autokeras que é uma ferramenta de aprendizado de máquina automatizado (AutoML) em Python, desenvolvida para simplificar a criação, treinamento e implementação de modelos de aprendizado de máquina. Destinado a ser fácil de usar, o AutoKeras requer conhecimento mínimo prévio em aprendizado de máquina. Seu principal propósito é automatizar a escolha das estruturas dos modelos e o ajuste dos hiperparâmetros, que realizou automaticamente a exploração por diversas arquiteturas de modelos, incluindo camadas, conexões e hiperparâmetros, personalizando-se conforme as características específicas do conjunto de dados em uso.

Figura 14: Gráficos previsão e *forecast* utilizando o *Autotune*.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Desempenho do algoritmo usando todas as variáveis e *Autotune*.

Épocas	Loss	MSE	MAE	V.Loss	V.MSE	V.MAE
1	0.0143	0.0143	0.0693	1.30E-03	1.30E-03	0.0239
2	1.90E-03	1.90E-03	0.0328	1.20E-03	1.20E-03	0.027
3	1.60E-03	1.60E-03	0.0305	8.16E-04	8.16E-04	0.021
4	1.40E-03	1.40E-03	0.0278	7.53E-04	7.53E-04	0.0208
5	0.0013	0.0013	0.0267	5.79E-04	5.79E-04	0.0173
6	1.20E-03	1.20E-03	0.0258	7.33E-04	7.33E-04	0.0219
7	1.10E-03	1.10E-03	0.0248	4.71E-04	4.71E-04	0.0154
8	1.10E-03	1.10E-03	0.025	3.94E-04	3.94E-04	0.0151
9	0.0011	0.0011	0.0239	5.14E-04	5.14E-04	0.0178
10	0.001	0.001	0.0234	3.63E-04	3.63E-04	0.0145
11	9.92E-04	9.92E-04	0.0232	4.31E-04	4.31E-04	0.0161
12	9.64E-04	9.64E-04	0.0227	5.29E-04	5.29E-04	0.0187
13	8.80E-04	8.80E-04	0.0216	3.18E-04	3.18E-04	0.0129
14	8.93E-04	8.93E-04	0.0218	2.73E-04	2.73E-04	0.0121
15	8.47E-04	8.47E-04	0.0212	2.74E-04	2.74E-04	0.0127

16	8.37E-04	8.37E-04	0.0211	2.63E-04	2.63E-04	0.012
----	----------	----------	--------	----------	----------	-------

Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento de um sensor virtual capaz de prever a temperatura interna de um motor de corrente contínua, tendo como base o banco de dados reais, usando redes neurais recorrentes, mais especificamente uma rede neural LSTM. Esta escolha é respaldada pela capacidade comprovada da LSTM em lidar eficientemente com sequências temporais complexas, um atributo crítico para modelar o comportamento dinâmico da planta industrial em termos de temperatura. A natureza recorrente da LSTM permite capturar padrões de longo prazo nos dados, tornando-a particularmente adequada para antecipar variações e aprimorar a precisão das previsões. Dessa maneira, a aplicação da LSTM nesta solução busca otimizar a robustez e eficácia do modelo em cenários industriais desafiadores.

A importância de cada variável de entrada para a construção do modelo foi enfatizada, destacando a necessidade da presença de todas elas para assegurar um desempenho sólido nas previsões. Por fim, os resultados do modelo desenvolvido corroboram a viabilidade do uso de sensores virtuais na estimação da temperatura de motores elétricos. A aplicação da rede neural LSTM permitiu a estimação da temperatura do motor ao longo de 19,44 horas, com um intervalo de coleta de dados de aproximadamente 5 segundos, totalizando 14.000 dados para a previsão (conforme Figura 14). Na etapa de validação, o erro médio quadrático (MSE) ficou na ordem de 2,63E-4, enquanto o erro absoluto médio (MAE) na mesma etapa surpreendeu por ser extraordinariamente baixo, na ordem de 0,012. Esses valores indicam uma magnitude média de erros muito reduzida nas previsões, evidenciando assim a eficácia do modelo utilizado e a realização dos objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

ACADEMY, D. S. Redes neurais recorrentes. 2019. Disponível em:

<<https://www.deeplearningbook.com.br/redes-neurais-recorrentes/>>. Acesso em 2 maio 2023.

ACADEMY, D. S. Arquitetura de redes neurais gated recurrent unit (GRU). 2022. Disponível em: <<https://www.deeplearningbook.com.br/arquitetura-de-redes-neurais-gated-recurrent-unit-gru/>>. Acesso em 27 de novembro 2023.

BRUNELLO et al. Virtual sensing and sensors selection for efficient temperature monitoring in indoor environments. Tomoyuki Yokota. 25 f. 2021.

FORTUNA, L. et al. Soft sensors for monitoring and control of industrial process. 1 ed. Catânia: Springer. 2007.

HAYKIN, S. Redes neurais: princípios e práticas. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HOCHREITER, S.; SCHMIDHUBER, J. Long short-term memory. Neural computation. Cambridge, Massachusetts: MIT. 1997.

JING, Q., WAN, J., XIAO, Y., LIU, J., VASILAKOS, A. V., & LEI, L. A Survey of Long Short-Term Memory Networks for Time Series Prediction. ACM Computing Surveys (CSUR).2021.

KUSIAK, A.; LI, M.; ZHENG, H. Virtual models of indoor-air-quality sensors. Iowa: Applied Energy. 8 f. 2010.

LI, X., CHEN, C., HU, X., & YANG, J. Long Short-Term Memory Network for Remaining Useful Life Estimation in Prognostics. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020.

LIMA. Soft sensor aplicado a plantas de processamento de gás natural em redes neurais artificiais. Rio Grande do Norte: 73 f. 2018.

MA, X.; ZHIMIN, T.; YINHAI, W.; HAIYANG, Y.; YUNPENG, W.; Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data. Elsevier: 187-197.10f. 2015.

MODIRNA, R.; BOULET, B.; Model-Based Virtual Sensors and Core-Temperature

Observers in Thermoforming Applications. IEEE transactions on industry applications, vol. 49. 721-730. 10f. 2013.

NETO, H., B. L. et al. Aplicação de redes neurais recorrentes em séries temporais de estações meteorológicas para imputação de dados: uma abordagem sobre micro estações meteorológicas na região oeste do Pará. Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE). 10 f. 2019.

OLAH, C. Understanding LSTM Networks. 2015. Disponível em: <<https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>>. Acesso em: 6 de julho 2023.

SANTOS, GABRIEL G. P. R. Uso de redes neurais LSTM para predição de séries temporais de demanda de vendas. São Paulo: Unifesp. 81 f. 2022 - Trabalho de Conclusão de Curso-Bacharelado em Ciência da Computação.

SILVA, Carlos A.; REZENDE José F. Acionamento de Máquinas Elétricas. Editora LTC, 2018.

SUTSKEVER, I.; VINYALS, O.; LE, Q. L. Sequence to sequence learning with neural networks. Disponível em:

https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2014/file/a14ac55a4f27472c5d894ec1c3c743d2-Paper.pdf. Acesso em 24 de janeiro de 2024.

THE ASIMOV INSTITUTE. The neural network zoo. 2016. Disponível em:

<https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/>. Acesso em: 5 maio 2023.

VEEN, F. V. The neural network zoo. 2016. Disponível em: <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/>. Acesso em: 5 maio 2023.

Capítulo 4



10.37423/240308785

ALGORITMO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL EM UM SISTEMA BIM - AQUISIÇÃO DE INSUMOS PARA CONSTRUÇÃO NO BRASIL

LUDMILA SANTOS DE ANDRADE

Universidade de Brasília



Resumo: As limitações existentes nas quantidades padrão de extração automática nos sistemas BIM (Building Information Modeling) torna seu uso limitado, pois a quantidade de materiais não são fornecidos nas unidades disponíveis no mercado nacional. Este é um importante dificuldade para aquisição de materiais de construção no Brasil. O problema do nosso estudo é como obter informações adequadas de materiais nas unidades utilizadas pela construção indústria no país. Nossa hipótese é que essa lacuna pode ser preenchida com a criação de um algoritmo dentro de um dos sistemas BIM para obtenção de limites quantitativos específicos de materiais de construção nas unidades disponíveis no Brasil. No método de investigação adotada, fizemos um recorte restringindo nossa pesquisa aos componentes estruturais construtivos parede. Destacamos a seguir os principais procedimentos desta metodologia: (a) a escolha de um sistema familiar de muros; b) a criação de camadas de informações que serão agregadas; c) o cálculo da proporção de limites quantitativos específicos de materiais de acordo com o tabela de composições de preços para Orçamentos (TCPO); e, por fim, d) a geração de limites quantitativos às unidades de compra do mercado nacional. Para demonstrar que nossa hipótese é promissora, o uso do Visual Programming Dynamo para testar o algoritmo dentro do sistema BIM escolhido, Autodesk Revit. O objetivo deste artigo é para mostrar que é possível com um novo algoritmo, implemente-o em uma programação ambiente (Dynamo), e testar sua funcionalidade através de dois modelos de edifícios em o BIM escolhido. Desta forma, levantamos a hipótese de que é possível extrair automaticamente o sistema BIM os dados quantitativos das unidades utilizadas pelo mercado nacional. Os testes do implementação do algoritmo apresentou resultados com as quantidades em unidades de compra, no mercado nacional. Foi, portanto, que o algoritmo executou a ação de extração automática dos dados necessários para aquisição dos insumos para construção no Brasil.

Palavras-chave: BIM, Construção, Algoritmos e linguagem de programação visual.

1 INTRODUÇÃO

Os novos métodos de investigação que pretendem suprir as inúmeras lacunas da construção estão voltados para os sistemas BIM. Esse processo de projeção generativo paramétrico enfoca no modelo único tridimensional que precisa ser compreendido como um repositório de informações para o gerenciamento de todo o ciclo de vida do projeto.

Visto que o modelo tridimensional é uma aproximação da realidade. O modelo único, portanto, compreende o banco de dados visuais dos componentes que desempenham funções específicas nos sistemas. A característica de banco de dados visuais de famílias de objetos deve abranger toda a gama de informações e atributos específicos de cada componente que poderá vir a ser utilizado na construção. Acomodar a somatória de dados dentro do modelo único significa, em última análise, torná-lo um kit completo de peças e informações para a simulação da realidade de um edifício.

A “inteligência” desses sistemas reside nas especificações dos atributos, requerimentos e características parametrizáveis dos componentes em suas camadas de informação, ou seja, nos dados referentes ao desenvolvimento das informações que foram incluídos pelo usuário durante o processo de projeção do modelo.

A realidade da construção está longe de ser solucionada por qualquer plataforma. Visto que o processo de projeção é pautado pelo processo cognitivo do arquiteto e por suas tomadas de decisões, é fácil compreender a impossibilidade de que uma plataforma que consiga suprir as inúmeras variáveis das exigências particulares de cada projeto e, ainda, de cada arquiteto.

Objetivando o desenvolvimento de algumas de suas possibilidades, esse artigo examina os Sistemas BIM como promessa, ainda em desdobramento, de um processo de modelo de informação para a construção. Outro ponto importante da proposta dos sistemas BIM refere-se às implicações dos quantitativos de materiais que poderiam ser idealmente avaliados e extraídos, em qualquer momento, durante o processo de projeção de todos os componentes da construção. Contudo se percebe que há a inconsistência entre a extração padrão das informações e o mercado nacional.

Essa nova abordagem dos quantitativos dos insumos para compra no mercado nacional não deve ser compreendida apenas como uma ferramenta de auxílio para o departamento de logística. A ideia é ir mais à frente, é a aproximação dos sistemas BIM ao mercado nacional, à realidade brasileira, além de buscar a integração entre arquitetura, construção e canteiro de obras.

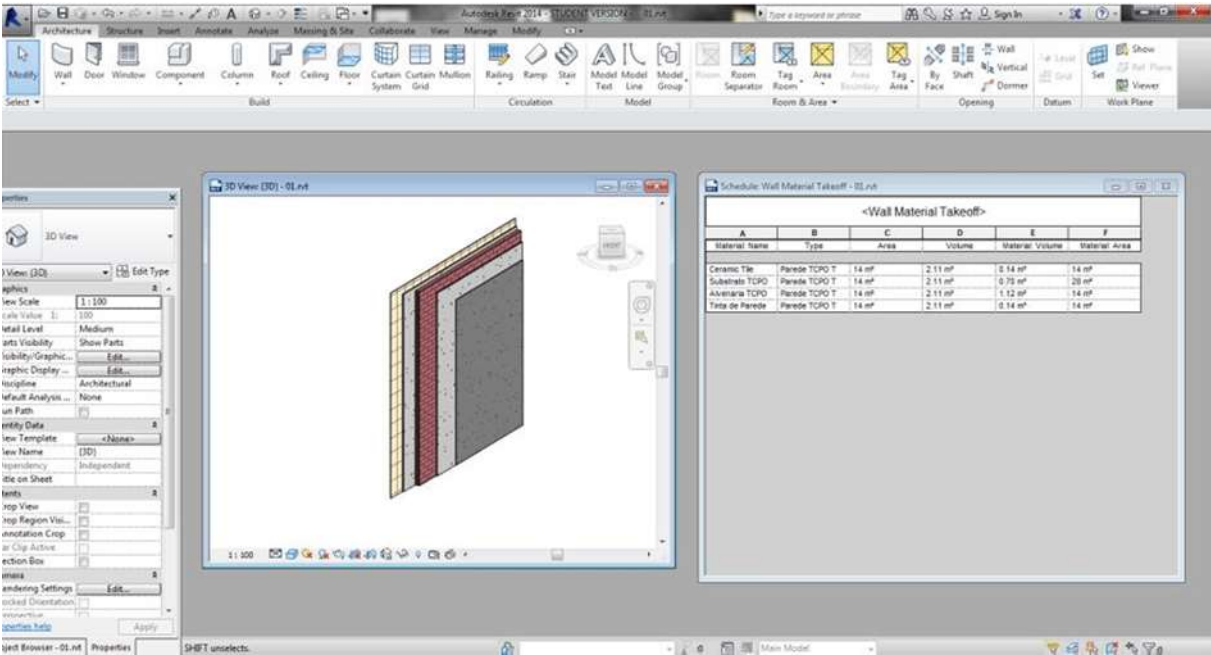


Figura 1 – Materiais Globais (extracao automatica no sistemas BIM)

Fonte: Andrade (2023)

A partir da figura acima, percebe-se que a extração da informação dos materiais de modo global, em área e volume da geometria, não supre as necessidades dos clientes que buscam o mercado brasileiro de construção para comprar os materiais nas medidas disponíveis e comercializadas.

Tabela 1- Modelo de extração das informações nos sistemas BIM padrão

Fonte: Andrade (2023)

Modelo Atual:		
Quantidades Globais		
Paredes		
Tijolos Furados	m²	66,8
Argamassa	m²	267

Ao analisar os sistemas BIM, a extração das informações do modelo é obtida a partir da geometria das camadas de informações; por isso, apenas os dados globais podem ser computados. Por exemplo, ao modelar uma parede nos sistemas BIM, as camadas de informação que a compõem (tijolo, reboco, chapisco e revestimento) permitem que a extração da informação seja apresentada apenas com base na sua geometria, área e volume do material utilizado, como mostra a Figura 1, desconsiderando os insumos que a compõem (tijolos, cimento, areia, brita e cal) e as suas unidades de compra no mercado. Para o mercado nacional o modelo de extração de informação apresentado abaixo é mais vantajoso:

Tabela 2- Modelo de extração por quantitativos de compra

Fonte: Andrade (2023)

Modelo Proposto:			
Quantidade de Compras			
Paredes			
Execução dos componentes:	<u>consumo</u>	Unidade	Quantidade
Bloco de Concreto	267	Unidade	267 Unidades
Execução dos componentes:			
Argamassa de Assentamento	Consumo	Unidade	Quantidade
Cimento	27,24 kg	Saco de 50 Kg	01 Saco
Cal Hidratada	27,24 kg	<u>saco de 20 Kg</u>	02 sacos
Areia Média ou Grossa	0,18 m ³	<u>m³</u>	0,18 m ³

2 A DIMENSÃO DO PROBLEMA

A área da construção civil sempre se destacou no cenário nacional como sendo de investimento de grande vulto no âmbito da economia nacional. Há que se considerar não apenas a sua materialidade, mas também a sua inclusão de sustentabilidade de materiais para se concluir uma dada obra para uma comunidade ou uma sociedade em geral.

A necessidade de uma reflexão sobre os quantitativos de construção gerou a premissa da adaptabilidade dos sistemas BIM ao mercado nacional. Além disso, o pressuposto deste artigo é que o conhecimento exato dos quantitativos de insumos para a construção permite ao arquiteto envolver-se cada vez mais no canteiro de obras e fortalecer o pensamento de que a finalidade do projeto é a construção.

O trabalho seminal publicado em 1975 por Charles M. Eastman no extinto AIA Journal apresentou o conceito mais antigo do que hoje denominamos sistemas BIM (Building Information Modeling). Seu artigo “Conceptual Design of a Building Description System (BDS)” contém uma proposta de sistema de modelagem de projeto arquitetônico que permitiria resultados mais exatos do que os fornecidos por um modelo físico ou por sua representação bidimensional.

“... Qualquer tipo de análise quantitativa pode ser acoplado diretamente à descrição do elemento... a estimativa de custos ou quantidades de material poderia ser facilmente gerada... Assim, BDS (Building Description System)

atuará como coordenador de projeto e analisador, fornecendo uma única base de dados integrada para análises quantitativas e visuais...” (Grifo nosso) (EASTMAN, 1975)

Além das características apresentadas, o Building Description System (BDS) anunciava uma mudança que incluía a integração e automação do processo de concepção arquitetônica. Prometia que, a partir da definição da geometria e das propriedades do modelo, isto é, da modelagem da edificação, as informações referentes à análise quantitativa poderiam ser extraídas automaticamente.

Segundo o relatório de prática recomendado pela Authority for Total Cost Management AACE (Associação Americana de Orçamentação), a determinação dos quantitativos exatos de materiais de construção deveria ser prática comum na construção.

*“O custo total de gestão de recursos em uma obra é a aplicação efetiva de profissionais e técnicos especializados para planejar e controlar os materiais, custos, rentabilidade e risco. Resumindo, é uma abordagem sistemática para gerenciamento da implementação dos materiais de construção durante todo o ciclo de vida de qualquer projeto, produto ou serviço... **O sistema de classificação das fases de detalhe do projeto (conceitual, planejamento e execução) é estimado através da aplicação do conhecimento exato dos materiais de construção a serem aplicados para a realização da obra com apoio do processo de gestão por meio das novas tecnologias**” (AACE, 2011. p.1) (Grifo nosso)*

Nessa citação, a menção ao sistema de classificação das fases de detalhe do projeto é destacada, fazendo referência aos quantitativos exatos dos materiais de construção. A AACE International, que fornece as diretrizes básicas para a aplicação dos princípios gerais de como utilizar os insumos nos projetos, recomenda que a construção atual seja pautada pela exatidão dos materiais de construção.

Portanto, retornando aos sistemas BIM e ainda por esses se tratar de um sistema com várias intenções ainda em aberto, essa pesquisa identificou uma lacuna e buscou o desenvolvimento de um algoritmo para preenchê-la. A lacuna foi assim definida: a falta da extração da informação exata dos quantitativos de compra dos insumos de acordo com as características do mercado nacional.

A customização da interface é uma prática ainda em desenvolvimento, utilizada por poucos escritórios de arquitetura. A interface de aplicação que customiza os sistemas BIM, permite ao usuário, até certo grau, definir, controlar e adicionar novas regras comportamentais baseadas em sua API (Application Platform Interface), seja por gráficos visuais (Visual Programming Dynamo, na família Autodesk) ou por códigos em linguagem de programação. A customização da interface segue as duas abordagens: escrever códigos através de manipulações gráficas ou programar por linguagem de programação. A intenção é que os arquitetos escolham entre programar através de manipulações gráficas (Visual

Programming Dynamo, na família Autodesk) ou escrever códigos diretamente (para isso, é necessário o aprendizado de uma linguagem de programação orientada a objetos). A programação orientada graficamente (Visual Programmig Dynamo) tem o potencial de reforçar os talentos adicionais dos arquitetos em customizar a sua própria interface; de outro modo, poderiam ir além de ter apenas uma relação passiva com suas ferramentas digitais. A customização e a inserção das camadas de informação são um dos cerne dos sistemas BIM, visto que um de seus grandes avanços é a integração de camadas de informação ao modelo geométrico e a possibilidade de customização da interface.

3 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO

O método científico hipotético-dedutivo de Karl Popper apresentado em seu livro “The Logic of Scientific Discovery” (1972) será utilizado nesta tese devido ao seu caráter exploratório. A importância desse método é permitir que a pesquisa seja iniciada a partir de uma hipótese e, posteriormente, se descreva o método de investigação em uma abordagem lógica para que possa ser reaplicada por outros pesquisadores.

Como essa pesquisa tem início a partir de uma lacuna detectada, a hipótese é delineada para resolver esse problema. A customização dos sistemas BIM configura-se como uma necessidade de prover informação específica dos quantitativos de insumos ao mercado nacional.

A apresentação detalhada do método de investigação, segundo estas etapas:

Function()

step 1 Duplicação de uma família de parede básica para a criação de um novo tipo de família - Cria um novo tipo de família, tarefa posterior à duplicação da família;

step 2 identificação dos parâmetros do componente;

step 3 execução de uma listagem da informação para identificar quais os dados que ainda precisam ser obtidos externamente;

step 4 Define as fórmulas matemáticas que serão utilizadas no cálculo das quantidades de cada um dos materiais componentes das paredes;

step 5 inclui as fórmulas matemáticas com as proporções utilizadas pela TCPO - Tabela de Composição de Preços para Orçamentos;

step 6 Propõe uma possibilidade de extrair automaticamente os quantitativos adequados; End

Na prática profissional, este algoritmo desenvolvido poderá ser acrescentado aos dados de todas as outras famílias do Compound Structure Layers do sistema Revit, como pisos, forros e telhados, entre outros. Dessa forma, contribuirá para reduzir os gastos com materiais de construção, uma vez que apresenta quantitativos mais precisos.

As variáveis de duplicação dentro da API de paredes já existem e são de domínio público. Este recurso de duplicação já está disponível para cada classe de parede; caso contrário, não seria possível criar um novo tipo a partir das já existentes. A classe de parede básica, suas propriedades e métodos e seus respectivos tipos são representados pelo WallType, que é uma derivação do ElementType.

Na criação dos materiais da alvenaria TCPO e substrato TCPO se utilizou o método Material.Create(). Nesta biblioteca de materiais não pode haver nomes duplicados dentro do Material Browser.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Ao implementar o algoritmo no Visual Programming Dynamo e testar o protótipo de aplicativo resultante da implementação do algoritmo na casa, Lorenzo permite compreender melhor as possibilidades que os Sistemas BIM por meio da sua API s permitem para extrair e customizar os dados do banco de dados do sistema.

Por exemplo, 15,60 sacos de cimento não estão disponíveis para compra no mercado, pois se vende apenas medidas inteiras. Por isto, o cálculo da quantidade de sacos de cimento deve obedecer ao arredondamento sempre para cima. Isto é, ser for necessários 110 quilos de cimento e sabendo que cada saco de cimento contém 50 quilos, portanto será necessário comprar 3 sacos de cimento.

Tabela 3 - Cálculo do Quantitativos de Materiais

Fonte: Andrade (2023)

Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia média ou grossa sem peneirar no traço 1:2:8.		
Componentes	Unidades de compra	Fórmulas para compra no mercado
Cimento	50 kg	<u>ARRED(número, núm. dígitos)</u> <u>ARREDONDAR.PARA.CIMA(quantidade de insumos/50;0)</u>
Cal hidratada	20 kg	<u>ARRED(número, núm. dígitos)</u> <u>ARREDONDAR.PARA.CIMA(quantidade de insumos/20;0)</u>
Areia média	m ³	<u>ARRED(número, núm. dígitos)</u> <u>ARREDONDAR.PARA.CIMA(quantidade de insumos)</u>
Bloco de concreto 14x 19x 39 cm	Unidade	<u>ARRED(número, núm. dígitos)</u> <u>ARREDONDAR.PARA.CIMA(quantidade de blocos)</u>

A Tabela 3 acima apresenta exemplos de cálculos matemáticos para a conversão dos quantitativos de materiais para as unidades de compra do mercado. Nas compras de materiais vale lembrar que o cimento e a cal hidratada são adquiridos nas quantidades de sacos de 50 e 20 quilos, respectivamente, enquanto a areia é calculada em metros cúbicos inteiros e os tijolos por unidade.

5 IMPLEMENTANDO O PROTÓTIPO DO ALGORITMO

A implementação do algoritmo é importante no processo de verificação da hipótese da tese. O algoritmo será implementado por meio do Dynamo, um programa Open Source[1] (código aberto).

Sommerville afirma na citação abaixo que o processo do protótipo é usual na definição de algoritmo, pois auxilia a identificação de problemas iniciais de requerimentos e também das especificações dos comandos.

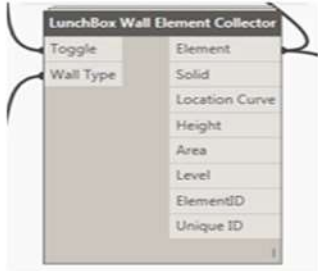
“Um protótipo é uma versão inicial de um sistema de software que é usado para demonstrar conceitos, testar opções de design e descobrir sobre eventuais inconsistências e suas possíveis soluções” (SOMMERVILLE, 2011, p. 45).

Os nodos no Dynamo permitem traduzir os mesmos conjuntos de instruções de diferentes maneiras. Semelhantemente a um editor gráfico de algoritmo, tais transcrições das ações são representadas pelas redes conectadas dos nodos. Este conceito de nodos é melhor apresentado na citação abaixo:

“A interface de programação em gráfico, Dynamo, representa fluxo de dados em um gráfico que consiste de um grupo de nodos que processam os dados e as ligações entre eles. Estes nodos podem ser selecionados a partir de uma série de menus e arrastados para o ambiente de trabalho. Os nodos podem representar funções, parâmetros ou mesmo geometria e são conectados com linhas. Esta abordagem permite a implementação de algoritmos complexos combinando os nodos” (FERREIRA e LEITAO, 2015, p. 638)

Tabela 4 - Cálculo do Quantitativos de Materiais

Fonte: Andrade (2023)

Fluxograma do Algoritmo	Nodo do Dynamo
A criação das partes das paredes. Escolha as camadas de material do <i>CompoundStructure</i> <i>layer</i> se forem especificadas; Cheque o comportamento do material e apenas o aceite se as camadas forem paralelas; Use o paralelismo para criar as outras camadas;	
A listagem dos atributos / Filtragem dos parâmetros Definir a estrutura padrão das paredes; Definir a estrutura padrão das paredes; Valide as informações e atributos das paredes básica; Liste todos os parâmetros do elemento parede	
Inclusão dos cálculos nos <u>parâmetros da parede</u>. A partir da propriedade da área crie as proporções TCPO de cimento, cal hidratada, areia e bloco de concreto com fórmula matemática para a extração dos quantitativos	

Etapas anteriores a implementação do algoritmo está demarcada pela especificidade da inclusão do material no objeto parede. As etapas do algoritmo se iniciam com, a) criação das partes do objeto, b) a listagem de todos os atributos da Parede TCPO (Parede teste nesta tese); c) a listagem do parâmetro área como sendo o único dado que será utilizado pelo algoritmo; e d) A inclusão dos cálculos matemáticos necessários para a execução do algoritmo.

Tabela 5 - Cálculo do Quantitativos de Materiais

Fonte: Andrade (2023)

Para a proporção de cimento adote a <u>fórmula</u> - Quantidade = (Área x 5,28); Para a proporção de cal Hidratada adote a fórmula - Quantidade = (<u>Área</u> x 0.65);	
As informações adequadas ao mercado nacional. Para compras no mercado adote as fórmulas para calcular arredondamento numérico dos sacos de cimento e cal hidratada; Para a compra de sacos de cimento adote a formula = <u>ARREDONDAR PARA CIMA</u> (quantidade de cimento/50;0); Para a compra de sacos de cal Hidratada adote a fórmula = <u>ARREDONDAR PARA CIMA</u>(quantidade de cal/20;0);	

6 TESTE DO PROTÓTIPO DO ALGORITMO

Casa Lorenzo - Este primeiro modelo de casa econômica possui 65 m², contendo 1 sala de jantar/estar, 2 quartos, 1 banheiro, 1 cozinha e 1 área de serviço.



Figura 1 - Imagem renderizada da casa Lorenzo

Fonte: Andrade (2023)

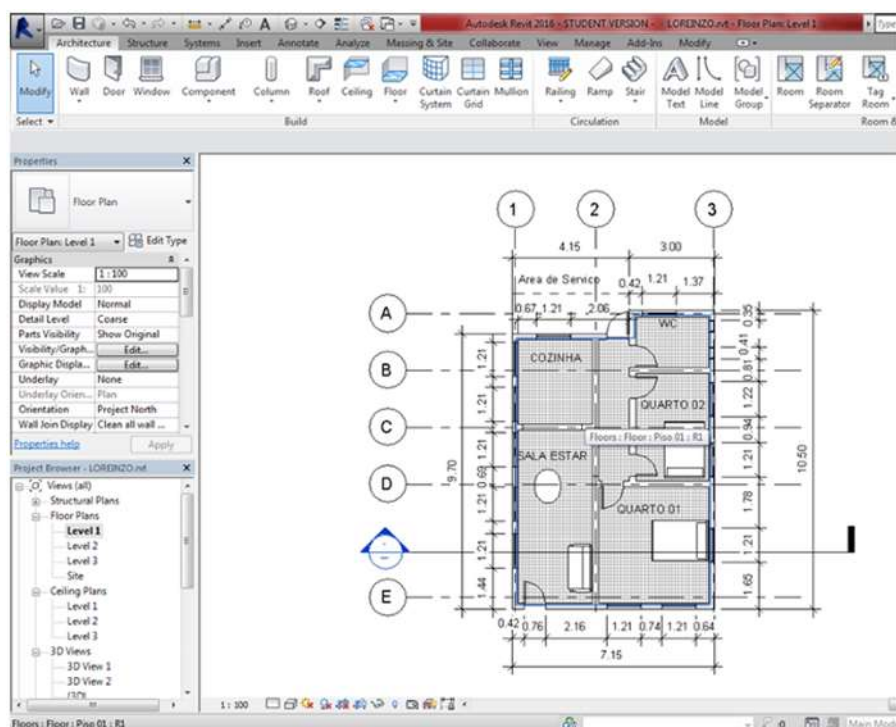


Figura 2 - Planta-baixa casa Lorenzo

Fonte: Modelo da autora (2023)

Obtivemos o resultado esperado do teste de implementação do algoritmo, isto é, os quantitativos de materiais de acordo com as unidades de compra no mercado nacional. Por meio da imagem abaixo pode-se observar que obtivemos êxito. Os quantitativos de cimento foram calculados automaticamente pelo algoritmo resultando em 17 sacos de 50 quilos de cimento necessários para a elevação da alvenaria estrutural.

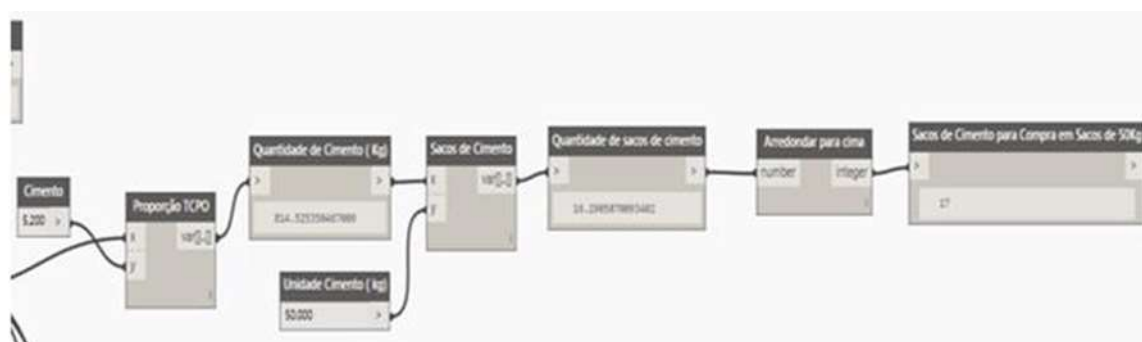


Figura 3 - Resultado do Quantitativo de Sacos de Cimento para Compra.

Fonte: Modelo da autora elaborado no Dynamo 2023.

Observa-se na figura acima que o nodo “Quantidade de Cimento (Kg)” apresenta a informação de 814,52 quilos. Como é do conhecimento geral, o cimento é vendido em sacos de 50 quilos. Portanto, incluímos no nodo “Sacos de Cimento” uma nova variável no cálculo de proporção entre a quantidade de quilos de cimento e a unidade de sacos de cimento de 50 kgs.

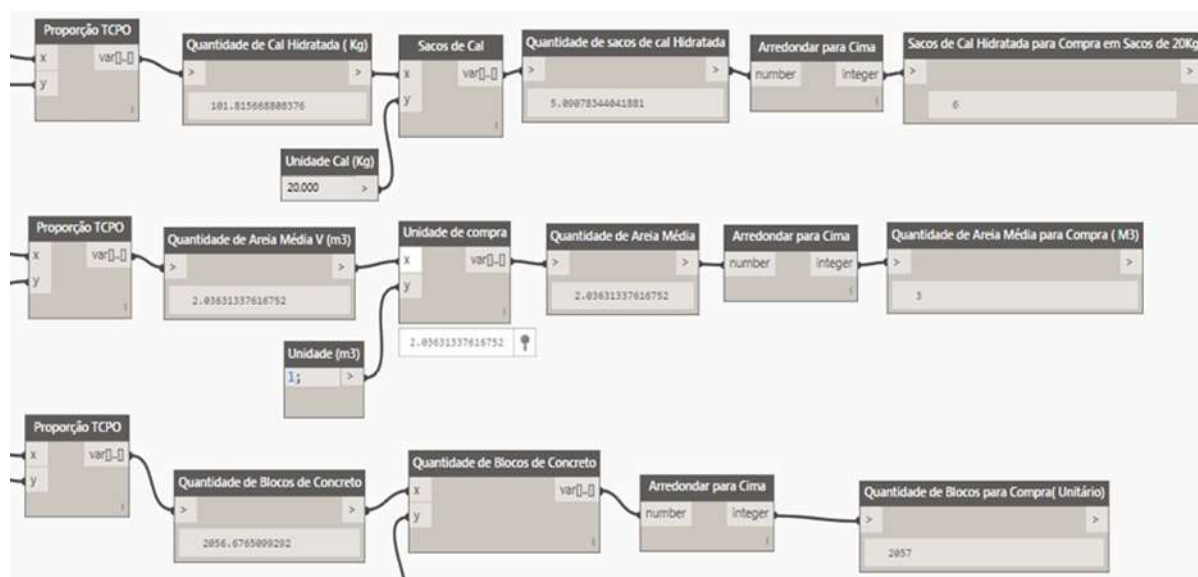


Figura 4 - Resultado do Quantitativo de Cal, Areia e Blocos para Compra.

Fonte: Andrade (2023)

A imagem acima mostra que serão necessários 6 sacos de 20 quilos de cal hidratada, 3 m³ de areia média e 2057 unidades de blocos de concreto para a construção das paredes estruturais.

7 CONCLUSÃO

Por fim, demonstramos que a hipótese deste artigo é promissora e que, portanto, é possível extrair automaticamente os dados de insumos do modelo e os respectivos quantitativos de materiais nas unidades nacionais por meio do API do Sistemas BIM. Neste sentido o algoritmo foi elaborado, implementado no Dynamo e a seguir testado com sucesso para extrair, resultando em uma contribuição original ao conhecimento.

8. REFERENCIAS

BRIDGES, A. The Challenge of Constraints: A Discussion of Computer Applications in Architectural Design. Laboratório de Projeto de Arquitetura e Fabricação Digital - FAU/UnB, Glasgow, 1993.

Eastman, Charles. (1975). The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. AIA Journal. 63.

Eastman, C. et al. (2008) BIM Handbook: A guide to Building Information. Indianapólis: Wiley Publishing, 2008.

Ferreira, B.; Leitaó, A. (2015) Generative Design for Building Information Modeling, Viena, v. 01º, n. 1!, p. 635 - 645, 2015.

Sommerville, I. (2011) Software Engineering. 9º. ed. Lancast: University of Lancaster.

AACE

Capítulo 5



10.37423/240308789

PROPOSTA DE NOVA TOPOLOGIA DE CONEXAO PARA TRANSFORMADORES DE CORRENTE VISANDO A OTIMIZACAO DA EXATIDÃO

RODRIGO CERQUEIRA CIARLINI

Universidade Federal do Ceará

Francisco Kleber de A. Lima

Universidade Federal do Ceará



Resumo: Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os fatores que provocam aumento no erro em transformadores de correntes empregados na medição e proteção, como apontado na literatura especializada, e propor uma nova metodologia de medição composta por uma inovação na topologia de conexão e tratamento dos dados medidos com uso de métodos de compensação computacional, com a finalidade de otimizar a exatidão dos transformadores de corrente. Desta maneira, é possível reduzir perdas de faturamento no sistema e possibilitar que relés de proteção possam realizar medições de qualidade de energia com a maior confiabilidade possível. Os resultados experimentais presentes neste trabalho validam a teoria proposta e sugerem que esta metodologia de medição tem potencial para uma importante inovação neste tema.

Palavras-chaves: Transformadores de corrente; medição de faturamento; qualidade de energia; sistema de potência.

1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de medição de energia elétrica realizados de maneira indireta por intermédio de Transformadores de Corrente (TC), a informação final levada ao equipamento eletrônico que irá processar o sinal elétrico, seja ele um relé de proteção ou medidor de energia, tem como ponto fundamental a exatidão. Assim, é comum utilizarmos transformadores de corrente para aplicações específicas de proteção e medição. Esta condição dá-se ao fato de que em se tratando de um sistema de proteção, a finalidade do TC ganha particularidades construtivas ligadas à sua capacidade de saturação e robustez, em detrimento ao aumento do erro de leitura disponibilizado para ser processado nos equipamentos eletrônicos de medição. Desta forma, faz-se necessário reavaliar a topologia de ligação do TC ao medidor e ao relé de proteção, com o olhar voltado para otimizar a condição de exatidão do mesmo e mitigar ao máximo os erros que contribuem para leitura das grandezas elétricas de um sistema de medição indireta. Através de ensaios e análises do comportamento fasorial das leituras instantâneas do TC nos lados primário e secundário, medimos os erros totalizados em um conjunto de pontos de medição e mapeamos os dados. Aplicando nova topologia proposta de ligação, com a finalidade de criar uma condição padrão de carga secundária fixa, além do processamento das leituras medidas com o objetivo de compensar os erros fasoriais, constatamos que é possível melhorar a exatidão de um TC, levando o erro a próximo de zero em relação ao dado inicial medido. Esta se converte em uma importante contribuição deste trabalho. Esta condição permitirá maior confiabilidade no uso destes equipamentos tanto no processamento de consumo de energia como de qualidade e proteção do sistema elétrico de potência. Por fim, teremos a redução da quantidade de equipamentos em serviço e o compartilhamento dinâmico da informação advinda do sistema elétrico de potência.

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Em transformadores de corrente para uso em sistemas de proteção, uma vez que o objetivo principal desta aplicação é suportar e realizar leituras de curtos-circuitos elevados e disponibilizar medições em uma considerável faixa acima da relação nominal estabelecida em placa, é comum encontrarmos transformadores de corrente para aplicações em sistemas de proteção que suportam medir até 20 vezes sua corrente nominal de placa ao custo de um erro em torno de 10%. Erro tolerável para a atual topologia para TC - relé de proteção é inviável para uso em medições de faturamento e qualidade de energia, mesmo para normas que vigoram.

A classe de exatidão é responsável por definir os erros que poderão surgir nos transformadores de corrente, com indicação das condições de operação que deverão ser atendidas para que o limite de erro não seja ultrapassado.

Comumente, existem três condições que podem ser estabelecidas para determinado limite de erro. Essas condições são; impedância, tensão eficaz e potência aparente. Todas estas condições estão relacionadas ao secundário do transformador de corrente, e cada uma delas possui uma letra, definida por norma, que as identifica em placa e que varia de acordo com a norma a qual o transformador de corrente foi especificado. A Tabela 1 mostra esse detalhamento para os padrões ABNT, ANSI e IEC.

Assim, em um transformador de corrente comercial cuja placa indica que a norma de orientação para sua construção é ABNT e que ele tem exatidão 10B200, concluímos que o erro máximo tolerável é de 10% e que a máxima tensão no secundário não ultrapasse 200 Volts, características típicas de um transformador de corrente associados a relés de proteção.

Tabela 1. Formas de expressar condições de classe de exatidão pelas normas ABNT, ANSI e IEC.

ABNT		
Padrão		
Aplicação	Medição	Proteção
Parâmetro	Potência (VA)	Tensão (V)
Símbolo	C	B

ANSI		
Padrão		
Aplicação	Medição	Proteção
Parâmetro	Impedância (ω)	Tensão (V)
Símbolo	B	C

IEC		
Padrão		
Aplicação	Medição	Proteção
Parâmetro	Potência (VA)	Mult. Corr.(A) e Pot(VA) (V)
Símbolo	VA	P/VA

Ressalta-se ainda que, quando a classe de exatidão especificar a tensão, isso indica a máxima tensão que deve surgir para uma corrente indicada pelo fator de sobre corrente para que não haja alterações na curva de saturação do TC. E quando a classe de exatidão especificar a potência, significa que essa deverá ser a máxima potência dissipada pela carga conectada ao secundário do TC quando uma corrente nominal circular por ele (Albertos and Antônio, 2006).

No que diz respeito aos relés de proteção é totalmente possível realizar avaliações de qualidade de energia e medição para faturamento quando pensamos apenas em sua eletrônica e sua capacidade de processamento de sinais. No entanto, temos como limitante o fato de o TC de proteção associado ao relé apresentar erro permitido de 10%, o que acaba por inviabilizar as características de medição

de qualidade e faturamento prevista nos submódulos do ONS, por exemplo. Outro ponto impactante neste âmbito é que o erro de leitura aumenta em função da corrente medida tomando como referência a relação de transformação de placa dos equipamentos. Ou seja, quanto mais distante, para mais ou para menos, a corrente lida pelo TC estiver da corrente nominal, relação de transformação de placa, maior será o erro percebido. Esta condição também se repete em transformadores de corrente com melhor classe de exatidão e que são de uso exclusivo para medições de qualidade de energia e faturamento de energia. Podemos observar tal característica analisando o paralelogramo de exatidão de um TC na Figura 1. O paralelogramo externo se refere a duas vezes a classe de exatidão nominal para uma corrente de ensaio igual a 10% da nominal. Para correntes aplicadas iguais a 10% da nominal existe uma tolerância duas vezes maior de erro, pois a corrente de magnetização é constante para um TC, independente da corrente que circula no primário, logo, para baixos níveis de corrente no primário, a corrente de magnetização apresentará uma parcela percentual significativa. Ou seja, o paralelogramo interno refere-se a 100% da corrente nominal, e o paralelogramo externo refere-se a 10% da corrente nominal, Almeida et al. (2006).

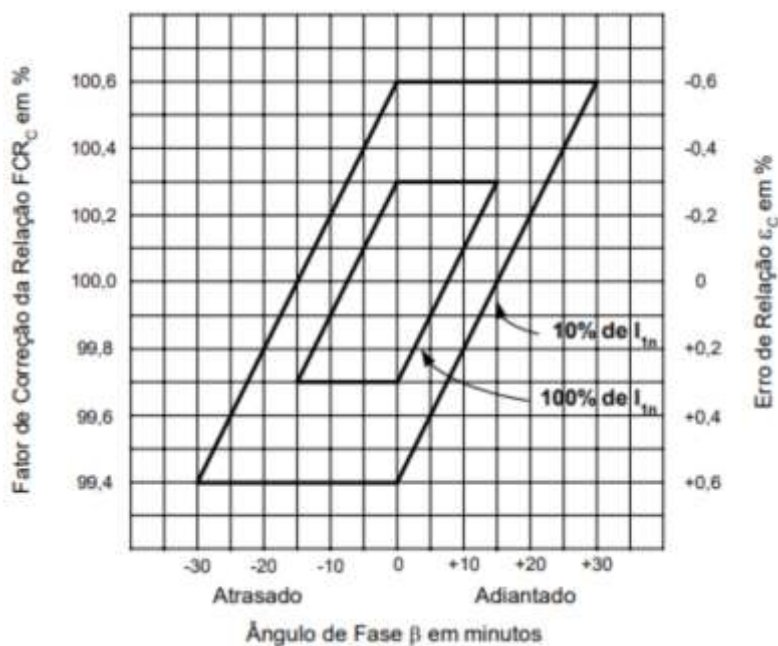


Figura 1. Paralelogramo de exatidão para TCs classe de exatidão 0,3.

Por essa característica, especificamos transformadores de corrente para medição e proteção com enrolamentos distintos e que, portanto, vão obedecer a classes de exatidão diferentes. O que acaba por nos obrigar a instalar equipamentos separados ou com duplo enrolamento. De tal sorte que em uma mesma instalação onde se quer avaliar, medição para faturamento, qualidade e proteção para

um mesmo ponto, é necessário um conjunto de transformadores de corrente e medidores independentes.

Assim, a proposta do trabalho traz como pilar principal o avanço desta tecnologia na direção de garantir melhores condições de exatidão permitindo, redução nas perdas de faturamento por erro de leitura e, portanto, registro de consumo ou geração de energia e compactação de projetos de subestações de energia elétrica que passarão a fazer uso de menor quantidade de equipamentos.

A operação de um TC pode ser melhor explicada através de um diagrama fasorial que tomamos como referência na figura a seguir, partindo de um circuito simples apresentado nas Figuras 2 e 3.

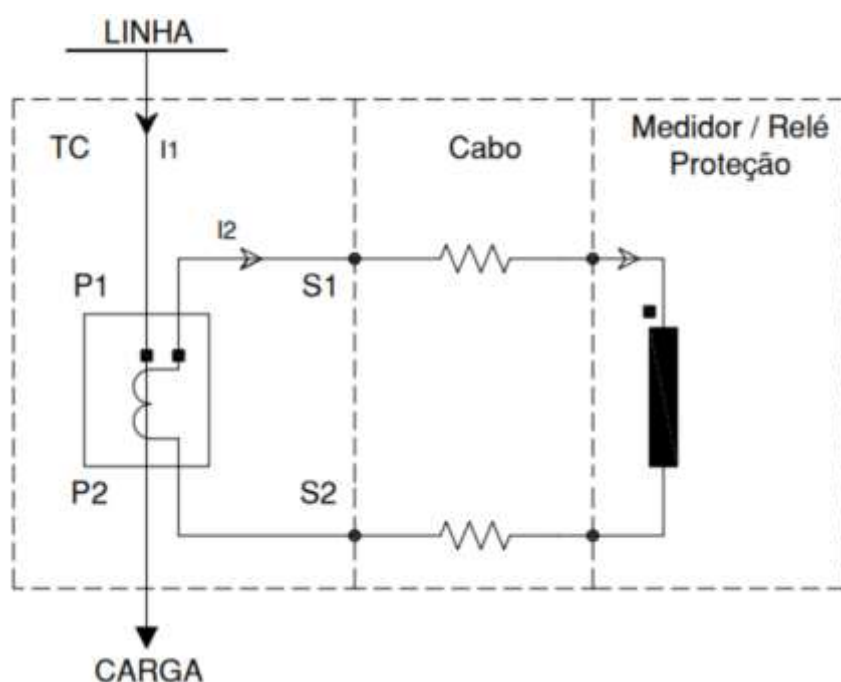


Figura 2. Representação do transformador de corrente Ideal.

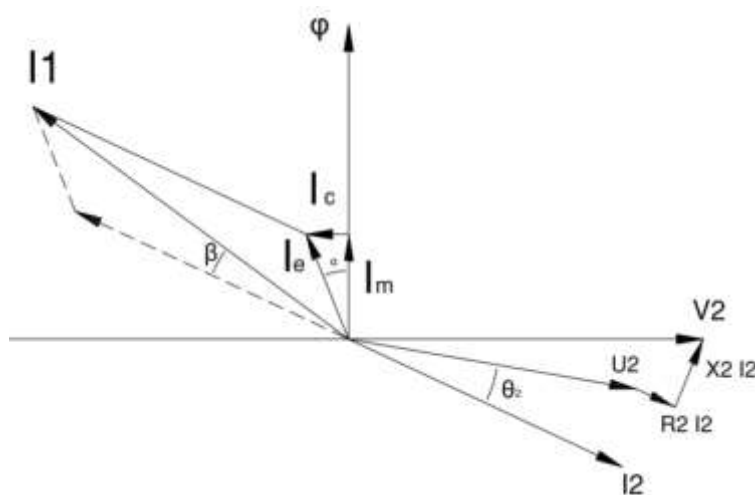


Figura 3. Diagrama fasorial do transformador de corrente.

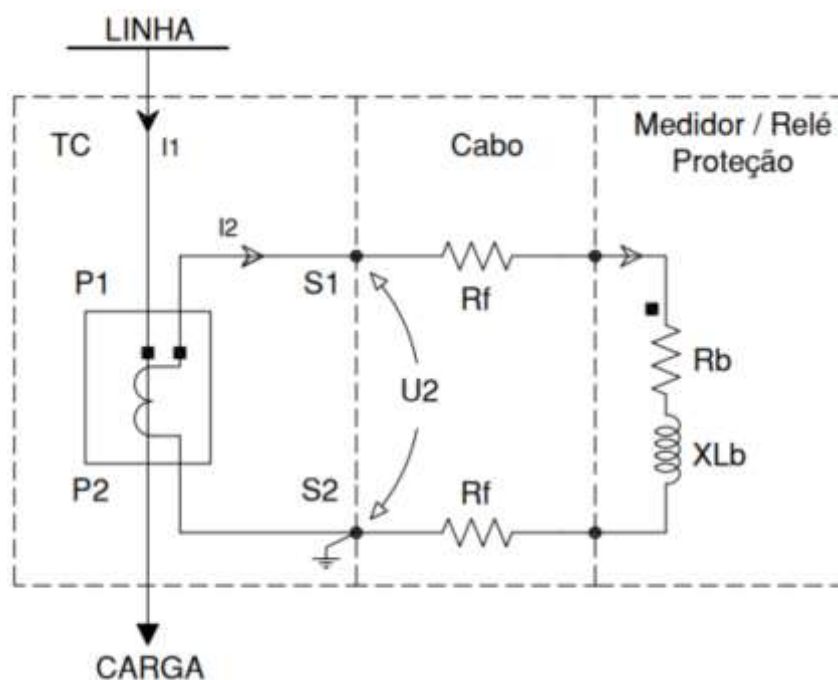


Figura 4. Representação do transformador de corrente real com carga.

A Figura 4 é a representação de um transformador de corrente com carga (medidor e cabos de interligação), sem a representação do ramo de magnetização.

Uma vez que circule uma corrente nominal da sua relação no primário que intitulamos de I_1 então circulará em seu secundário I_2 pela ação característica do transformador de corrente, de modo que independentemente do valor de corrente que circule no primário, o TC deve manter a relação, perfazendo a seguinte equação, I_1/I_2 para o caso em questão. Uma vez que não há conexão direta entre o primário e o secundário, o medidor estará isolado a nível de tensão primária. O fechamento da carga conectada ao secundário (medidor ou relé de proteção) deve ser aterrado como no circuito representado, tão somente no lado secundário e em um único ponto. Esta condição de ligação entre o TC e a carga no secundário (medidor ou relé de proteção) é condição de ligação prevista e usual em todas as instalações mundiais.

Apresentamos a seguir as principais relações de transformação normalizadas pela ABNT para que no futuro possamos tomar uma destas como exemplo prático para validar nossa proposta de topologia.

Tabela 2. Relações nominais simples de transformadores de corrente.

Corrente primária nominal (A)	Relação nominal In - 5A	Relação nominal In - 1A	Corrente primária nominal (A)	Relação nominal In - 5A	Relação nominal In - 1A
5	1:1	5:1	100	20:1	100:1
10	2:1	10:1	150	30:1	150:1
15	3:1	15:1	200	40:1	200:1
20	4:1	20:1	150	50:1	250:1
25	5:1	25:1	300	60:1	300:1
30	6:1	30:1	400	80:1	400:1
40	8:1	40:1	500	100:1	500:1
50	10:1	50:1	600	120:1	600:1
60	12:1	60:1	800	160:1	800:1
75	15:1	75:1	1000	200:1	1000:1

Outro ponto relevante é que as marcas de polaridade indicadas nos nossos circuitos e marcas fisicamente nos transformadores de corrente, são usadas para mostrar o fluxo instantâneo de corrente nos enrolamentos primários e secundários. Assim, a corrente I_1 , que circula pelo primário na direção do terminal P_1 para o terminal P_2 como observado na Figura 4, terá na corrente secundária I_2 a direção apresentada no mesmo instante saindo no terminal S_1 para o terminal S_2 .

Em uma dada medição de grandeza fasorial com uso de TC, portanto, são introduzidos dois erros: o erro de relação e o erro de ângulo. O erro da relação pode ser calculado como apresentado a seguir:

$$\epsilon\% = \frac{RTC \cdot I_s - I_{pn}}{I_{pn}}, \quad (1)$$

Onde:

RTC: Relação de Transformação Nominal do Transformador de corrente, especificado em placa.

I_s : Corrente eficaz medida no secundário do transformador.

I_{pn} : Valor eficaz da corrente primária, na condição especificada.

$\epsilon\%$: Erro percentual podendo assumir valores positivos ou negativos.

Como apresentado no diagrama fasorial da Figura 3, temos na representação do ângulo β o erro de ângulo de fase entre a corrente primária e o inverso da corrente secundária, podendo este, assumir valores positivos ou negativos. Para tanto é necessária uma análise mais detalhada do circuito equivalente do TC conectado a carga e um conjunto de ensaios de exatidão.

A Figura 5 apresenta um esquema elétrico simplificado de um TC uma vez que a impedância do enrolamento primário pode ser desconsiderada, e a corrente primária é determinada pela carga do circuito no qual o transformador de corrente está instalado e a queda de tensão nesta impedância é de valor desprezível, sendo também omitido do transformador $N1:N2$ e todas as correntes e tensões são referenciadas do lado secundário.

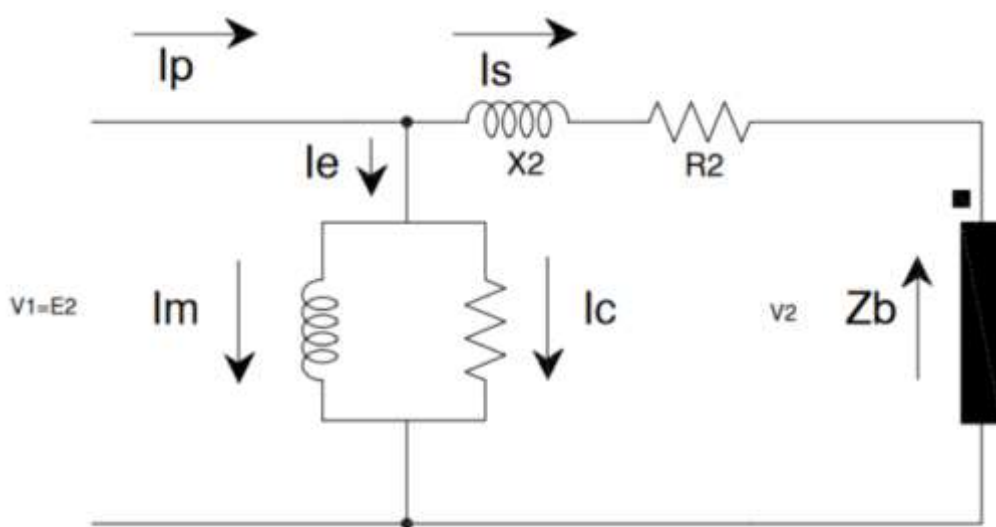


Figura 5. Circuito equivalente simplificado de um TC.

A corrente de excitação I_e é necessária para magnetizar o núcleo. A corrente necessária para alimentar a carga do secundário não reflete, portanto, em módulo e em ângulo a corrente primária, produzindo os erros de relação e ângulo de fase do TC.

A influência dos condutores (cabos de interligação) utilizados para conectar o secundário do TC ao medidor criam pequena queda de tensão, que quando se referem a erros de exatidão. A impedância do medidor ou relés de proteção e a resistência dos cabos são então a carga a considerar no enrolamento secundário (carga imposta), conforme podemos observar na Figura 4 e comentado em Molina (2012). Tomamos assim:

R_f : Resistência dos cabos de interligação.

$Z_b = R_b + X_{Lb}$: Impedância do medidor.

O diagrama fasorial mostrado, Figura 3, representa um TC com relação 1:1, para facilitar a didática e a formatação das equações básicas, a partir das quais, contextualizar futuras ações.

2.1 MODELO MATEMÁTICO

O fluxo magnético ψ no núcleo induz uma tensão V_2 no secundário atrasado do fluxo magnético ψ em 90° . A tensão V_2 dá origem a U_2 após levarmos em consideração as quedas de tensão intrínsecas em R_2 e X_2 nos terminais do secundário do TC. A corrente I_2 é determinada pela tensão U_2 nos terminais do secundário e pela impedância do circuito secundário Z_{fb} ;

$$Z_{fb} = (R_f + R_b) + jX_{Lb}, \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{fb}}. \quad (3)$$

I_2 defasa de U_2 pelo ângulo θ_2 onde $\cos(\theta_2)$ é o fator de potência da carga secundária do TC.

A queda de tensão $R_2 \cdot I_2$ está em fase com I_2 e a queda de tensão $X_2 \cdot I_2$ adiantada em 90° a corrente I_2 . A tensão induzida no enrolamento secundário V_2 menos a queda de tensão $I_2 \cdot Z_2$ no próprio enrolamento secundário é igual à tensão U_2 nos terminais do secundário do TC.

A corrente de magnetização, I_m , requerida para fornecer o fluxo magnético ψ está em fase com este. I_c é a corrente consumida na histerese e nas perdas por correntes parasitas no núcleo, e adiantada de I_m por 90° . A soma fasorial de I_m e I_c é a corrente de excitação I_e . Assim, podemos observar que a corrente de excitação é a causa principal de erros de relação e ângulo de fase de um transformador de corrente. Uma vez que o fluxo magnético varia em função da corrente primária, e esta irá variar em ampla faixa. A corrente de excitação que produz este fluxo, também varia em ampla faixa. Deste modo, considerando as não linearidades do circuito magnético, as variações de corrente de excitação não serão proporcionais às correntes no primário.

Sobre os efeitos da carga secundária no erro de relação e do ângulo de fase temos como fator relevante que para uma mesma corrente no primário a carga imposta no secundário poderá variar em função da distância entre o TC e o relé ou medidor de energia, fazendo com que os cabos alcancem distâncias muitas vezes acima de 100 metros e que a carga representada pelo relé ou medidor ficará a cargo do fabricante que o construiu. Desta forma, naturalmente poderemos ter um aumento na tensão do secundário para que, assim, o circuito realize a manutenção da corrente secundária refletida. Desta maneira, a tensão induzida em E_2 também irá aumentar e, consequentemente, aumentando

o fluxo magnético e a corrente de excitação, sendo ela a principal causadora dos erros de relação e ângulo de fase.

A norma IEC 60044-1 (IEC, 2003) adverte que as condições de classe de exatidão de um dado TC não são garantidas para cargas impostas no secundário que fujam da nominal, prevista em norma. Ou seja, caso uma carga maior que a suportada pelo secundário de um dado TC seja instalada, haverá um erro acima das condições máximas permitidas em norma.

É importante mencionar ainda que para cargas impostas abaixo de 25% do valor nominal, esta exatidão também não é garantida de acordo com Brito (2011). Este é um ponto de grande relevância, haja visto que o sistema elétrico de potência em seus trabalhos de modernização (retrofit), instalam novos medidores e relés associados a antigos transformadores de corrente, e que por sua vez operavam anteriormente com medidores ou relés de carga muito maior que os mais modernos. Portanto como a nova carga secundária, muitas vezes, estão abaixo dos 25% mencionados e previstos em norma, esta condição de modernização acaba por contribuir para erros mais elevados ou desconhecidos de medição fasorial.

Em termos práticos, a condição de carga imposta variável em função das distâncias entre TC e o IED ou medidor e os diversos fabricantes destes, limitam a possibilidade de mapeamento do erro geral do sistema, haja visto que a carga imposta irá variar caso a caso para cada projeto e que, portanto, o fabricante do TC sempre deverá garantir uma faixa, relativamente ampla para assim abranger essas variações de projeto (Ciarlini, 2019).

2.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

A norma internacional IEC 60044-1 (IEC, 2003) define os limites dos erros de módulos de corrente de acordo com as Tabelas 3 e 4 apresentadas a seguir.

Tabela 3. Limites de erros de corrente para TCs de medição (%) classes de 0,1 a 0,5.

Classes de exatidão	$I_1/I_2 \times 100\%$			
	5	10	100	120
0,1	$\pm 0,40$	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
0,2	$\pm 0,75$	$\pm 0,35$	$\pm 0,20$	$\pm 0,20$
0,5	$\pm 1,50$	$\pm 0,75$	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$

Tabela 4. Limites de erros de corrente para TCs de medição (%) classes de 0,1 a 0,5.

Classes de exatidão	$I_1/I_2 \times 100\%$			
	5	10	100	120
0,1	$\pm 15,00$	$\pm 8,00$	$\pm 5,00$	$\pm 5,00$
0,2	$\pm 30,00$	$\pm 15,00$	$\pm 10,00$	$\pm 10,00$
0,5	$\pm 90,00$	$\pm 45,00$	$\pm 30,00$	$\pm 30,00$

3. PROPOSTA DA TOPOLOGIA

Em face ao conjunto de explanações e equações apresentadas que norteiam o somatório de variáveis que contribuíram para o erro geral do sistema de medição, propõe-se uma nova topologia que reduz toda a carga imposta no secundário do TC a valores ideais conhecidos, uma vez que a carga será definida pelo fabricante do TC e fixada ao secundário do mesmo na sua caixa de ligação secundária, e o mais importante, torna fixa a carga imposta permitindo assim o mapeamento da curva de erro para as diversas correntes no primário e, portanto, uma oportunidade de correção destes erros via software de compensação vetorial, (Albertos and Antônio, 2006). Ou seja, sem eventuais variações da carga imposta em função da distância dos transformadores de corrente aos relés e medidores. A Figura 6 representa a topologia convencional com ampla aplicação.

A nova topologia proposta é apresentada na Figura 7.

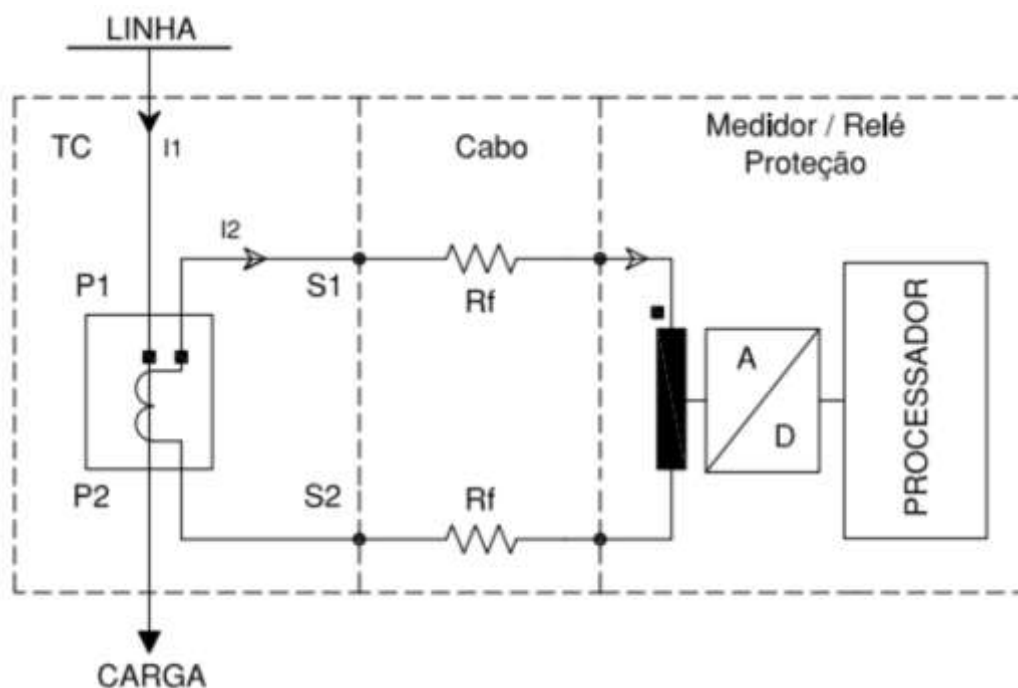


Figura 6. Topologia convencional entre TC e Medidor.

Na nova topologia, apresentada na Figura 7, a bobina que realiza a leitura da corrente dentro do medidor é conectada

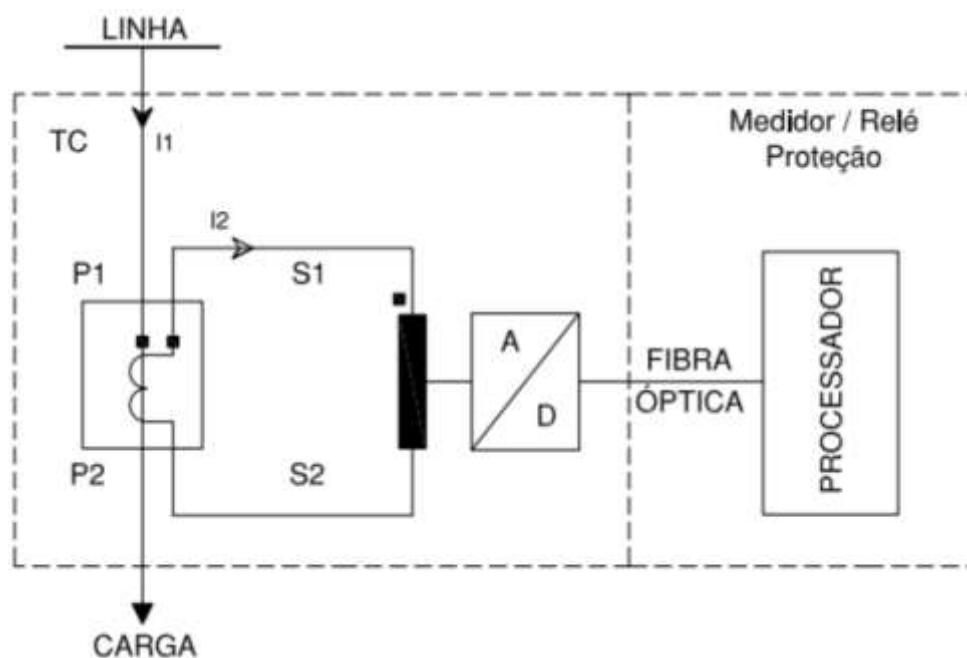


Figura 7. Topologia inovadora entre TC e medição.

Diretamente ao enrolamento secundário e instalada dentro da caixa de ligação junto ao TC. Isso vale também para o conversor A/D - Analógico Digital que agora passa a integrar o conjunto do TC. Assim, a conexão entre o TC e o medidor ficará a cargo de um par de fibra óptica como observado. Esta proposta de topologia torna fixa a carga do TC e agora podemos realizar um conjunto de ensaios e mapeamento dos erros de relação e ângulo de fase.

Uma vez que fica a cargo do fabricante do TC o conjunto completo de carga imposta, as condições de carga variável deixam de ser relevantes do ponto de vista dos ensaios de exatidão com várias cargas tornando completamente viável o projeto de uma carga que obtenha o “ponto de exatidão” ótimo para um dado TC. Outra vantagem relevante é a redução na interferência magnética que o condutor de interligação sofre ao longo da conexão e, portanto, acaba por requerer instalações especiais que visem a redução da interferência por campos externos. É o caso de subestações de alta tensão, onde o condutor de interligação necessita de blindagem e ainda de instalação em tubulação em aço. Com a nova topologia, a interligação fica a cargo do cabo de fibra óptica reduzindo custos e aumentando a confiabilidade do sistema de medição.

Assim, temos como novo parâmetro para análise de erro, apenas o erro composto, uma vez que a variável “carga imposta” se tornou fixa e definida pelo fabricante do TC em sua etapa de projeto e fabricação.

Uma vez que são conhecidos os erros de relação e erros de ângulos é possível aplicar diretamente a equação que define o TVE (Total Vector Error) conforme Molina (2012), erro total vetorial, de acordo com a norma IEEE C37.118/2005 (Martin et al., 2008), apresentado em (4), a seguir, que determina o erro total percentual.

$$TVE\% = 100 \cdot \sqrt{\left[\left(1 + \frac{\epsilon\%}{100}\right)\cos\beta - 1\right]^2 + \left[\left(1 + \frac{\epsilon\%}{100}\right)\sin\beta\right]^2} \quad (4)$$

Mapeados os erros e reconhecido o fasor medido real, face ao fasor ideal, conseguimos definir o fasor resultante que fará a compensação do erro natural do TC. A arquitetura básica, Figura 7, segue a seguinte sequência do fluxograma apresentado na Figura 8 para efetuar as correções de erro e apresentar o resultado corrigido e, finalmente, avaliar os resultados, retornando um feedback ao software de correção (Skogestad and Postlethwaite, 2005).

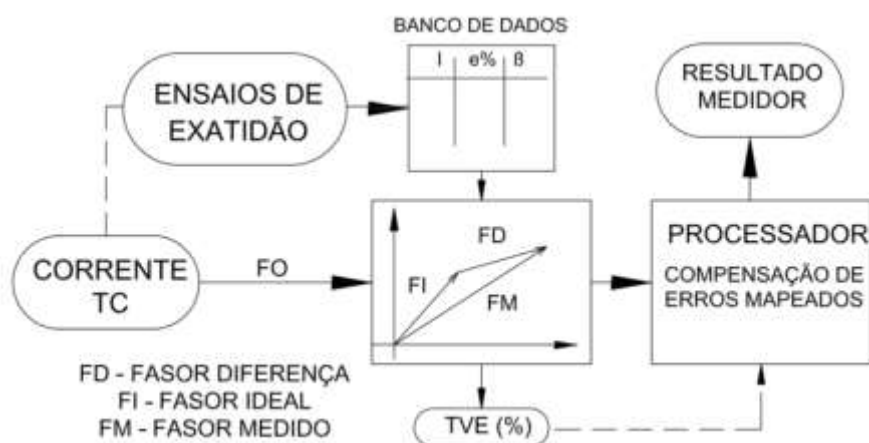


Figura 8. Arquitetura básica de compensação de erros.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E ENSAIOS

Na primeira etapa do processo realizamos um conjunto de ensaios com o objetivo de mapear o comportamento real do erro do TC buscando verificar o erro de relação $\epsilon\%$ e erro de ângulo β para a nova carga imposta “fixa” adotada.

Variamos a corrente no primário ampère até seu valor nominal de relação de transformação e analisamos o ângulo β e o erro de relação e calculamos caso a caso o erro total percentual como apresentado em (4). A Figura 9 apresenta o circuito básico para levantamento das variáveis, onde utilizamos uma fonte de corrente ajustável como fonte e um osciloscópio de ensaios.

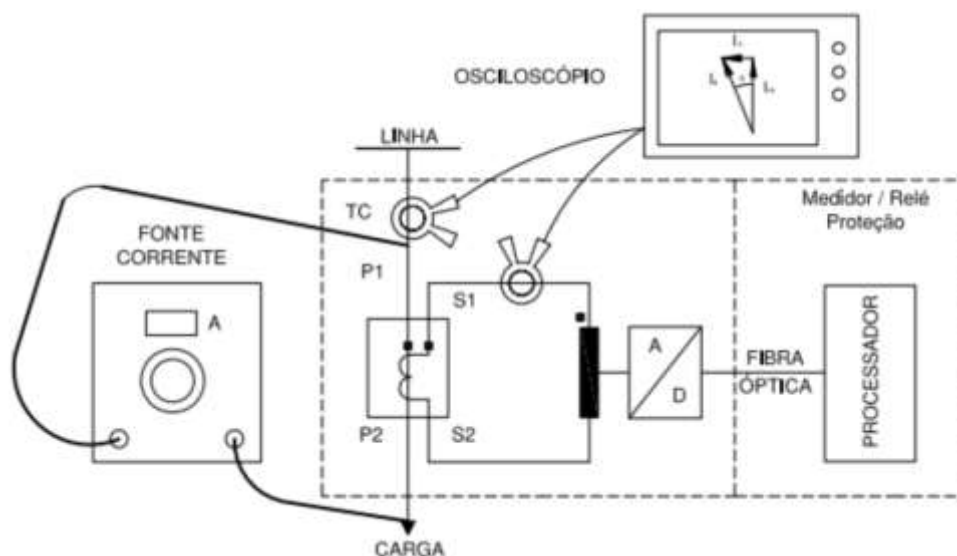


Figura 9. Montagem básica para ensaios e avaliação dos erros no TC.

Realizamos um conjunto de ensaios com a finalidade de se obter uma amostragem dos erros de relação e erros de ângulo. Todos os pontos medidos foram repetidos por cinco vezes com a finalidade de verificar o desvio padrão dos resultados afim de avaliar o grau de dispersão para o conjunto de pontos medidos. A Tabela 5 apresenta um resumo dos valores médios deste conjunto de ensaios realizados.

Uma vez em posse destas informações, figura 11, é simples equacionar a seguinte proposição e realizar a correção a nível de programação, haja visto que o banco de dados que define o comportamento do erro para a nova topologia já foi mapeado e armazenado no computador (relé ou medidor) de maneira prévia. Por fim temos a aplicação básica vetorial abaixo para compensação dos erros, conforme Andrade (2008).

Em sistemas de medição de faturamento convencional, os equipamentos básicos que o compõe, TP, TC e medidor,

Tabela 5. Conjunto de ensaios realizados em TC classe 0,3C50 conforme Figura 9.

Corrente injetada primário (A)	Relação nominal In - 5A	Conexão no secundário	Erro de relação (%)	Erro de fase em minutos (valores médios)
150	100 - 5A	S1 - S2	-0,07	0,8
100	100 - 5A	S1 - S3	-0,12	0,6
50	100 - 5A	S1 - S4	-0,12	0,6
10	100 - 5A	S1 - S5	-0,6	0,5



Figura 10. Bancada de ensaios para medição de erros de relação e ângulo.

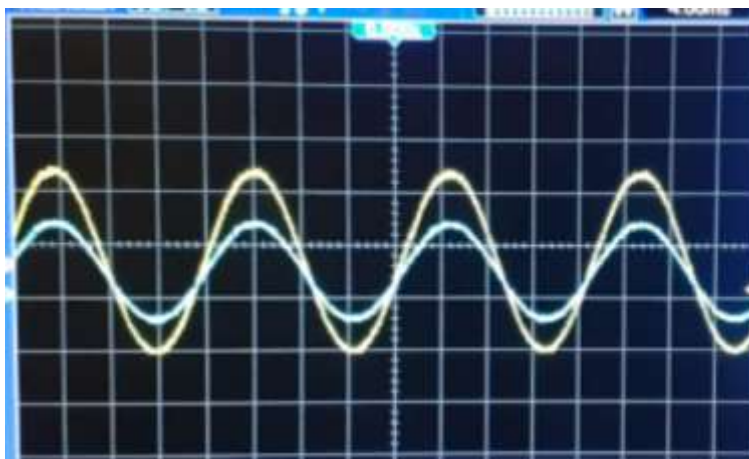


Figura 11. Característica das formas de onda na leitura dos erros com uso do osciloscópio.

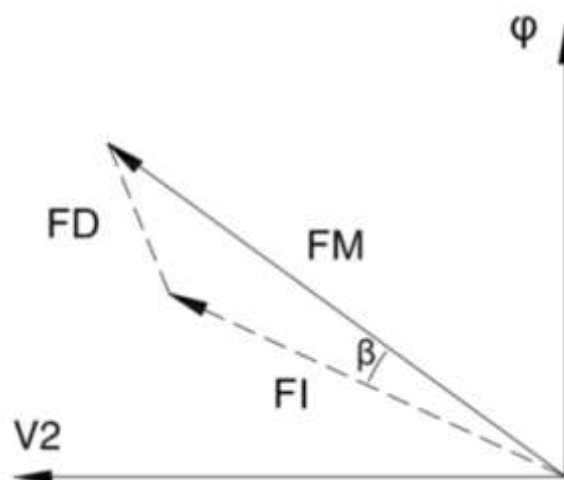


Figura 12. Módulo do fasor diferença/ módulo fasor ideal.

No processo de certificação e ensaios pelas concessionárias de energia, são avaliados individualmente a ótica de sua exatidão. Ou seja, os TCs e TPs tem sua exatidão avaliada e verificada se atendem as condições estabelecidas em norma através dos paralelogramos de exatidão normatizados para o modelo. Já os medidores de energia são avaliados com malas de calibração secundário através de um conjunto de pontos de ensaio verificando assim; o erro medido e a incerteza expandida do equipamento. Por fim, soma-se a esse conjunto a análise da carga imposta ao secundário dos TCs e TPs completando o conjunto de verificações básicas. Para a nova topologia proposta as concessionárias precisariam avaliar o conjunto de erros de maneira integrada entre equipamentos, ou seja, seria injetada no primário dos TPs e TCs um conjunto de fasores conhecidos e a avaliação da exatidão do sistema seria na entrega final da informação já no medidor de energia, de maneira instantânea ou na coleta da memória de massa.

Apresentando, por fim, o erro total do conjunto, de modo que o sistema automático de compensação de erros estaria operante e a filosofia de carga imposta passaria a condição de carga fixa conhecida. Esse método traria muito mais confiabilidade ao conjunto em termos de exatidão, já que agora a análise é totalmente integrada e não parte por parte como no modelo convencional.

5. CONCLUSÃO

A metodologia de medição proposta leva o conjunto de erros percentuais a resultados menores que 0,05% para todas as faixas de correntes, haja visto que o algoritmo realizará correção automática em ampla faixa. A nova topologia também reduz a interferência eletromagnética sofrida sobretudo pelos cabos de interligação, agora suprimidos e evidencia a necessidade de desenvolver uma carga fixa ideal conectada ao secundário capaz de melhorar sua condição operacional do ponto de vista da exatidão, ainda na concepção do transformador de corrente.

É necessário considerar que podem existir os erros, em função das harmônicas, que não foram avaliados neste trabalho inicial. Para os ensaios deste trabalho foi aplicada a corrente nominal no primário do TC, como primeira ação antes de iniciarem os ensaios para magnetização do núcleo, o que reduz a variação dos resultados quando repetidos e, portanto, melhora o desvio padrão observado. É válido salientar que esta é uma topologia inovadora e que atualmente, para a sua aplicação, é necessário desconsiderar as regras que vigoram em normas de concessionárias de energia.

No futuro, o modelo será submetido a homologação e ensaios de tipo como previsto em ABNT (2009), para aprovação e aceitação comercial.

Por fim, a metodologia proposta propõe um conceito de ampla aplicação, a partir de um método simples a ser adotado ainda na etapa de fabricação do transformador de corrente, equipamentos de processamento de dados, medidores e relés de proteção.

REFERÊNCIAS

- ABNT, N. (2009). 6856:“transformador de corrente-versão corrigida.”. Technical report, ABNT/CB-03 Eletricidade.
- Albertos, P. and Antonio, S. (2006). Multivariable control systems: an engineering approach. Springer Science & Business Media.
- Almeida, R.G. et al. (2006). Comportamento de transformadores de corrente sob condições de energização de um transformador de potência.
- Andrade, S.R.C. (2008). Sistemas de medição fasoria sincronizada: aplicações para melhoria da operação de sistemas elétricos de potência.
- Brito, L.C.G. (2011). Avaliação dos erros dos transformadores de corrente em medições de sincrofasores e em suas aplicações. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Ciarlini, E.A. (2019). Tópicos de medidas eléctricas - Transformadores de instrumentação. Livro Técnico.
- IEC (2003). 60044-1 instrument transformers, part 1: Current transformer.
- Martin, K., Hamai, D., Adamiak, M., Anderson, S., Begovic, M., Benmouyal, G., Brunello, G., Burger, J., Cai, J.,bDickerson, B., et al. (2008). Exploring the iee standard c37. 118-2005 synchrophasors for power systems. IEEE transactions on power delivery, 23(4), 1805-1811.
- Molina, R.N.T. (2012). Procedimento para testes de confiabilidade em sistemas de medição indireta. XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica.
- Skogestad, S. and Postlethwaite, I. (2005). Multivariable feedback control: analysis and design. John Wiley & sons.

Capítulo 6



10.37423/240308796

MÓDULOS DE PERMEAÇÃO PARA PURIFICAÇÃO DE HIDROGÊNIO: UM ESTUDO DE REVISÃO

Camila Pereira Giroto

Universidade Paranaense

Clara Elisa Simões Bassetto

Universidade Estadual de Maringá

Aline Domingues Gomes

Universidade Estadual de Maringá

Ramiro Picoli Nippes

Universidade Federal do Paraná

Marcos de Souza

Universidade Estadual de Maringá



Resumo: O hidrogênio é um composto que pode ser usado como combustível, mas sua utilização requer que ele seja ultra puro. Uma alternativa seria realizar a purificação de H₂ por membranas compósitas de paládio. Para que a purificação ocorra é deve-se utilizar um módulo de permeação, que funciona como um leito onde a membrana é encaixada para que uma mistura gasosa, chamada de alimentação, permeie através dela e se divida em outras duas correntes de saída: uma de gases retidos e outra de gás permeado. Existem vários fatores a serem considerados ao projetar e construir um módulo de permeação de membranas. Este trabalho teve como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica de diferentes estudos que realizaram a purificação de hidrogênio em módulos de permeação de membranas planas, evidenciando a estrutura e fatores que compõem estes módulos. Para isso, avaliaram-se as metodologias experimentais, resultados e conclusões dos estudos selecionadas com o intuito de analisar o funcionamento dos módulos de permeação para diferentes membranas e relacionar com as melhores condições de permeabilidade do hidrogênio nos testes realizados com cada módulo. Percebeu-se que o material mais aplicado na construção do módulo é a liga metálica de aço inoxidável e o uso do gás de arraste se faz necessário para garantir a diferença de pressão entre o retentado e permeado. Dentre as características analisadas, os estudos de van de Graaf et al (1998) resultaram na construção de um módulo mais simples e eficaz.

Palavras-chave: Módulo de permeação; Membranas planas; paládio; Hidrogênio; Purificação.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico vem acompanhado do consumo de bens finitos da natureza, como fontes de energia não renováveis. A fonte de energia com base em recursos não renováveis possui alto potencial poluidor, como a energia produzida a partir de combustíveis fósseis. Nesse campo, há preocupações com o esgotamento das matrizes de energia tradicionais e com os seus efeitos nocivos ao ambiente e, conseqüentemente, é gerado um esforço na implementação de novas tecnologias utilizando fontes renováveis de energia, o que contribui para o desenvolvimento sustentável do planeta. Algumas das fontes de energia com potencial renovável são: a solar, a eólica, os biocombustíveis e o hidrogênio que, em conjunto, criam uma nova consciência social sobre os meios utilizados para suprir as necessidades humanas [(BOFF *et al.*, 2017).].

A fabricação de etanol e biodiesel por meio da biomassa vegetal vêm ganhando grande destaque. Esses produtos podem ser utilizados direta ou indiretamente, como, no caso do álcool, que é matéria-prima na produção de hidrogênio para uso deste gás em células a combustíveis. O hidrogênio é um elemento abundante no planeta, possui maior relação peso-energia que outros combustíveis e praticamente não emite poluentes quando usado em células a combustíveis. Sua aplicação requer que ele esteja ultrapuro e livre de compostos carbonáceos, o que pode ser um processo difícil e oneroso (MAIA *et al.*, 2007). Por isso, é de grande importância que se encontre tecnologias menos custosas de purificação desse gás.

Um purificador de hidrogênio deve ser econômico, resistente e ter alta seletividade (Dunbar and Chu, 2012; Serra *et al.*, 2017). Uma técnica geralmente utilizada para essa finalidade é a realização da permeação do hidrogênio com o uso de membranas, que são barreiras semipermeáveis e seletivas a alguns componentes, retendo os demais presentes em uma mistura. Sua seletividade e permeabilidade dependem da estrutura da membrana, da difusividade das espécies na mistura, temperatura de operação do processo de separação e outros mecanismos de transporte (SUTHERLAND, 2008; FERNANDEZ *et al.*, 2016). A purificação de misturas gasosas nas membranas ocorre por efeito de uma força motriz, que é expressa em termos do gradiente de concentração e/ou pressão.

As membranas podem ser de diferentes geometrias: plana, tubular ou de fibra oca. As membranas tubulares permitem uma maior área superficial para permeação, além de serem mais adequadas para realizar reações químicas catalíticas. As membranas planas possuem configuração mais simples, são

mais fáceis de manusear, armazenar e requerem uma menor quantidade de material para sua preparação. Elas ainda podem ser classificadas como porosas ou densas e constituídas por polímeros, cerâmicas, metais ou uma combinação destes. Enquanto as membranas planas são mais aplicadas para testes laboratoriais e desenvolvimentos de novos materiais, as membranas tubulares são mais utilizadas em escala industrial na permeação de gases (SUTHERLAND, 2008; FERNANDEZ *et al.*, 2016; ALIQUÉ *et al.*, 2018).

Dentre as classificações citadas, as membranas metálicas geralmente são empregadas em processos que envolvem altas pressões e temperaturas, pois os metais possuem elevadas resistências térmica e mecânica, além de boas condutividades térmica e elétrica. Os metais também apresentam propriedades químicas (particularmente catalíticas) que os tornam favoráveis para materiais de membranas, sejam estas densas ou porosas (HABERT *et al.*, 2006).

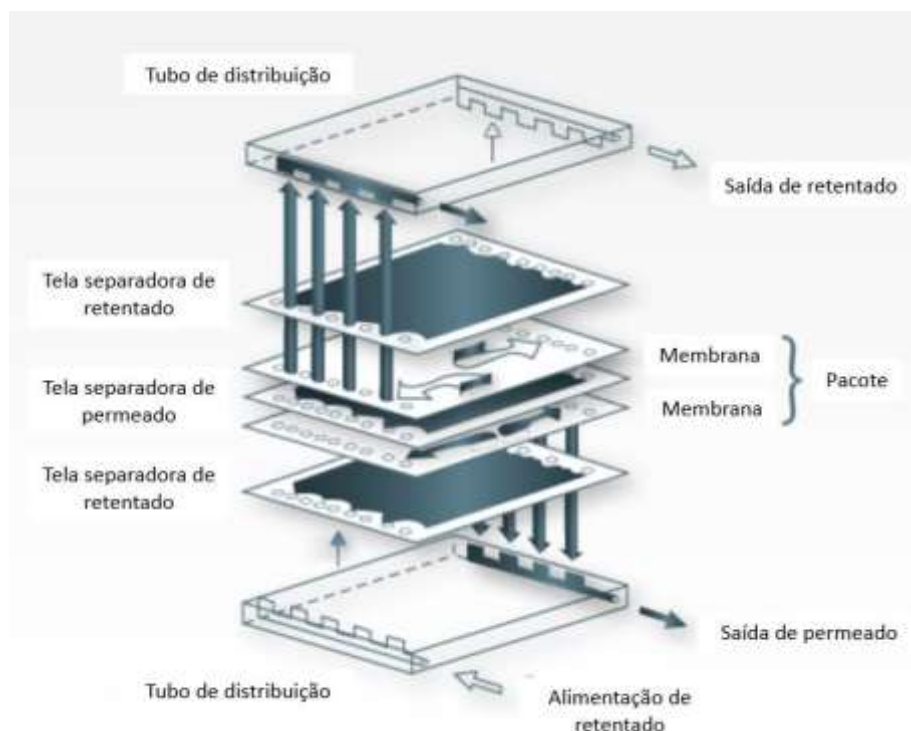
O paládio é um dos metais que possui capacidade de transportar apenas o hidrogênio em sua forma dissociada. Ele tem a maior permeabilidade para hidrogênio e a habilidade de auto catalisar a dissociação das moléculas de H_2 . Estas vantagens fazem com que o Pd seja o material mais utilizado para a produção de membranas metálicas para purificação de hidrogênio (GADE *et al.*, 2009). Devido a essas características e pela necessidade do uso de um suporte mais barato, as membranas compósitas de paládio têm sido as mais utilizadas em estudos de permeação do hidrogênio. Além disso, estas estruturas também podem ser utilizadas para a fabricação do H_2 , o que permitiria a purificação deste composto à medida em que fosse produzido (CALLES *et al.*, 2014).

Para realizar a produção e purificação de um gás simultaneamente, utilizam-se reatores de membrana. Refere-se a diferentes tipos de configurações de reatores que contém uma membrana e promove reações reversíveis no sentido direto, para aumentar a conversão dos reagentes. Os reatores de membrana contribuem de maneira favorável à economia, pois elimina a etapa de purificação de um produto de interesse e diminui a ocorrência de reações paralelas que formam substâncias indesejadas (LULIANELLI *et al.*, 2011).

Os reatores de membrana são constituídos, entre outras coisas, por um módulo de permeação. Ele serve como o leito onde a membrana se protege e fixa para que toda a mistura gasosa produzida passe por ela por uma corrente de alimentação e se divida entre pelo menos duas outras correntes de saída: uma de gases retidos e outra de gás permeado. O módulo de permeação pode ser produzido em formatos diferentes, a depender da geometria da membrana. No caso de membranas planas, o

módulo funciona basicamente conforme demonstrado pela Figura 1 (Portal de Engenharia Química-Membranas).

Figura 1-Projeto básico de um módulo de permeação para membranas planas.



Fonte: Adaptado de Portal de Engenharia Química-Membranas.

A Figura 1 apresenta a estrutura básica de um módulo de permeação adaptado para membranas planas. Nela, observa-se que o módulo compacta a membrana e, de acordo com a disposição correta de entrada e saída do gás a ser permeado, formam-se correntes de entrada e saída de retentado e saída de permeado. Existem diversas maneiras de realizar a disposição da membrana no módulo de permeação, modificar a configuração de entrada e saída de gases, fazer a coleta das amostras e materiais em que o módulo será constituído.

Projetar e construir um módulo de permeação de membranas de qualquer geometria não é uma tarefa fácil, pois existem vários fatores a serem considerados. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica de diferentes estudos que realizaram a purificação de hidrogênio em módulos de permeação de membranas planas, evidenciando principalmente a estrutura e fatores que compõem estes módulos.

2. DESENVOLVIMENTO 2.1. METODOLOGIA

2.2. RESULTADOS

Este trabalho é de revisão bibliográfica e possui caráter qualitativo. Em seu desenvolvimento foi abordado a respeito de módulos de permeação de hidrogênio construídos para testes de eficácia de membranas compósitas de Pd. O desenvolvimento do estudo se deu pela revisão de 6 artigos que envolvem a construção de módulos de permeação de hidrogênio por membranas de paládio planas. Discorreu-se sobre as metodologias experimentais, incluindo tipo de membrana utilizada, material do módulo, temperatura de permeação, diferença de pressão entre o lado retentado e permeado do processo e gás de arraste utilizado para teste. Além disso, foram apresentados os resultados e conclusões desses trabalhos, com o intuito de avaliar o funcionamento dos módulos de permeação para diferentes membranas e relacionar com as melhores condições de permeabilidade do hidrogênio nos testes realizados com cada módulo.

Os trabalhos selecionados para revisão bibliográfica apresentam projetos de módulos de permeação de hidrogênio para membranas planas compósitas de paládio. Os artigos revisados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1-Estudos de purificação de gases utilizando módulos de permeação de membranas planas.

Autor	Membrana	Material do Módulo	Temperatura (°C)	Diferença de Pressão (kPa)	Gás de Arraste
(Howard <i>et al.</i> , 2004)	Pd-Cu/Hastelloy	Inconel	283-977	3100	Argônio
(Arstad <i>et al.</i> , 2006)	Pd-Ag/Silicone	Metal	190-275	1-2	Nitrogênio
(Graaf, van de <i>et al.</i> , [s.d.])	Não mencionado	Aço inoxidável	20	5-100	Hélio
(van de Graaf, Kapteijn, <i>et al.</i> , 1998)	Zeólita/PSS	Aço Inoxidável	270-625	101-310	Hélio ou Argônio

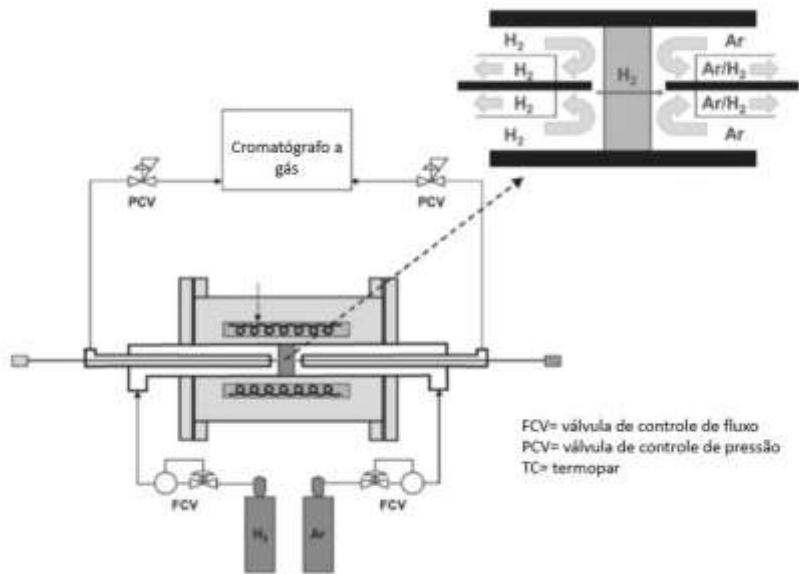
(Chotirach <i>et al.</i> , 2012)	Pd/PSS-ZrO ₂ ; Pd/PSS-Zr; Pd/PSS-ZrN	Não mencionado	350-500	101,325 - 303,975	-
(Kiadehi <i>et al.</i> , 2018)	Pd/NaY/PSS	Não mencionado	350-450	298,675 KPa	Argônio

Fonte: Autoria Própria (2022).

2.3. DISCUSSÃO

O trabalho de Howard e colaboradores (2004) teve como objetivo realizar a permeação de hidrogênio em ligas de paládio e cobre em elevadas temperatura e pressão e com diferentes tipos de composições dos metais. O melhor resultado obtido foi com a membrana composta por 60% Pd e 40% Cu. A unidade de teste de membrana de hidrogênio (HMT) usada neste estudo foi projetado e construído no Laboratório Nacional de Tecnologia Energética (NETL). O módulo foi projetado para teste de membranas de hidrogênio em pressões e temperaturas de até 3,1 MPa e 1173 K, respectivamente. Um esquema do projeto de módulo realizado por Howard e colaboradores está demonstrado conforme Figura 2 abaixo.

Figura 2-Esquemática do sistema de permeação utilizado por Howard e colaboradores.



Fonte: Adaptado de Howard et al (2004).

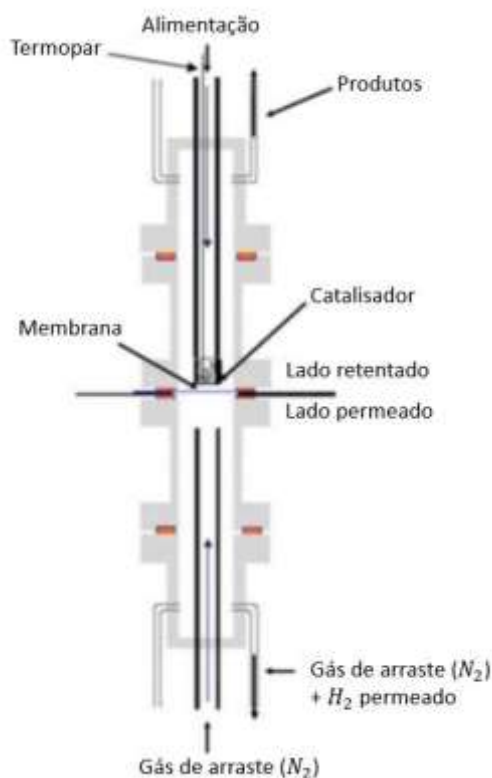
A configuração de tubo coaxial em contato com a membrana plana permitiu que o gás entrasse no anel formado pelos tubos de diâmetros entre 19.1 e 9.5 mm. O tubo de aquecimento tinha largura de

152 mm e as temperaturas foram medidas utilizando termopares tipo-K. Tanto a membrana quanto o aquecedor foram isolados com fibra de cerâmica.

O gás de alimentação da membrana foi constituído por uma mistura de 90% de hidrogênio e 10% de hélio e utilizou-se argônio de alta pureza como gás de arraste do permeado. Para este estudo, a pressão do gás de arraste foi controlada para manter um gradiente de pressão total de 0,14 MPa. A vazão foi monitorada por controladores de fluxo Brooks e variou entre 190 e 250 sccm (centímetros cúbicos padrão por minuto) e o fluxo de gás de arraste controlado de modo a manter a concentração de hidrogênio no permeado em geral inferior a 4% em mol. A detecção da composição de gás hidrogênio permeado foi feita com o cromatógrafo de gás Hewlett-Packard 5890 Series II.

Nos testes de permeação de hidrogênio realizados por Arstad e colaboradores (2006) com membranas compósitas de Pd e Ag depositados por pulverização magnética (*Sputtering por Magnetron*) Os autores construíram um módulo de permeação que mantém a membrana rígida e estável em diferentes condições de temperatura e pressão e fluxo de gás. O módulo produzido para este estudo foi projetado conforme a Figura 3.

Figura 3-Modelo módulo de permeação.



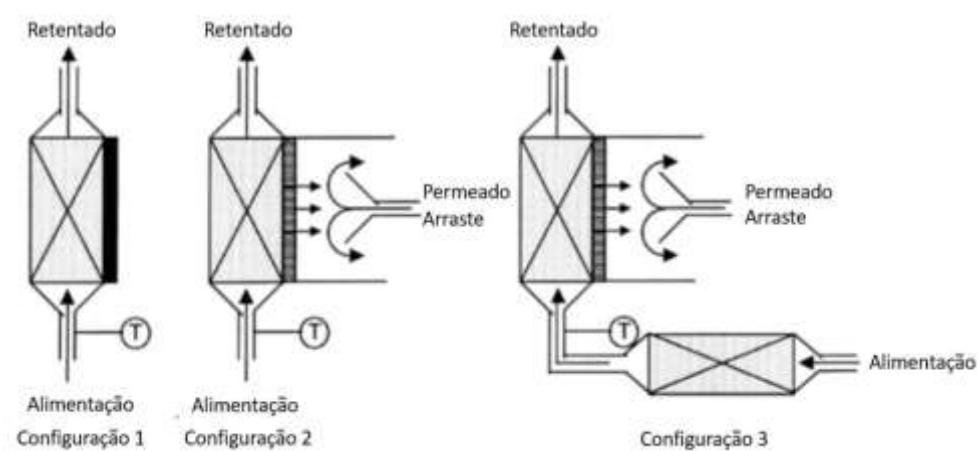
Fonte: Adaptado de Arstad et al. (2006).

O reator de membrana demonstrado pela Figura 3 é do tipo de leito fixo com o leito de catalisador localizado entre 2 e 3 mm acima da membrana auto-suportada e nele encontra-se um termopar. Foi utilizado um fluxo constante de nitrogênio como gás de arraste em todos os experimentos. Entre os experimentos, o nitrogênio foi liberado através do reator de membrana em ambos os lados do permeado e do retentado a 190°C. Observou-se que não houve alteração entre experimentos exotérmicos, endotérmicos e não catalíticos (permeação de H₂). Todas as temperaturas indicadas pelo artigo foram medidas na posição do leito do catalisador, 3 mm acima da membrana.

O estudo realizado testou o comportamento do fluxo de permeação do gás H₂ entre 190 °C e 275°C e com a diferença de pressão entre retentado e permeado de 0,01-0,02 bar. Nessas condições, nota-se que o fluxo é favorecido com o aumento de temperatura e a adição do gás nitrogênio não altera o fluxo de permeação, mas o monóxido de carbono (CO) diminui esse processo de 50 NmL/min para abaixo de 10 NmL/min. O estudo sugere que isso ocorra porque o CO desativa a membrana ao reagir com o Pd de modo a formar carbonetos de paládio, que obstruem a passagem de H₂ (ARSTAD *et al.*, 2006).

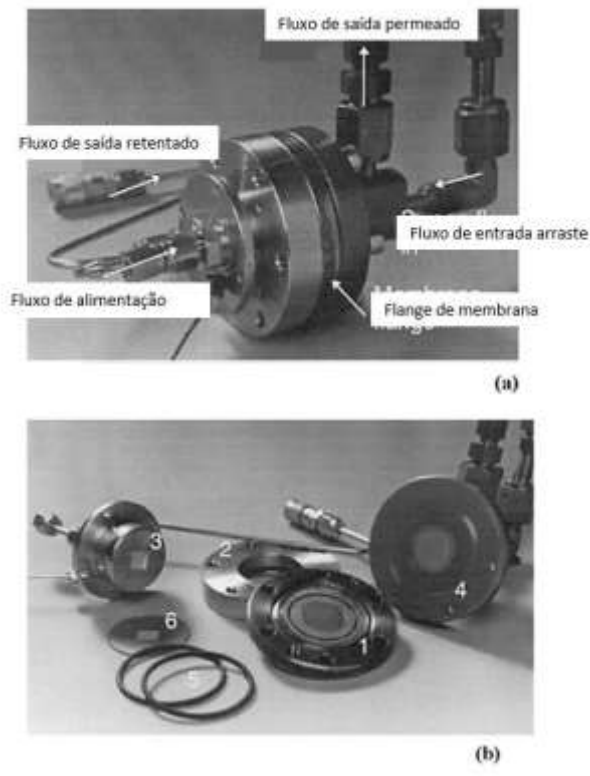
Os experimentos de permeação e separação demonstrados por Van de Graaf e colaboradores (1998) foram realizados de acordo com o princípio de Wicke-Kallenbach, que se baseia em um sistema de duas correntes de gás em cada lado da membrana: o gás de alimentação e o gás de de arraste. Os componentes permeados são absorvidos no gás de arraste, que tem taxa de vazão 100 mL.min⁻¹ (STP) e analisados com um CG (Chrompack 9001, equipado com uma coluna de sílica fundida PLOT Al₂O₃/KCl e um detector FID). O reator de membrana utilizado neste estudo pode ser comparado a uma placa de leito catalítico com uma parede permeável de um lado (Fig. 4). Uma fotografia do módulo completo é apresentada na Fig. 5(a), mostrando as duas peças de acoplamento no lado de alimentação e permeado e a membrana presa no meio. A Fig. 5(b) mostra todas as partes do módulo do reator.

Figura 4-Representação esquemática das diferentes configurações do reator de membranas. (1)Reator de membrana fechada. (2) reator com um lado permeável. (3) reator de um lado permeável, alimentado por uma mistura equilibrada.



Fonte: Adaptado de Van de Graaf et al. (1998).

Figura 5-Imagem do módulo do reator de membrana de aço inoxidável com indicação dos fluxos (a) e das diferentes partes que o compõem (b). 1: flange UHV contendo a membrana; 2: anel que é usado para manter a peça de acoplamento de alimentação no lugar; 3: peça com entrada de alimentação e saída de retentado, contendo o quadrado para o leito do catalisador; 4: peça de acoplamento com cabeça de pulverização para fornecimento de fluxo de arraste; 5: Anéis de Viton para vedação entre as peças 1, 2 e 4; 6: junta para proteção da membrana.



Fonte: Adaptado de Van de Graaf et al. (1998).

É possível observar pelas Figuras 4 e 5 que o fluxo da mistura de alimentação termina em uma boca de forma cônica, preenchida com fibra de vidro, para garantir uma distribuição uniforme do gás de alimentação sobre o leito. A membrana foi coberta com uma fina junta de silicone em formato de anel. Essa junta revestiu toda a membrana, exceto a área central, onde o leito do catalisador foi posicionado. A peça de acoplamento de permeado contém um cabeçote de pulverização para fornecimento do hélio como gás de arraste, com uma vazão de $42,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ (STP).

Todos os experimentos com reatores de membrana foram conduzidos a 296 K com vazão de alimentação variando de 1,8 a 20 ml min^{-1} . O fluxo total de hidrocarbonetos no lado do permeado pode ser calculado a partir das concentrações medidas e o fluxo total de retentado foi determinado a partir de um balanço de massa.

O módulo de membrana para aplicação em alta temperatura publicado no trabalho de Kiadehi e colaboradores (2018) foi projetado no Solid Work Software. Como mostrado em Figura 6, este consiste no corpo do módulo, duas flanges do tipo “knife-edge”, arruelas de cobre macias e termopar. A membrana fabricada para o trabalho de Kiadehi foi embutida dentro do módulo de membrana de aço inoxidável. Para fornecer a temperatura do módulo necessária, um elemento de aquecimento de banda foi instalado ao redor do módulo e ambos foram mantidos isolados. Um termopar foi integrado no meio do módulo da membrana para monitorar a temperatura durante os experimentos de permeação. As flanges “knife-edge” foram apertadas no corpo do módulo com parafusos e arruelas de cobre macio. Esse tipo de flange foi aplicada para distribuição uniforme de força compressiva sobre o selo de cobre macio e o disco de membrana.

Os testes de permeação de gases (H_2 e/ou N_2) foram realizados para avaliar a permeabilidade e seletividade das membranas compostas de Pd/NaY/PSS em temperaturas na faixa de 350 e 450 °C. A vazão desses gases foi ajustada com dois controladores de fluxo de massa do tipo Brooks 5850. Para melhorar a estabilidade da permeação de hidrogênio, realizou-se um tratamento térmico de membranas em um ambiente de hidrogênio até a temperatura desejável (450°C) ser obtida. A vazão do gás de arraste (argônio) foi controlada por um controlador de fluxo (Brooks 5850). A diferença de pressão entre o lado de alimentação e o lado do permeado da membrana foi ajustado através de um regulador de contrapressão do tipo GO BP3. Dessa forma, alterou-se a pressão do lado retentado de 200 para 400 kPa, enquanto do lado permeado foi mantida a pressão atmosférica (101,325 KPa). A taxa de fluxo de gás permeado foi medida usando um medidor de vazão de bolhas de sabão e a

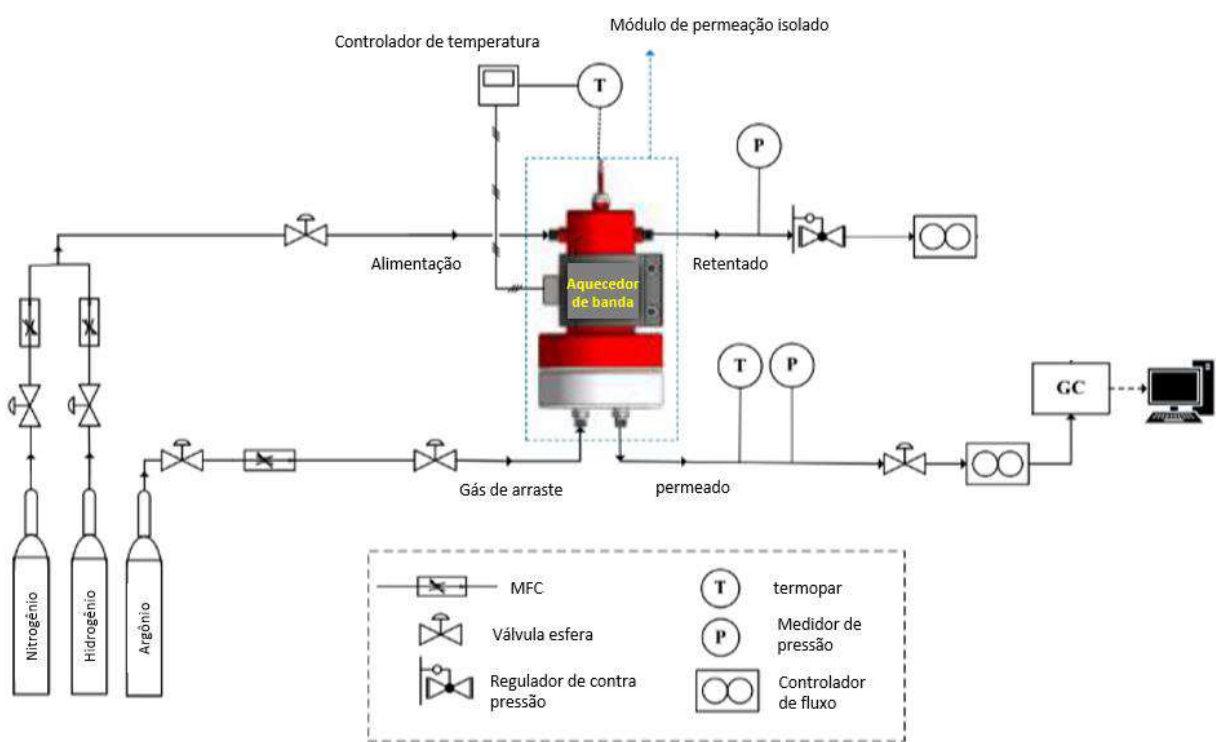
composição do gás permeado foi analisada por um cromatógrafo a gás online (GC, Varian CP-3800). A configuração de instalação do reator é demonstrada pela Figura 7.

Figura 6-Diagrama esquemático do módulo de membrana.



Fonte: Adaptado de Kiadehi *et al.* (2016).

Figura 7-Diagrama esquemático do aparelho de experimento de permeação de gás.



Fonte: Adaptado de Kiadehi *et al.* (2016).

No módulo de permeação produzido por Van de Graaf e colaboradores (1998), o flange contendo a membrana é colocado entre dois suportes e vedado com cobre (Figura 8). Ambos os suportes contêm a entrada e a saída dos fluxos de gás nos dois lados da membrana.

Este módulo é então colocado em um forno de ventilação, cujas temperatura e taxa de aquecimento são controláveis e a temperatura próxima à membrana é monitorada por meio de um termopar localizado no módulo próximo à membrana. Os dados aqui apresentados foram obtidos entre 270 e 625 K e a taxa de aquecimento utilizada foi de 1 ou 2 K.min⁻¹. A pressão total no lado de alimentação da membrana foi controlada entre 105 e 106 Pa usando um controlador de contrapressão e a pressão total no lado do permeado da membrana poderia ser controlada entre 100 e 8104 Pa por meio de uma bomba de vácuo ou entre 105 e 106 Pa usando um controlador de contrapressão.

Os experimentos de permeação foram realizados de acordo com dois métodos. O primeiro método é o Wicke-Kallenbach (WK). Conforme representado pela Figura 9 (a), no lado de alimentação da membrana, um conjunto de controladores de vazão mássica é usado para compor a corrente de alimentação que pode consistir em até 4 gases. Experimentou-se utilizar gás puro ou uma mistura de gases na corrente de alimentação, balanceada para 101 kPa pelo gás de arraste. Quando um gás puro é usado como corrente de alimentação, a concentração do componente em estudo é determinada na corrente de permeado, bem como a concentração do gás de arraste na corrente de retentado. O fluxo através da membrana pode então ser calculado a partir de um balanço de massa. Quando a alimentação é composta por uma mistura, fica difícil medir o contra fluxo do gás de arraste. Portanto, em alguns casos, ele é estimado a partir da extrapolação dos dados com uma alimentação pura, assumindo que é linearmente proporcional à diferença de pressão através da membrana.

No lado do permeado foi usado um gás de arraste puro (100 ml.min⁻¹, condições padrão). A análise das vazões de alimentação, retentado e permeado foi feita usando um espectrômetro de massa (Analisador de massa Quadrupolo, Ledamass), que é colocado em linha.

O outro foi chamado de método batelada, operando de forma descontínua. Conforme demonstrado pela Figura 9 (b), o lado permeado foi evacuado para 100 a 800 Pa. No lado da alimentação foi imposta uma pressão total de $3,1 \cdot 10^5$ Pa. O experimento é iniciado quando o fluxo de gás de entrada no lado de alimentação é fechado por meio de uma válvula. Nesse momento, a diminuição da pressão no compartimento de alimentação foi monitorada por um indicador de pressão (Kullite, tipo ITO-1000-

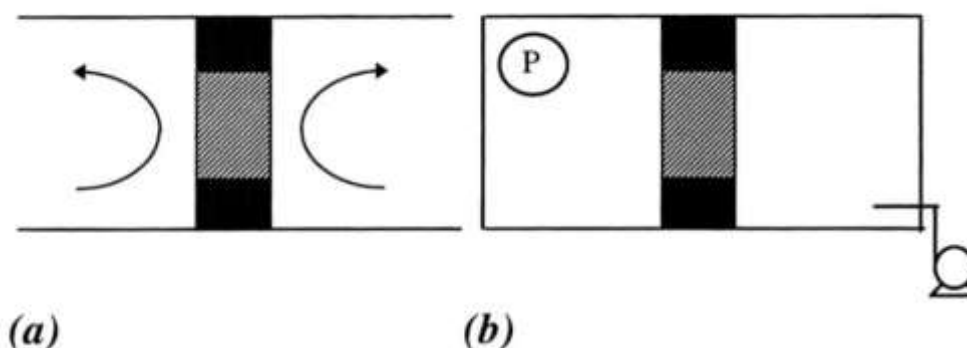
7). Com a diminuição de pressão, o fluxo através da membrana pode ser calculado após a calibração do volume do módulo no lado da alimentação.

Figura 8-Imagem do módulo de aço inoxidável para teste de membrana. Meio: o disco de membrana com uma camada de zeólita sobre aço inoxidável poroso e não poroso. Esquerda e direita: as duas peças de acoplamento, utilizadas para alimentação e retirada de gás. As três peças são conectadas usando gaxetas de cobre.



Fonte: Van de Graaf et al (1998).

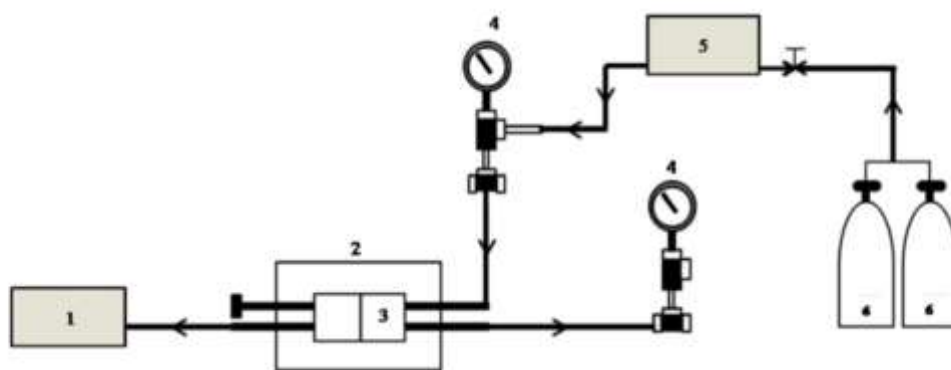
Figura 9-Representação esquemática dos 2 diferentes modos de permeação. Método Wicke-Kallenbach (a) e método Bach (b).



Fonte: Van de Graaf et al (1998).

No trabalho realizado por Chotirach e colaboradores (2012), a membrana densa de paládio em discos PSS foi submetida à medição do fluxo de hélio usando uma célula de permeação sob pressão atmosférica. Os discos foram inicialmente aquecidos em hélio a uma taxa de cerca de $4\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, quando o hélio foi substituído por hidrogênio. A pressão do gás de alimentação foi monitorada entre 1 e 3 atm e a temperatura do reator foi variada de 350 a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. A taxa de permeação do gás foi medida por um medidor de vazão capilar de bolhas de sabão. O aparelho configurado para teste de fluxo de permeação de hidrogênio é mostrado esquematicamente na Figura 10.

Figura 10. Representação esquemática da configuração de permeação do gás. Medidor digital de fluxo (1); forno (2); célula de permeação (3); medidor de pressão (4); controlador de gás (5); cilindro de gás (6).



Fonte: Adaptado de Chotirach et al. (2012).

Conforme os estudos citados na Tabela 1, os módulos de permeação são produzidos por materiais metálicos, sendo o aço inoxidável o mais utilizado. Esta liga metálica é mais propícia para compor os módulos de permeação por ser inerte e resistente termicamente, pois os testes de purificação com hidrogênio ocorrem, geralmente, em temperaturas acima de 300°C . O gás de arraste foi aplicado em cinco dos estudos mencionados para garantir a diferença de pressão entre o retentado e o permeado, de modo que o fluxo de permeação ocorra no sentido correto. Com isto, percebe-se a importância da escolha do material para a produção do módulo de permeação e sua configuração para permitir a passagem do gás de arraste. Na maioria dos artigos encontrados, os módulos de permeação continham quatro orifícios: uma para a entrada da mistura a ser purificada, outra para a entrada do gás de arraste, uma para a saída do retentado e outra para a saída do permeado. Dentre estes, os que apresentaram a configuração mais simples e eficiente para construção seriam os dos estudos de van de Graaf et al (1998).

3. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica dos trabalhos voltados para a construção de módulos de permeação foi eficaz na obtenção de informações relevantes sobre as configurações mais convenientes desse aparelho. Os estudos demonstram as preferências de se utilizar liga metálica de aço inoxidável na construção do módulo devido a maior resistência a altas temperaturas em que os testes de permeação são submetidos. O uso do gás de arraste demonstrou ser eficaz para garantir a diferença de pressão entre o lado retentado e permeado, sendo essa a força motriz do processo de permeação para a passagem de gás de um lado para outro. Dentre os artigos citados, os estudos de van de Graaf et al (1998) resultaram na construção de um módulo mais simples e eficaz, por ter utilizado aço inoxidável em sua estrutura e 4 correntes, sendo uma para alimentação, outra para entrada de gás de arraste, uma para saída de permeado e outra para saída de retentado.

4. REFERÊNCIAS

ADMINISTRATOR. Portal de Engenharia Quimica - Membranas. Disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=57&Itemid=206>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ALIQUE, D.; MARTINEZ-DIAZ, D.; SANZ, R.; CALLES, J. A. Review of Supported Pd-Based Membranes Preparation by Electroless Plating for Ultra-Pure Hydrogen Production. *Membranes*, v. 8, n. 5, p. 1-39, 2018

ARSTAD, B.; VENVIK, H.; KLETTE, H.; WALMSLEY, J.C.; TUCHO, W.M.; HOLMESTAD, R.; HOLMEN, A.; BREDESEN, R. Studies of self-supported 1.6 mm Pd/23 wt.% Ag membranes during and after hydrogen production in a catalytic membrane reactor. *Catalysis Today*, 2006.

BOFF, Salete Oro; BOFF, Vilmar Antonio. Inovação Tecnológica em energias renováveis no Brasil como imperativo da solidariedade intergeracional. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 282-302, maio/ago. 2017.

CALLES, J. A.; SANZ, R.; ALIQUE, D.; FURONES, L. Thermal stability and effect of typical water gas shift reactant composition on H₂ permeability through a Pd-YSZ-PSS composite membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, p. 1398-1409, 2014.

CHOTIRACH, M.; TANTAYANONB, S.; TUNGASMITA, S.; KRIAUSAKUL, K. Zr-based intermetallic diffusion barriers for stainless steel supported palladium membranes. *Journal of Membrane Science*, 2012.

FERNANDEZ, E.; MEDRANO, J. A.; MELENDEZ, J.; PARCO, M.; VIVIENTE, J. L.; SINT-ANNALAND, M. V.; GALLUCCI, F.; TANAKA, D. A. P. Preparation and characterization of metallic supported thin Pd-Ag membranes for hydrogen separation. *Chemical Engineering Journal*, v. 305, p. 182-190, 2016.

GADE, S. K.; KEELING, M. K.; DAVIDSON, A. P.; HATLEVIK, O.; WAY, J. D. Palladium-ruthenium membranes for hydrogen separation fabricated by electroless co-deposition. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, p. 6484-6491, 2009.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. *Processos de separação com membranas*. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HOWARD, B.H.; KILLMEYER, R.P.; ROTHENBERGER, K.S.; CUGINI, A.V.; MORREALE, B.D.; ENICK, R.M.; BUSTAMANTE, F. Hydrogen permeance of palladium-copper alloy membranes over a wide range of temperatures and pressures. *Journal of Membrane Science*, 2004.

KIADEHI, A. D.; TAGHIZADEH, M. Fabrication, characterization, and application of palladium composite membrane on porous stainless steel substrate with NaY zeolite as an intermediate layer for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.

LULIANELLI, A.; BASILE, A. Hydrogen production from ethanol via inorganic membrane reactors technology: A Review. *Catalysis Science & Technology*, v. 1, p. 366-379, 2011.

MAIA, T.; BELLIDO, J.D.A; ASSAFI, E. M; ASSALF, E.M; ASSAFI, M. A. Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor de etanol utilizando catalisadores Cu/Ni/g-Al₂O₃. *Química Nova*, São Carlos, abril de

2007. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/njtMNXSDh4sHQCTdvtbCzpg/?lang=pt>> Acesso em: 28 de agosto de 2021.

SUTHERLAND, K. *Filters and Filtration Handbook*. Oxford: Elsevier, p. 536, 2008.

VAN DE GRAAF, J.M.; KAPTEIJN, F.; MOULIJN, J.A. Methodological and operational aspects of permeation measurements on silicalite-1 membranes. *Journal of Membrane Science*, 1998.

VAN DE GRAAF, J. M.; ZWIEP, M.; KAPTEIJN, F.; MOULIJN, J. A. Application of a silicalite-1 membrane reactor in metathesis reactions. *Applied Catalysis*, 1998.

Capítulo 7



10.37423/240308833

MONITORAMENTO ESTATÍSTICO MULTIVARIADO E DE DESEMPENHO DE MALHAS DE CONTROLE DE UMA CALDEIRA

Carmela Maria Polito Braga

Universidade Federal de Minas Gerais

Anísio Rogério Braga

Universidade Federal de Minas Gerais

Bruno Monteiro de Sousa

Universidade Federal de Minas Gerais



Resumo: Usinas termelétricas (UTES) possuem unidades críticas, como caldeira, que é uma unidade multivariável complexa em si. Tais unidades apresentam comportamento não estacionário e múltiplos pontos de operação, o que implica mudanças constantes de referências de variáveis de processo. Apresenta-se uma metodologia de monitoramento estatístico multivariado, combinado com análise de componentes principais, para detecção de mudanças nas condições operacionais, adaptada às condições do processo, uma vez que o uso destas técnicas requer estacionariedade e este não a possui. Além disso, são utilizados índices de desempenho de malhas de controle para auxiliar na indicação de mudanças no comportamento das mesmas e no rastreamento das variáveis mais influentes na degradação de desempenho da caldeira. A metodologia proposta foi implementada numa plataforma PIMS, integrando um sistema de monitoramento, instalado numa UTE usada como estudo de caso. Resultados experimentais com dados de operação da usina estudada validam a proposição e ilustram a metodologia.

Palavras-chaves: Carta de controle de Hotelling T^2 , SPE, Índice combinado, PCA, Controle Estatístico de Processos Multivariados, Monitoramento de desempenho de malhas, Caldeira.

1. INTRODUÇÃO

Usinas termelétricas, apesar de serem mais custosas no que se refere a operação e manutenção, possuem um importante papel de estabilização da matriz energética brasileira, a qual é baseada principalmente na hidroeletricidade e, portanto, fortemente dependente de mudanças nas características climáticas (ANEEL, 2002; Sousa et al., 2015). Contudo, o aumento na queima de combustíveis fósseis para geração termelétrica como fonte complementar de energia em períodos de seca tende a piorar as mudanças climáticas associadas à emissão de gases do efeito estufa. Deste cenário emerge forte demanda por ferramentas e sistemas automatizados que suportem a operação e manutenção de usinas termelétricas em um alto nível de eficiência, com máximo índice de disponibilidade e poluição parcimoniosa (Sousa et al., 2015).

Unidades críticas de usina termelétrica, e.g. caldeira, são sistemas complexos que integram variáveis impactantes na eficiência global (Åström; Bell, 2000). Usinas que funcionam como fornecedoras de energia complementar e que utilizam diferentes combustíveis geralmente possuem a característica de multiplicidade de pontos operação e de não estacionariedade em torno desses pontos. Tais condições resultam em alterações frequentes nas referências das variáveis chave e, portanto, limitam o uso de técnicas clássicas de Controle Estatístico de Processos (CEP), por causa do requisito de estacionariedade. Além disso, a ocorrência de faltas ou degradações incipientes afeta, em geral, mais de uma variável simultaneamente. Assim, considerando o grande número de variáveis monitoradas que possivelmente apresenta correlações com faltas, há necessidade de métodos capazes de lidar tanto com a correlação entre elas – como os métodos de Controle Estatístico de Processos Multivariados (CEPM) – quanto com seu comportamento inerentemente quase ou não estacionário.

Duas importantes ferramentas estatísticas de análise e monitoramento multivariados são, respectivamente, a técnica de Análise das Componentes Principais (PCA, do inglês, Principal Component Analysis) e a carta T^2 de Hotelling. O monitoramento com carta de Hotelling baseia-se na tradução das informações de um conjunto de variáveis correlacionadas em um único índice estatístico, o T^2 (Mason; Young, 2002). Esse índice é calculado de acordo com (1), em que X é o vetor amostral de variáveis com observações unitárias. Ainda em (1), $\bar{X}$ e S são, respectivamente, o vetor de médias das variáveis e a estimativa da matriz de covariância do sistema quando este opera em estado de controle estatístico.

$$T^2 = (X - \bar{X})^T S^{-1} (X - \bar{X}). \quad (1)$$

De acordo com Montgomery (2009), a carta de Hotelling perde sensibilidade à medida que o número de variáveis p aumenta, já que uma possível alteração na média de um processo é dissolvida no espaço p -dimensional e, por isso, incorre na possibilidade de ser não detectada. A combinação PCA-CEPM é justificada na medida em que a técnica de PCA permite a redução do espaço de variáveis sem que haja perda significativa de informação, gerando um conjunto menor de componentes principais que incorpora a maior parte da variabilidade do sistema. A aplicação do índice T^2 sobre as componentes principais retidas fornece uma métrica do desempenho global do sistema. Adicionalmente, a análise das componentes principais na ocorrência de pontos fora dos limites de controle da carta provê suporte ao rastreamento de faltas, já que os scores, com maior influência no alarme, indicam quais variáveis contribuíram mais fortemente para que o processo saísse do estado de controle estatístico.

Outros índices estatísticos multivariados são frequentemente utilizados para a detecção de alterações no comportamento dos processos (Pessel; Balmat; Lafont; Bonnal, 2007; Wang; Ma; Xu, 2011). O SPE (do inglês, squared prediction error), em especial, é capaz de medir o desvio entre o conjunto original dos dados e a predição das variáveis feita a partir do modelo resultante do PCA. Na prática, o monitoramento do processo por meio de um único índice é preferível pelas equipes de operação e manutenção. Yue e Qin (2001) propõem um índice combinado ϕ , que sumariza informações tanto do T^2 quanto do SPE. Logo, um valor de ϕ que ultrapasse os limites de controle deve ser seguido da inspeção individual tanto do índice T^2 quanto do SPE.

Além dos índices estatísticos multivariados, monitorar o desempenho das malhas de controle beneficia equipes envolvidas propiciando informação adicional acerca do estado de controle regulatório do processo. Além de verificarem se a operação da malha está dentro de níveis aceitáveis, métricas de desempenho dinâmico fornecem suporte para detectar e apontar situações que requerem novas sintonias, ou mesmo a substituição de componentes de instrumentação. Dos vários índices de desempenho encontrados tanto na literatura científica quanto nos manuais de softwares comerciais (Campos; Teixeira, 2010; Controlsoft, 2019; Jota; Braga; Pena, 1995; Metso Expertune, 2019), este trabalho aplica três: a integral do erro absoluto (IAE), a variabilidade (desvio padrão) da variável controlada (VarY) e a variabilidade da variável manipulada (VarU).

Alguns resultados significativos do uso de técnicas de CEPM para monitoramento de variáveis de processo têm sido publicados. Zhu e Braatz (2014) propõem, em conjunto com as técnicas de PCA e com a carta de Hotelling T^2 , a aplicação de um mapa de contribuição bidimensional para a identificação de faltas em processos multivariados. Os autores obtêm resultados positivos com a aplicação dessas

ferramentas sobre dados do Tennessee Eastman Process, modelo matemático de referência (benchmark) para estudos simulados de processos de uma indústria química. Qin (2003) discute a utilização da carta de Hotelling, da técnica de PCA e de outros métodos multivariados para a detecção, identificação e diagnóstico de faltas. Lee e outros (2006) utilizam o método de independent component analysis no monitoramento de um processo de tratamento de água.

Este trabalho apresenta a implementação combinada das técnicas de PCA-CEPM para detecção de mudanças nas condições operacionais de uma usina termelétrica e auxílio no rastreamento de faltas por meio do PCA, como suporte à gestão de ativos e ao monitoramento de desempenho. São consideradas seções de uma unidade de caldeira consideradas críticas para o desempenho global. A usina em questão possui ambas as características mencionadas: múltiplos pontos de operação e não estacionariedade, que podem ser explicadas pelas variações na demanda energética exigida e na composição e disponibilidade dos combustíveis. Como as técnicas de PCA-CEPM requerem comportamento de quase-estacionariedade, é proposto um mecanismo de adaptação de média para a padronização das amostras que possibilita que os diferentes pontos de operação da usina possam ser adequadamente tratados pelos métodos estatísticos.

O sistema de monitoramento é um apoio às equipes de operação e manutenção da usina cujo objetivo é (i) alertar sobre alterações inesperadas nas condições de operação da caldeira sem avalanche de alarmes, (ii) auxiliar no rastreamento de faltas e (iii) formatar os dados em termos de índices estatísticos e índices de desempenho de malhas de controle para criação de banco de conhecimento do processo. Esses recursos viabilizam uma operação mais ciente do desempenho da caldeira e suas malhas de controle e de possíveis degradações incipientes. Propiciam, também, ações da engenharia de manutenção proativa, capazes de antever e programar intervenções sobre equipamentos e instrumentos quando há indícios fortes de degradação e/ou falta incipiente.

A seção 2 apresenta uma descrição do estudo de caso da usina de maneira geral, destacando os aspectos mais importantes para o desenvolvimento do trabalho e detalhando as unidades mais críticas para o desempenho, sendo este trabalho voltado para o monitoramento da caldeira. A seção 3 apresenta a metodologia empregada no monitoramento das seções críticas, enquanto que a seção 4 mostra os resultados obtidos e as respectivas análises. Por fim, a seção 5 sumariza as conclusões do trabalho.

2. USINA TERMELÉTRICA DO ESTUDO DE CASO

A usina termelétrica considerada neste estudo de caso foi projetada para operar com três tipos de combustíveis: gás de alto-forno, gás natural e alcatrão conforme ilustrado no digrama da Fig.1. Cada um dos combustíveis apresenta poder calorífico diferente e tal diferença tem impacto direto na dinâmica das variáveis controladas e na eficiência da usina. Portanto, é necessário que o operador manipule a quantidade de alcatrão e de gás de alto-forno disponibilizada para queima, complementada pela de gás natural que, embora sempre disponível, tem custo superior aos outros dois combustíveis supracitados. Nesse sentido, ao manipular a quantidade e a proporção de cada um dos combustíveis, o operador está, na verdade, alterando o ponto de operação da usina a fim de otimizar a eficiência da mesma.

O vapor superaquecido gerado na caldeira é direcionado à turbina, que converte energia térmica do vapor em energia cinética através do movimento de rotação de suas pás (Woodruff; Lammers; Lammers, 2005). A velocidade de rotação é proporcional à diferença de temperatura do vapor na entrada e na saída da turbina. À medida que o vapor perde energia ele é retirado da turbina através de quatro pontos de extração e reutilizado em processos de pré-aquecimento de combustíveis e água. Um gerador acoplado ao eixo de rotação da turbina é responsável pela conversão da energia cinética em energia elétrica, e a potência gerada depende da demanda exigida pela empresa proprietária.

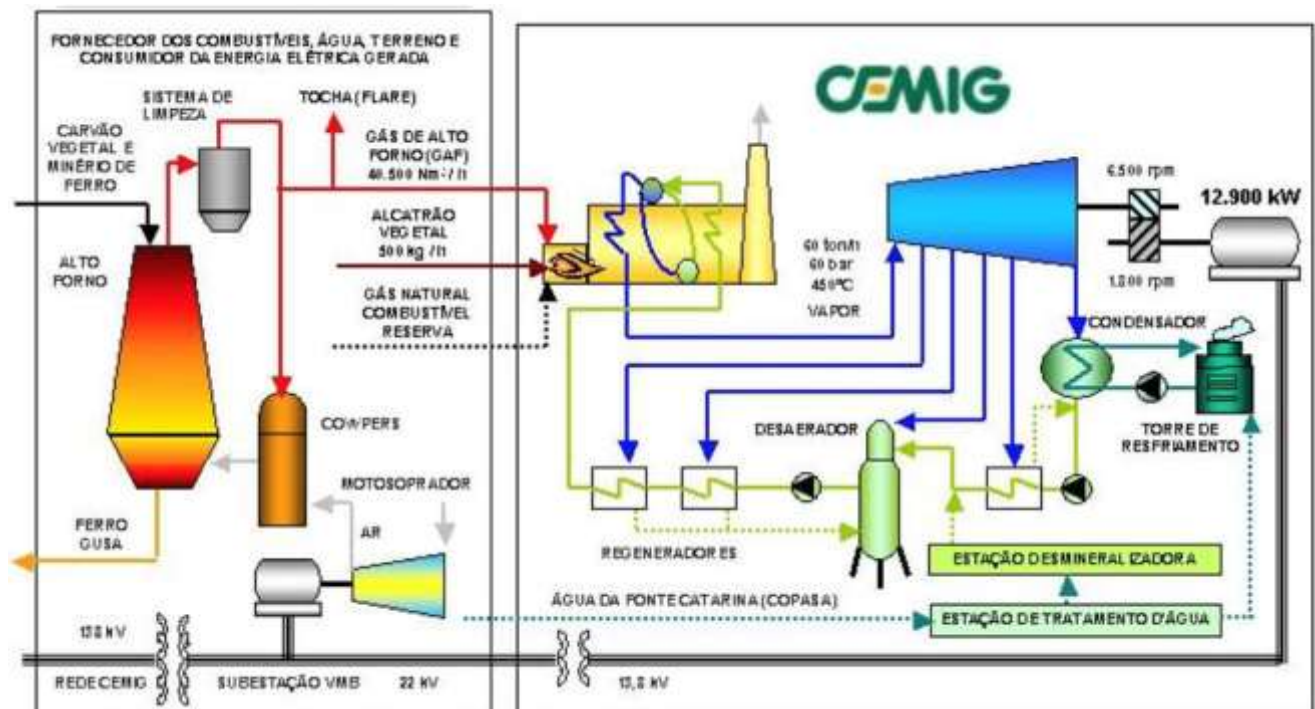


Fig. 1. Diagrama da usina do estudo de caso.

3. METODOLOGIA

A metodologia de PCA-CEPM que trata as condições de não estacionariedade ou de quase-estacionariedade consiste em três etapas principais: (i) pré-filtragem, correção de inconsistências nas amostras e determinação da região de referência ou nominal do processo; (ii) cálculo das componentes principais, bem como o projeto das cartas de Hotelling T^2 e dos índices SPE e combinado; (iii) validação das cartas através do monitoramento de um novo conjunto de dados. Tais procedimentos são detalhados nas subseções seguintes.

3.1 TRATAMENTO INICIAL DOS DADOS E SELEÇÃO DAS REGIÕES DE PROJETO

Inicialmente, deve-se determinar a lista das variáveis de maior interesse para monitoramento e controle estatístico de cada unidade do processo, neste caso em particular, a caldeira. Isso é feito por meio da análise de fluxogramas de engenharia (P&ID) do processo e da consideração dos conhecimentos dos operadores, técnicos e engenheiros envolvidos. Uma vez coletados os dados, deve-se verificar a integridade dos arquivos e a consistência das amostras. Isso significa, principalmente, interpolar dados faltantes e remover mensagens esporádicas de falhas. A carta de Hotelling T^2 requer que os dados estejam sincronizados e que haja uniformidade no intervalo de amostragem. Nesse trabalho, os dados foram retirados de um sistema PIMS com uma taxa de amostragem de 1 Hz.

Após a pré-filtragem e a verificação da consistência das amostras, o próximo passo é realizar a dizimação dos dados. A dizimação é importante para minimizar alarmes excessivos da carta de controle na etapa de monitoramento do processo. A determinação da taxa de dizimação é feita a partir do método de tentativa e erro combinado com inspeção visual dos dados, com o intuito de reduzir o número de amostras sem ocasionar perdas significativas de dinâmicas dominantes e de mudanças abruptas dos dados.

De modo semelhante à etapa de escolha da taxa de dizimação, é feita a inspeção visual das variáveis principais da unidade caldeira, a fim de determinar os segmentos em que o processo opera em estado de controle estatístico, aqui denominados de regiões de projeto. Operadores e engenheiros do processo são consultados para auxiliar na classificação dos segmentos como condições ou patamares de operação de referência ou nominais.

Posteriormente, todas as variáveis são normalizadas usando a média e o desvio padrão de cada região de controle. A normalização das variáveis é de suma importância para o PCA, pois a diferença de escala

das variáveis gera resultados inconsistentes relativos à contribuição para a variabilidade de sistemas multivariados (Montgomery, 2009).

3.2 PROJETO DA CARTA DE HOTELLING T^2 , DEFINIÇÃO DOS LIMITES DOS ÍNDICES SPE E Φ E ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

O vetor de scores $\mathbf{z}$ das componentes principais de um conjunto original de p -variáveis, $\mathbf{X}$, é calculado como:

$$\mathbf{z} = \mathbf{U}^T, \quad (2)$$

Em que as colunas da matriz $\mathbf{U}$ são os autovetores da matriz de autocorrelação do sistema. Os autovetores que compõem a matriz $\mathbf{U}$ representam as principais direções de variabilidade dos dados, ou das componentes retidas.

Nos estudos de caso apresentados neste trabalho, é calculada uma matriz de correlação $\mathbf{U}$ para cada uma das regiões de projeto da caldeira, uma vez estas apresentam estatísticas distintas. Na fase de projeto da carta de Hotelling, o índice T^2 é calculado usando as componentes principais que explicam a maior parte da variabilidade do sistema (95%):

$$T^2 = (\mathbf{z}_r - \bar{\mathbf{z}})^T \mathbf{S}_z^{-1} (\mathbf{z}_r - \bar{\mathbf{z}}), \quad (3)$$

em que $\mathbf{z}_r$ e $\bar{\mathbf{z}}$ são, respectivamente, o vetor de scores e o vetor com as médias dos scores retidos. $\mathbf{S}_z$ é a matriz de covariância dos scores. O SPE e o índice combinado são calculados de acordo com (4) e (5), respectivamente:

$$SPE = (\mathbf{z}_l)(\mathbf{z}_l)^T, \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{T^2}{T_{\alpha}^2} + \frac{SPE}{Q_{\alpha}}, \quad (5)$$

Em que l é o número de componentes descartadas e $\mathbf{z}_l$ é o vetor com as componentes descartadas.

Esse método de cálculo é uma alternativa àquele referenciado por (Jackson, 2003). T_{α}^2 e Q_{α} são, respectivamente, os limites da carta de Hotelling T^2 e do índice SPE encontrados na etapa de projeto.

Os limites de controle, tanto para a fase de projeto quanto para a fase de monitoramento, dependem do número de pontos das regiões de projeto e do número de componentes principais retidas (Mason; Young, 2002; Montgomery, 2009).

3.3 MONITORAMENTO

Na etapa de monitoramento, os parâmetros gerados na fase de projeto são usados para realizar o monitoramento online do processo por meio da carta de Hotelling T2, do SPE e do índice combinado. Além disso, são monitorados os seguintes índices de desempenho de malhas: IAE, variabilidade da variável controlada (VarY) e variância da variável manipulada (VarU). A Tabela I destaca todas as malhas monitoradas. Os cálculos do IAE, de VarY e VarU para cada instante k são dados por (6) e (7) (Sousa, 2015, Jota; Braga; Pena, 1995):

$$IAE[k] = IAE[k - 1] + \alpha(|e[k]| - IAE[k - 1]) . \quad (6)$$

As estimativas da variância da variável manipulada e da variável controlada, respectivamente, no instante k , foram calculadas usando o algoritmo (7):

$$\begin{cases} v_m[k] = v_m[k - 1] + \beta(v[k] - v_m[k - 1]) \\ V_m[k] = V_m[k - 1] + \beta(v^2[k] - V_m[k - 1]) \\ Var_v[k] = \sqrt{\frac{2-\alpha}{2(1-\alpha)}} (V_m[k] - v_m^2[k]), \end{cases} \quad (7)$$

Fazendo-se $v[k] = U[k]$ para obter variabilidade da variável manipulada, e $v[k] = Y[k]$ para a variabilidade da variável controlada.

Em (6), α é um fator de esquecimento: quanto maior seu valor, mais se prioriza a entrada atual no cálculo do IAE e menor é o peso dado ao valor passado da saída. A mesma interpretação é usada para β em (7).

A Fig. 2 apresenta um diagrama de blocos do algoritmo de PCA-CEPM com foco na etapa de monitoramento. As amostras multivariadas devem ser coletadas a uma taxa correspondente à taxa de dizimação empregada na fase de projeto. Uma vez coletadas as amostras, elas são normalizadas para evitar que diferenças nas escalas gerem valores incorretos no momento do cálculo do PCA. Entretanto, como a usina apresenta mudanças frequentes de setpoint e múltiplos patamares de operação, realizar a normalização usando a média da região de projeto é uma abordagem limitada e que pode produzir

resultados inconsistentes. Uma solução para esse problema é fazer a padronização das amostras usando um estimador de média adaptativo ao invés de utilizar a média da região de operação considerada (Sousa et al., 2015).

Tabela I. Malhas de controle monitoradas.

Malha de controle
Vazão GAF na entrada do queimador
Vazão de água de alimentação
Pressão do vapor no superaquecedor
Temp. do vapor no superaquecedor
Vazão de ar de combustão
Nível de água do tubulão
Pressão do ar de combustão
Pressão do GAF
Pressão na câmara de queima

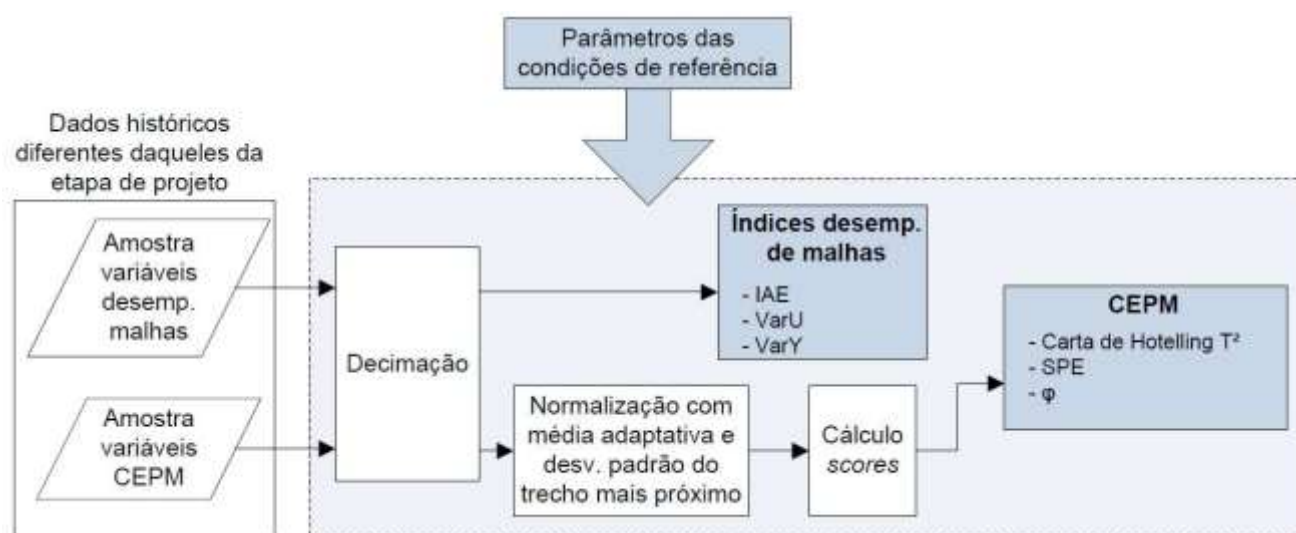


Fig. 2. Diagrama de blocos do algoritmo de monitoramento dos índices multivariados e do desempenho das malhas de controle.

O estimador adaptativo de média provê um mecanismo rápido de adaptação quando ocorrem mudanças de referência ou comandos do operador (Sousa et al., 2015). Para isso, a amostra de cada uma das variáveis é entrada de dois filtros de média aritmética recursivos. Um filtro de média rápida, que acompanha melhor as variações dos dados originais, e o outro de média lenta, que apresenta dinâmica mais lenta em relação ao sinal original. Sobre o resíduo das saídas desses filtros é aplicado um teste CUSUM (Cumulative Sum), que detecta mudanças abruptas ou comandos do operador e

envia um comando para que a saída do filtro lento seja chaveada para o valor da saída do filtro rápido. A saída do filtro lento é usada para selecionar os parâmetros do ponto de operação – parâmetros do PCA e limites de controle – e normalizar os dados. Dessa forma, o algoritmo PCA-CEPM foca na variabilidade do processo durante o período de monitoramento como se este fosse quase estacionário. As componentes principais retidas são usadas para monitorar aproximadamente 95% da variabilidade dos dados com um intervalo de confiança de 99%.

A escolha das variáveis da caldeira a serem monitoradas utilizando técnicas de CEPM foi baseada, principalmente, no estudo da operação do processo, na análise de diagramas de engenharia e na experiência de operadores e engenheiros envolvidos no projeto. A Tabela III apresenta a relação das variáveis selecionadas. Em paralelo às variáveis da caldeira, os índices de desempenho das malhas de controle também são monitorados.

Tabela III. Relação de variáveis da seção da caldeira de maior relevância para o monitoramento estatístico.

TAG	Descrição
FIQ101	Vazão de gás de alto-forno na entrada do queimador
FIQ102	Vazão de gás natural na entrada do queimador
FIQ313	Vazão de água de entrada
FIT301	Vazão de vapor superaquecido
PI343	Pressão de vapor no tubulão
PIC322	Pressão do vapor superaquecido
TIC327	Temperatura do vapor superaquecido
TI323	Temperatura da água de alimentação
TI329	Temperatura dos fumos (gases de exaustão)
TI343	Temperatura do gás de alto-forno
FIQ311	Vazão de ar para combustão
AIC301	Análise de oxigênio dos gases de exaustão

4. RESULTADOS

O conjunto de dados da caldeira utilizado para o projeto da carta de Hotelling corresponde a um período de dados de 4 dias em maio e 7 dias em julho de 2015. Esse recorte foi realizado com a finalidade de privilegiar períodos em que a usina operava em patamares de potência diferentes e bem definidos, de modo que a tarefa de seleção dos trechos de referência para cada patamar fosse

facilitada. Como os pontos de operação variam consideravelmente, foram escolhidos quatro trechos que representam o comportamento típico da usina para o projeto em cada patamar típico de operação, considerando-se que são também representativos do estado de controle estatístico dos mesmos. A Fig. 3 apresenta o período de dados de potência ativa, com destaque para os trechos de projeto escolhidos. O número de componentes principais retidas em cada trecho de projeto busca explicar cerca de 95% da variabilidade total desses dados.

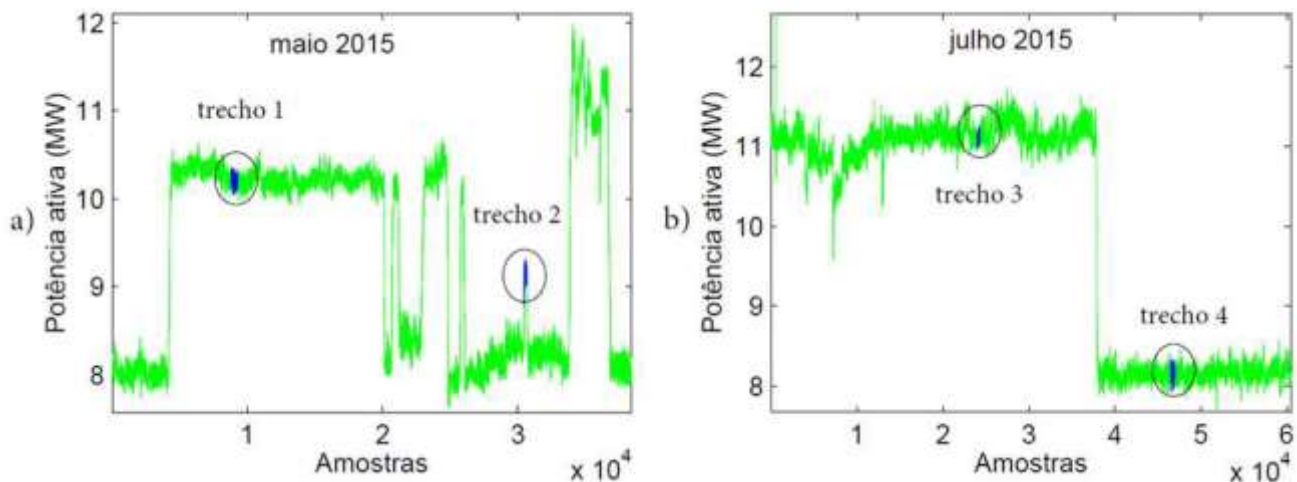


Fig. 3. Trechos escolhidos para o projeto da carta de Hotelling T^2 e para o cálculo dos limites dos índices SPE e ϕ . Os dados do mês de maio estão indicados em a) e os do mês de julho em b).

Os limites de controle foram projetados para um intervalo de confiança de 99%, para cada uma das quatro regiões de projeto, correspondentes aos quatro patamares típicos de operação.

Para fins de comparação, a Fig. 4 exibe um trecho de monitoramento do processo em que não há desvios da condição de referência. Nela, a potência gerada pela usina é comparada com o índice combinado.

Os índices T^2 e SPE do mesmo trecho são exibidos na Fig. 5. Nota-se que os pontos fora dos limites de controle são pouco frequentes e ocorrem em compatibilidade com o intervalo de 99%. Já a Fig. 6 mostra os índices multivariados em um segmento de dados em que o processo sai do estado de controle estatístico. Uma análise das contribuições de cada score no índice T^2 indica alterações principalmente nas variáveis PIC322, FIQ313 e TI329. Nesse mesmo trecho de dados, oscilações nos índices de desempenho das malhas relacionadas a essas variáveis são observadas, como mostram as Fig. 7 e 8. A Fig. 9 mostra a variação no SP e na saída da malha de PIC322. Tanto o IAE quanto a variabilidade das variáveis controlada (VarY) e manipulada (VarU) são afetados.

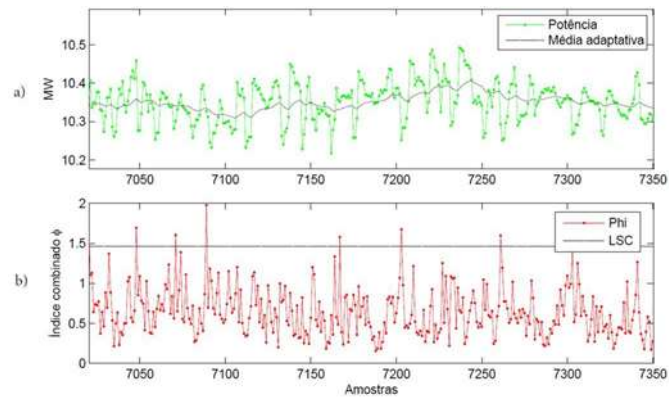


Fig. 4. Potência ativa da usina e índice combinado em um trecho onde não há desvios da condição de referência. Em a) também está indicada a média adaptativa utilizada para o cálculo dos índices.

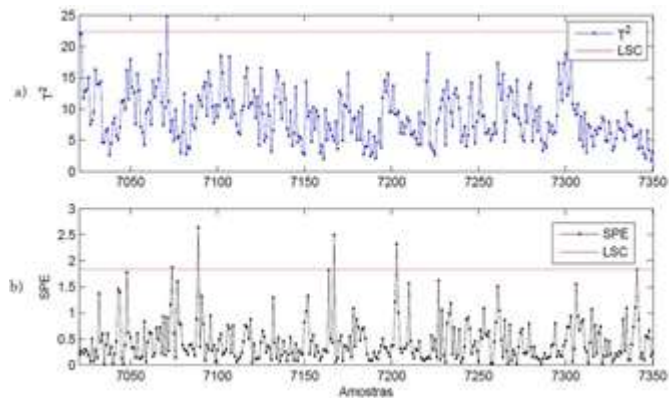


Fig. 5. Índices T^2 e SPE do mesmo trecho dos dados exibidos na Fig. 4. Não há a presença de alterações significativas no processo.

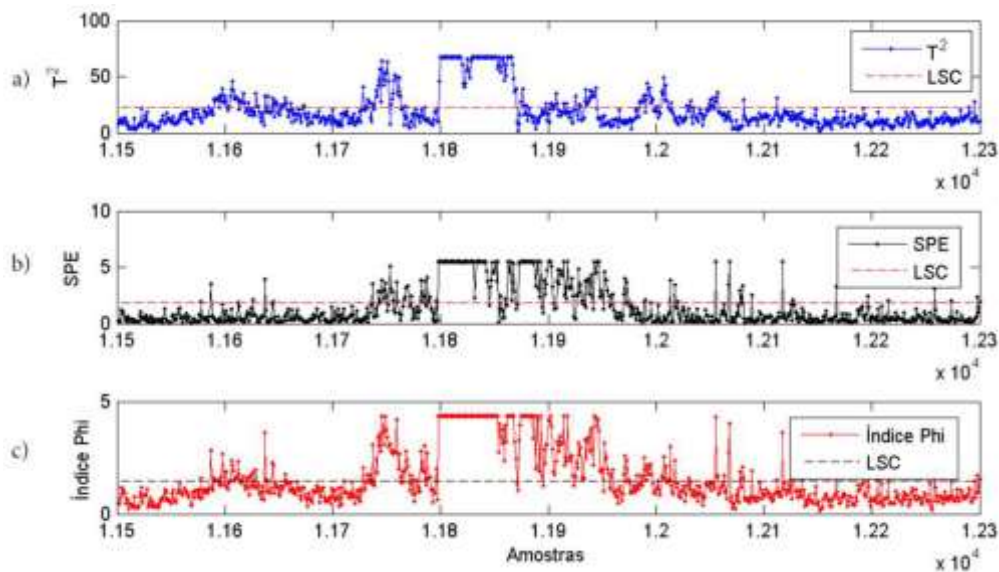


Fig. 6. Índices T^2 (a), SPE (b) e combinado (c) em torno das amostras de número 11800 a 11900 indicando a presença de uma condição anormal de operação.

Algumas variáveis com contribuições elevadas no SPE e que fazem parte das malhas monitoradas também possuem alterações percebidas pelos índices de desempenho. É o caso da vazão de GAF (FIQ101), do nível de água no tubulão (LIC302) e da vazão de ar de combustão (FIQ311). Os índices da malha de nível de água no tubulão, por exemplo, são mostrados na Fig. 10. A Fig. 11 exibe alterações em algumas das variáveis apontadas, as quais possuem grande influência na geração de alarmes tanto por meio do índice T^2 quanto pelo SPE.

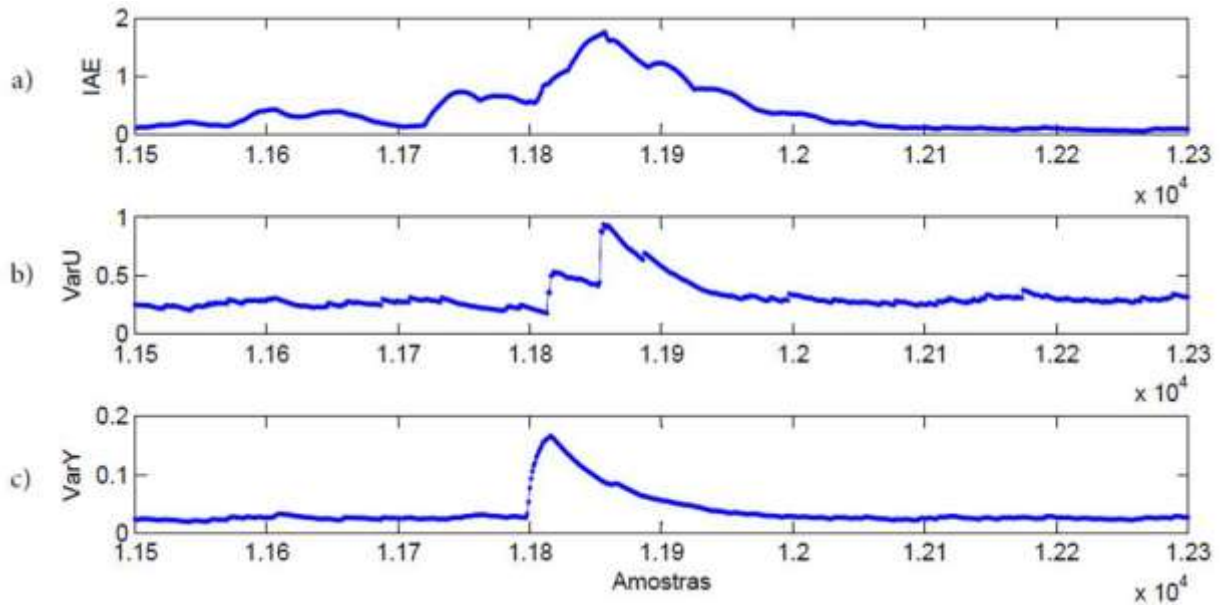


Fig. 7. Oscilação na pressão de vapor superaquecido (PIC322) refletida nos índices da malha de controle: IAE (a), VarU (b) e VarY (c).

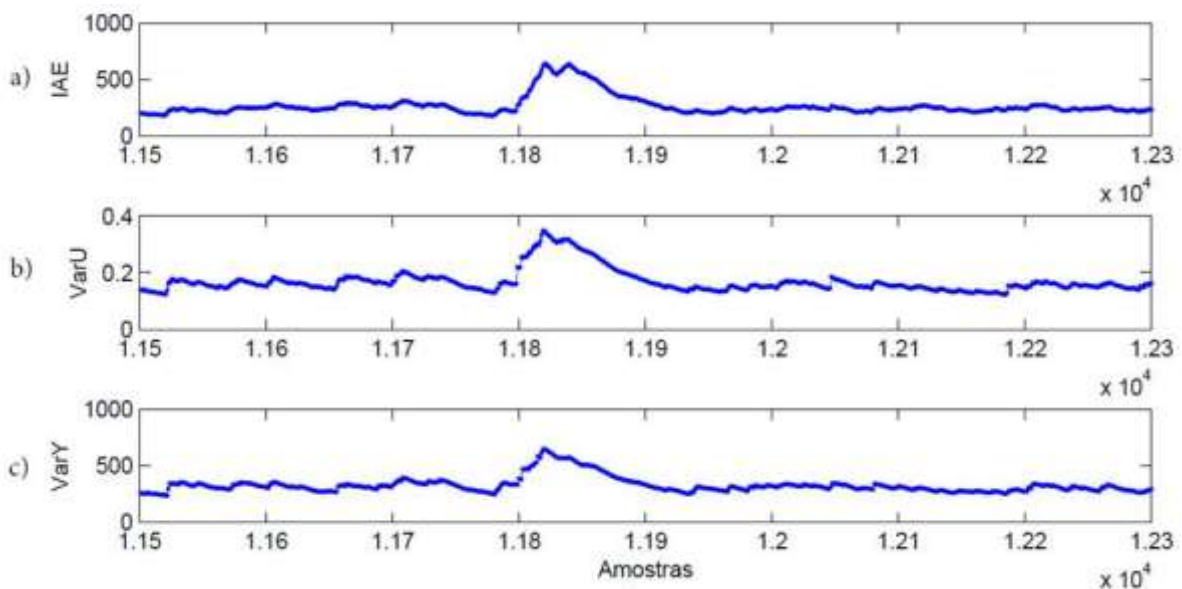


Fig. 8. Oscilação na vazão de água de entrada (FIQ313) refletida nos índices da malha de controle: IAE (a), VarU (b) e VarY (c).

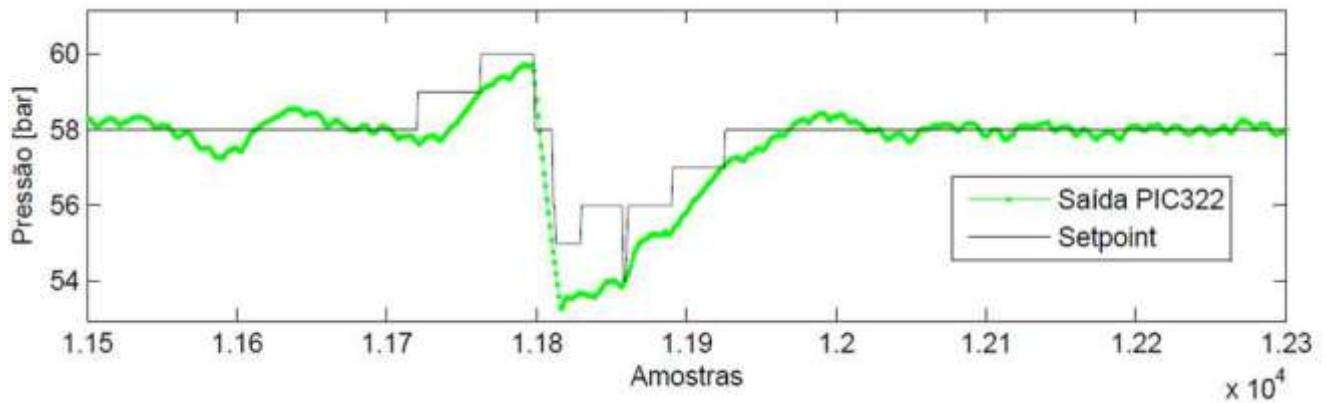


Fig. 9. Variável controlada e *setpoint* (SP) da malha de vazão de vapor superaquecido (PIC322).

Uma provável análise das alterações observadas começa por considerar o leve aumento, seguido de queda repentina, na pressão do vapor superaquecido. Tal flutuação impacta diretamente na pressão de vapor do tubulão, já que a linha de saída de vapor do tubulão está diretamente conectada à de vapor superaquecido. A queda brusca na pressão dentro do tubulão gera um aumento imediato no nível aparente de água em razão do crescimento do volume das bolhas de vapor. Porém, logo em seguida, como a pressão mais baixa favorece a passagem da água para o estado gasoso, o nível de água apresenta declínio. Essa redução no nível gera aumento na vazão de água de alimentação e de combustíveis, buscando reequilibrar o nível de água e as características de pressão e temperatura do vapor principal. É necessário destacar que o diagnóstico correto das causas do desequilíbrio na pressão de vapor relacionadas a toda essa sequência de alterações na caldeira deve ser feito em conjunto com os operadores, técnicos e engenheiros da usina (Sousa, 2015).

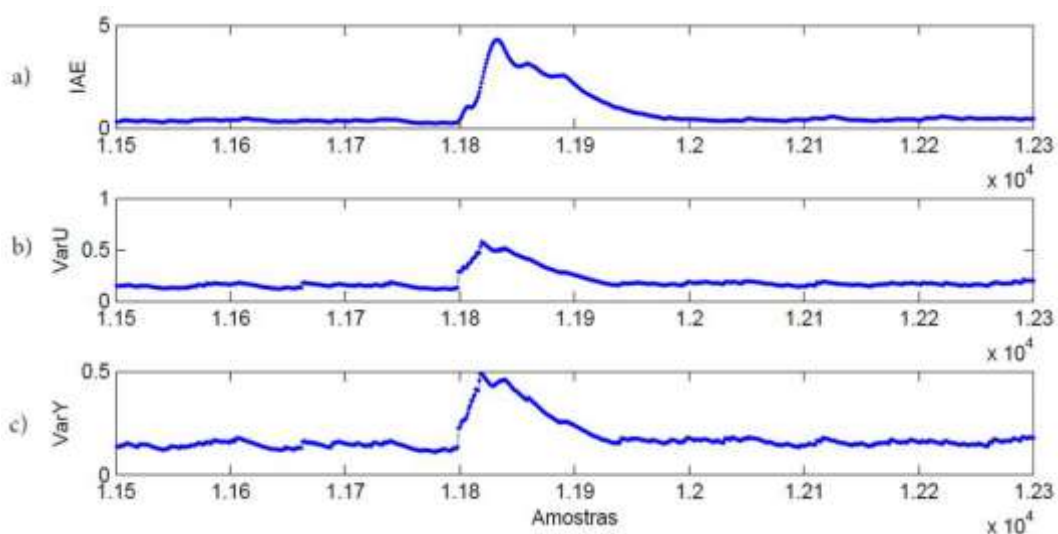


Fig. 10. Oscilação no nível de água do tubulão (LIC302) refletida nos índices da malha de controle: IAE (a), VarU (b) e VarY (c).

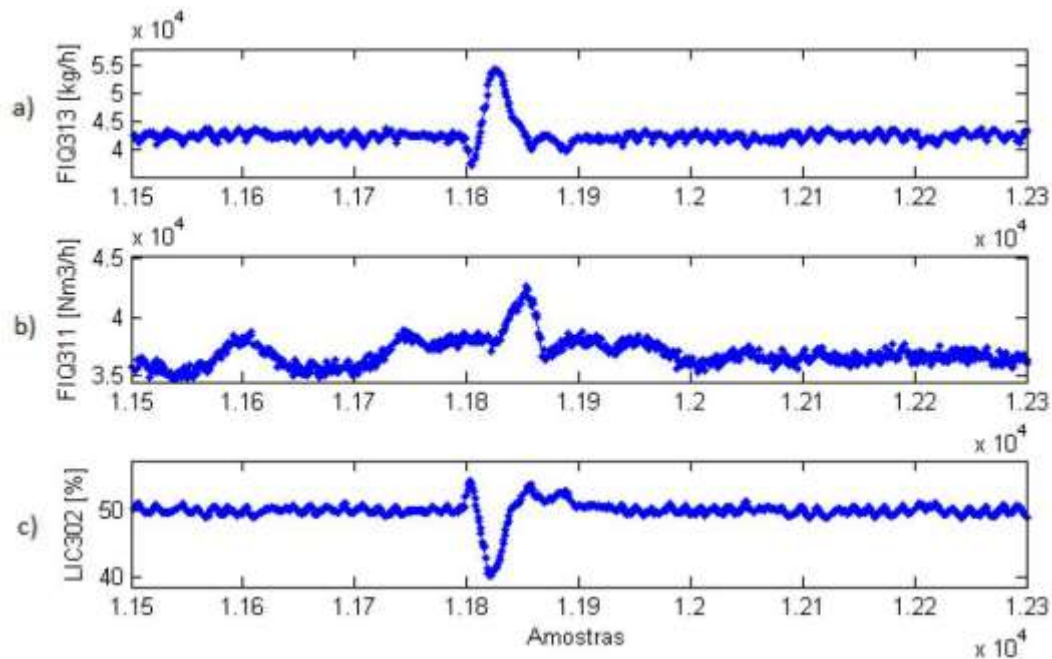


Fig. 11. Alterações observadas na vazão de água de entrada (FIQ313), na vazão de ar de combustão (FIQ311) e no nível de água do tubulão (LIC302).

5. CONCLUSÕES

Foi apresentado o uso de técnicas de controle e monitoramento estatístico multivariado, com um esquema proposto de adaptação de média para adequação às condições de operação não-estacionárias e com múltiplas referências. A aplicação da metodologia proposta, considerando as fases de projeto e monitoramento para a caldeira, que opera com múltiplas referências, demonstra a validade da metodologia proposta. Demonstrou-se que o uso combinado dessas técnicas com o monitoramento dos índices de desempenho de malhas é capaz de detectar mudanças nos casos em que há alteração não usual no processo, provendo às equipes de operação maior agilidade no relato dessas condições.

O uso simultâneo de Índices de avaliação de desempenho para as malhas de controle contribui para confirmar a influência de mudanças no desempenho das malhas, nas situações em que os índices estatísticos indicam perda do estado de controle estatístico, ou ainda, degradação das condições operacionais. A engenharia de manutenção pode se beneficiar, também, com a análise sistemática dos resultados do monitoramento, pois estes proporcionam conhecimento sobre o desempenho do processo e do sistema de automação, sobre a correlação entre as variáveis e os problemas ocorridos, além de prover informação prévia sobre degradações em curso e em qual local. Esta informação prévia sobre possíveis degradações pode tornar a manutenção mais proativa, planejando uma intervenção

sobre um sistema, um instrumento ou equipamento enquanto a degradação ainda não implica em falha, evitando que esta venha a ocorrer. No caso de alguma malha de controle estar envolvida, uma auditoria dessa malha mostra-se desejável, uma vez que a degradação do seu desempenho pode estar associada a problemas com o medidor, o atuador ou a sintonia do controlador.

Assim sendo, pode-se dizer que a técnica combinada proposta de PCA-CEPM com média adaptativa, em conjunto com o monitoramento do desempenho das malhas, pode ser encapsulada como uma ferramenta auxiliar para monitoramento em tempo hábil de processos multivariados não-estacionários e com múltiplos pontos de operação, apoiando as equipes de operação e manutenção a manterem a planta operando em suas melhores condições.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2002). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. [Online]. Disponível:

http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf.

Aström, K. J. and Bell, R. D. (2000). Drum-boiler dynamics. *Automatica*, volume 36 (3), 363-378.

Campos, M. C. M. M and Teixeira, H. C. G. (2010). Controles típicos de equipamentos e processos industriais. Edgard Blucher (2ed).

Controlsoft (2019). INTUNE+ Control Loop Performance Monitoring. [Online]. Disponível em:

<<https://www.osisoft.com/marketplace/solution-detail/?id=a2K1I0000001XgUUAU>>. Acesso em: 12 abr. 2019.

Jackson, J. E. (2003). A User's Guide to Principal Components. Wiley Interscience.

Jota, F.G., Braga, A.R., Pena, R.T. (1995). Performance assessment of advanced process control algorithms using an interacting tank system. In IAS'95 Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 1565-1571.

Lee, J.-m, Qin, S. J. and Lee, I.-B (2006). Fault Detection and Diagnosis Based on Modified Independent Component Analysis. *AIChE Journal*, volume 52(10), 3501-3514.

Mason, R. L. and Young, J. C. (2002). Multivariate Statistical Process Control with Industrial Applications. ASA-SIAM.

Metso Expertune (2019). MPC Performance Monitoring. [Online]. Disponível em:

<https://www.metso.com/contentassets/3f1c4763b0db426ea8_fba833febe6eb7/mpcperformance_monitoring.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2019.

Montgomery, D. C. (2009). Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley & Sons.

Pessel, N., Balmat, J-F., Lafont, F., Bonnal, J. (2007). An Improved PCA Fault Detection for the Diagnosis. In Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling & Simulation, 312-318.

Qin (2003), S. J. Statistical Process Monitoring: Basics and Beyond. *Journal of Chemometrics*, volume 17(8-9), 480- 502.

Sousa, B. M., Lebedev, A., Ferreira, J., Aguiar, W. E., Braga, C. M. P., Braga, A. R., Lemos, A. P. (2015). Multivariate Statistical Process Control of Boiler and Turbine- Generator units of a Thermoelectrical Power Plant With Multiple Operating Set Points. In Proc. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, 1907-1913.

Sousa, B. M. (2015). Desenvolvimento de um Sistema para Validação Ampla de uma Caldeira com Múltiplos Pontos de Operação. Dissertação de Mestrado, Dept. Eng. Elétrica, Univ. Fed. Minas Gerais, Belo Horizonte.

Wang, Q., Ma, J., Xu, X., (2011). PCA-AR based Fault Prognosis for Turbine Machine. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1605-1610.

Woodruff, E. B., Lammers, H. B., Lammers, T. F. (2004). Steam Plant Operation. McGraw-Hill.

Yue, H. H. and Qin, S. J. (2001). Reconstruction based fault identification using a combined index. Industrial and Engineering Chemistry Research, volume 40 4403 – 4414.

Zhu, X. and Braatz, R. (2003). Two-Dimensional Contribution Map for Fault Identification. IEEE Control Systems Magazine, volume 34(5), 72-77.

Capítulo 8



10.37423/240308835

POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE MICRO E MINICOGERAÇÃO EM CENTROS URBANOS – ANÁLISE DE CASO

Elio Vicentini

Universidade Federal do ABC

Ricardo Caneloi dos Santos

Universidade Federal do ABC

Ricardo da Silva Benedito

Universidade Federal do ABC



Resumo: Este trabalho demonstra o posicionamento das diferentes fontes de energia em relação às solicitações de acesso e indica o potencial de outras fontes de energia, com o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias, para centros urbanos. No caso, o trabalho explana sobre a cogeração a gás natural nos lugares onde a oferta de telhados e áreas para implantação de sistemas solares não são possíveis ou interessantes, devido à sombreamentos, posicionamento, limitação de área, geometria inadequada, custos das áreas ou outros tipos de interferências. Como parte do trabalho, é apresentado um estudo de caso e a análise financeira para demonstrar sua viabilidade. O futuro crescimento desse tipo de acesso deve ser considerado no planejamento e operação de redes de distribuição, pois terá uma participação considerável na constituição do sistema elétrico em centros urbanos.

Palavras-chaves: Cogeração; Planejamento; Tecnologia; Investimento; Geração Distribuída

1. INTRODUÇÃO

A publicação da Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482, em abril de 2012, foi um marco para a distribuição de energia no país. Tal publicação definiu as condições regulatórias que criaram a possibilidade para os consumidores produzirem a sua própria energia elétrica e exportar o excedente para a rede de distribuição, em caráter de empréstimo à distribuidora, consumidoras que participam do programa em março de 2022 já é de 857.715, superando a previsão da própria ANEEL. O sistema elétrico será transformado e uma nova configuração de rede de distribuição, com geradores de energia compartilhando a sua infraestrutura elétrica, deverá ser considerada (ANEEL, 2012).

Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Dentre tais benefícios, destacam-se o adiamento de investimentos na expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015).

Ao explorar os dados disponibilizados pela ANEEL, relativos à geração distribuída no país, é possível extrair diversas informações do segmento de geração distribuída (GD). Uma delas, que merece destaque, é a participação constituindo assim o Programa de Compensação de Energia. O número de unidades consumidoras nesse programa em 2017 era 26.834, sendo que a perspectiva prevista pela Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL de 24 de maio de 2017 (ANEEL, 2017) para 2024 era de 886.700 unidades consumidoras.

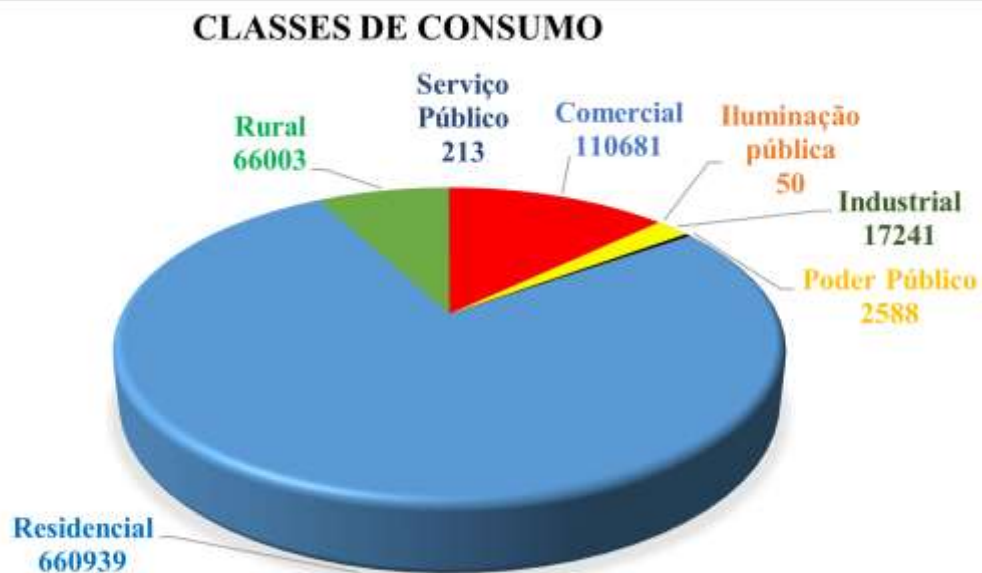
Entretanto, o número atual de unidades das diferentes fontes de energia na composição desse tipo de conexão à rede. A geração solar fotovoltaica tem uma participação expressiva no número de acessos, devido à facilidade de implantação desses sistemas em telhados e áreas disponíveis. Além disso, também são atrativos dessa tecnologia a intensa radiação solar no país, bem como o seu menor custo de implantação, quando comparada com as outras fontes de energia. A Tabela 1 contém a distribuição do número de acessos, por fontes renováveis, do início do programa (2012) até março de 2022.

Tabela 1 – Distribuição de acessos por fontes renováveis

Distribuição de acessos por fontes renováveis	
Eólica (EOL)	89
Termelétrica (UTE)	378
Hidráulica (CGH)	75
Solar (UFV)	857.173

Fonte: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-deempreendimentos-de-geracao-distribuida>

A Fig. 1 mostra que a maioria dos acessos são referentes a clientes residenciais.

**Fig. 1** Distribuição das Classes de Consumo (mar/2022)

Fonte: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-deempreendimentos-de-geracao-distribuida>

A média observada da potência instalada das micro e minigerações nas classes de consumidores residencial e comercial é aproximadamente 6,2 kW e 28,1 kW, respectivamente. Essa última é a classe que possui maior quantidade de unidades consumidoras que se enquadram no perfil de instalações que demandam serviços de água quente e possuem condições para a adoção da cogeração. Em

centros urbanos existe a dificuldade para o aproveitamento dos telhados, seja por questões de limitação de área, sombreamento ou verticalização das grandes cidades.

Portanto, observa-se que em centros urbanos a geração fotovoltaica possui algumas restrições para sua utilização e outras alternativas devem ser consideradas. As instalações comerciais, industriais, hoteleiras e hospitalares são as mais sujeitas à essas restrições.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 ANÁLISE DO POTENCIAL DA COGERAÇÃO

A cogeração é uma alternativa conhecida para o aproveitamento de insumos energéticos disponíveis, principalmente no setor industrial, onde diferentes processos podem gerar elementos descartáveis na fabricação dos produtos, mas que podem gerar energia para o processo de produção. A definição básica de cogeração é o aproveitamento de um insumo que, pelo sistema de transformação, resulta em, no mínimo, dois serviços.

Para que a cogeração seja elegível no Programa de Compensação de Energia da ANEEL (ANEEL, 2012), a mesma precisa ser previamente classificada pelo órgão regulador como qualificada. O termo “qualificada” é um atributo concedido a cogeradores que atendem requisitos definidos pela Resolução Normativa ANEEL 235 de 14 de novembro de 2006 (ANEEL, 2006), segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração. Instalações comerciais, industriais, hoteleiras, clubes, escolas, lavanderias, hospitais e grandes condomínios residenciais demandam, pela sua característica de serviço, não somente eletricidade, mas também calor. Com o desenvolvimento tecnológico, a cogeração qualificada se tornou atrativa para esses consumidores, que comportam cogerações de 10 a 5.000 kW de potência elétrica e normalmente necessitam o dobro em potência calorífica.

Além da geração própria de eletricidade, que reduz o consumo da instalação, o calor gerado no interior de um motor (por meio de sistemas de resfriamento e escapamento) é aproveitado para aquecer, por exemplo: piscinas, águas para banho, caldeiras para a lavagem de roupas, etc. Segundo a Federação Brasileira de Hospitais (FBH, 2018), o Brasil conta com 6.702 hospitais de médio e grande porte, onde essa tecnologia poderia ser explorada.

A Associação Brasileira de Shopping Centers informa que o país possui 563 unidades desse tipo de comércio (ABRASCE, 2019). Em relação às academias, embora não se tenha os dados de quantas possuem piscinas, no Brasil são mais de 36.500 unidades, segundo a Associação Brasileira de Academias (SEBRAE, 2018). O número de hotéis cadastrados no Fórum de Operadores Hoteleiros do Brasil (FOHB, 2019) é de 10.341 unidades. Diante desses números, mesmo sem considerar instalações comerciais diversas (clubes, escolas e grandes condomínios residenciais), é possível perceber um grande mercado em potencial para a aplicação da tecnologia de cogeração.

Todos esses consumidores somados, representam mais de 54.100 unidades com potencial para a implantação de cogeração. Se uma instalação típica de um cogrador de 15 kW for considerado como referência, é possível estimar que há um montante de geração da ordem de 800 MW para ser incluído no sistema elétrico brasileiro.

A utilização desta solução é relativamente simples, devido as reduzidas dimensões e potências dos equipamentos envolvidos no projeto. Além disso, o retorno do investimento é considerado curto, quando comparado aos demais tipos de geração. Esse benefício é um dos grandes impulsionadores desse tipo de produção de energia.

No entanto, há algumas restrições para seu uso, como, por exemplo, a necessidade de uma rede de gás que alimente o sistema com quantidade e pressão adequadas. Os isolamentos térmico e acústico também são de grande importância para a implantação desses sistemas. As condições mínimas para a análise da implantação de um sistema de cogeração são:

- Consumo ou uso contínuo de água quente;
- Presença de rede de gás canalizado na unidade;
- Obter o valor do volume mínimo de consumo de gás para a mudança de classe de consumo junto à distribuidora;
- Espaço para implantação da cogeração;
- Análise das adequações necessárias da infraestrutura elétrica interna e da concessionária.

2.2 ESTUDO DE CASO

As informações do estudo de caso foram obtidas junto a empresa ECOU Sustentabilidade Urbana, sobre um projeto de implantação de um sistema de cogeração em um edifício residencial de alto padrão, com apenas 8 unidades residenciais e grande área comum. O perfil energético do condomínio e o perfil de consumo de energia elétrica estão resumidos na Fig. 2 a seguir. Observa-se que a demanda

térmica é maior que a demanda por eletricidade. Essa necessidade é suprida por 3.000 m³ em média de gás e 20.500kWh de eletricidade.

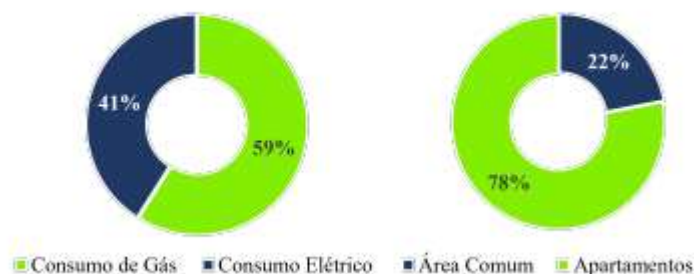


Fig. 2. Perfil energético do condomínio

Fonte: ECOU Sustentabilidade Urbana

O condomínio possui uma central de aquecimento de água, que sofreu a inclusão da cogeração, que abastece todos os apartamentos, as áreas comuns e garante o aquecimento da piscina. O sistema de aquecimento existente foi alterado, com a inclusão de um cogrador - Combined Heating Power HP). Os aquecedores de passagem existentes não foram desativados, pois em uma situação de parada do CHP a instalação continuará com o serviço de água quente com a operação desses equipamentos.

O sistema de aquecimento e a sua distribuição pelas unidades consumidoras é apresentado na Fig. 3.

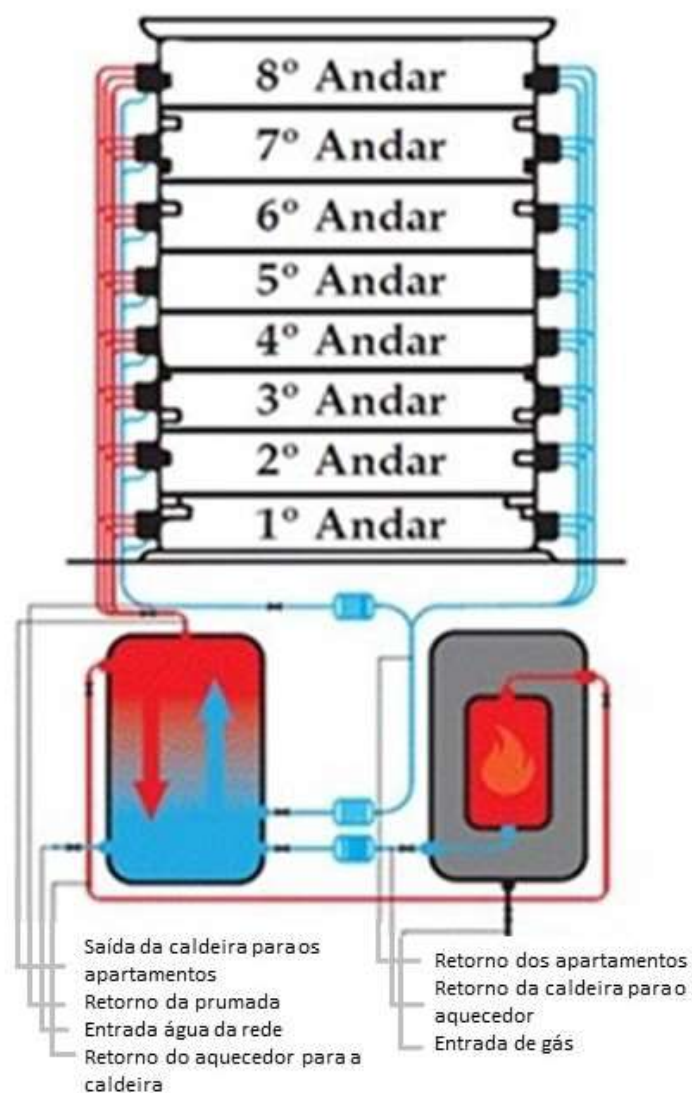


Fig.3. Sistema de aquecimento de água

Fonte : ECOU Sustentabilidade Urbana

No esquema proposto, a água aquecida pelo CHP passará pelos aquecedores que, no entanto, não trabalham para o aquecimento da água, pois ela já se encontra em temperatura adequada para armazenamento nos acumuladores. Dessa forma, os aquecedores ficam inativos, entrando em operação somente quando a água não estiver em uma temperatura préestabelecida.

Na Fig. 4 é apresentado o novo circuito de aquecimento de água do condomínio.



Figura 4. Sistema de aquecimento de água com CHP

Fonte: ECOU Sustentabilidade Urbana

As Fig. 5 e Fig. 6 mostram os equipamentos utilizados na instalação. As dimensões são bem reduzidas e o aspecto é harmonioso, com apresentação visual de limpeza e simplicidade. Todo o calor gerado é transferido para o sistema de aquecimento de água.



Fig. 5. Combined Heating Power – CHP

Fonte: Autores



Fig. 6. Combinated Heating Power – CHP

Fonte: Autores

Este tipo de equipamento possui um alto rendimento, convertendo e utilizando grande parte da energia do insumo.

A Tabela 2 apresenta o quadro de eficiência do CHP utilizado.

Tabela 2. Eficiência do CHP

Potência e Eficiência @ 60Hz			
Pot. Elétrica - kWe	20,0	Efic. Elétrica	30,3%
Pot. Térmica - kWt	43,4	Efic. Térmica	65,7%
Pot. Combustível - kW	66,0	Efic. Total	96,0%

Fonte: Amico Gas Power CO., LTD

O dimensionamento da máquina foi realizado objetivando atender o máximo possível da demanda térmica do condomínio, fornecendo, em condições normais de operação, aproximadamente 90% do total. A Fig. 7 mostra o perfil de consumo de água quente do condomínio.

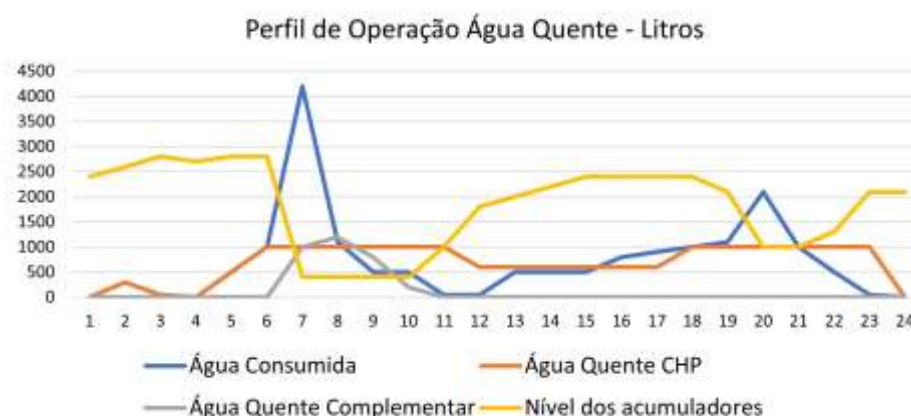


Fig. 7 – Consumo de água quente

Fonte: ECOU Sustentabilidade Urbana

Utilizando a curva de consumo típica para edifícios residenciais, é possível modelar o consumo bruto aproximado de energia elétrica do prédio ao longo do período de um dia.

O sistema de micro cogeração é dimensionado para operar 24h por dia da forma mais eficiente possível. Para que isso ocorra, é necessário fazer o dimensionamento de modo que a demanda térmica seja a referência de operação, ou seja, o sistema não irá operar de acordo com a demanda elétrica do prédio, mas sim de acordo com a necessidade por água quente. Tal procedimento é mais vantajoso do ponto de vista financeiro e de sustentabilidade. O perfil da demanda elétrica da instalação é mostrado na Fig. 8.



Fig. 8 - Perfil de demanda elétrica

Fonte : ECOU Sustentabilidade Urbana

Na Fig. 8 é possível perceber que a geração tem a operação em sua potência nominal de energia elétrica, grande parte do dia - cerca de 18 horas. Neste caso específico, considerando também a

demanda das unidades consumidoras, é possível notar que não há exportação de energia para a rede, devido ao ciclo de utilização da carga térmica.

O estudo de viabilidade foi elaborado com os dados do investimento necessário para a implantação do sistema e o tempo de retorno dele (payback), considerando a redução dos custos obtidos. É importante observar que a produção de energia do sistema de cogeração poderá exceder o consumo do edifício, unidades e áreas comuns. Como a instalação é participante do Programa de Compensação de Energia, o excedente de energia produzido pela cogeração pode e será dividido entre os condôminos, gerando uma redução de quase 50% na fatura de energia mensal. A Tabela 3, apresenta a comparação entre os custos mensais da instalação, antes e depois da implantação do sistema de cogeração.

Tabela 3 - Comparação de custos mensais

Custos Mensais	Antes CHP	Depois CHP
Eletricidade A.C.	R\$2.700,00	R\$0,00
Gás A.C.	R\$10.000,00	R\$7.500,00
Eletricidade U.C.	R\$1.300,00	R\$773,00
Manutenção	R\$0,00	R\$1.700,00
Total	R\$23.100,00	R\$15.380,00
A.C.: Área Comum; U.C.:Unidade Consumidora		

Fonte: ECOU Sustentabilidade Urbana

2.3 RESULTADOS

O sistema de cogeração implantado foi projetado para fornecer a potência térmica de 43,4 kW e a potência elétrica de 20 kW. Os serviços da edificação, que demandavam energia térmica, foram atendidos adequadamente com a instalação da cogeração. Embora o consumo de gás tenha aumentado com o uso do cogerador, quando comparado com o volume utilizado nos aquecedores de passagem empregados inicialmente, a utilização do CHP permitiu a migração da classe de consumo do condomínio (tarifa de gás de comercial para industrial), tornando viável economicamente a solução adotada. A Fig. 9 apresenta o resumo financeiro anual da operação da cogeração em comparação com o antigo sistema de aquecimento.



Fig.9 - Resumo financeiro anual

Fonte: ECOU Sustentabilidade Urbana

A implantação do sistema de cogeração em estudo necessitou do cliente o investimento total de aproximadamente R\$280.000,00 e o payback esperado, mantidas as condições atuais de comercialização de gás e as regras do Programa de Compensação de Energia da ANEEL, ocorrerá em 36 meses.

Em comparação com outras fontes renováveis de energia, elegíveis no Programa de Compensação de Energia, projetos de cogeração oferecem o retorno do investimento em menor prazo. Sistema solares fotovoltaicos tem em média o retorno do investimento em 72 meses e são diretamente influenciados pelo valor da tarifa de energia oferecida pela distribuidora local.

Para uma simples comparação com os sistemas solares fotovoltaicos convencionais, o investimento estimado de um sistema fotovoltaico de mesma potência, seria em torno de R\$103.200,00. Entretanto, o retorno do investimento é esperado a partir do oitavo ano.



Figura 11 – Evolução dos custos de implantação de sistemas solares fotovoltaicos de energia

Fonte : Greener

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, observou-se que há um mercado, ainda pouco explorado, para uso da tecnologia de cogeração através do gás natural. A aplicação da micro e minicogeração por meio desse tipo de tecnologia se concentrará prioritariamente em centros urbanos. O uso dessa solução é bastante promissora, face a contínua redução dos custos dos sistemas de cogeração, a manutenção do preço do gás e a necessidade de otimizar despesas das instalações. Diferentemente da cogeração praticada atualmente, que está centralizada no setor industrial, as micro e minicogerações também pretendem atender os setores comercial, hospitalar e hoteleiro. Possivelmente, as distribuidoras vão adaptar seu sistema elétrico para receber uma quantidade sensível de acessantes utilizando esse tipo de tecnologia de geração.

Inicialmente, a geração térmica deve ser dimensionada para satisfazer as necessidades da instalação, sendo que a potência da geração elétrica está vinculada à essa geração térmica.

Diante do estudo de caso apresentado é possível destacar, além do resultado financeiro interessante para o investidor, comparado com gerações que utilizam outros tipos de fontes de energia sustentáveis, as seguintes conclusões:

a) Vantagens do sistema de cogeração

- Previsão assertiva da produção de energia;
- Pequena área para implantação;
- Bem aceita pelas distribuidoras pelo caráter contínuo de operação;
- Pequena obra civil para instalação dos equipamentos.
- Não depende de condições climáticas.
- Contribui para a redução da emissão de CO₂.

b) Desvantagens do sistema de cogeração

- Necessita de área específica para instalação do equipamento;
- Exige tratamento acústico, térmico e de emissão de gases;
- Requer sistema de ventilação e exaustão de calor para resfriamento da máquina.

REFERÊNCIAS

ABRASCE. Números do setor. Associação Brasileira de Shopping Centers, 2019. Brasil. Disponível em: <<https://abrasce.com.br/numeros/setor/>>

Amico (2019). Specifications on AMC20N6SC-AS Natural Gas Combined Heating & Power (CHP). Amico Gas Power Co. LTD. Chengdu, China

ANEEL (2006). Resolução Normativa no 235/2006. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2006. Brasília, Brasil.

ANEEL (2012). Resolução Normativa no 482/2012. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012. Brasília, Brasil.

ANEEL (2015). Resolução Normativa no 687/2015. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Brasília, Brasil.

ANEEL (2017). Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Brasil.

ANEEL (2022a). Geração Distribuída – Resumo por tipo de geração. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022. Brasília, Brasil. Disponível em:<

<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacaodeempreendimentos-de-geracao-distribuida> >

ANEEL (2022b). Geração Distribuída – Resumo por classe de consumo. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2022. Brasília, Brasil. Disponível em:

<<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacaodeempreendimentos-de-geracao-distribuida> >

BOYCE, M.P. Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants, 2002. Texas, EUA.

ECOU. Estudo de caso. ECOU Sustentabilidade Urbana, 2019. São Paulo, Brasil.

FBH. Relatório Cenário dos hospitais no Brasil – 2018. Federação Brasileira de Hospitais, 2019. Brasil.

Disponível em:<http://fbh.com.br/wpcontent/uploads/2018/07/Relatorio-FBH-CNS_web.pdf>

FOHB. Hotelaria em Números – Fórum de Operadores Hoteleiros do Brasil. Brasil, 2019. Disponível em:

<<http://fohb.com.br/pesquisas-estudos/>>

GREENER. Estudo Estratégico de Geração Distribuída, Greener, 2022. Brasil. Disponível em:<

<https://www.greener.com.br/sumario-executivo-estudode-geracao-distirbuida-2o-sem-2021>>

SEBRAE. Fitness – Relatório de Inteligência. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2019. Brasil. Disponível em:<<https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/>

RJ/Anexos/Relat%C3%B3rio%20SIS%20Fitness%20-%20Precifica%C3%A7%C3%A3o.pdf

Capítulo 9



10.37423/240308855

AUMENTO NO ÍNDICE OEE EM UMA INDÚSTRIA DE CALÇADOS DE SEGURANÇA COM O MÉTODO PDCA DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

JOEL CORDEIRO JÚNIOR

FACULDADE BIOPARK

MATEUS FELIPE HOLZBACH

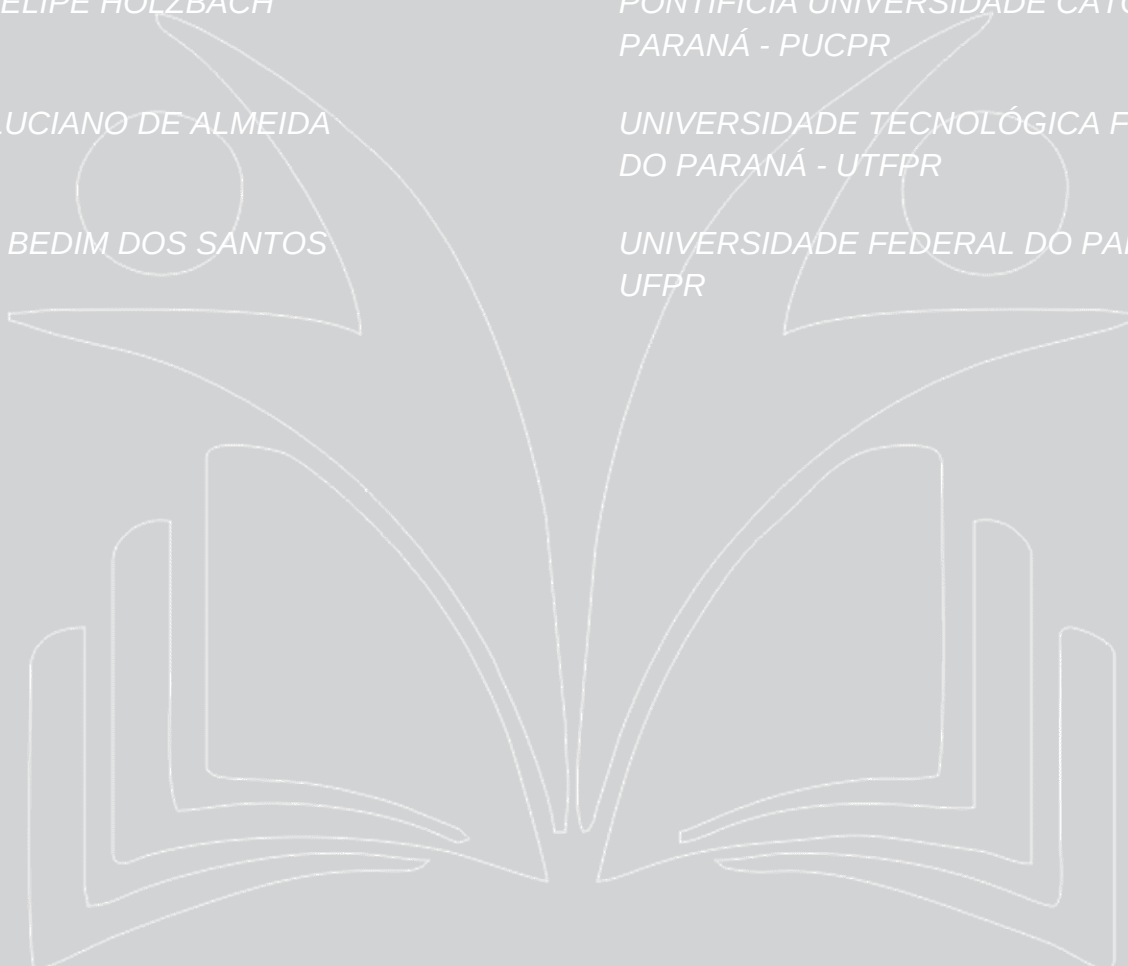
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR

ROBSON LUCIANO DE ALMEIDA

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - UTFPR

MAURÍCIO BEDIM DOS SANTOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR



Resumo: Nos últimos anos, o cenário econômico do Brasil apresentou recessão e por isso as empresas ainda evitam fazer grandes investimentos. Desse modo, buscam aumentar sua competitividade no mercado com reformulações internas como o realinhamento dos processos produtivos. Em uma indústria de calçados de segurança buscou-se alternativas para o aumento de eficiência do setor de injeção de poliuretano, responsável por produzir as solas e entressolas dos calçados. Definiu-se como objetivo do trabalho a maximização do índice oee das injetoras por meio do método pdca e utilização da filosofia lean manufacturing. A metodologia utilizada foi o pdca. Ao final do trabalho alcançou-se resultados satisfatórios. O índice oee foi maximizado para 85,96% e 92,77% nos dois equipamentos abordados. Como proposta de trabalhos futuros sugeriu-se a implantação da filosofia lean na empresa, a extensão do uso do índice oee nos demais equipamentos ou linhas e a definição de responsáveis para o acompanhamento das eficiências e manutenção dos resultados alcançados.

Palavras-chaves: Oee. Lean manufacturing. Pdca.

1. INTRODUÇÃO

No setor calçadista houve queda de 55 mil postos diretos de trabalho entre 2013 e 2018, segundo o Relatório Anual de Atividades 2018 da Associação Brasileira das Indústrias de Calçados – Abicalçados. Nos últimos anos o Brasil tem se consolidado como o quarto maior produtor de calçados no mundo, contando com cerca de 7 mil indústrias do setor, que gerou aproximadamente 280 mil postos diretos de trabalho em 2018. Ainda, conforme a Abicalçados, em 2017, o faturamento foi de mais de R\$ 21 bilhões e em 2018 mais de 110 milhões de pares exportados (Abicalçados, 2018).

Considerando a importância deste setor industrial no cenário econômico, esse trabalho foi realizado em uma indústria de calçados de segurança, localizada no oeste do estado do Paraná e atuando no setor a mais de 40 anos. Atualmente é considerada uma indústria de médio porte, sendo que no ano de 2019 produziu em média 5700 pares de calçados de segurança diariamente, em diversos modelos. Desta produção, em torno de 40% foi destinada à exportação para países vizinhos, como Uruguai, Bolívia e Colômbia.

O trabalho foi realizado com total apoio da alta direção da indústria, que acredita ser imprescindível a melhoria constante do processo de produção e a manutenção de uma alta eficiência de operação para se manter competitiva no mercado, mesmo que para isso seja necessário de tempos em tempos adotar novos métodos e filosofia de trabalho nas linhas de produção.

Com o objetivo de medir adequadamente e acompanhar a eficiência de operação em suas linhas de produção, a partir de 2018 a empresa adotou como método de quantificação de eficiência o índice OEE, sigla do inglês *Overall Equipment Effectiveness*, que é um meio muito adequado de medir a eficácia global de equipamentos ou processos.

O cálculo do índice foi aplicado nas injetoras de poliuretano BI 1 e BI 3, equipamentos principais no processo de produção com a produção das solas e entressolas de calçados, sendo que ao longo de 2018 obteve OEE médios de 69,74% na injetora BI 1 e 82,58% na injetora BI 3. Considerou-se o valor do índice OEE da injetora BI 1 como baixo para esse tipo de equipamento, sendo que o mesmo índice poderia ser aumentado ainda mais para a injetora BI 3, além dos mesmos apresentarem muita variabilidade ao longo do tempo.

A escolha desses equipamentos para o acompanhamento por meio do OEE foi feita após a identificação dos mesmos como gargalos em suas linhas pela área de engenharia da empresa. E, como

gargalos, ações de aumento da eficiência operacional nessas injetoras automaticamente impactam diretamente na produção das linhas.

Para que uma solução fosse conduzida de maneira mais organizada e segura, optou-se em utilizar o método PDCA na investigação das causas dos valores e variações do OEE desses dois equipamentos, assim como na definição das ações mais adequadas para aumento máximo desse índice dentro das condições de operação do processo. Da mesma forma, para melhor orientação na redução de gastos desnecessários envolvidos com a produção, achou-se conveniente utilizar a visão da filosofia *Lean Manufacturing* na identificação de desperdícios no processo durante a solução do problema.

Desta forma, o objetivo geral do trabalho consistiu em maximizar o índice OEE das máquinas injetoras da indústria de calçados de segurança por meio da utilização da filosofia *Lean Manufacturing* e da aplicação do método PDCA.

Para alcançar o objetivo geral definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Aplicar o método PDCA e a filosofia *Lean Manufacturing* para identificação dos problemas no processo produtivo que impactavam diretamente no OEE dos equipamentos.
- b) Executar ações viáveis para resolução dos problemas e melhorias do processo.
- c) Verificar e validar o aumento da eficiência das máquinas injetoras medido por meio do índice OEE.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CALÇADOS DE SEGURANÇA

Os calçados de segurança pertencem aos Equipamentos de Proteção Individual (EPI), e o Ministério do Trabalho e Emprego determina a obrigatoriedade desses equipamentos em certas funções, como trabalho no setor produtivo de indústrias. A NR 6, norma regulamentadora que aborda sobre os EPI's, é a norma de segurança brasileira que estabelece várias obrigações quanto a esses equipamentos – tanto para o empregador quanto para o empregado – com a finalidade de preservar a segurança e o conforto em todos os postos de trabalho (Brasil, 2020).

Segundo Vaccaro (2018), os calçados de segurança podem ser de PVC (para locais úmidos e escorregadios); botinas de segurança com biqueiras de plástico (as mais comuns dentro das empresas, protegem contra torções, quedas de objetos, agentes químicos, infectantes e outros); botinas de segurança com biqueira de aço (mesmo uso da biqueira de plástico porém mais resistente); botinas de segurança com biqueira composite (material muito resistente e para serviços com riscos de

descarga elétrica) e botas térmicas de uso frigorífico. Há ainda a opção de o calçado vir com palmilhas anti-perfurantes.

2.2 LEAN MANUFACTURING

Segundo Dennis (2008), o conceito de *Lean Manufacturing* é produzir mais com menos recursos de tempo, espaço, esforço humano, maquinário e material, lembrando sempre que o foco é atender com qualidade, ou seja, atender às expectativas dos clientes.

Já, Hino (2009), enfatiza que a filosofia central do *Lean* é aumentar a eficácia global de um sistema em vez de buscar aumentos de eficácias parciais. Para isso, a empresa precisa manter um processo interno de melhoria contínua e eliminar totalmente os desperdícios. Hino afirma também que o *Lean Manufacturing* se baseia em dois pilares: *just-in-time* (no tempo certo) e *jidoka* (automação). Já para Koenigsaecker (2015), os dois pilares são o conceito e a prática da melhoria contínua e o poder do respeito pela pessoa. Fato é que todos esses conceitos, pilares ou não, são a essência do *Lean*.

O conceito do *just-in-time* é que a linha de produção seja abastecida com os materiais certos, na quantidade certa e no momento certo, assim eliminando ao máximo estoques intermediários, segundo Ohno (1997).

2.3 OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE)

Segundo Hansen (2006) o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) é um método para se calcular a eficiência completa de um equipamento e se baseia em três métricas: disponibilidade do equipamento (D), sua performance (P) e a qualidade dos produtos (Q). O valor do OEE é calculado como o produto dessas três métricas, conforme a Equação 1.

$$OEE = D \times P \times Q \quad (1)$$

- a. Disponibilidade (D): Primeiramente é estipulado quanto tempo diário a empresa trabalhará durante o dia. Após, a partir do tempo disponível de produção, é calculada a quantidade de paradas não programadas, ou seja, as paradas que não são esperadas durante a jornada, por exemplo, manutenção corretivas;
- b. Performance (P): Com o tempo padrão já cronometrado, é calculada a taxa de uso do equipamento em relação ao tempo disponível. Por exemplo, quantas peças realmente produzidas em um período determinado para se produzir X peças;

- c. Qualidade (Q): Do total de peças produzidas, quantas estão dentro das especificações e prontas para a venda;

Segundo Hansen (2006), a OEE deve ser aplicado nos gargalos ou em qualquer parte bastante dispendiosa da fábrica. Desse modo, é acurada a produção real do setor, gerando informações mais precisas para decisões estratégicas.

A partir do cálculo da OEE, o seu resultado final é comparado com os índices descritos por Hansen (2006) no Quadro 1.

QUADRO 1 - Classificação do índice da OEE de um processo ou equipamento.

OEE	Classificação
$OEE < 65\%$	Inaceitável. Revisão urgente no processo.
$65\% \leq OEE \leq 75\%$	Aceitável somente se as tendências trimestrais estiverem melhorando.
$75\% \leq OEE \leq 85\%$	Muito bom, porém, é possível melhorar para se obter vantagens competitivas.
$OEE \geq 85\%$	Classe mundial para processos em lotes.
$OEE \geq 90\%$	Classe mundial para processos discretos e contínuos.

Fonte: adaptado de Hansen, 2006.

3. METODOLOGIA

Este trabalho é um estudo que pode ser classificado como descritivo e quantitativo quanto à coleta e análise de dados e qualitativo quanto à elaboração de documentos de padronização.

A metodologia empregada foi a do ciclo PDCA, a qual segundo Campos (2004) pode ser dividida em oito etapas: (1) Identificação do problema; (2) Observação; (3) Análise; (4) Plano de ação; (5) Execução; (6) Verificação; (7) Padronização e (8) Conclusão.

Dentro do método PDCA utilizou-se ferramentas da qualidade como *brainstorming*, para prospecção de ideias, Diagrama de Causa e Efeito, conhecido também como e Espinha de Peixe ou Diagrama de Ishikawa, para organização das causas prováveis, teste dos 5 porquês, para determinação das causas fundamentais e, para elaboração de um plano de ação, o 5W1H.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na etapa **Identificação do problema**, para maior entendimento de como o problema ocorria, levantou-se o histórico dos valores médios mensais do índice OEE das máquinas injetoras BI 1 e BI 3 por um período de 1 ano, de jan/18 a jan/2019, os quais são apresentados nos Gráfico 1.

Gráfico 1 – Médias mensais do OEE entre jan/18 a jan/19.



Fonte: Os autores, 2019.

Pelo Gráfico 1 observa-se que em média a injetora BI 3 teve maior eficiência durante o ano, além de apresentar menor variabilidade entre os meses. Apesar dos valores médios de OEE dos dois equipamentos aumentarem ao longo do ano, a injetora BI 1 apresentou uma variação maior dos valores, podendo ser identificado três quedas na eficiência ao longo do ano, ocorridas em fevereiro, maio e setembro.

A comparação dos valores de OEE médio diário dos dois equipamentos, verificou-se que em muitos dias os mesmos foram inferiores a 65%, sobretudo na injetora BI 1. Isto, segundo apresentado no Quadro 1, de Hansen (2006), são resultados inaceitáveis dentro de uma indústria, recomendando-se uma revisão urgente do processo.

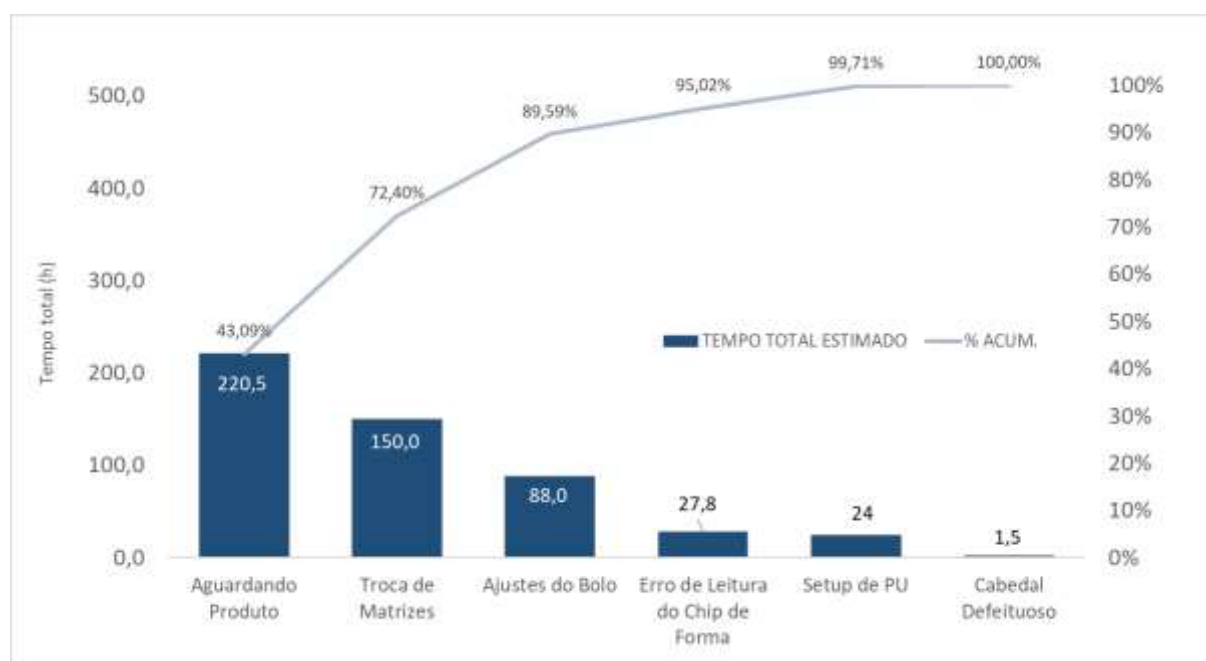
Após essa verificação, cientes da urgência de uma solução, a direção da indústria definiu a equipe que trabalharia no projeto de solução. A equipe foi composta por um gerente de produção, um analista de PCP, um estagiário para auxílio, um cronoanalista, os encarregados dos setores de injeção, palmilhagem e montagem de bico, dois colaboradores do setor de injeção e um colaborador do setor de palmilhagem.

Com o histórico do problema levantado e equipe definida iniciou-se a segunda etapa do PDCA: **Observação do problema.**

Na etapa de observação, seguindo criteriosamente o método proposto em Campos (2004), realizou-se diversas observações *in loco* dos equipamentos e de suas operações. O objetivo das observações foi a coleta de dados, descobrindo as características do problema pela observação do que ocasionava a parada dos equipamentos, queda de desempenho ou mesmo uma produção defeituosa.

Na etapa de **Análise do problema** os dados referentes a paradas dos equipamentos registrados nos últimos 4 meses, de out/18 a jan/19, foram tabulados e representados em um Diagrama de Pareto, mostrado no Gráfico 2. Devido à similaridade, os dados dos dois equipamentos foram agrupados e analisados como um único conjunto de dados.

GRÁFICO 2 - Diagrama de Pareto do tempo total de equipamento parado de out/18 a jan/19.



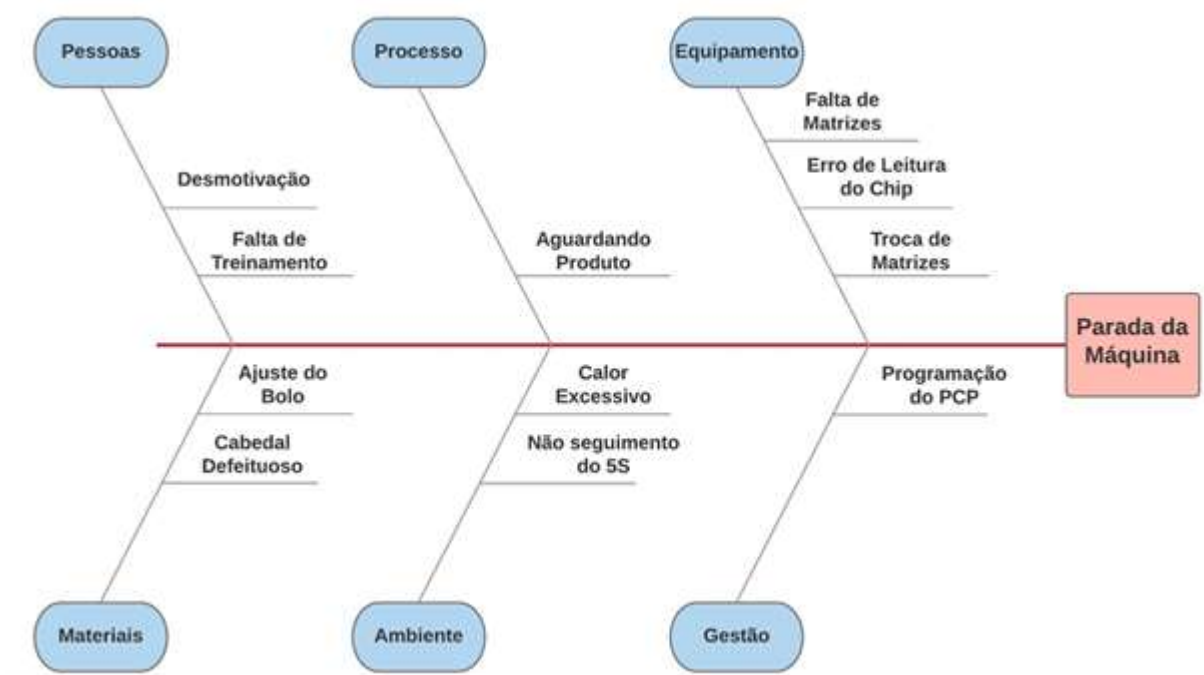
Fonte: Os autores, 2019.

O gráfico de Pareto mostra que 89,59% do tempo de equipamento parado foram devido às causas “aguardando produto”, “troca de matrizes” e “ajuste do bolo”. A equipe definiu que as ações seriam focadas nessas três causas principais, mas que se tivesse alguma ação possível e de baixo custo envolvendo as demais, poderia ser também executada, auxiliando na redução do problema e melhoria do processo.

No processo de análise, por meio de *brainstorming* com a equipe, outras possíveis causas, não registradas devidamente no histórico ou observadas na coleta de dados, como desmotivação, falta de

treinamento ou falhas na programação do PCP, foram levadas em consideração. De forma que o Diagrama de causa e efeito elaborado a partir de todas as causas prováveis ficou mais completo, conforme pode ser observado na Figura 1.

FIGURA 1 - Diagrama de causa e efeito das paradas das injetoras.



Fonte: Os autores, 2019.

As causas levantadas até então, apresentadas no diagrama da Figura 1, eram causas prováveis. Era, então, necessário a determinação das causas fundamentais do problema, também chamadas de *causas raízes*. Para essa determinação uma outra ferramenta foi utilizada, o *método dos 5 porquês*. As principais causas fundamentais identificadas foram falhas na programação de produção, falta de manutenção preventiva no leitor de chips, falta de treinamento das equipes de operação e manutenção, matéria prima fora das especificações de qualidade e desmotivação dos operadores por falta de um plano de carreira melhor definido.

A partir da definição das causas fundamentais iniciou-se a etapa do **Plano de ação** e, em reunião com toda a equipe, elaborou-se um plano de ação 5W1H para abordagem do problema. O plano foi executado na etapa de **Execução**, sendo que ao final desta etapa o mesmo estava preenchido conforme apresentado no Quadro 2.

QUADRO 2 – Plano de ação após a etapa de Execução

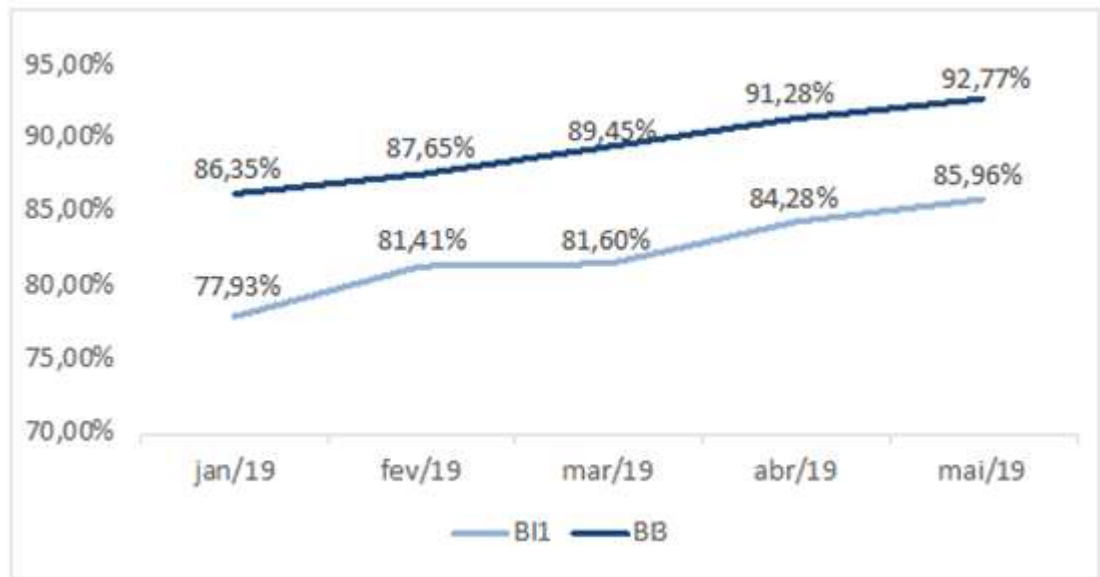
PLANO DE AÇÃO						
Nº	ATIVIDADE O QUE?	RESPONSÁVEL QUEM?	DETALHAMENTO DA ATIVIDADE - COMO?	LOCAL ONDE?	CRONOGRAMA QUANDO?	STATUS
1	MELHORAR PROGRAMAÇÃO DAS CORES E NUMERAÇÕES	SUPERVISOR DE PCP	REFAZER ORDENS DE PRODUÇÃO COM CORES E NUMERAÇÕES PRÉ-DEFINIDAS E ESTABELECEER NOVO PRAZO DE ENTREGA AOS CLIENTES	PCP	06/02/19	FINALIZADO
2	CRIAR PULMÃO DE CABEDAI	ENCARREGADO DA PALMILHAGEM	POR SER UM SETOR PEQUENO, O ENCARREGADO TAMBÉM IRÁ OPERAR MÁQUINAS, HAVENDO ENTÃO, UMA PESSOA A MAIS PARA SUPRIR A DEMANDA	PALMILHAGEM	01/02/19	FINALIZADO
3	AJUSTAR LEITOR DOS CHIPS DE FORMA	ENCARREGADO DE AUTOMAÇÃO	CRIAR MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CALIBRAÇÃO DO LEITOR DE CHIPS	INJEÇÃO/ROBÔ	12/02/19	FINALIZADO
4	TREINAMENTO DA EQUIPE	ENCARREGADOS	CADA ENCARREGADO TREINA OS NOVOS COLABORADORES INDIVIDUALMENTE COM ORIENTAÇÕES ESPECÍFICAS PERTINENTES A CADA FUNÇÃO	TODOS OS SETORES	14/02/19	FINALIZADO
5	AJUSTAR MATERIAL DE PU	ENCARREGADO DE AUTOMAÇÃO	OBTER ESPECIFICAÇÕES PRECISAS E PADRÕES NO LABORATÓRIO DA EMPRESA E GARANTIR O RECEBIMENTO DE MATÉRIA PRIMA DENTRO DESSAS ESPECIFICAÇÕES JUNTO AOS FORNECEDORES	FORNECEDORES	29/03/19	FINALIZADO
6	COMPRAR NOVAS MATRIZES	GERÊNCIA / COMPRAS	FAZER ANÁLISE DAS MATRIZES EXISTENTES E DO TEMPO DE VIDA ÚTIL DAS MESMAS. COMPARAR AS EXISTENTES COM O HISTÓRICO DE VENDAS E FAZER AS DEVIDAS AQUISIÇÕES	GERÊNCIA / COMPRAS	15/04/19	CANCELADO
7	FORMALIZAR PLANO DE CARREIRA	SUPERVISORA DE RH	ELABORAR NOVO PLANO DE CARREIRA A FIM DE GARANTIR OPORTUNIDADES DE CRESCIMENTO PESSOAL E PROFISSIONAL DOS COLABORADORES	RH	02/04/19	ENTREGUE COM ATRASO
8	PADRONIZAR A COR DO COURO	ENCARREGADO DO CORTE	TER UM MODELO DE COR PADRÃO E COMPARAR COM A TONALIDADE DA PEÇA DE COURO PARA O PROCESSO DE CORTE	CURTUME	22/02/19	ENTREGUE COM ATRASO

Fonte: Os autores, 2019.

Conforme pode-se observar pelo Quadro 2, nem todas as ações planejadas puderam ser executadas no prazo estabelecido, sendo que a ação de compra de novas matrizes não foi executada por decisão da direção da empresa. No entanto, até abril/2019 6 das 8 ações já haviam sido executadas, sendo um resultado considerado satisfatório pela equipe que, a partir desse mês já iniciou a etapa de **Verificação** dos resultados.

Para a verificação dos resultados coletou-se novamente os dados de OEE dos equipamentos de fevereiro a maio de 2019, os quais são apresentados no Gráfico 3, juntamente com o valor de jan/2019.

GRÁFICO 3 - Índice OEE das injetoras BI 1 e BI 3 na etapa de verificação.



Fonte: Os autores, 2019.

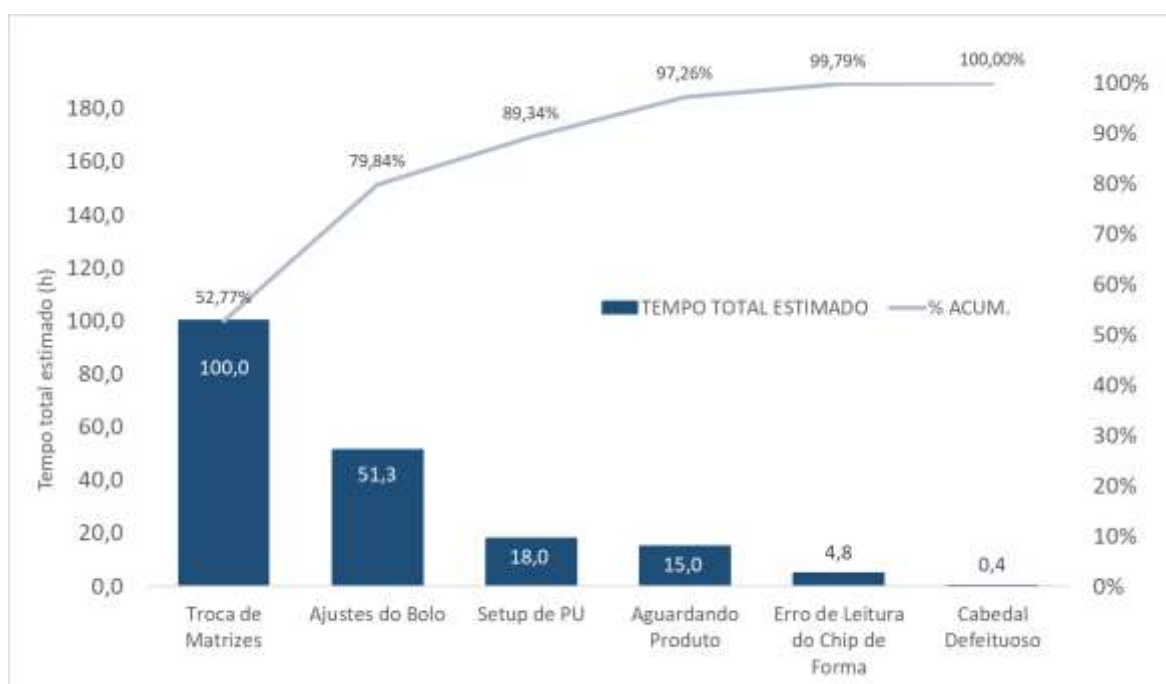
Observa-se pela comparação entre os gráficos 1 e 3 que:

- 1) para a injetora BI 1 o maior valor médio mensal alcançado de jan/18 a jan/19 foi de 77,93%, em jan/2019. Com as ações executadas a eficiência de operação do equipamento continuou aumentando, atingindo o valor de 85,96% em mai/19. Além disso, nota-se que os valores mensais apresentaram menor variação entre os meses. O valor de OEE de 85,96% foi a maior eficiência alcançada desde o início das medições.
- 2) para a injetora BI 3, a qual já tinha alcançado uma eficiência operacional média mensal de 86,35% em jan/19, manteve-se um crescimento do índice OEE nos primeiros meses de 2019, atingindo o valor histórico de 92,77% em mai/19.

Todos esses valores finais de OEE são considerados de excelentes, de classe mundial para processos em lotes, que é o caso da produção de calçados de segurança, segundo a classificação de Hansen (2006), apresentada no Quadro 1. Foi considerado como desafio para a equipe a manutenção dos mesmos para os próximos meses de 2019.

Na etapa de verificação também se repetiu a análise das causas das paradas de produção das injetoras por 4 meses, realizada na etapa de observação, a fim de comparação. Esses resultados são apresentados no Gráfico 4, diagrama de Pareto das causas de parada de fevereiro a maio de 2019.

GRÁFICO 4 - Diagrama de Pareto do tempo total de equipamento parado de fev/19 a abr/19.



Fonte: Os autores, 2019.

Comparando-se os gráficos 2 e 4 observa-se que as três principais causas de paradas passaram a ser por “troca de matrizes”, “ajuste do bolo” e “setup de PU”. A causa “aguardando produto”, que era a causa que impactava em 43,09% do tempo de parada passou a ser a quarta causa de parada, passando a impactar em apenas 7,92% (97,26% – 89,34%) do tempo de parada. Na verdade, todas as causas passaram a impactar menos em termos de paradas dos equipamentos. Esse é um resultado direto da eficiência das ações de correção realizadas.

Assim sendo, foi feita uma análise comparativa da relação do aumento de eficiência do setor de injeção com a quantidade de pares produzidos no mesmo período conforme o Gráfico 6. Um levantamento realizado pela equipe do trabalho constatou que o aumento de produção diário das linhas passou de 5.666 pares de calçados em jan/19 para 6.164 em mai/19, em média, correspondente a +8,8% na capacidade de produção.

Após as verificações de ótimos resultados, a equipe iniciou a etapa de **Padronização**, a fim de que os resultados possam ser mantidos ao longo dos próximos meses de produção. Para a padronização fez-

se atualização dos Procedimentos Operacionais Padrões (POP) relacionados ao problema. Entre as novas ações elencadas nos novos POPs estão:

1. Programação das Ordens de Produção voltadas à otimização dos processos.
2. Sempre haver um pulmão de cabedais para injeção, evitando pausas por espera de material.
3. Novo cronograma de manutenção preventiva do leitor dos chips de forma.
4. Treinamento prévio completo do novo colaborador de todos os setores.
5. Análise no laboratório de todas as matérias primas que compõem o poliuretano e certificar que elas estão dentro das especificações da empresa.
6. Padronização das cores do couro no setor de corte.

Finalizada a padronização, a equipe iniciou a etapa de **Conclusão** do trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após quatro meses de aplicação das ações, observou-se 85,96% no índice OEE na injetora BI 1 e 92,77% na injetora BI 3, o que correspondeu ao final do período um aumento significativo da eficiência operacional e um ganho satisfatório em produção nas linhas. Esse aumento de eficiência nas injetoras refletiu em +8,18% da capacidade de produção de calçados de segurança na empresa.

Desta forma, constatou-se que o objetivo geral do trabalho foi alcançado, que era a maximização do índice OEE nas máquinas injetoras. Considerou-se que o desafio a partir da finalização do trabalho seria a manutenção dos resultados, visto que valores de OEE acima de 85% são considerados de “classe mundial” para processos em lotes, isto é, provavelmente exigindo atenção constante ao processo para serem mantidos.

A utilização do método PDCA para a solução do problema apresentou diversas vantagens, segundo a percepção geral da equipe, pois permitiu um desenvolvimento sequencial e organizado do trabalho, além de prover mais cientificidade em cada abordagem realizada.

A utilização da filosofia *Lean Manufacturing* durante a solução, apesar de não estar implantada na empresa, proveu a equipe dos conceitos e cuidados necessários para uma correta avaliação das perdas e desperdícios existentes no processo. Com base nesta experiência a equipe sugeriu como trabalhos futuros a implantação da filosofia *Lean* na empresa, a extensão do uso do índice OEE nos demais equipamentos ou linhas e a definição de responsáveis para o acompanhamento das eficiências e manutenção dos resultados alcançados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS (ABICALÇADOS). Relatório anual de atividades 2018. Novo Hamburgo, 2018. Disponível em: <http://www.abicalcados.com.br/midia/relatorios/relatorio-anual-2018.pdf>. Acesso em: 10 mai 2020.

BRASIL. NR 6 – Equipamento de Proteção Individual – EPI. disponível em: https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-06.pdf. Acesso em: 10 mai 2020.

CAMPOS, V. F. Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2004.

DENNIS, Pascal. Produção Lean Simplificada: Um guia para entender o sistema de produção mais poderoso do mundo. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

HANSEN, R. C. Eficiência Global dos Equipamentos: Uma Poderosa Ferramenta de Produção/Manutenção para o Aumento de Lucros. Porto Alegre. Bookman, 2006.

HINO, Satoshi. O Pensamento Toyota: Princípios de Gestão para um Crescimento Duradouro. Porto Alegre: Bookman, 2009.

KOENIGSAECKER, George. Liderando a transformação Lean nas empresas. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OHNO, Taiichi. O Sistema Toyota de Produção: Além da produção em larga escala. Porto Alegre: Bookman, 1997.

VACCARO, Flávia. Entenda sobre a importância dos calçados de segurança. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://blog.gaveteiro.com.br/2018/12/28/entenda-sobre-importancia-dos-calcados-de-seguranca/>. Acesso em: 20 out. 2019.

Capítulo 10



10.37423/240308856

APLICAÇÃO DA FILOSOFIA DO LEAN MANUFACTURING EM EMPRESAS DE ALTO RENDIMENTO COM A FERRAMENTA KAIZEN

JOEL CORDEIRO JÚNIOR

FACULDADE BIOPARK

AMANDA DE FREITAS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO
PARANÁ - PUCPR

ROBSON LUCIANO DE ALMEIDA

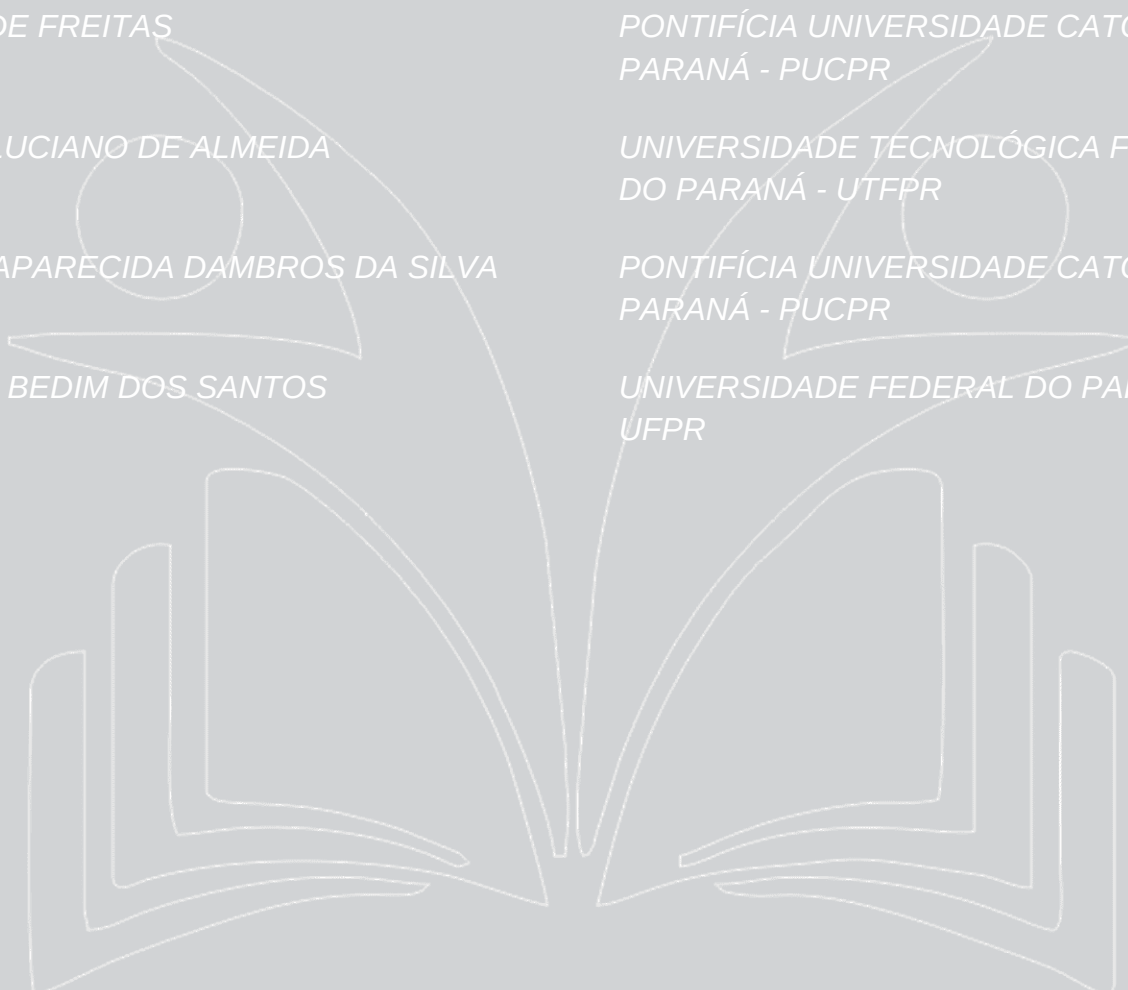
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL
DO PARANÁ - UTFPR

ADRIANA APARECIDA DAMBROS DA SILVA

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO
PARANÁ - PUCPR

MAURÍCIO BEDIM DOS SANTOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ –
UFPR



Resumo: Este artigo tem por objetivo expor os principais conceitos referentes ao lean manufacturing e a ferramenta kaizen, quanto a sua importância e aplicação em empresas de alto rendimento. O estudo é baseado na literatura, artigos e dissertações que abordam ambos os conceitos. A metodologia definida é de técnica quantitativa na qual esta quantifica as condições e benefícios da utilização da ferramenta kaizen nos processos das organizações. Uma ótima estratégia empresarial é o que contribui para que essa ferramenta se torne tão notória. Ao final da pesquisa, com base nos diversos estudos de casos avaliados, verificou-se que para que se obtenha resultados e benefícios mais consistentes com o kaizen, a ferramenta deve ser utilizada por médio ou longo prazo, com tempo suficiente para que os colaboradores compreendam a importância da ferramenta na transformação do ambiente de trabalho.

Palavras-chaves: Lean manufacturing, kaizen, melhoria contínua, controle de qualidade, produção enxuta.

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da primeira revolução industrial, um conjunto de mudanças no cenário produtor europeu, a substituição do trabalho artesanal pelo assalariado e o uso de máquinas, passa a contribuir com uma produção em alta escala e o aumento nos lucros. Com isso a busca de mudanças culturais para a melhoria nos processos vem sendo estudada cada vez mais devido ao cenário competitivo, baixando os custos e melhorando a produtividade como um todo (SANTOS, 2016).

A ferramenta *Kaizen* surgiu com uma necessidade de organização e disciplina japonesa após a devastação de recursos gerada através da segunda guerra, assim competir no mercado automobilístico de modo semelhante ao processo do fordismo. *Kaizen* é uma palavra de origem japonesa com o significado de “mudança para melhor”, sendo usada não somente para a vida pessoal, mas também empresarial (DINIS, 2016).

Neste cenário pela busca da produção enxuta, a cultura *Kaizen* possui grande importância, onde o aprimoramento do pensamento de melhoria contínua deve estar habituado e inserido de forma eficiente nas empresas.

Assim, o trabalho tem como objetivo apresentar os resultados das aplicações sobre o método *Kaizen*, reforçando sua importância dentro das organizações que buscam se manter competitivas no mercado através dos vários benefícios proporcionados pela mesma.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.2 LEAN MANUFACTURING

De acordo com Werkema (2012) o *Lean Manufacturing* é baseado na iniciativa de eliminar os desperdícios, ou seja, aquilo que não tiver valor para o cliente deve ser excluído. Sua origem se deu ao Sistema Toyota de Produção, também conhecido como Produção *Just-in Time*. Com o objetivo de reduzir os custos e aumentar a qualidade e velocidade na entrega dos produtos para os clientes, em 1950, o executivo da Toyota Taiichi Ohno iniciou a implantação de um sistema de produção que tinha como foco a identificação e eliminação de desperdícios.

Werkema (2012) destaca ainda a integração entre o *Lean Manufacturing* e o Seis Sigma, e a importância de a empresa usufruir dos pontos fortes de ambas. O *Lean Manufacturing*, por exemplo, não possui um método estruturado para solucionar os problemas, e não conta com ferramentas estatísticas para lidar com a variabilidade, aspecto que pode ser complementado pelo Seis Sigma. Já o

Seis Sigma não foca na melhoria da velocidade dos processos e na redução do *lead time*, aspectos esses que compõem o *Lean Manufacturing*.

Segundo Werkema (2012) as organizações conseguem, através do *Lean* e Six Sigma, resultados em custos, qualidade e tempo, com foco no desempenho do processo produtivo. São, portanto, ferramentas estratégicas com as quais a chance de sobrevivência no mercado é ampliada. Assim, conforme Briaes e Ferraz (2006), para ser estrategista no mercado atual é imprescindível a utilização de ferramentas de gestão, que possibilitam, além de um maior entendimento do processo produtivo, do aprimoramento gradual de qualquer serviço ou produto.

2.3 KAIZEN

Os conceitos de *Kaizen* e produção enxuta devem ser incorporados nas empresas de uma maneira que seja a mais adequada para a realidade destas. *Kaizen* é uma palavra de origem japonesa, que significa basicamente “melhoria contínua com mudança incremental”. Esta filosofia busca envolver todas as pessoas da organização com o objetivo de promover as melhorias da empresa. A produção enxuta tem como base a eliminação dos desperdícios visando atender as necessidades dos clientes no quesito tempo de entrega, com um custo competitivo mantendo a qualidade elevada. Ressalta-se ainda o mais importante foca no desenvolvimento de uma cultura voltada para o processo produtivo com direção ao aprimoramento da forma com que a empresa trabalha (ORTIZ, 2010).

Por outro lado, o *Kaizen* é vital para o controle da qualidade e traz consigo um histórico respeitável para organizações que, quando aplicam a metodologia eficientemente, o resultado é alcançado. Com a incessante busca pela melhoria contínua, as aplicações, englobam o Controle de Qualidade Total (TQC), seguindo os padrões da indústria japonesa. Sendo irrepudiável uma não cooperação entre todos na organização. Um processo de sincronia deve ser adotado desde gerentes à todos os trabalhadores incorporados no processo, para sistematizar e integrar a melhoria em todos os níveis organizacionais.

Seguindo essa linha de raciocínio Alvares et al. (2017) defende que o esforço coletivo prevalece sobre desejos individuais, tomando como bem mais valioso da organização, seus colaboradores. O sistema *Kaizen* também apresenta como valores coletivos, a responsabilidade e satisfação, consequentemente, respeitando as necessidades individuais dos colaboradores a equipe de gestão direciona-os para alcançarem as metas da empresa.

O *Kaizen* engloba diversas áreas da organização, porém, sua aplicação é mais notável no processo produtivo, atendendo as metas e objetivos da organização, e ao mesmo tempo, valorizando colaboradores de todos os níveis. Como um dos objetivos de desempenho se dão pelo custo, o *Kaizen* usa da qualidade, velocidade, flexibilidade e confiabilidade para tal objetivo para o crescimento da organização (ALVARES et al., 2017).

3. METODOLOGIA

O estudo foi realizado por meio das pesquisa e revisão bibliográfica durante o mês de Setembro de 2019 e Abril de 2020, no qual estas foram utilizadas como base para maior conhecimento sobre o assunto abordado. A pesquisa se fez em artigos publicados em congressos, dissertações e em livros de referência. Após realizadas, foram selecionadas as que abordavam de forma explicativa o assunto apresentado neste trabalho. Destaca-se ainda que a metodologia é de técnica quantitativa, em que esta quantifica as condições, benefícios e utilização da filosofia *Lean* com a aplicação da ferramenta *Kaizen* nos processos dentro das empresas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base no que foi pesquisado e levantado, os resultados encontrados se baseiam nas aplicações da ferramenta *Kaizen*, suas vantagens e desvantagens em processos produtivos.

É indispensável a aplicação de uma boa estratégia empresarial com base no cenário atual, e é o que torna esta ferramenta tão notória. No Brasil e em outros países, o processo de melhoria contínua é ligado ao fator cultural e também ao total comprometimento da alta gestão. Este último, mesmo muitas vezes não possuindo um total conhecimento da ferramenta, deve sempre incentivar a disciplina, a criação de regras e o cumprimento das mesmas para um melhor desempenho das áreas onde é aplicada (ALVARES et al., 2017).

A prática do *Kaizen* visa o bem não apenas da empresa mas do homem que nela trabalha. Parte do princípio que o tempo é o melhor indicador de competitividade, além de atuar, de reconhecer e de eliminar os desperdícios existentes na empresa, quer em processos produtivos, quer na manutenção de máquinas ou mesmo em processos administrativos (IMAI, 1986).

Um exemplo disso foi visto através do *Kaizen Institute* (1985-2020), líder global em implementação KAIZEN™, presente em mais de 30 países nos cinco continentes do mundo, que visa reconhecer anualmente as organizações líderes na implementação dos esforços de Melhoria Contínua e inspirar

a comunidade KAIZEN™, em todos os campos e setores. Em 2019, uma empresa brasileira atuante no fornecimento de peças automotivas estava entre as indicadas, concorrendo diretamente com empresas alemãs, espanholas, italianas, polonesas, entre outras (INSTITUTO KAIZEN, 2019).

Em contrapartida, as dificuldades encontradas podem ser relacionadas a quebra de paradigmas existentes e a resistência para a execução das melhorias propostas por parte de quem irá executá-las. Sendo assim fundamental a superação dos mesmos e o apoio da gestão onde se faça necessário.

Por último, é interessante observar que quanto mais os colaboradores consideram conhecer a ferramenta *Kaizen*, mais ela é considerada fundamental dentro do processo de melhoria contínua, o que ajuda a promover um crescimento quanto ao conhecimento da mesma e na organização em que está inserida (ALVARES *et al.*, 2017).

Segundo Briaes (2006), o estudo de caso aplicado em uma indústria automobilística com mais de 380.000 funcionários apontou pontos positivos na aplicação das ferramentas do *Kaizen*. Elencada como uma das maiores e mais modernas instalações da América Latina, a indústria começou a implantação do pensamento *Lean* no início dos anos 2000 em seu setor de projetos estratégicos da produção, perante à globalização e competitividade da fatia do mercado que ela pertencia, os resultados foram benéficos após a consultoria especializada no ferramental *Kaizen*, e na filosofia do *Lean Manufacturing*. As etapas da metodologia ferramental começaram com a conscientização dos gestores de planejamento estratégico, objetivando as prioridades na melhoria dos processos, nivelando a produção e controlando os indicadores de produção, com padronização do fluxo produtivo e oferecendo melhoria ergonômica aos colaboradores e ajustando o meio ambiente de trabalho “*Gemba*” para alcançar os melhores resultados possíveis. O *Kaizen* contribuiu para a organização de diferentes formas, com o aumento de produtividade, a redução de *lead-time*, redução do estoque em processo, criação de um fluxo uniforme de produção, redução do tempo de *setup*, melhorias ergonômicas e segurança, melhoria da qualidade, padronização de operações, dentre outros. Briaes (2006) ressalta que para que essas melhorias fossem alcançadas na empresa, foi estabelecida uma agenda *Kaizen* semanal com uma equipe multifuncional, que discutia e estudava o andamento do processo produtivo e, a partir dessa visualização sistêmica, propunha soluções de melhorias contínuas com metas e análise gráfica dos resultados, para melhor visualização da equipe e dos colaboradores da indústria.

Segundo Olliane *et al.* (2016), a aplicação do *Kaizen* nas empresas pode ser apoiada nas diversas ferramentas de melhoria contínua existentes, vários estudos de caso demonstram a aplicação dessa

ferramentas, bem como os benefícios e resultados alcançados. Nesse sentido faz necessário o entendimento das etapas dos passos a serem seguidos da ferramenta e que sejam adequados às necessidades das organizações, bem como o estudo e análise de viabilidade e aplicabilidade, de acordo com as necessidades e características que a empresa possui.

Um outro exemplo é dado em Fonseca (2018), o qual relata um estudo de caso realizado em uma empresa multinacional americana localizada na cidade de Petrópolis no estado do Rio de Janeiro, com a temática do *Kaizen*. A empresa trabalhava inicialmente nos anos de 1957 com a fabricação de eletrodomésticos, em específico ventiladores de uso doméstico, e após a sua venda para a Panair do Brasil foi transformada em oficina de revisão de motores aeronáuticos. Em 1965 uma crise interna levou a empresa à falência, porém os colaboradores, utilizando as ferramentas *Kaizen* a reergueram pouco a pouco, e a colocaram novamente no mercado de manutenção de motores. A partir daí, a empresa adotou o número de Kaizens anuais executado por cada funcionário como métrica adicional de remuneração os funcionários. Essa política da empresa fez com que os funcionários contribuíssem de maneira mais regular com suas ideias e inovações ao longo do tempo. A ascensão da empresa foi muito devido aos resultados obtidos por meio da ferramenta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi proposto no presente trabalho, justificou-se a importância do assunto abordado sobre a aplicação da ferramenta *Kaizen*, no qual foram demonstrados resultados satisfatórios em aplicações em processos produtivos de diferentes áreas. Vale ressaltar que a ferramenta *Kaizen*, deve ser tratada como um comportamento diário de melhoria contínua, em todos os setores, envolvendo o máximo de colaboradores possíveis, não se restringindo à cargos ou funções. Nesse contexto, é de suma importância que o conhecimento de gestores e consultores esteja diretamente ligado à valorização do *Kaizen*, uma vez que, por meio deles os colaboradores da empresa irão compreender a importância da ferramenta na transformação do ambiente de trabalho.

Ao longo da explanação, foi possível perceber o quanto se faz importante a utilização da ferramenta *Kaizen*, e que esta deve ser utilizada a médio ou longo prazo quando se tem como objetivo, manter a melhoria contínua dos processos da empresa, de forma a evitar os desperdícios e promovendo consequentemente a produção enxuta.

Importante ressaltar que devido às necessidades atuais de se manter no mercado, a melhoria contínua se coloca como indispensável quando se busca caminhos curtos com custos minimizados, maximizando por exemplo a sustentabilidade econômica da empresa.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, Felipe Toguchi; TAMBORELLI, Héctor Wesley Vieira; LIMA, Jéssica S.; MAIA, Murilo Pereira; SANTOS, Piter Cavalcante; RODRIGUES, Samantha Jacinto; CARVALHO, Heber de Godoi. Kaizen: O Sucesso na estratégia de produção. 2017.
- BRIALES, Julio Aragon; FERRAZ, Fernando Toledo. Melhoria contínua através do Kaizen. Revista eletrônica de economia, n. 7, 2006.
- DINIS, Cláudia. A Metodologia 5S e Kaizen Diário. 2016. Relatório de estágio profissionalizante (Mestrado em Engenharia Alimentar) - Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária.
- FONSECA, Luciana et al. A FERRAMENTA KAIZEN NAS ORGANIZAÇÕES. 2018.
- IMAI, Masaaki. Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. McGraw-Hill/Irwin, 1986.
- INSTITUTO KAIZEN. Global KAIZEN™ Award, 2018. Bologna, Italy, 2019.
- OLIANI, Luiz Henrique; PASCHOALINO, Wlamir José; DE OLIVEIRA, Wdson. FERRAMENTA DE MELHORIA CONTÍNUA KAIZEN. Revista Científica UNAR, v. 12, n. 1, p. 58, 2016.
- ORTIZ, Chris. Kaizen e implementação de eventos Kaizen. 1 ed. São Paulo: Bookman, 2010.
- SANTOS, Virgilio F.M. Como evoluímos da revolução industrial?. 2016. Disponível em: <<https://www.fm2s.com.br/revolucao-industrial/>> Acesso em: 2 set. 2019.
- WERKEMA, Cristina. Criando a Cultura Lean Seis Sigma. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. p. 22-25.

Capítulo 11



10.37423/240408861

TRANSIÇÃO DE UM ATELIER SOB MEDIDA PARA LOJA EM UM MARKETPLACE: UM PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO SEGUINDO OS CONCEITOS DA CAUDA LONGA

ANGELE MAINE RHODEN

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

FERNANDA HÄNSCH BEUREN

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

SILENE SEIBEL

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

ICLEIA SILVEIRA

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA



Resumo: O presente artigo tem como objetivo apresentar um planejamento estratégico em forma de modelo sumarizado para a transição de um atelier de vestimentas litúrgicas sob medida para o modelo de loja *online* em um *marketplace* pronta entrega utilizando-se dos conceitos de Cauda Longa, pois, ao analisar o caso da marca La Dama Atelier, constatou-se que os referidos conceitos podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias para o alcance de objetivos financeiros e de marketing. Para este fim, foi realizado um estudo de caso sobre o atelier, incluindo um planejamento de mix de varejo bem como uma revisão bibliográfica acerca da obra A Cauda Longa, de Anderson (2006). A partir do observado, infere-se que: os direcionamentos presentes na teoria de Cauda Longa se fazem amplamente relevantes aplicados ao caso do atelier em questão, reforçam sua potencialidade enquanto nicho e prospectam um aumento no rendimento financeiro.

Palavras-chave: planejamento estratégico, cauda longa, nicho, *marketplace*.

1 INTRODUÇÃO

Descrito como uma mudança dos mercados de massa para os mercados de nicho, o termo *cauda longa* ganhou notoriedade a partir do livro homônimo de Anderson (2006) no qual explica-se a estratégia de direcionar as ações de vários produtos com demanda menor, ao invés de poucos produtos com demanda maior. Tal mudança de cenário alinha-se ao advento da venda pela internet. O mercado de moda, que, por sua vez, prontamente absorveu suas ações estratégicas, comercializa itens de desejo e pôs-se a trabalhar com os nichos. Paralelamente ao avanço do consumo, produtos de moda altamente nichados e anteriormente encontrados apenas em locais físicos específicos, como no caso do vestuário litúrgico afro-brasileiro, demonstram demanda por clientes já fidelizados pelo consumo *online*. Estes consumidores viram na oferta deste tipo de item através da internet, uma oportunidade de adquirir peças com maior variedade de modelos e valores, que, anteriormente talvez não encontrassem em suas cidades.

A pandemia ocasionada pelo vírus Covid-19 no ano de 2020, trouxe alta letalidade e colocou o mundo em um isolamento social. O fechamento de comércios como medida sanitária para conter o vírus acelerou o comércio virtual, fenômeno já há alguns anos em curso. Como parte das medidas de contenção do vírus, pontos de venda físicos precisaram fechar as portas e pausar suas atividades presenciais por tempo indeterminado, algumas destas empresas, que ainda não possuíam atividade de venda pela internet depararam-se com a necessidade de incluir a modalidade em suas atribuições para minimizar os prejuízos do *lockdown*. Assim como empresas tiveram de fechar suas portas, muitos dos templos de religiões de matriz africana (terreiros) também o fizeram, tal fato, a priori, contribuiu para uma desaceleração do consumo destes itens de vestuário, porém, ao passo que a pandemia foi controlada, as atividades religiosas retornaram e junto delas, as festividades.

A concorrência no ambiente virtual demonstrou nítido aumento e as empresas focam suas atenções em estratégias de diferenciação para se manterem no mercado, neste cenário, o segmento do vestuário litúrgico já desponta com vantagem por poder ser considerado por natureza um negócio de nicho. Segundo o recenseamento de 2000, apenas 0,3% da população brasileira adulta declaram-se pertencentes a uma das religiões afro-brasileiras, o que corresponde a pouco mais de 470 mil seguidores, embora pesquisas feitas com metodologia mais precisa indicam valores maiores, da ordem de pelo menos o dobro das cifras encontradas pelo censo (Pierucci e Prandi, 1996). Já no último censo realizado pelo IBGE em 2010, este número de autodeclarados praticantes subiu para 588.797 mil. Dado o espaço de tempo entre a última aferição do censo e a constatação de que quando se trata das

religiões afro-brasileiras, as estatísticas sobre os seguidores costumam oferecer números subestimados, por conta das circunstâncias históricas nas quais essas religiões surgiram no século XIX, este número tende a ser consideravelmente maior no ano de 2021.

Campos (2015), discorre em seu artigo “Axós em evidência: uma análise da indumentária litúrgica afro-brasileira no Recife” sobre o estabelecimento graduado das religiões afro-brasileiras no contexto urbano a partir do século XX, tal fato permitiu a elas maior visibilidade social e um número cada vez mais crescente de adeptos, que já não possuem limitações de raça, etnia, grau de instrução ou classe social. Ainda segundo Campos (2015), esta conquista pode ser creditada ao espetáculo estético das cerimônias públicas, demonstradas nas roupas e adereços litúrgicos dos fiéis.

Primordialmente, a maioria destas vestes era confeccionada em materiais rústicos e simples como o algodão cru, chita e juta; com o passar do tempo, no cenário de urbanização e expansão de praticantes, a produção destas vestimentas cresceu e viu-se diante de um processo de industrialização das indumentárias litúrgicas afro-brasileiras. Diante do exposto, Campos (2015) infere que algumas mudanças na concepção de tais peças ocorreram e ligam-se, entre outros fatores, à inserção da cultura urbana nos terreiros e consequentemente ao consumo dos tecidos industrializados. Essa transformação e as oportunidades oferecidas pelo cenário urbano permitiram que as religiões de matriz africana se inserissem no mercado para atender às demandas de consumo dos fiéis.

As lojas, portanto, se especializaram em oferecer diversas possibilidades de ornamentação pessoal para os religiosos, e a busca por novas peças, tecidos e estampas é uma constante. Hoje em dia, tem sido cada vez mais comum o uso de roupas rituais compradas prontas, e a aceitação desse novo método de produção alcançou uma grande parcela de adeptos nos terreiros, visto que, um *axó*¹ sob medida pode chegar a custar entre R\$ 350 até R\$ 3.500, em ateliês do RS e SC, enquanto as mesmas peças, porém, vendidas separadamente ou não, em escala de produção variam de preços entre R\$ 50 a R\$ 650 em lojas especializadas nestes mesmos estados.

Nos estados do Rio grande do Sul e Santa Catarina, foram identificadas apenas 7 marcas (3 em SC e 4 no RS) do segmento de vestimenta litúrgica afro religiosa com presença e certa relevância no comércio *online*, sendo que destas 7, apenas 1 é totalmente dedicada a produção em larga escala e não opera com sistema de encomendas personalizadas. Dada a informalidade da maioria dos ateliês de vestuário litúrgico bem como a escassez de material instrucional e acadêmico para auxiliar estes produtores a escalar sua venda de nicho na modalidade *online*, faz-se pertinente a elaboração de um material

teórico de conteúdo direto e acessível, capaz de delimitar tópicos norteadores para esta transição do modelo de negócio ateliê sob medida para o modelo de loja *online*.

Este artigo tem como objetivo principal aplicar os conceitos de Cauda Longa, suas regras e forças, ao planejamento estratégico em forma de modelo sumarizado para a transição de um ateliê de vestuário litúrgico sob medida para o modelo de loja *online* em um *marketplace*, utilizando como estudo de caso o La Dama Atelier, empresa criada em 2018, que vende peças de indumentária litúrgica afro-brasileira sob encomenda.

Para a pesquisa aplicou-se o método indutivo, de finalidade aplicada, com análise de dados qualitativos do ponto de vista descritivo. A elaboração da pesquisa bibliográfica deu-se a partir de uma revisão narrativa assistemática além da realização de uma pesquisa de campo.

Assim, em primeiro lugar a pesquisa apresenta o mercado de vestuário litúrgico afro-brasileiro, a empresa onde será implementada a proposta de transição, posteriormente o conceito de Cauda Longa, suas regras e forças, para que então se faça a aplicação das referidas premissas e regras em um modelo sumarizado para a marca a fim de compreender a contribuição dessa estratégia de negócios para o nicho de vestimentas ritualísticas.

2 O VESTUÁRIO LITÚRGICO AFRO BRASILEIRO

As religiões de matriz africana, como a Umbanda, estão entre as três maiores tradições religiosas presentes na formação da religiosidade brasileira que, segundo Cláudio Ribeiro (2013), apresenta como principal característica a fusão dos elementos mágicos e místicos a partir da simbiose das religiões indígenas, africanas e do catolicismo ibérico bem como o kardecismo. Segundo Prandi (2004, p. 223), tais cultos formaram uma espécie de instituição de resistência sociocultural em que,

Até meados do século XX, uma espécie de instituição de resistência cultural, primeiramente dos africanos, e depois dos afro-descendentes, resistência à escravidão e aos mecanismos de denominação da sociedade branca e cristã que marginalizou os negros e os mestiços mesmo após a abolição da escravatura.

Teixeira (2005), versa em sua obra que a identificação e a participação ativa num grupo social sempre envolve o corpo humano, seus adornos e roupas. A vestimenta comunica uma determinada linguagem, identifica e possibilita o reconhecimento dentre os demais. Souza (2007), corrobora a fala anterior ao dizer que “o traje também cria e fortalece os laços do grupo social”, ao estabelecer uma relação do indivíduo com o meio em que se encontra inserido e em um contexto ritualístico, “a vestimenta é uma linguagem simbólica importante para todo o grupo religioso”. Nesse sentido,

mesmo que um traje especial para os membros não seja exigência para que os mesmos participem dos ritos, há sempre um cuidado com o vestir.

Nas religiões afro-brasileiras, os axós proporcionam a leitura e reconhecimento de um determinado imaginário, proveniente do sagrado. Nesse sentido, as religiões de matriz africana, de uma maneira geral, atribuem um imenso valor às roupas, que, combinados a rituais específicos, cores, paramentos e demais acessórios representam um universo representativo cujas influências vêm dos mais variados entornos. De uma forma geral, tais cultos reservam aos seus iniciados roupas e adereços ritualísticos que cumprem diversas funções: comunicar autoridade, representar poder ou sabedoria, enunciar um dado caráter mágico, revelar níveis sacramentais, entre outros.

De acordo com Teixeira (2005), a indumentária ritualística nas religiões afro-brasileiras, representa uma grande variedade de paramentos e acessórios, compostos dos mais diferentes tipos de tecidos e materiais. Composta de um vasto número de adereços vai desde túnicas até capacetes, passando por turbantes, batas, saias, corpetes, capas e cocares. Esta gama de elementos apresenta uma importância e um significado específico, sendo que cada peça do vestuário comunica algo, e por isso só deve ser utilizada em momentos e situações especiais. Datas festivas, por exemplo, são distintas por acessórios e vestuário diferenciado, seguindo o calendário litúrgico anual.

Teixeira (2005) ainda ressalta que, em relação às peças do vestuário, as variedades regionais permitem incluir roupas típicas, tais como o formato tradicional das bombachas da vestimenta do gaúcho, muito utilizadas no Batuque², embora numa versão muito mais larga do que a bombacha tradicional. O vestuário adotado pelos praticantes da Umbanda³ e Quimbanda⁸, assim como os orixás do Batuque, remete a um imaginário associado individualmente a cada uma das entidades, através da atribuição de um passado mítico. No entanto, as características gerais do vestuário permitem o imediato reconhecimento entre os praticantes.

No âmbito das tradições de matriz africana, a recém observada disponibilidade e variedade dos *axós* no comércio revela como estes passam a sofrer as influências do mercado da moda, tornando-se cada vez mais luxuosos e caros, substituindo os antigos trajes utilizados em festividades e solenidades. Campos (2015), explana que existe toda uma rede de relações econômicas formais e informais, que ajudam a difundir a religião e inseri-la na esfera pública cada vez mais, sendo a moda um fator determinante, conforme observado sobre o fim das chamadas “obrigações” de um iniciado nos ritos como os do Batuque:

Quando sua obrigação se concretizar e o fruto de sua dedicação, pelo menos na etapa final que quebra o sigilo iniciático, for exposto ao público na festa do terreiro, todos os olhos estarão voltados para o apuro estético e o fausto da apresentação. Ninguém estará preocupado com virtudes e sentimentos religiosos, pois a religiosidade aqui se expressa pela sua exterioridade, a forma embotando o conteúdo, (PRANDI, 2000).

Segundo o autor, a moda nos terreiros, movimenta um grande mercado de artefatos religiosos que são determinados pela moda da época: “Esse mercado de artigos religiosos põe à disposição do seguidor do candomblé uma oferta que se renova a cada onda da moda e faz dele um consumidor contumaz” (PRANDI, 2000). Assim sendo, uma breve contextualização do mercado de vestuário litúrgico afro brasileiro no país e especialmente na região sul, local onde a marca La Dama está sediada, torna-se oportuna.

2.1 MERCADO DE VESTUÁRIO LITÚRGICO NO BRASIL

Foi realizada em nível nacional, pesquisa on-line para analisar a existência do consumo das vestimentas litúrgicas. Foi percebido que existe mercado ativo, principalmente nas redes sociais *Facebook* e *Instagram*, com a presença de empresas nacionais. Afirmção contextualizada por Tavares et al (2010, p.159), diz que:

A funcionalidade dessas mídias sociais na comunicação institucional permite que organização e seus públicos estejam ligados não mais ao conceito de bilateralidade, mas em rede, onde todos os pontos estão ligados e são influenciados pelo relacionamento estabelecido.

Dessa forma, a religião também está diretamente ligada às redes sociais, sendo notável a maioria da presença de empresas do segmento no Sul e Sudeste brasileiros. De acordo com artigo publicado por Iyemonja (2020), o estado do Rio Grande do Sul é o segundo estado mais branco do país, porém, é o estado com maior número de terreiros do Brasil. Ultrapassando os estados da Bahia e Rio de Janeiro, estima-se que haja 65.000 terreiros em todo o estado. Dada sua quantidade expressiva de adeptos das religiões de matriz africana, o estado conta com um grande número de ateliês e costureiras especializadas na confecção dos *axós*, muitas de origem humilde e localizadas em comunidades, muitos destes profissionais permanecem no anonimato, trabalhando apenas para os clientes próximos aos seus locais de atendimento, enquanto outros decidiram migrar para a venda pela internet.

Ao pesquisar na internet por lojas especializadas no comércio de vestuário litúrgico afro brasileiro na região sul, foram detectadas 4 marcas com maior relevância em resultados e venda na modalidade *online*, localizadas nas cidades de Porto Alegre, Canoas e Pelotas, todas no RS. Destas, apenas 1 é estritamente focada em produção massificada, vendendo apenas peças a pronta entrega na

modalidade online e presencial em loja física localizada no centro da capital, enquanto as demais ainda operam com algumas peças a pronta entrega, porém com pedidos sob encomenda; com exceção de uma, localizada em Canoas, que trabalha exclusivamente com modelos sob medida. Já no estado de Santa Catarina foram encontradas 3 marcas que tem presença *online*, localizadas nas cidades de Joinville, Balneário Camboriú e Florianópolis (esta última, a própria La Dama), vendem através de site próprio, redes sociais e *marketplace*, respectivamente. Ambas marcas analisadas trabalham com algumas peças a pronta entrega mas ainda mantém a disponibilidade de produção sob encomenda.

3 LA DAMA – UM ESTUDO DE CASO

A marca surgiu em 2018 na cidade de São Leopoldo (RS) com a proposta de produzir vestimentas ritualísticas femininas e masculinas para os cultos de matriz africana na modalidade sob medida. Ao final do ano de 2018, a marca mudou-se para a cidade de Florianópolis (SC) e durante o ano de 2019 e início de 2020 desempenhou suas atividades conforme a proposta inicial, tendo uma expressão tímida em vendas dado o tempo hábil para a produção de cada peça ser considerável e o atelier dispor, até então, de uma única pessoa para desempenhar todas as funções de atendimento, venda, produção e marketing. Abaixo, na figura 1, um dos modelos confeccionados no atelier na modalidade sob medida.



Figura 1. Axó sob medida do atelier La Dama em 2019. Acervo da autora.

Foi apenas no segundo semestre de 2020 que a proprietária do ateliê passou a pesquisar o mercado no qual a marca estava inserida e percebeu que uma mudança no posicionamento do ateliê seria

necessária para obter um faturamento saudável. Em outubro de 2020 a marca foi inserida na plataforma de vendas *Shopee*, ainda em caráter experimental, onde a modalidade de venda “a pronta entrega” seria testada. Durante os 12 meses seguintes todas as métricas que envolvem a venda *online* foram coletadas e, por fim, em outubro de 2021, dentro da disciplina de Estratégias de Administração, Planejamento e Produção de Vestuário, do anteriormente referido Programa de Pós-Graduação em Design de Vestuário e Moda (PPGModa), um *mix* de produto foi realizado com base nestes dados coletados para uma análise criteriosa do desempenho de cada modelo, suas margens de lucro, percentual de vendas bem como um planejamento estratégico para o próximo passo a ser dado pela empresa, o estabelecimento da loja na modalidade online, “a pronta entrega”, em uma plataforma de *marketplace*, cujo presente artigo servirá de norte juntamente com o *mix* de produto previamente realizado.

Para complementar o estudo de caso da marca, uma pesquisa de campo foi conduzida pela autora através de questionário de múltipla escolha com 6 perguntas, nas quais os indivíduos respondentes eram todos praticantes de religiões de matriz africana, em 2 templos distintos localizados na cidade de Sapucaia do Sul (RS). Um total de 19 respostas foram coletadas a fim de compor uma análise de preferências de compra destes adeptos quando se refere ao vestuário litúrgico.

Na primeira pergunta, os indivíduos foram questionados se realizaram a compra de algum item de vestuário litúrgico nos últimos 12 meses, levando em consideração que nestes últimos 12 meses, o país como um todo sofreu com a pandemia de Covid19 e muitos templos pausaram suas atividades, o percentual de 84,21% dos indivíduos questionados seguiram adquirindo este tipo de produto da mesma forma implica na dedução de que este nicho de fato está em expansão.

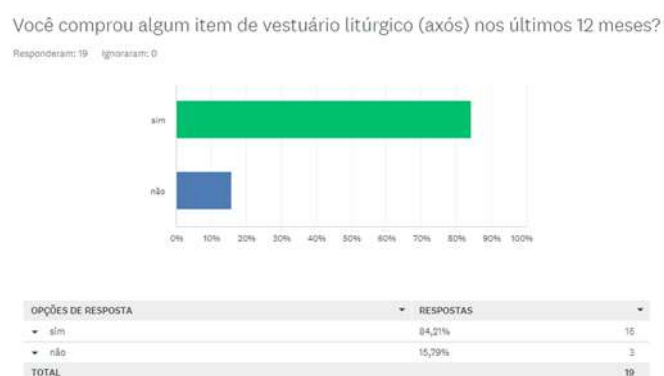


Figura 2. Questão 1. Elaborado pela autora (2021)

Na segunda questão, os indivíduos foram perguntados sobre a circunstância da compra realizada, se compraram em loja física, loja online ou se mandaram fazer sob medida, nesta questão, a vestimenta sob medida liderou com 50% dos votantes, seguida pela compra em loja online com 33,33% e em último lugar, loja física com 16,67%. Podemos atribuir este resultado novamente ao fechamento dos pontos de venda físicos, devido a pandemia de 2020 bem como ao fato de que o estado do RS conta com grande número de costureiras especializadas na confecção deste tipo de traje, disponíveis nas comunidades próximas ao endereço dos indivíduos respondentes da pesquisa.



Figura 3. Questão 2. Elaborado pela autora (2021)

Na questão de número 3, os respondentes foram questionados acerca da necessidade de se adquirir um *axó* novo a cada festividade/obrigação realizada em seus templos, as opções eram “sim”, com um total de 10,53%; “não”, com um total de 31,58% e “depende (se for uma obrigação especial ou para orixá)”. Observando esta resposta, podemos deduzir que a maioria dos indivíduos considera importante ter uma vestimenta nova para festividades/obrigações desde que elas sejam, de acordo com seu próprio julgamento, especial.



Figura 4. Questão 3. Elaborado pela autora (2021)

Para a quarta pergunta, os indivíduos foram questionados sobre os fatores que levam em conta na hora da compra de suas peças de vestuário litúrgico, as opções eram: preço, o menor possível; qualidade mesmo que custe mais caro e por fim originalidade/exclusividade. Nesta questão a maioria votou em originalidade/exclusividade, tendo em segundo lugar empatadas as opções de preço e qualidade com 26,32% cada.



Figura 5. Questão 4. Elaborado pela autora (2021)

Na pergunta de número 5, os respondentes foram questionados sobre sua preferência de compra online, qual dos meios apresentados lhe passava mais segurança. As opções foram: *marketplaces*; loja online com domínio próprio, primeiro buscar conhecer a marca através de redes sociais e por fim sem interesse, prefere compra presencial. Nesta questão, a mais votada foi a opção de primeiro buscar informações sobre a marca nas redes sociais, com 47,37%.

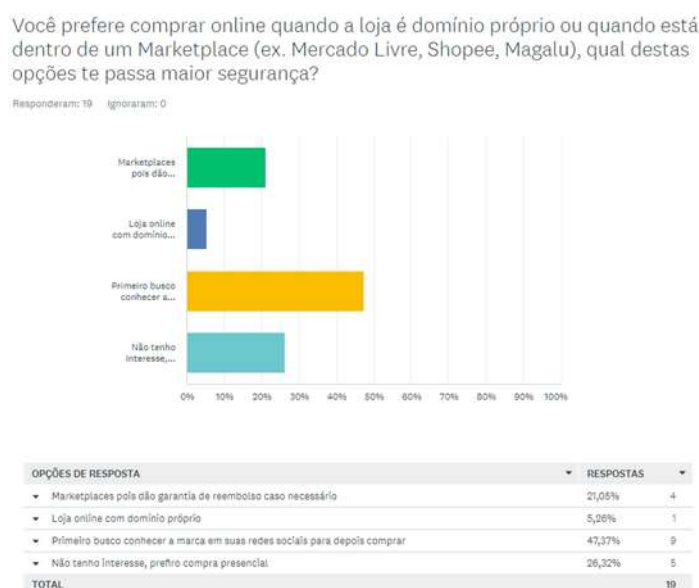


Figura 6. Questão 5. Elaborado pela autora (2021)

Finalmente, na pergunta de número 6, os respondentes foram questionados sobre a situação hipotética onde uma loja *online* de produtos voltados ao vestuário litúrgico surgisse com uma comunicação em redes sociais bastante clara, mostrando todos os detalhes das peças, materiais utilizados bem como ensinando a audiência a efetuar uma compra em uma plataforma segura e conhecida de *marketplace* a exemplo da *Shopee* ou Mercado livre; se eles se sentiriam seguros para comprar nela e a resposta positiva foi unânime.



Figura 7. Questão 6. Elaborado pela autora (2021)

Diante ao analisado na pesquisa realizada com os indivíduos selecionados, pode-se inferir que para sentirem-se seguros para realizar este tipo de compra pela internet, preferem que esta seja através de uma plataforma de venda conhecida que lhes ofereça garantias, porém, para isto, a marca deve ser bem posicionada na internet, ter presença em redes sociais e não deixar margem para dúvidas sobre a procedência, atributos e qualidade das peças comercializadas.

Desta forma, podemos prosseguir para uma contextualização acerca dos conceitos e regras da Cauda Longa a fim de estabelecer o modelo sumarizado referido anteriormente, agora, levando em consideração os resultados obtidos na pesquisa.

4 A CAUDA LONGA – APLICAÇÕES DE SEUS CONCEITOS E REGRAS EM UM MODELO SUMARIZADO

Em sua obra homônima, Anderson (2006) contextualiza a Cauda Longa como um conceito possível a partir do surgimento do comércio online, onde existem uma infinidade de ofertas de produtos disponíveis à escolha do consumidor no mercado, o que forma, em um gráfico de estatística, o desenho de uma curva com distribuição de uma cauda longa infinita. No topo da curva localizam-se os denominados hits⁵ e ao decorrer do caminho encontram-se os produtos de nicho. Anderson (2006)

ainda afirma que todos os produtos de nicho existente formam um mercado significativo, que detém o poder de representar o mesmo valor em vendas do mercado de hits. Condensar as vendas dos produtos localizados mais a fora da cauda é a estratégia de negócio conhecida como Cauda Longa.

Isto posto, após vasta pesquisa e análise, Anderson (2006) elencou nove regras pelas quais os negócios posicionados na Cauda Longa se baseiam para obter sucesso em vendas, as quais estão divididas em três premissas: "reduza seus custos", "desenvolva a mentalidade de nicho" e "perca o controle".

A redução de custos de um negócio de nicho está ligada à movimentação dos estoques, expressa na regra 1, como por exemplo a possibilidade de possuir estoques virtuais, descentralizados ou até mesmo o armazenamento em estoques de parceiros. A segunda regra dentro deste pressuposto diz respeito à possibilidade de os consumidores prestarem serviços para si mesmos, o que promove avaliações mais confiáveis e bem informadas sobre os produtos para os outros usuários, pois o trabalho está sendo realizado pelos próprios clientes, que, por sua vez, são as pessoas mais interessadas e melhor conhecem suas necessidades (ANDERSON, 2006).

Já as regras que versam sobre desenvolver a mentalidade de nicho são ligadas à forma de distribuição (regra 4), variedade (regra 5) e preço (regra 6) dos produtos oferecidos. De acordo com Anderson (2006) possuir vários canais de distribuição pode aumentar a possibilidade de encontrar mais pessoas para sua oferta, como por exemplo uma loja física e loja online integradas, uma vez que o cliente ganha mais um canal para pesquisa dos produtos, tem a vantagem de permanecer disponível 24 horas por dia, todos os dias. Oferecer a maior quantidade de "fatias" possível de um só produto também é uma estratégia interessante para negócios de nicho; no exemplo da marca estudada neste artigo, La Dama, pode ser entendida a partir da ideia do "monte seu axó", onde os clientes podem combinar peças diferentes dos trajes da forma que assim desejarem para criar combinações novas.

As regras de 6 a 9 da Cauda Longa abrangem ideias de compartilhamento de informações com os clientes (regra 6), confiança no mercado (regra 7), sempre possuir a maior variedade de produtos possíveis (regra 8) e o entendimento de que a internet e sua "gratuidade" (regra 9) é uma ferramenta poderosa no oferecimento de vantagens para o seu negócio. Anderson (2006) sustenta que estas estratégias estão relacionadas com deixar-se levar pelas apostas proporcionadas pelo mercado de nicho online e "perder o controle".

O compartilhamento de informações reflete na transparência do negócio para com seus clientes, quanto mais dados forem oferecidos sobre a empresa, sobre o produto e sobre o universo da marca, mais confiança o consumidor cria para fechar a venda (ANDERSON, 2006). Tal informação já

demonstra aderência a uma das constatações feitas no questionário apresentado anteriormente, onde os indivíduos expressaram seu interesse em conhecer a marca da qual irá efetuar uma compra para sentir-se seguro para tal.

Segundo Anderson (2006, p. 220), em "mercados com capacidade infinita, a estratégia certa é quase sempre oferecer tudo". O autor reitera a ideia de que possuir uma profundidade diversa de produtos com as mesmas características, porém com poucos detalhes que os diferenciam (como cor ou estampa, por exemplo) para dar poder de escolha ao consumidor é muito importante, porque no uso de estoques virtuais com espaço ilimitado, para o dono do negócio é muito mais fácil decidir por agregar do que ficar na dúvida sobre ter somente um ou outro produto disponível. Por isso essa regra impõe a ideia de sempre pensar "e", não "ou". Tal estratégia já foi testada e implementada na marca La Dama com sucesso.

Anderson (2006) diz que a ideia de poder ter um estoque infinito é apostar em todas as possibilidades possíveis de produtos e depois de um certo período no mercado, identificar o que vende mais. Esse retorno costuma mostrar-se eficaz, pois ele replica a "sabedoria das multidões" (ANDERSON, 2006, p. 221). Atualmente, nota-se que as redes sociais são espaços que também ajudam a detectar as preferências dos usuários por determinados produtos, através de seus inúmeros recursos de avaliação, curtidas, visualizações, entre outros subsídios. Essas ferramentas auxiliam o gestor do negócio na identificação de produtos em potencial, que podem ser trabalhados com outras estratégias de marketing para alavancar vendas.

Compreender o poder da gratuidade é a última regra apresentada na Cauda longa e é interessante observar a venda de produtos de nicho pela internet, pois é a própria que proporciona esse poder com custos "inexistentes", onde um cliente pode se encantar por um produto, conseguir amostras ou até mesmo comprar o item e, então, criar confiança, tonando-se um comprador único (que já não consome da concorrência) ou indicar para outras pessoas o que adquiriu. Esse conceito pode ser facilmente aplicado à produtos físicos, a partir da conquista dessa confiança do consumidor nas marcas de nicho.

Dessa maneira, as nove regras da Cauda Longa revelam uma teoria importante para os negócios de moda no mercado de nicho, pois são estratégias simples e úteis para os empresários de pequenos negócios, que muitas vezes atuam sozinhos em suas marcas independentes e usam a internet e as redes sociais como seus principais canais de contato com o consumidor. No tópico a seguir, será apresentado um modelo sumarizado com sugestões seguindo a maioria das regras da Cauda Longa

aplicadas ao objetivo principal deste estudo: a transição de um ateliê de vestuário litúrgico sob medida para uma loja em um marketplace.

2.2 APLICAÇÃO DA CAUDA LONGA EM UM MODELO SUMARIZADO

Diante do exposto, fez-se associação da teoria da Cauda Longa com o modelo de negócios atual do ateliê La Dama. Para tanto, além da realização de análises e pesquisas anteriormente citados (mix de produto e a pesquisa de campo), o posicionamento em redes sociais da marca também foi analisado. Inicialmente, para entender a localização da marca em seu nicho de mercado, elaborou-se mapas de posicionamento a partir da visão de seus concorrentes e produtos similares.

De acordo com o que foi identificado no mapa, pode-se afirmar que a marca está dentro do mercado de nicho, onde seus diretos possuem propostas similares ou até mesmo iguais de produto. Saber o posicionamento da marca no mercado nichado é fundamental para compreender as estratégias da Cauda Longa, pois é a partir do posicionamento que se consegue definir o público-alvo em potencial de migrar para a cauda da curva.

MODELO SUMARIZADO PARA APLICAÇÃO DAS REGRAS DA CAUDA LONGA AO LA DAMA ATELIER		
	REGRAS	AÇÕES SUGERIDAS
REDUZA SEUS CUSTOS	1 Movimente os estoques para dentro ou para fora	Definição de estoque “pulmão”
	2 Deixe os clientes fazerem o trabalho	Realização periódica de divulgação de avaliações e depoimentos
DESENVOLVA A MENTALIDADE DE NICHO	3 Um método de distribuição não é adequado a todas as situações	Analisar outras plataformas de marketplace
	4 Um produto não atende todas as necessidades	Variações do produto em cores, materiais e comprimentos
	5 Um preço não serve para todos	Definições de linhas básica, comercial e luxo
	6 Compartilhe informações	Presença constante em redes sociais para criação de vínculo
	7 Pense “e” e não “ou”	Constante aumento do catálogo de

PERCA O CONTROLE		produtos com base nas sugestões
	8 Ao fazer seu trabalho, confie no mercado	
	9 Compreenda o poder da gratuidade	

Elaborado pela autora, 2021.

Conforme descrito no exemplo acima, a redução de despesas pode ser notada ao aplicar a Regra 1, que envolve estabelecer um "estoque de reserva" conforme descrito por Wanke (2011). Esse estoque extra contém a quantidade mínima necessária para evitar a falta de materiais ou equipamentos. Se não for devidamente monitorado, há risco de falta de produtos.

A Regra 2, também baseada na redução de custos, sugere que, no caso do La Dama, seria benéfico divulgar regularmente testemunhos e avaliações de clientes, premiando-os com ofertas ou descontos em troca de depoimentos em vídeos ou histórias nas redes sociais. Essa estratégia visa construir confiança no negócio para novos consumidores em potencial, delegando essa tarefa às pessoas mais interessadas que conheçam suas necessidades. Essas ações também encorajaram feedbacks positivos de clientes que já tiveram sucesso na loja, promovendo uma rede de confiança entre todos os usuários.

Por fim, as Regras 3, 4 e 5 incentivam o comerciante a adotar a mentalidade de nicho em seu negócio. Na aplicação da Regra 3, embora ainda não haja diretrizes específicas além das já seguidas pela marca, é sugerido que, estando em um processo de estabilização no comércio online através de *marketplaces*, uma investigação futura em outras plataformas de vendas pode ser pertinente.

Ao implementar o conceito da Regra 4, que ressalta que um único produto não pode atender a todas as necessidades, a marca continua a expandir sua linha por meio da inclusão de novas variações de modelos, que abrangem uma ampla gama de combinações de materiais, núcleos, comprimentos e tamanhos, desde o PP ao G5. Os produtos são categorizados por gênero, tamanho e tipo, como blusas, saias, conjunto, calças e acessórios.

Quanto à Regra 5, ela propõe uma subdivisão das linhas de produtos em básico, comercial e luxo, cada uma com uma quantidade pré-determinada de peças e preços crescentes de acordo com a qualidade dos materiais e a complexidade do design. Essa estratégia atende tanto clientes com menor poder aquisitivo quanto aqueles que desejam investir mais. Para implementar a Regra 6, é essencial planejar uma presença eficaz nas redes sociais, realizar pesquisas para identificar os melhores horários, locais

e tipos de conteúdo que envolvem a audiência. Com esses dados, é possível desenvolver estratégias de marketing e presença digital para conquistar

Na Regra 7, que destaca a importância de pensar em adições, não substituições, a marca pode expandir seu portfólio constantemente, aproveitando a facilidade de adaptação da modelagem das peças, materiais ou mesmo aviamentos, possibilita uma nova gama de produtos passíveis de venda. A sugestão da Regra 8 é otimizar o layout da loja online para facilitar a navegação e comparação de produtos pelos consumidores. Ao questionar suas preferências, a loja pode personalizar a experiência de compra e revelar informações valiosas para o momento de marketing que gera a plataforma.

Por último, a Regra 9 reforça a importância da interação do público, encorajando o compartilhamento de experiências para construir a confiança e a confiança da marca. O feedback dos clientes ajuda a atrair novos consumidores por meio de experiências autênticas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo foi apresentar um planejamento estratégico em forma de modelo sumarizado para a transição de um atelier de vestimentas litúrgicas sob medida para o modelo de loja online em um marketplace pronta entrega utilizando-se dos conceitos de Cauda Longa, para auxiliar no desenvolvimento de estratégias para o alcance de objetivos financeiros e de marketing da marca La Dama Atelier. Apresentar a teoria da Cauda Longa de maneira aplicada a um negócio real, como foi exposto aqui, é relevante para a academia e para o mercado, uma vez que a marca estudada é de nicho e tem o e-commerce por *marketplace* como alternativa viável para escalar e aumentar suas vendas, atingindo seu público-alvo de maneira expandida. Vender vários produtos de segmento de nicho, que juntos somam receitas positivas, é uma estratégia de negócio que aposta em valor de marca, posicionamento de mercado e público-alvo bem definidos, sendo uma maneira mais simples para a conquista de um negócio economicamente sustentável por meio de uma marca de moda.

4 REFERÊNCIAS

ANDERSON, Chris. A Cauda Longa: do mercado de massa para o mercado de nicho. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

CAMPOS, Zuleica Dantas Pereira. Axós em evidência: uma análise da indumentária litúrgica afro-brasileira no Recife. In: 28º Congresso Internacional da SOTER, 2015.

IYEMONJA, Baba Diba de. Comunidade tradicional de terreiro – Batuque do RS e o racismo religioso. SINDJUS - Sindicato dos Servidores da Justiça do RS. 2020. Disponível em: <<http://www.sindjus.com.br/comunidade-tradicional-de-terreiro-batuque-do-rs-e-o-racismo-religioso/12607/>>. Acesso em 20/11/2021.

PRANDI, Reginaldo. Hipertrofia ritual das religiões afro-brasileiras. Novos estudos CEBRAP. N.56, mar. 2000.

PIERUCCI, Antônio Flávio e PRANDI, Reginaldo. A realidade social das religiões no Brasil. São Paulo, Hucitec, 1996.

RIBEIRO, Cláudio de Oliveira. Um olhar sobre o atual cenário religioso brasileiro: possibilidades e limites para o pluralismo. Estudos da Religião. v.27, n.2 /53-71/jul-dez.2013. Disponível: <<http://www.bibliotekevirtual.org/revistas/Metodista-SP/ER/v27n02/v27n02a03.pdf>>. Acesso em 27 de out. 2021.

SOUZA, Patrícia Ricardo. Axós e Ilequês: rito, mito e a estética do candomblé. São Paulo, 2007. Tese (Doutorado em Sociologia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

TAVARES, Judy Lima; LUÍNDIA, Luíza Elayne Azevedo. Mídias Sociais: redes de relacionamento entre organização e públicos. In: CHAMUSCA, Marcello; CARVALHAL, Márcia (orgs). Relações públicas digitais: o pensamento nacional sobre o processo de relações públicas interfaceado pelas tecnologias digitais, 2010. Disponível em: <<http://www.rp-bahia.com.br/biblioteca/e-books/rpdigitais-chamusca-carvalhal.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2021

TEIXEIRA, Talita Bender. Trapo formoso: o vestuário na Quimbanda. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado em Antropologia Social) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

WANKE, P. Gestão de Estoque na Cadeia de Suprimentos: Decisões e Modelos Quantitativos. 3 Ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2011.

ENGENHARIA: SOLUÇÕES E INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO

VOLUME IX



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE