

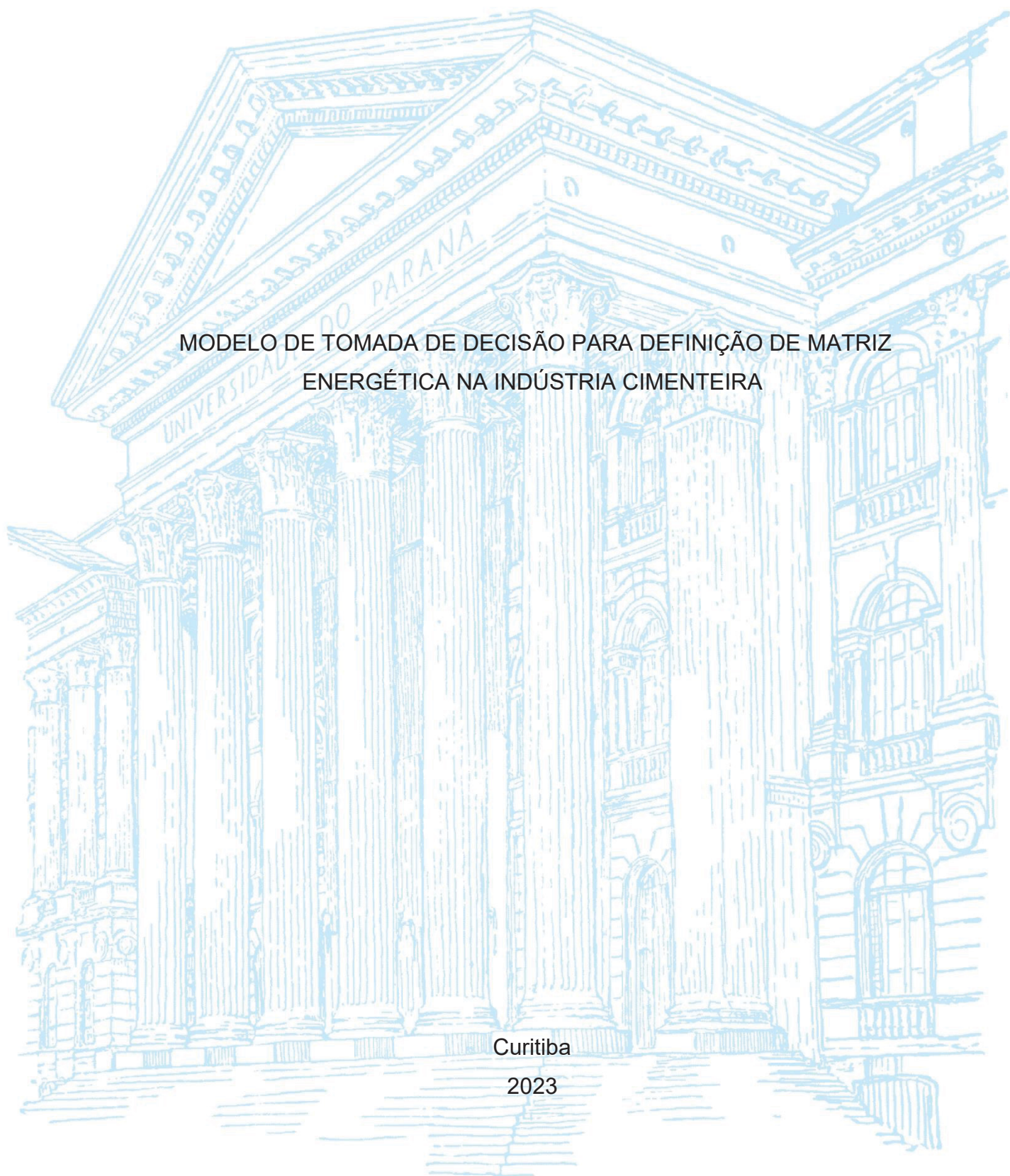
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GLAUCIO ROMEU OLIVEIRA ROLAND JUNIOR

MODELO DE TOMADA DE DECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE MATRIZ
ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Curitiba

2023



GLAUCIO ROMEU OLIVEIRA ROLAND JUNIOR

MODELO DE TOMADA DE DECISÃO PARA DEFINIÇÃO DE MATRIZ
ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Dissertação apresentada ao Programação de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Produção.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Izabel Cristina Zattar

Curitiba

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Roland Junior, Glaucio Romeu Oliveira

Modelo de tomada de decisão para definição de matriz energética na indústria cimenteira / Glaucio Romeu Oliveira Roland Junior. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Izabel Cristina Zattar

1. Cimento – Indústria. 2. Programação linear. 3. Energia – Consumo. 4. Combustíveis fósseis. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Zattar, Izabel Cristina. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GLAUCIO ROMEU OLIVEIRA ROLAND JUNIOR** intitulada: **Modelo de Tomada de Decisão para a Definição de Matriz Energética na Indústria Cimenteira**, sob orientação do Prof. Dr. IZABEL CRISTINA ZATTAR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/04/2023 10:45:16.0

IZABEL CRISTINA ZATTAR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/04/2023 17:55:48.0

ARINEI CARLOS LINDBECK DA SILVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/04/2023 18:55:05.0

RENATA VIDART KLAFKE

Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

18/04/2023 13:56:34.0

MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me ter permitido chegar até onde cheguei, colocar no meu caminho durante esta jornada pessoas incríveis e que colaboraram para concluir este grande sonho.

Principalmente agradeço a minha orientadora, Prof. Dra. Izabel Cristina Zattar por me aceitar como orientando, acreditar no meu potencial e por sua competência, dedicação, amizade e que não mediu esforços para a elaboração, desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.

Estendo este agradecimento em especial, a minha esposa Taiane e a minha filha amada Geovana pelo carinho e apoio (eu amo vocês), sem elas eu não teria conseguido realizar este sonho, e aos demais familiares pela colaboração.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná, os quais muito contribuíram para a conclusão desta empreitada.

Aos colegas e amigos ao longo do mestrado que dividimos ansiedades, preocupações, problemas e a certeza de que todos estes momentos ficarão marcados em nossas vidas.

Em especial, um agradecimento ao Sr. Emerson Luiz Miguel e ao Sr. Eduardo Noviski pelo apoio desde o início do mestrado e a “empresa estudo de caso” que deu a oportunidade para a realização desta pesquisa.

Por fim, uma mensagem a todos os pacientes diagnosticados com qualquer tipo de Leucemia, assim como eu, tenha fé e nunca desista! Longe de terminar, é apenas o começo de uma nova etapa e o melhor sempre está por vir!

RESUMO

A necessidade crescente por busca de vantagem competitiva e a relevância do tema combustíveis, bem como a procura por redução de custos na produção, fez com que, a partir dos anos setenta, a indústria cimenteira iniciasse pesquisas voltadas a buscar alternativas energéticas para o seu processo produtivo. Sobre o custo direto da produção do cimento, a metade de todo o custo corresponde às despesas com os combustíveis e energia elétrica. Os combustíveis correspondem acima de 25% e podendo atingir 45% do custo de produção de cimento conforme as variáveis de suprimentos. Atualmente, o coque de petróleo e o carvão são responsáveis por 70% do consumo das cimenteiras, sendo que sua compra é suscetível a variações cambiais e fatores de mercado. Visando a redução de custos, a indústria de cimento no Brasil, em cooperação com outras organizações cimenteiras internacionais, desenvolveu o *Technology Roadmap 2050*, que propõe uma série de ações prioritárias para buscar incremento dos combustíveis alternativos, os quais representam mais de 20% do consumo térmico do setor de cimento. Diante do exposto, o objetivo geral do trabalho é um modelo matemático para a definição da matriz energética capaz de auxiliar na tomada de decisão de escolha dos combustíveis atendendo aos parâmetros de produção com a função objetivo de minimizar os custos e de promover o desenvolvimento sustentável. O presente estudo foi dividido no desenvolvimento da modelagem da descrição do problema, a coleta de dados, a modelagem e estruturação das equações e através da pesquisa operacional e programação linear. Para tal, como método de pesquisa, foi realizado um estudo de caso em uma indústria cimenteira estabelecida na Região Metropolitana de Curitiba. Na etapa seguinte, a validação da modelagem e a simulação de dois cenários para a matriz de combustíveis. Por fim, o resultado apresentou uma assertividade na escolha da matriz energética, redução nos custos, flexibilidade na definição das variáveis e agilidade para tomada de decisão. Sendo que o estudo representa uma vantagem competitiva e interessa ao desenvolvimento da indústria, e qualquer alteração na mistura dos combustíveis terá representatividade nos resultados financeiros.

Palavras-chave: indústria cimenteira; matriz energética; programação linear.

ABSTRACT

The growing need to seek competitive advantage and the relevance of the fuel issue, as well as the search for cost reduction in production, meant that, from the 1970s onwards, the cement industry began research aimed at seeking energy alternatives for its process. productive. About the direct cost of cement production, half of the total cost corresponds to expenses with fuel and electricity. Fuels account for over 25% and may reach 45% of the cost of cement production depending on supply variables. Currently, petroleum coke and coal are responsible for 70% of cement plants' consumption, and their purchase is susceptible to exchange rate variations and market factors. With a view to reducing costs, the cement industry in Brazil, in cooperation with other international cement organizations, developed the Technology Roadmap 2050, which proposes a series of priority actions to seek an increase in alternative fuels, which represent more than 20% of consumption the cement industry. Considering the above, the general objective of the work is to propose a mathematical model for the definition of the energy matrix capable of assisting in the decision-making process of choosing fuels, considering the parameters, variables and restrictions of the furnaces and production. The present study was divided into the development of modeling from the description of the problem, data collection, modeling and structuring of equations and through operational research and linear programming. Therefore as a research method, a case study was carried out in a cement industry established in the Metropolitan Region of Curitiba. In the next step, the validation of the modeling and the simulation of two scenarios for the fuel matrix. Finally, the result showed assertiveness in choosing the energy matrix, cost reduction, flexibility in defining variables and agility in decision making. The study represents a competitive advantage and is of interest to the development of the industry, and any change in the mix of fuels will have a bearing on the financial results.

Keywords: cement industry; energy matrix; linear programming

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – Nomenclatura do cimento Portland.....	19
FIGURA 02 – Evolução dos fornos de via úmida para via seca no Brasil	23
FIGURA 03 - Processo de fabricação de cimento via seca.....	23
FIGURA 04 – Jazida de calcário	23
FIGURA 05 – Moinho de bolas.....	25
FIGURA 06 – Moinho de rolos vertical	26
FIGURA 07 – Pré-aquecedor	27
FIGURA 08 – Torre de ciclone, pré-calcinador e forno rotativo.....	28
FIGURA 09 – Clínquer	29
FIGURA 10 - Protocolo do estudo de caso	45
FIGURA 11 - Etapas do estudo de caso	45
FIGURA 12 - Fluxograma Método Simplex.....	49
FIGURA 13 - Arquivo Modelagem.....	92
FIGURA 14 - Parâmetros do Solver	93
FIGURA 15 - Resultados Solver.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 – Produção de cimento no Brasil (milhões de toneladas)	21
GRÁFICO 02 – Produção de cimento no mundo – 2020.....	22
GRÁFICO 03 - Matriz energética – cimenteiras do mundo	33
GRÁFICO 04 - Matriz energética – cimenteiras no Brasil.....	34
GRÁFICO 05 - Comparativo Matrizes mês de junho.....	64
GRÁFICO 06 - Comparativo Matrizes mês de julho	65
GRÁFICO 07 - Comparativo Matrizes mês de agosto.....	66
GRÁFICO 08 - Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês de junho	68
GRÁFICO 09 - Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês julho	69
GRÁFICO 10 - Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês agosto	70
GRÁFICO 11 - Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês junho	71
GRÁFICO 12 - Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês julho	72
GRÁFICO 13 - Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês agosto	74

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – Tipos de cimento Portland	18
QUADRO 02 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processo de produção de cimento	32
QUADRO 03 - Resíduos aptos e vetados para coprocessamento	38
QUADRO 04 - Classificação dos resíduos coprocessamento	40
QUADRO 05 - Características dos combustíveis	43
QUADRO 06 - Definindo o número de estudos de casos	47
QUADRO 07 – Matriz de Combustíveis	56

LISTA DE TABELA

TABELA 01 – Cimenteiras no Brasil 2021.....	20
TABELA 02 – Capacidade de Produção de Clínquer.....	56
TABELA 03 – Consumo térmico.....	56
TABELA 04 – Disponibilidade de Combustíveis.....	56
TABELA 05 – Qualidade dos Combustíveis.....	57
TABELA 06 – Custos dos Combustíveis.....	57
TABELA 07 – Produção de Clínquer.....	63
TABELA 08 – Amostra Matriz de Combustíveis.....	63
TABELA 09 – Amostra dos Custos dos Combustíveis em R\$ por ton.....	63
TABELA 10 – Variação % Grupo de Combustíveis mês junho.....	65
TABELA 11 – Variação % Grupo de Combustíveis mês julho.....	66
TABELA 12 – Variação % Grupo de Combustíveis mês agosto.....	67
TABELA 13 – Cenário 01 –Variação % Grupo de Combustíveis mês junho.....	68
TABELA 14 – Cenário 01 - Variação % Grupo de Combustíveis mês julho.....	69
TABELA 15 – Cenário 01 - Variação % Grupo de Combustíveis mês agosto.....	70
TABELA 16 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês junho.....	72
TABELA 17 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês julho.....	73
TABELA 18 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês julho.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CDR	Combustível Derivado de Resíduo
CEMBUREAU	Associação Europeia de Cimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO ₂	Dióxido de carbono
CP II-F	Cimento Portland composto com fíler
CP II-Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP V-ARI RS	Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos
CVP	Coque Verde de Petróleo
CSI	Cement Sustainability Initiative
ECO	Conferência das Nações Unidas
EPE	Eficiência Energética Brasil
EUA	Estados Unidos da América
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido
FDP	Funções Densidade de Probabilidade
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GRG	Gradient Réduit Généralisé
GRG	Generalized Reduced Gradient
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
IBEAS	Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais
IEA	Agência Internacional de Energia
Kcal	Quilocaloria
LTS	Litros
MP	Mega Pascal
MW	Megawatt
Nm ³ /h	Normal Metro Cúbico por Hora
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCI	Poder calorífico inferior

PCS	Poder calorífico superior
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos – RSU
R\$/Gcal	Custo energético em reais
SEMA/PR	Secretaria de Meio Ambiente do Paraná
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO2	Dióxido de enxofre
SOX	Óxidos de enxofre
TON	Toneladas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 DELIMITAÇÕES.....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 CIMENTO.....	17
2.2 INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO BRASIL E NO MUNDO.....	19
2.3 PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO	22
2.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO BRASIL	30
2.5 MATRIZ ENERGÉTICA E COMBUSTÍVEIS	32
2.5.1 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS SÓLIDOS.....	35
2.5.2 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS LÍQUIDOS.....	36
2.5.3 O USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA.....	37
2.5.4 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS	41
3 METODOLOGIA	44
3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA	44
3.2 PROTOCOLO DE PESQUISA	44
3.3 AMBIENTE DA PESQUISA, POPULAÇÃO, AMOSTRA.....	46
3.4.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	47
3.4.4 MÉTODO SIMPLEX E O PROBLEMA DA MISTURA	49
3.4.4 SOFTWARES DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	51
3.5 TRABALHOS CORRELATOS	52
4 DESENVOLVIMENTO - MODELAGEM MATEMÁTICA.....	55
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	55
4.2 COLETA DE DADOS	57
4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	58
4.4 EQUAÇÕES	60
5 RESULTADOS.....	62
5.1 VALIDAÇÃO.....	62

5.2 CENÁRIO 1	67
5.3 CENÁRIO 2	71
6 CONCLUSÃO	76
8. REFERÊNCIAS.....	79
9. ANEXO.....	92

1 INTRODUÇÃO

A indústria de cimento sempre teve um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico do país, pois está diretamente associada com o aumento da prosperidade da população por meio de obras e construções. Em relação a geração de empregos representa 9% do total dos registros criados no Brasil em 2021 e o setor acumulou crescimento de 9,7% em relação ao ano de 2020 contribuindo para o desenvolvimento da economia (ABCP, 2022).

Na indústria cimenteira, observa-se que, o uso de energia é significativo, isto porque utiliza alta temperatura para fazer o seu processo de transformação da matéria-prima até o produto. A energia térmica utilizada durante o processo de queima é responsável por cerca de 25 a 30% do custo de produção de cimento (MADLOOL et al., 2013).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento SNIC (2021), cerca de 50% de todo o custo direto da produção de uma cimenteira corresponde às despesas de energia térmica como combustíveis e energia elétrica.

A representatividade poderá variar conforme os fatores que compõem a cadeia de suprimentos dos custos dos combustíveis. A evidência disto, no ano de 2021, a energia térmica utilizada durante o processo de queima foi responsável por cerca de 35% a 45% do custo de produção de cimento.

Em particular, a energia térmica é necessária durante o processo de clinkerização, o qual é uma das etapas mais relevantes devido à possibilidade de influência na qualidade do produto e no custo de produção. As matérias-primas homogêneas permanecem no forno entre 15 e 20 minutos, atingindo temperaturas entre 1.450 °C e 1.500 °C até a formação do clínquer (SNIC, 2021).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (2002), ao longo do tempo, a matriz energética da indústria de cimento sofreu mudanças devido à adequação de mercado, crises energéticas e a necessidade de redução de custos.

As crises do Petróleo e, a consequente adequação da indústria, tiveram forte impacto no consumo de óleo combustível, principalmente na década de oitenta, quando houve uma momentânea migração para o carvão (mineral e vegetal).

No ano 2000, ocorreu a entrada no mercado brasileiro do coque de petróleo importado, oriundo dos Estados Unidos e da Venezuela, mais competitivo no

comparativo no custo de energia. Com isso, o setor migrou para este combustível em detrimento do óleo combustível (EPE, 2020).

Atualmente, os combustíveis que alimentam os fornos das cimenteiras são, na maioria das vezes, provenientes de fontes não renováveis, como o coque de petróleo e o carvão, sendo o mais utilizado o coque de petróleo devido ao seu elevado poder calorífico, o qual representa aproximadamente de 70% do total dos combustíveis inseridos no forno de cimento (CHATZIARAS, 2016).

Além do uso de coque como combustível, a indústria também utiliza combustíveis alternativos, como resíduos sólidos industriais e urbanos, os quais, atualmente, são destinados na sua grande proporção a lixões ou aterros sanitários no Brasil (EPE, 2020).

Com base em dados do SNIC (2021), os combustíveis alternativos, já representam mais de 20% do consumo térmico do setor e crescem a cada dia devido ao significativo ganho de resultado, isto devido, a sua competitividade no custo de energia e a redução de poluentes, quando comparado com os combustíveis tradicionais. A diferença entre o coque e os combustíveis alternativos, em torno de 10%, é complementada com outros combustíveis, como carvão vegetal e carvão mineral.

Conforme a EPE (2020), desde o início dos anos setenta diferentes tipos de resíduos têm sido utilizados como combustíveis alternativos nos fornos de cimento na Europa, Japão, Estados Unidos, Canadá e Austrália. Apesar disto, para a Agência Internacional de Energia (IEA, 2009), o processo de produção de clínquer tende a depender fortemente do carvão e coque, notadamente nos maiores mercados globais de cimento, a China com 56% e a Índia 6% da produção mundial de cimento.

No Brasil, os combustíveis alternativos começaram a receber atenção por volta dos anos noventa. Suas diretrizes foram discutidas na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – ECO 1992 (ALBUQUERQUE et al., 2007) e o propósito desse evento era elaborar estratégias que interrompessem, ou pelo menos reverteressem, os efeitos da degradação ambiental, promovendo entre o meio empresarial a redução do consumo de energia e produção de resíduos, gerando, com isso, economia financeira.

Em consenso com o mercado onde está inserida, a indústria de cimento brasileira, em cooperação com várias organizações internacionais, desenvolveu o *Technology Roadmap 2050*. Este documento propõe uma série de ações prioritárias

que incluem o reforço da cooperação nacional e internacional, reaproveitamento energético de resíduos urbanos e industriais, estímulo à eficiência energética, através do compartilhamento das melhores práticas, e promoção da pesquisa e do desenvolvimento de tecnologias emergentes e inovadoras de mitigação do carbono (EPE, 2020).

Segundo Visedo e Pecchio (2019), a utilização de combustíveis alternativos em substituição aos combustíveis fósseis não renováveis, como, o coque de petróleo, representa a segunda principal alternativa do setor. A estimativa é de que, somente o uso de resíduos sólidos urbanos (RSU), pode representar uma taxa de 17% de substituição de combustíveis e um alto potencial de crescimento.

Observa-se, então, que o uso de energia é considerado estratégico para a indústria cimenteira e o desenvolvimento da sociedade. Logo, a necessidade de uma tomada de decisão eficiente no desenvolvimento e escolha da matriz energética para os fornos de cimento torna-se relevante para a redução de custos e um diferencial de competitividade de mercado. Deste modo, há a necessidade do desenvolvimento de uma modelagem eficiente, que colabore com a indústria e auxilie na escolha correta dos combustíveis conforme as suas características.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria cimenteira apresenta um papel de destaque no desenvolvimento socioeconômico dos países e no Brasil, o setor da construção civil exerce uma forte influência na economia nacional e, principalmente, nas localidades em que as indústrias cimenteiras exercem suas atividades (SNIC, 2021).

Portanto a demanda na indústria cimenteira está cada vez mais pressionada e o mercado vem se demonstrando um setor intensamente competitivo. Por isso, a necessidade de uma eficiência energética e assertividade da matriz dos combustíveis utilizados nos fornos.

Atualmente, o mercado brasileiro é composto por grupos nacionais e estrangeiros que totalizam 24 grupos cimenteiros, com 100 fábricas espalhadas em todas as regiões do Brasil que representam uma capacidade instalada anual acima de 102 milhões de toneladas de cimento (CIMENTO.ORG, 2021).

Desta forma, cada fábrica tem as suas particularidades de produção, parâmetros, variáveis e restrições dos fornos, por essa razão, a relevância da

pesquisa, é pertinente devido à representatividade dos valores monetários envolvidos, estima-se que os custos iniciais para um forno de cimento são de R\$ 6.000.000,00 por mês com a matriz de combustíveis.

Neste contexto, a presente pesquisa tem por objetivo geral propor um modelo matemático para a definição da matriz energética capaz de auxiliar na tomada de decisão de escolha dos combustíveis atendendo aos parâmetros de produção com a função objetivo de minimizar os custos e de promover o desenvolvimento sustentável.

Para tal finalidade, foi utilizada ferramenta da Pesquisa Operacional, modelado um problema de programação linear e aplicado o método simplex.

A contribuição do presente trabalho é a apresentação de um modelo matemático, aplicando técnicas para a definição dos combustíveis, abrangendo diversos aspectos, muitas vezes não considerados, tais como custos, qualidade dos combustíveis, características dos combustíveis, as variáveis de disponibilidade, restrições e visando manter o poder calorífico aceitável e necessário para a produção do cimento.

Além disso, o modelo facilita na seleção da melhor solução e, também, coopera naquelas situações em que a tomada de uma decisão deve ser a mais rápida possível, circunstâncias rotineiras no ambiente da administração de produção.

Portanto, torna-se evidente que a pesquisa, interessa a indústria cimenteira brasileira e outros ramos de atividade industriais que se identificam com o problema, propondo agilidade na tomada de decisão da matriz energética e uma vantagem competitiva.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Propor um modelo matemático para a definição da matriz energética capaz de auxiliar na tomada de decisão de escolha dos combustíveis atendendo aos parâmetros de produção com a função objetivo de minimizar os custos e de promover o desenvolvimento sustentável.

1.2.2 Objetivos específicos

- Coletar dados sobre os combustíveis utilizados, informações sobre os custos, os critérios e as restrições da operação e da cadeia de produção;
- Desenvolver um modelo matemático para a resolução do problema utilizando a programação linear e o método simplex;
- Validar o modelo matemático proposto para a indústria cimenteira por meio dos dados reais da indústria estudo de caso;
- Desenvolver cenários de utilização do modelo.

1.3 DELIMITAÇÕES

Apesar de a empresa estudo de caso possuir três fornos para o processo produtivo do cimento, neste trabalho optou-se pelo estudo e a modelagem da matriz energética de um único forno, denominado forno III.

A escolha pelo forno III justifica-se pelo fato de ser o mais eficiente operacionalmente, representar acima de 50% da produção do clínquer, aceitar a mistura de diversos combustíveis, possuir equipamentos que permitam a maior taxa de substituição de combustíveis alternativos e a sua tecnologia ser a mais recente, tendo sido adquirido em 2011.

A relevância da pesquisa, é pertinente devido à representatividade dos valores monetários envolvidos, para atender a matriz de combustíveis do forno III os custos podem ultrapassar R\$ 10.000.000,00 mensais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O propósito deste capítulo é discorrer sobre os principais conceitos relacionados à indústria cimenteira, apresentando o processo de produção e os combustíveis utilizados no forno de cimento. Além disso, apresenta também uma conjuntura da indústria cimenteira brasileira e mundial, a legislação ambiental e as características dos combustíveis.

2.1 CIMENTO

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) explica que a palavra "cimento" deriva do latim *caementu* " e significa uma pedra natural esculpida em rocha. As evidências indicam que a origem do cimento é uma liga feita de uma mistura calcinada de gesso, empregada para a construção dos imponentes monumentos do Antigo Egito, construídos há mais de 4.500 anos.

No entanto, em 1756, John Smeaton deu um grande passo no desenvolvimento do cimento. O engenheiro inglês obteve um produto de alta resistência queimando calcário argiloso. Entretanto, em 1818 o engenheiro francês Louis Joseph Vicat conseguiu o mesmo efeito que Smeaton misturando argila e calcário, sendo, assim, considerado o inventor do cimento artificial (ROBERTO, 2001).

Em 1844, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou junto os principais compostos: calcário e argila, transformando-os em pó fino. Desta forma, percebeu que havia obtido uma mistura que, após seca, se tornava tão dura quanto às pedras usadas nas construções da época (BATTAGIN, 2017). A mistura criada por Aspdin é insolúvel em água e foi patenteada pelo construtor com o nome Portland Cement, assim chamado devido à cor, durabilidade e tenacidade semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ROBERTO, 2001).

A composição química do cimento Portland também pode ser modificada com a adição de novos compostos, criando assim um cimento específico para cada tipo de construção. Ao adicionar ou melhorar algumas de suas propriedades, incluindo sua resistência ou tempo de cura, sendo os aditivos os compostos mais comuns as pozolanas e escórias de alto forno (JACQUES, 2013).

Segundo a ABCP (2002), a norma de especificação do cimento Portland da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR, n.º 16697, padroniza os tipos de cimentos produzidos e comercializados no Brasil.

Dessa forma, define o tipo de cimento, identificado por uma sigla que começa com CP (Cimento Portland) seguido de algarismos romanos (I-Comum, II-Composto, III-Blast, IV-Pozolana, V-Alta Resistência) ou outros.

As classes de resistência 25, 32 ou 40 Mega Pascal (Mpa) e valores de força. Os cimentos compósitos também são identificados por aditivos onde E-escória, Z-pozolana, e F-filer. No quadro 01 é apresentada a classificação dos tipos de cimento conforme a norma ABNT NBR 16697.

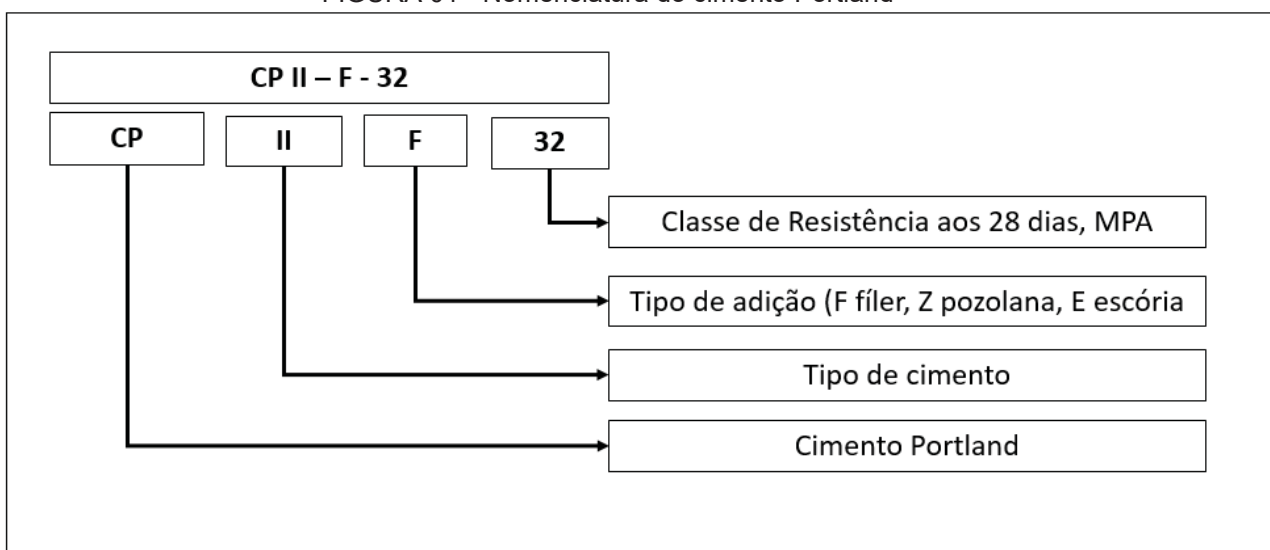
QUADRO 01 – Tipos de Cimento Portland

Cimento Portland (ABNT)	Tipo
Cimento Portland Comum (CP I)	CP I – Cimento Portland Comum
	CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição
Cimento Portland Composto (CP II)	CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória
	CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
	CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler
Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)	Alto-forno
Cimento Portland Pozolânico (CP IV)	
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)	
Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)	
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)	
Cimento Portland Branco (CPB)	

Fonte: ABCP (2002)

Por último, na nomenclatura, a representação da classe, que mostra a resistência à compressão mínima que o cimento atinge aos 28 dias. Os valores são de 25, 32 ou 40 MPa. Dessa vez a exceção fica por conta do CPV, que não apresenta em sua nomenclatura o valor da resistência, pois atinge um valor de 34 MPa em apenas 7 dias. Por este motivo é que leva o nome de cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI). Alguns exemplos: CPI–32, CPII–Z–25, CPIII–40, CPIV–32, CPV–ARI conforme a Figura 01.

FIGURA 01 - Nomenclatura do cimento Portland



Fonte: ABCP (2022)

2.2 INDÚSTRIA CIMENTEIRA NO BRASIL E NO MUNDO

A indústria cimenteira apresenta um papel de destaque no desenvolvimento socioeconômico dos países, e o seu crescimento está associado à geração de empregos, oportunidades de sustento e à prosperidade da população (SHRIVASTAVA, 2017).

No Brasil, o setor da construção civil exerce uma forte influência na economia nacional e, principalmente, nas localidades em que as indústrias cimenteiras exercem suas atividades (SNIC, 2021).

Atualmente, o mercado brasileiro é composto por grupos nacionais e estrangeiros que totalizam 24 grupos cimenteiros, com 100 fábricas espalhadas em todas as regiões do Brasil. No entanto, a maior quantidade de fábricas localiza-se na região Sudeste, onde está concentrado o maior mercado consumidor (SILVA, 2009).

Outros estudos, sinalizam que o motivo desta concentração, é que as minas de extração, das principais matérias-primas para a produção de cimento são o calcário e a argila, estão concentradas na região sudeste, sendo o foco para Minas Gerais (SOUZA, 2022). A tabela 01 apresenta os principais grupos em atividade no Brasil e sua capacidade instalada.

TABELA 01 - Cimenteiras no Brasil 2021

Grupos	Quantidade de Fábricas	Cap. Inst. 2021 (toneladas /ano)
VOTORANTIM	28	34.866.000
INTERCEMENT	16	15.990.000
CSN & LafargeHolcim	12	15.300.000
NASSAU	11	8.400.000
MIZU	7	5.239.800
TUPI	3	3.840.000
Ciplan	1	2.760.000
Cimento ITAMBÉ	1	2.700.000
CRH	4	2.640.000
Outras Cimenteiras	17	11.046.000
24 Grupos cimenteiros	100	102.781.800

Fonte: CIMENTO.ORG

Durante o período de 2010 até 2014, após ter enfrentado a crise mundial de 2008, a produção de cimento estava em crescimento e em recuperação, e a economia brasileira passava por uma onda de investimentos e plena expansão, um reflexo dos eventos da Copa do Mundo de 2014 e das Olimpíadas de 2016.

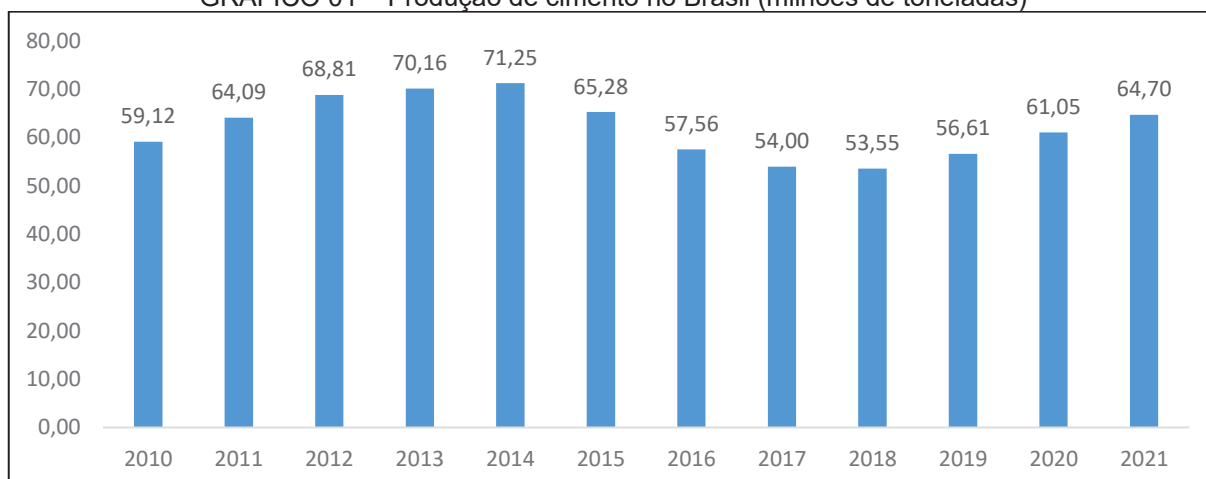
Entretanto, o cenário de desenvolvimento no Brasil teve uma profunda mudança a partir de 2015 e, assim, contribuíram para a queda na produção do cimento os fatos como: os escândalos de corrupção decorrida da investigação da “Lava Jato”, a crise econômica interna e o aumento das taxas de juros.

A consolidação destes fatores impactou diretamente o mercado imobiliário e da construção civil. Em meados de 2016, a indústria brasileira atingiu a capacidade atual de 102 milhões de toneladas, após os investimentos em modernização do parque fabril e de novas plantas em todas as regiões do Brasil.

Ao final do ano de 2021, a CSN adquiriu todos os ativos da LafargeHolcim por US\$ 1,025 bilhão, reposicionando a companhia para cima no ranking de cimenteiras no país e passando a terceiro lugar em número de fábricas e de capacidade de produção.

Em agosto de 2022, a negociação foi aprovada, sem restrições, aquisição da LafargeHolcim Brasil pela CSN cimentos pelo Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE). O gráfico 01 apresenta a produção brasileira de cimento em toneladas entre os anos de 2010 e 2021.

GRÁFICO 01 – Produção de cimento no Brasil (milhões de toneladas)



Fonte: CBICDADOS (2021)

Segundo SNIC (2008), dada a sua representação no mundo, a indústria cimenteira está espalhada em quase todos os países, e a produção global mudou significativamente graças à integração e cooperação entre as empresas, sendo que nos países emergentes apresenta uma concentração da produção devido ao ciclo de desenvolvimento.

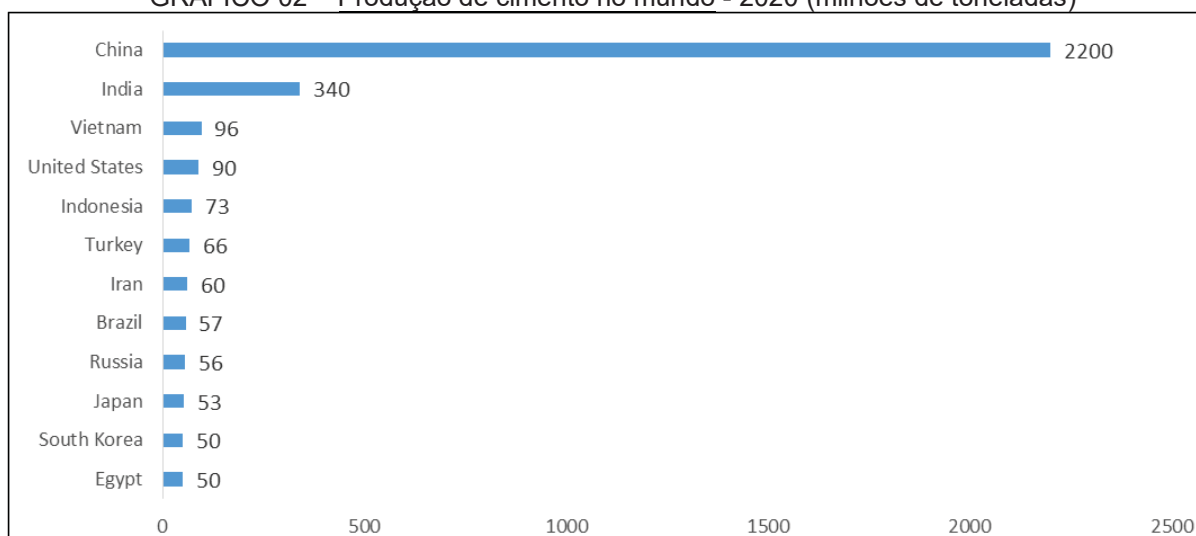
O continente asiático possui aproximadamente 77% de todo o cimento produzido no mundo. Nesse cenário, a China, principal produtor de cimento da Ásia e do mundo, vem crescendo ano a ano e em 2010 produziu 56% de todo o cimento mundial (ABCP, 2002).

A Índia, no que lhe concerne, detém a segunda maior população do mundo e corresponde entre 7% e 8% do consumo mundial de cimento, situando-se como o segundo maior mercado global no consumo (CIMENTO.ORG, 2021).

O Vietnã foi o terceiro maior produtor global em 2020, com 96 milhões de toneladas métricas. O investimento em infraestrutura e a expansão da indústria imobiliária contribuíram para o aumento do consumo de cimento nos últimos anos. No entanto, a taxa de urbanização do Vietnã ainda é muito baixa, de aproximadamente 38% em 2018, o que significa que o consumo de cimento não está atualmente no seu pico (CEMBUREAU, 2016).

Em 2013, o Brasil estava na 5ª posição dos maiores produtores de cimento no mundo com 70 milhões de toneladas, ficando atrás de China, Índia, Estados Unidos e Irã. Entretanto, no ano de 2020 caiu para 8ª posição, gráfico 02, sendo que o consumo de cimento no país foi de 69,3 milhões de toneladas, posicionando-o como o quarto maior consumidor de cimento no mundo (ABCP, 2002).

GRÁFICO 02 – Produção de cimento no mundo - 2020 (milhões de toneladas)



Fonte: Cimento.Org (2021)

2.3 PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO

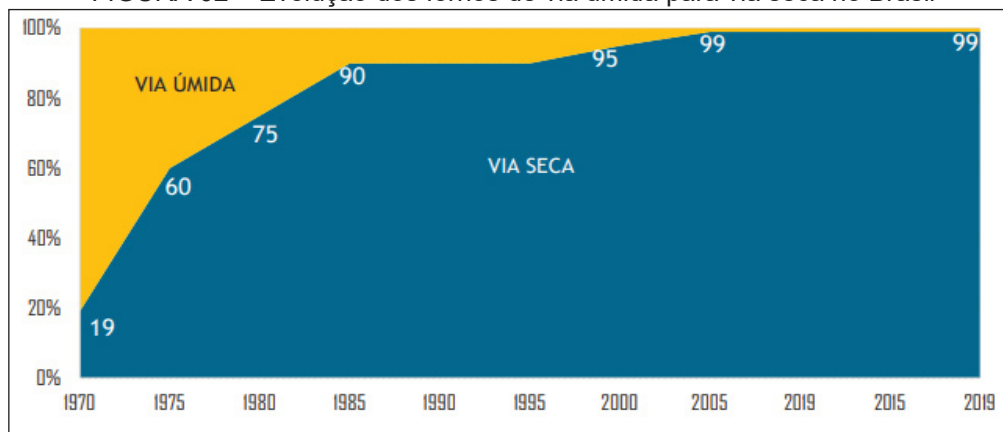
Para serem utilizadas no processo de fabricação do cimento Portland as matérias-primas devem ser reconhecidas pela ABNT, órgão responsável por estabelecer padrões de referência, sendo que os principais materiais utilizados são o calcário, argila, minério de ferro e gesso. Para tal, são submetidas a uma série de análises e verificações, a fim de obter a composição química desejada e, assim, atender aos requisitos nacionais de qualidade do produto (KIHARA; MARCIANO JR, 1995).

São reconhecidos dois principais métodos de produção de cimento, o processo via úmida e o processo via seca. Importante citar que, durante o período dos anos 70 e 80, a indústria cimenteira brasileira foi uma das primeiras a substituir quase a totalidade dos fornos que utilizavam o processo via úmida por via seca, prática foi posteriormente adotada no resto do mundo

Conforme o SNIC (2021), 99% do cimento Portland brasileiro é produzido em processo a seco. A figura 02 apresenta a evolução da transformação no processo de fabricação do cimento no Brasil. No processo via seca, mais moderno e utilizado em maior escala, após britado grosseiramente, o material é direcionado ao moinho denominado giratório ou de martelos, sem adição de água e posteriormente é novamente fragmentado em moinhos tubulares. Os gases quentes provenientes da combustão no forno são aproveitados na moagem para a secagem da matéria-prima,

sendo que nessa sequência, as correções da composição são realizadas (SHREVE, 1980).

FIGURA 02 – Evolução dos fornos de via úmida para via seca no Brasil

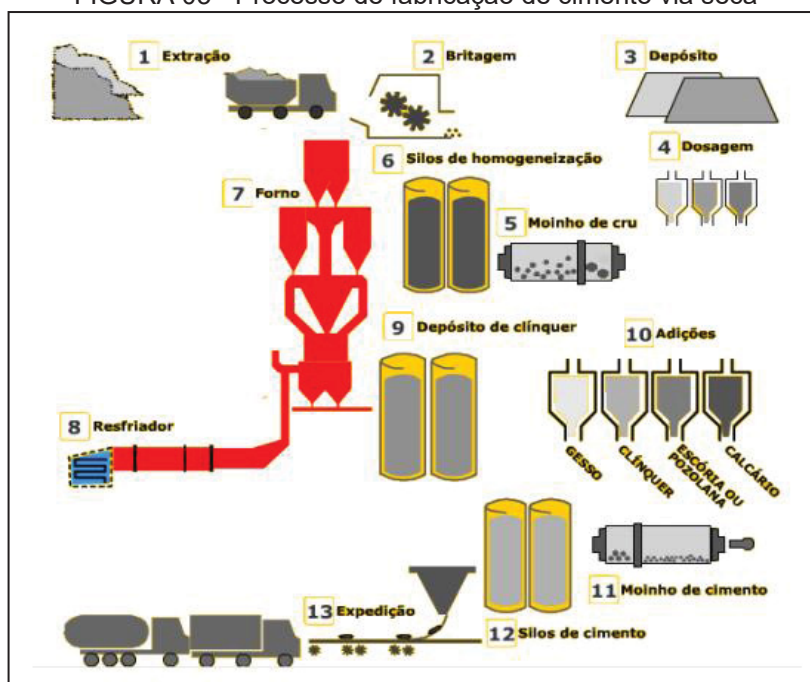


Fonte: SNIC (2021).

As principais vantagens do processo de fabricação de cimento via seca são a menor emissão de poluentes, além de requerer menor consumo de energia no forno, reduzindo os custos da empresa (ABCP, 2002).

Assim, este trabalho irá se limitar a discutir e apresentar o processo de produção do cimento via seca. Segundo a ABCP (2002), o processo de fabricação do cimento Portland via seca envolve as etapas apresentadas esquematicamente na figura 03.

FIGURA 03 - Processo de fabricação de cimento via seca



Fonte: ABCP (2002).

Na sequência, cada uma destas etapas será explicada detalhadamente.

1) EXTRAÇÃO

O início do processo de fabricação se dá pela extração de calcário e argila de uma jazida subterrânea ou ao ar livre. Na figura 04 é apresentada a jazida de extração do calcário de uma cimenteira localizada em Campo Largo/PR.

FIGURA 04 – Jazida de calcário



Fonte: Campo Largo/Pr. (2018)

O calcário é o principal componente do cimento, este contribui entre 85% e 95% na fabricação do clínquer, principal composto do cimento. Conforme a sua origem, esse material pode possuir algumas impurezas como magnésio, alumínio, ferro, dentre outros.

2) BRITAGEM

A britagem é a redução do tamanho das partículas de calcário extraídas da mina. Esta etapa é importante porque quanto menor o tamanho da partícula, maior a área de contato, favorecendo a reação dentro do forno. A maioria das impurezas presentes no calcário também é removida nesta fase (SILVA, 1994).

3) DEPÓSITO E PRÉ HOMOGENEIZAÇÃO

Após a britagem, o calcário passa pelo processo de pré-homogeneização, em que ele é misturado para ficar homogêneo e é posteriormente armazenado.

4) DOSAGEM

Em uma pré-homogeneização secundária, o calcário é mesclado com a argila, assegurando a uniformidade da matéria-prima que será queimada no forno de clínquer (SILVA, 1994).

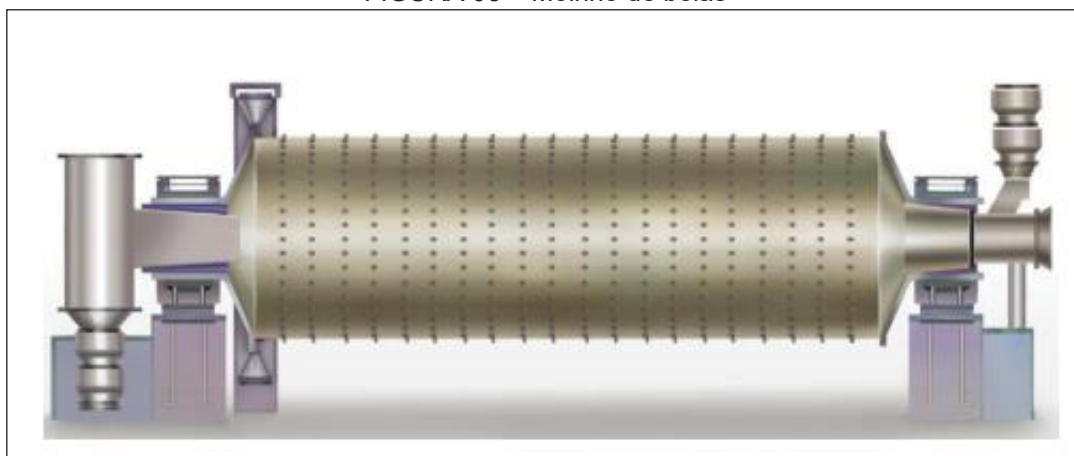
5) MOINHO DE CRU

A moagem e a mistura das matérias-primas ocorrem para atingir as proporções adequadas, sendo reduzidas a partículas entre 0,15 e 0,20 mm e armazenadas em silos de homogeneização, formando a farinha de cimento ou farinha crua.

Nesta etapa, o processo de moagem é realizado por meio do equipamento denominado moinho de bolas, que consiste em um cilindro horizontal rotativo, sendo o seu interior preenchido por bolas metálicas, conforme mostrado na figura 05.

Por meio da rotação e da movimentação destas bolas metálicas no interior do moinho, as partículas são fragmentadas usando-se de três mecanismos principais, sendo eles impacto, compressão e cisalhamento. Eles podem ocorrer isoladamente ou em conjunto (OLIVEIRA, 2012).

FIGURA 05 – Moinho de bolas



Fonte: PATFAB ENGINEERS (2010)

Atualmente, algumas fábricas possuem moinho de rolos verticais para moagem e a mistura das matérias-primas. Este equipamento possui algumas vantagens comparando com o moinho de bolas.

O custo e o consumo de energia é de 30 a 40% menor que o do moinho de bolas. Outra vantagem é o custo mais baixo na instalação, sendo que o moinho de rolos, figura 06, ocupa uma área 50% menor que a do moinho de bolas (ZENITH, 2021).

FIGURA 06 – Moinho de rolos vertical



Fonte: Autor (2022)

6) SILOS DE HOMOGENEIZAÇÃO

A farinha crua proveniente da moagem é homogeneizada em silos verticais pelo processo pneumático ou gravidade.

7) FORNO

A definição do forno de cimento é a de um grande reator químico cilíndrico, ligeiramente inclinado, com movimento rotativo, o qual possui na extremidade mais baixa a entrada dos gases quentes, gerados na queima do combustível primário (CEMBUREAU, 2016).

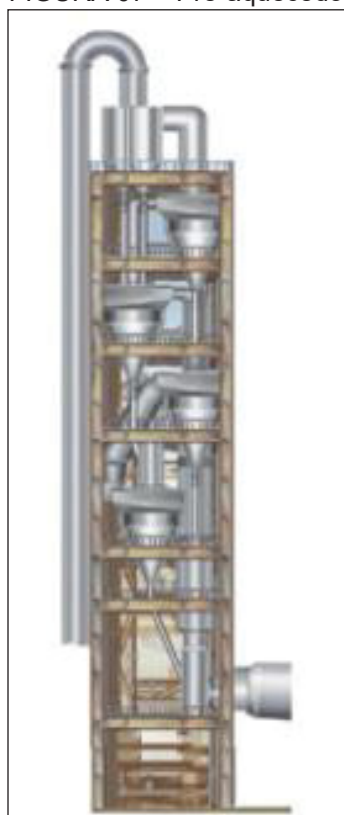
Os fornos de cimento têm um leve ângulo de inclinação combinado ao lento movimento de rotação (de 0,5 a 4,0 rpm) permite que o material percorra o cilindro à medida que desliza pelas paredes que são revestidas de material refratário que protege a carcaça do forno das altas temperaturas e isolantes térmicos que conservam o calor no seu interior (SNIC, 2021).

Sendo cilindros horizontais de 100 até 160 metros de comprimento, com diâmetros entre 3,5 e 7 metros podendo variar, conforme o fabricante e as especificações da indústria solicitante.

Em um processo de produção, as etapas que ocorrem no forno se subdividem em pré-aquecimento, pré-calcinação e a clinquerização. No pré-aquecimento (figura 07) a farinha segue para a torre de ciclone, pré-aquecida antes de entrar no forno rotativo

Nesta etapa, entra em contato com os gases de exaustão do forno rotativo que se movem em contracorrente com a farinha. Esta etapa do processo é responsável por remover a umidade restante na farinha.

FIGURA 07 – Pré-aquecedor



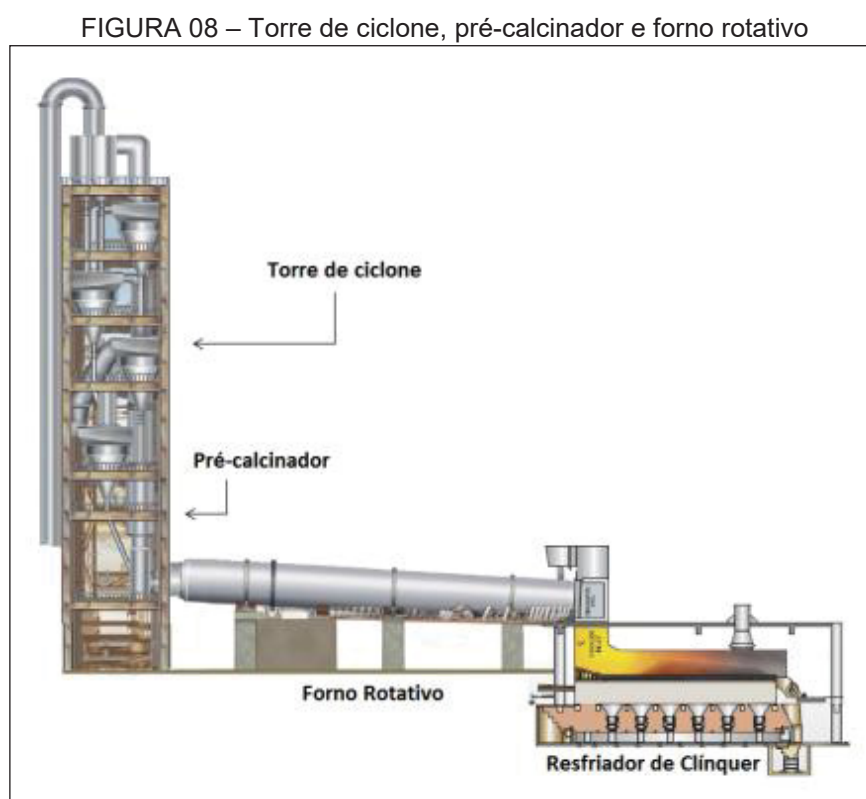
Fonte: FLSmidth (2022)

A etapa seguinte, denominada pré-calcinação, consiste em uma câmara de combustão na qual o material segue a uma temperatura em torno de 800 °C. Nesta

câmara ocorre cerca de 90% da reação de calcinação, que consiste na decomposição do calcário em óxido de cálcio.

A temperatura é mantida constante pela incorporação de combustível à câmara. A etapa de pré-calcinação permite a combustão de substâncias com poder calorífico inferior ao permitido para os fornos rotativos, aumentando a utilização de combustíveis alternativos de baixo poder calorífico e poupa o combustível utilizado no forno.

Na sequência, a figura 08 apresenta o conjunto do pré-aquecedor, torre de ciclone, pré-calcinador, forno rotativo de clínquer e o resfriador. As fábricas de cimento no Brasil utilizam em seu processo o pré-aquecedor e o pré-calcinador, isto porque contribui diretamente para o menor gasto de energia no processo de calcinação (SNIC, 2021).



Fonte: FLSmidth (2022)

Na próxima etapa de produção, chamada de clínquerização, a farinha crua é calcinada até fusão incipiente, em um forno rotativo, como mostra a figura 8, a uma temperatura de aproximadamente de 1450°. O material que entra em seu interior avança lentamente no sentido da queima, levando de 10 a 20 minutos neste processo (ABCP, 2002).

Os combustíveis convencionais usados no forno rotativo para a fabricação do clínquer são principalmente os combustíveis fósseis sólidos, combustíveis fósseis líquidos e os combustíveis alternativos.

Sendo assim, o forno rotativo em sua plena capacidade é alimentado basicamente de matéria-prima, combustível e ar.

No processo de clinquerização, os combustíveis utilizados para gerar calor e potência térmica e energética nos fornos devem possuir um rigoroso controle de qualidade e atendimento aos parâmetros.

A qualidade do material afeta diretamente produção do clínquer, manutenções no forno e diretamente relacionada com os parâmetros técnicos constituintes dos combustíveis (LOISON; FOCH; BOYER, 1989).

8) RESFRIADOR

As pelotas incandescentes, são resfriadas bruscamente em arrefecedores pneumáticos que baixam a temperatura entre 50 °C e 200 °C (dependendo do tipo de resfriador).

Ao final do processo na saída do resfriador, há um britador de martelos que diminui a granulometria do clínquer a média de duas polegadas, desta forma, facilita a estocagem e manuseio.

Após passagem pelo britador, o clínquer é conduzido por meio sistema transportador até o depósito de clínquer ou silo de embarque. A figura 09 mostra o clínquer ao final do processo.

FIGURA 09 – Clínquer



Fonte: Autor (2022)

9) DEPÓSITO DE CLÍNQUER

O clínquer produzido e resfriado será armazenado em depósitos ou silos específicos onde posteriormente com adições será utilizado na moagem de cimento.

10) ADIÇÕES

Esta etapa é referente às adições de substâncias que determinam os diversos tipos de cimento Portland, os aditivos utilizados são o gesso, a escória e o calcário sendo armazenados em silos separados. Destes, o gesso é o único aditivo que está sempre presente na mistura (BERNARDO, 2009).

11) MOINHO DE CIMENTO

No moinho de cimento é realizada a moagem final resultando no cimento como conhecido. Após esta etapa o cimento é transportado para os silos de armazenagem via um sistema pneumático/elevadores de caçambas/correias transportadoras. Em paralelo, são realizados os ensaios finais de qualidade e sua certificação do produto (ECRA, 2022).

12) SILOS DE CIMENTO E EXPEDIÇÃO

Dos silos de armazenagem, o cimento passa para a estação de empacotamento ou para expedição via granel. Em seu processo de expedição, o cimento é comercializado de duas maneiras, a granel ou em sacos de 50 kg.

O ensacamento é feito em máquinas especiais que, automaticamente, enchem os sacos e os liberam assim que atingem o peso especificado. A embalagem é feita em papel kraft, garantindo prático manuseio pelo consumidor (ABCP, 2012).

2.4 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO BRASIL

A produção de cimento é uma atividade que, independentemente do combustível utilizado, apresentará alto potencial poluidor e contribuirá de 5% a 7% nas emissões totais de dióxido de carbono (CO_2) do mundo (BLUMENSCHNEIN, 2012).

A emissão ocorre principalmente pelo processo de formação do clínquer, durante a calcinação, em que o carbonato de cálcio (CaCO_3) é convertido em óxido

de cálcio (CaO), liberando gás carbônico. Aliado ao fato, soma-se ainda o CO₂ liberado pela queima dos combustíveis no forno rotativo (UWASU, 2014).

No Brasil, cabe ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a responsabilidade de apresentar a legislação relativa ao meio ambiente. Os instrumentos usados para tal fim são as resoluções.

- A resolução CONAMA n.º 237 cita que indústrias de fabricação e elaboração de produtos minerais não metálicos tais como: produção de material cerâmico, cimento, gesso, amianto e vidro, entre outros estão sujeitas ao licenciamento ambiental.

- A resolução CONAMA n.º 436 estabeleceu os limites máximos de emissões de poluentes do ar. Nas fontes fixas, com potência menor do que 70 de megawatt (MW), o limite de emissão é 1.800 g de dióxido de enxofre (SO₂) por calorías de unidade de massa (kcal/kg). Para fontes fixas, com potência maior do que 70 MW, o limite de emissão é 2.700 g SO₂ /kcal.

- A Resolução CONAMA n.º 382 trata dos limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes da indústria do cimento e não estabelece limite de emissão para os óxidos de enxofre (SO_x), em função das características locais da área de influência da fonte poluidora, a qualidade do ar.

O órgão ambiental licenciador local poderá estabelecer limites de emissão mais restritivos, inclusive considerando a alternativa de utilização de combustíveis com menor potencial poluidor.

No estado do Paraná, SEMA 016/2014-PR estabelece os limites de emissão de SO₂ para processos de geração de calor ou energia. Para fornos de produção de clínquer, a mesma Resolução estabelece o limite de entre 400 e 1.200 mg SO₂ / metro cúbico normal (Nm³) (dependendo do teor de SO₃ na farinha alimentada ao forno), com 7% de oxigênio (O₂) livre nos gases de escape em base seca.

O quadro 02 apresenta um resumo dos limites de emissão de poluentes atmosféricos gerados na indústria do cimento Portland.

QUADRO 02 – Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processo de produção de cimento

Equipamentos	MP*	Óxidos de nitrogênio (como NO ₂)
Fornos de clínquer sem coprocessamento	50 ^{(1) (4)}	1000 ^{(3) (4)}
Fornos de clínquer com coprocessamento	50 ^{(1) (4)}	800 ^{(3) (4)}
Resfriadores de clínquer	50	NA
Moinhos de cimento	50	NA
Secadores de escória e de areia	50 ⁽²⁾	NA
Ensacadeiras	50	NA
* os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e com o teor de oxigênio definido para cada fonte. (1) teor de oxigênio - 11% (2) teor de oxigênio - 18% (3) teor de oxigênio - 10% (4) Para fornos de clínquer via úmida e via semiúmida (vertical) os valores de emissão serão definidos pelo órgão ambiental licenciador.		

Fonte: Resolução CONAMA 436/11

2.5 MATRIZ ENERGÉTICA E COMBUSTÍVEIS

Conforme o EPE (2015), a energia vem de um conjunto de fontes renováveis ou não renováveis que formam o que é denominado de matriz energética, formada por fontes.

No processo de fabricação do cimento, o uso de energia é significativo, principalmente a energia da queima de combustíveis, isto porque, necessita altas temperaturas para realizar a transformação da matéria-prima até o produto acabado (MADLOOL et al., 2013). Acima de 80% da energia utilizada, é referente ao consumo de energia térmica durante a queima dos combustíveis para a produção do clínquer (EPE, 2013).

Segundo o SNIC (2021), metade de todo o custo direto da produção de uma cimenteira corresponde às despesas com combustíveis e energia elétrica. A representatividade poderá variar conforme os custos dos combustíveis.

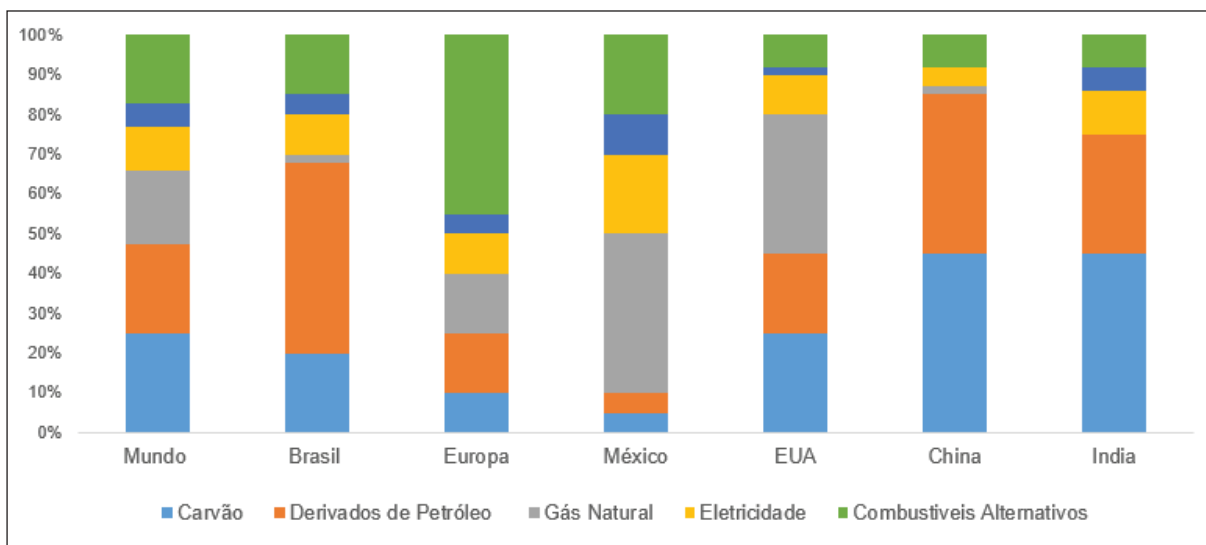
No ano de 2021 a energia térmica utilizada durante o processo de queima foi responsável por cerca de 35% a 45% do custo de produção de cimento.

Atualmente, os combustíveis que alimentam os fornos das cimenteiras são, na maioria das vezes, oriundos de fontes não renováveis, como os derivados do petróleo, isto devido ao seu elevado poder calorífico.

Porém, pesquisas na área evidenciam que a utilização de combustíveis alternativos promove uma redução na emissão de poluentes, entre eles o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de azoto ou dióxido de nitrogênio (NO_2) e o dióxido de enxofre (SO_2), dependendo do tipo do material inserido no forno para combustão, além de ajudar a reduzir o passivo ambiental que esses resíduos geram quando descartados em locais inadequados.

Assim, a matriz energética das cimenteiras no mundo todo vem passando por transformações (CHATZIARAS, 2016; PRIES, 2016), conforme mostra logo abaixo o gráfico 03.

GRÁFICO 03 - Matriz energética – cimenteiras do mundo



Fonte: Atlas publicado pela Eficiência Energética Brasil (EPE, 2020).

Pode-se observar que enquanto o gás natural é um dos combustíveis menos utilizados no setor de cimento no Brasil, sendo utilizado em unidades com proximidade ao gasoduto e desta forma havendo competitividade de custos. Por outro lado, desempenha um papel importante na Argentina, nos Estados Unidos e no México.

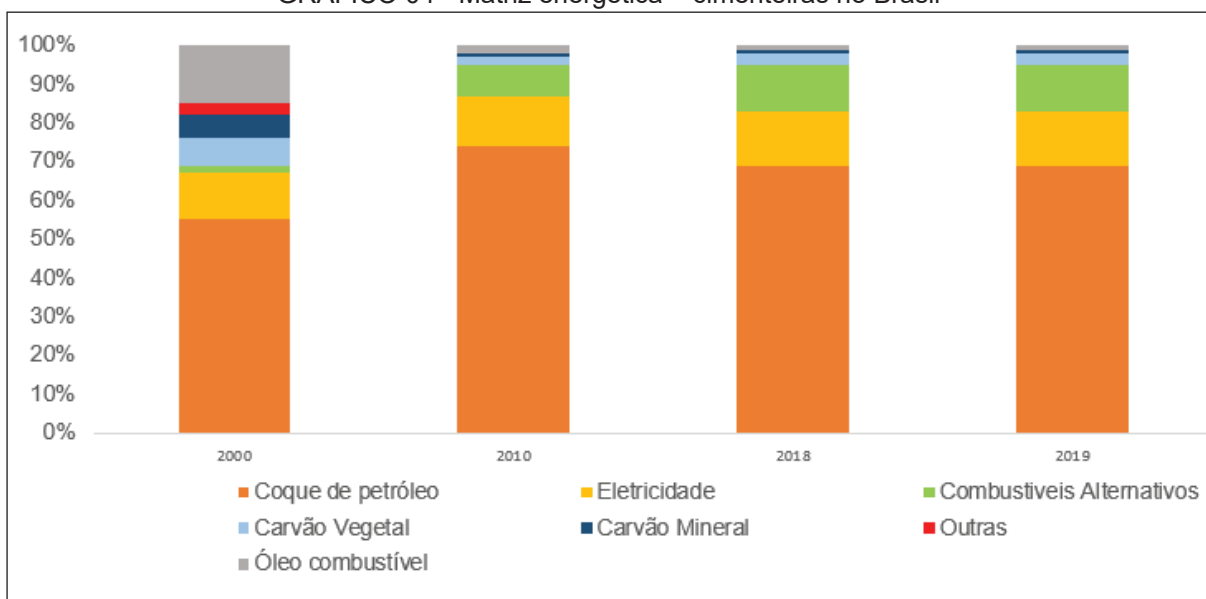
A matriz energética do México é a que apresenta menor dependência direta dos derivados de petróleo, porém, atualmente, 73,3% da geração de eletricidade usada depende de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo, carvão e diesel).

No período de 2010 a 2011 a Holanda substituiu 83% dos combustíveis convencionais por resíduos e a Noruega 60%, devido aos testes positivos realizados e da possibilidade de melhora nos custos das fábricas (SCHWENCK, 2017).

A Alemanha, em 2016, alcançou quase 61% de coprocessamento médio anual de todas as fábricas de cimento do país e a fábrica de cimento alemã Schwenck obteve 93%, substituição energética do combustível carvão mineral por resíduos (SCHWENCK, 2017).

A indústria cimenteira brasileira, com intuito de reduzir os custos da produção do cimento, tem adotado técnicas com a admissão de combustíveis alternativos de fontes renováveis, em que parte dos combustíveis fósseis é substituída por resíduos industriais, resíduos urbanos, biomassa, pneus e outros, como demonstra o gráfico 04.

GRÁFICO 04 - Matriz energética – cimenteiras no Brasil



Fonte: Atlas publicado pela Eficiência Energética Brasil (EPE, 2020).

No Brasil, há atualmente 24 grupos cimenteiros, com aproximadamente 100 fábricas, mas apenas 38 fábricas são licenciadas para coprocessamento, a baixa quantidade de unidades licenciadas, deve aos motivos: a viabilidade do coprocessamento para algumas fábricas, a disponibilidade do combustível e ao longo processo de homologação (RODRIGUES, 2017).

Em 2016, o Brasil coprocessou 1,6 milhão de toneladas de resíduos, que representaram cerca de 10% de substituição térmica total dos combustíveis

convencionais usados nos fornos, considerando o potencial de todas as fábricas licenciadas para coprocessamento de resíduos no Brasil.

Segundo avaliação da ABCP, a capacidade de coprocessamento em massa é de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas por ano (ABCP, 2016).

Para uma melhor compreensão, e posterior discussão, serão apresentados na sequência os principais combustíveis utilizados pela indústria cimenteira brasileira, sendo estes os combustíveis fósseis sólidos, combustíveis fósseis líquidos e os combustíveis alternativos.

2.5.1 Combustíveis fósseis sólidos

- a) **Carvão mineral** - é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares, conforme o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002). Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar e com a decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico solidificam-se, perdendo oxigênio e hidrogênio, e se enriquecem em carbono, durante um processo denominado carbonificação.
- b) **Carvão vegetal** - mostra como alternativa de combustível para a produção de cimento, não somente por suas características energéticas e físico-químicas serem semelhantes ao coque e ao carvão mineral, mas principalmente pelo potencial redução de emissões de dióxido de carbono CO₂ (ABCP, 2016).
- c) **Coque verde de petróleo (CVP)** - Em princípio, todos os tipos de coque de petróleo podem ser usados como combustível nos fornos de cimento. O coque de petróleo está entre os combustíveis utilizados para aquecer os fornos de clínquerização da indústria de cimento (PETROBRAS, 2019). Existem dois tipos principais de Coque Verde de Petróleo: o tipo esponja e o tipo agulha. O primeiro é obtido a partir de óleos residuais de destilação a vácuo, em que a carga da unidade pode também ser transformada em óleos combustíveis e asfalto. O segundo é obtido a partir de óleos aromáticos pesados, normalmente gerados em processo de conversão térmica

(alcatrão de craqueamento térmico) e/ou Craqueamento Catalítico Fluido (FCC).

Na indústria cimenteira brasileira, conforme EPE (2020) o coque tipo agulha é o mais utilizado, separado em três categorias com diferentes qualidades:

Coque Alto Enxofre (ATE), com o preço de comercialização mais competitivo e mais recomendado para indústria cimenteira brasileira, sendo a sua origem no Golfo México e especificação técnica de enxofre acima de 6%;

Coque Médio Enxofre (MTE), onde a Venezuela é o país com o maior potencial de comercialização e a especificação técnica de enxofre entre 4,5% a 5,5%;

Coque de Baixo Enxofre (BTE), tem a sua origem no mercado brasileiro devido as características do petróleo e em sua especificação técnica contém teor de enxofre igual ou menor que 1,0% (PETROBRAS, 2019).

2.5.2 Combustíveis fósseis líquidos

Os principais combustíveis fósseis líquidos utilizados na matriz energética da indústria cimenteira são o óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo e outros derivados de petróleo (EPE, 2020).

De acordo com Silva (2016), os derivados de petróleo líquidos mais utilizados como combustíveis na indústria têm origem conforme segue:

- a) **Óleo diesel** - Mistura de etapas de destilação do petróleo, dentre elas a nafta pesada, o querosene, o diesel leve e pesado, gasóleo leve da unidade de craqueamento catalítico fluido (hidrotratado ou não), nafta pesada e gasóleos produzidos na unidade de coqueamento.
- b) **Óleo combustível** - produzido com o resíduo de vácuo com adição de óleo de corte, normalmente gasóleo, para acerto da viscosidade e demais propriedades específicas de cada tipo de óleo.

c) **Gás Natural** - é um combustível de origem fóssil, formado pela mistura de hidrocarbonetos leves que permanecem no estado gasoso nas condições ambientes de temperatura e pressão, entre os quais se destaca o metano (CH₄). A utilização de gás natural nas indústrias traz benefícios relevantes para o meio ambiente, pois sua

queima produz baixa emissão de poluentes, já que a combustão é mais limpa e eficiente.

2.5.3 O uso de combustíveis alternativos no coprocessamento na indústria cimenteira

Os combustíveis alternativos, com base em dados do SNIC (2021), representam em torno de 20% do consumo térmico do setor e crescem a cada dia, substituindo, majoritariamente, os combustíveis fósseis sólido entre 40% e 70% do consumo e os outros 10% outras fontes de combustíveis.

No Brasil a questão do desenvolvimento sustentável na indústria cimenteira começou a receber atenção por volta dos anos noventa. Suas diretrizes foram discutidas na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – ECO 1992 (Albuquerque et.al.,2007).

A indústria de cimento no Brasil, em cooperação com várias organizações internacionais, desenvolveu o *Technology Roadmap 2050*. O documento visa alcançar a neutralidade de carbono ao longo de toda a cadeia de valor – clínquer, coque, cimento, concreto, construção e (re) carbonatação. Propõe uma série de ações prioritárias, incluindo uma cooperação global da indústria de cimento, em busca de iniciativas para a substituição de sua matriz energética, adicionando combustíveis alternativos de menor potencial poluidor.

A utilização de combustíveis alternativos em substituição aos combustíveis fósseis não renováveis, como, por exemplo, o coque de petróleo, representa a principal alternativa do setor. Enquanto o uso de resíduos sólidos urbanos de 17% de substituição, com elevado conteúdo de biomassa em sua composição, também representa alto potencial (VISED; PECCHIO, 2019).

Segundo World Business Council (2005), o coprocessamento é definido como o resíduo selecionado com valor calorífico recuperável, que pode ser utilizado como combustível em fornos de cimento em substituição a alguns combustíveis fósseis convencionais. De acordo com a Associação Europeia de Cimento (CEMBUREAU, 2016), o coprocessamento oferece uma solução para reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e a dependência de combustíveis fósseis.

Portanto, o coprocessamento de resíduos proporciona uma substituição máxima de materiais não renováveis. No entanto, a decisão sobre qual tipo de resíduo pode ser usado em uma planta cimenteira não é respondida uniformemente.

Desta forma, os resíduos de combustíveis podem ser usados no lugar dos combustíveis fósseis, desde que não afetem negativamente a operação do sistema do forno. Sendo assim, deve ser analisado separadamente cada tipo de resíduo, avaliando aspectos de qualidade, produtividade, estabilidade do processo e o impacto nas emissões de clínquer para a atmosfera (FERRARI, 2021).

O coprocessamento na indústria do cimento é regido ao nível nacional pela Resolução CONAMA 264/99. Esta resolução regulamenta e proíbe o coprocessamento de agrotóxicos, explosivos, organoclorados, radioativos, resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde (BRASIL, 1999).

No estado do Paraná, as restrições previstas na resolução do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEMA) 76/2009 não permite o coprocessamento de resíduos que contenham concentrações de metais superiores aos valores listados no quadro 03, que apresenta os resíduos que podem ou não ser coprocessados (CEMA, 2009).

QUADRO 03 - Resíduos aptos e vetados para coprocessamento

Resíduos permitidos coprocessamento	Resíduos impedidos para coprocessamento
Pneus	Urbano ou domiciliar bruto
Borras oleosas, óleos usados	Serviços de saúde
Borras de tintas, solventes	Explosivos
Papel, papelão, celulose	Radioativos
Solos contaminados	Organoclorados, agrotóxicos e afins
Lodos de estação de tratamento de efluentes	Com elevadas concentrações de cloro ou enxofre
Urbano ou domiciliar tratado	Estado do Paraná resíduos com: Cd + hg + TI acima de 200 mg/Kg, Hg acima de 10 mg/kg, As + CO + Ni + Se + Te acima de 5.000 mg/kg, Se acima de 100 mg/kg, Cr acima de 5.000 mg/kg, Pb acima de 5.000 mg/kg, Lodo galvânico Lodo de ETE com PCS abaixo de 1.000 Kcal/kg
Biomassa (madeira, farinha de osso e gordura animal, moinha de carvão vegetal)	

Fonte: ABCP (2021)

Na sequência, são apresentados os principais combustíveis alternativos utilizados na indústria cimenteira em substituição aos combustíveis fósseis. Em geral, a indústria cimenteira classifica os combustíveis do coprocessamento em resíduos sólidos, resíduos líquidos e resíduos pastosos.

Resíduos sólidos são compostos por combustíveis derivados de resíduo, pneus triturados, biomassa, cavaco de madeira, lodos de esgoto, solos contaminados e triturados, em geral (plástico, papéis, EPI, entre outros).

Combustível Derivado de Resíduo (CDR) ou Resíduos sólidos urbanos são combustíveis alternativos elaborados a partir de resíduos sólidos e comercializados como alternativa aos combustíveis tradicionais, como em fornos industriais, caldeiras ou tratamento térmico de resíduos, de modo a não reduzir a eficiência ou a qualidade do processo produtivo. Nesse viés, o produto não causa maior impacto ambiental em relação ao impacto causado exclusivamente pelo uso de combustíveis convencionais (SIMA, 2020).

Sendo assim, os resíduos aceitos como CDR devem agregar valor ao forno de cimento, em termos do poder calorífico da parte orgânica e do valor material da parte mineral (CEMBUREAU, 2016).

Os pneus velhos sem uso e em descarte representam um risco ambiental em alguns aspectos, sendo, no entanto, classificados como resíduos não perigosos na lista de resíduos europeus. A ressalva importante, é que no cenário de incêndio, os depósitos de pneus abandonados constituem uma bomba, um incêndio sem precedentes e um grande risco para os moradores (CAPONERO, 2000).

Nos fornos de cimento é possível a introdução de pneus, que podem ser queimados por inteiro ou triturados em lascas para a queima. Consiste no processo simples de introduzir e adicionar resíduos à carga que vai alimentar o forno para queima, no entanto, essa prática exige muita atenção considerando-se que o processo de queima, a carga vai sendo aquecida, progressivamente, antes de chegar à zona de combustão (MOTTA, 2008).

Portanto, segundo Santi (2003), a queima de pneus e outros resíduos em fornos de cimento deve atender a normas específicas estabelecidas pelos órgãos ambientais responsáveis do local. Este procedimento se aplica às atividades de licenciamento para reaproveitamento de resíduos sólidos em forno rotativo de clínquer.

A biomassa vegetal pode ser queimada diretamente, gerando energia térmica, ou, por meio de processos de conversão específicos, pode ser transformada em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos (GOMES, 2011). Tal processo é denominado como torrefação, processo de conversão, no aquecimento da biomassa em uma atmosfera pobre em oxigênio em temperaturas de 200 °C a 300 °C.

Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), o coprocessamento utiliza resíduos como combustível alternativo ou matéria-prima. Os lodos de esgoto gerados após o processo de tratamento caracterizam-se por conter no mínimo 75% de água,

entretanto, podem atingir umidade menor que 25% e contém por possuírem poluentes com concentrações elevadas, em alguns casos nitrogênio, fósforo, metais pesados como chumbo, cromo, mercúrio e tálio, compostos orgânicos e agentes patológicos como vírus, parasitas e microrganismos como ovos de helmintos, protozoários e bactérias (TAO, 2012).

A exploração e o potencial do lodo de esgoto (ETE) estão relacionados ao grau de urbanização e gestão do saneamento e à proximidade das fontes de produção e as fábricas de cimento. No Brasil apenas 43% do seu esgoto é tratado.

Nos resíduos líquidos, o processo de “blendagem” que consiste em uma técnica que mistura diferentes materiais, é composto por solventes, óleos residuais/borras oleosas, Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), borra líquida, líquidos industriais (Indústrias Químicas e Metalúrgica) e líquidos fora de especificação (Indústria Petroquímica).

Os resíduos pastosos, utilizados como combustíveis para os fornos de clínquerização, são borra oleosa, lodo de efluentes industriais, lodo de indústrias de papel, resinas sólidas, borra de tinta seca, borra de solvente, fundo de destilação não bombeável, borra neutralizada (Indústrias Químicas) e bolo catalítico (Indústria Metalúrgica).

O quadro 04 mostra os exemplos dos resíduos com sua classificação como resíduos pastosos ou líquidos e sólidos.

QUADRO 04 - Classificação dos resíduos coprocessamento

Resíduo	Pastoso/Líquido	Sólido
Pneus inteiros ou picados		X
CDR - Combustível Derivado de Resíduo		X
Biomassa		X
Óleos residuais/borras oleosas	X	
Papel		X
Plástico		X
Solventes	X	
Farinha Animal (ração)		X
Lodo de indústrias de papel	X	
Lodos de ETE (23% umidade)		X
Lodos de ETE (acima de 40% de umidade)	X	

FONTE: SCHWENCK (2017)

De acordo com Penna (2022), presidente da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2021), a *Get the Numbers Right* (GNR), em 2014, o Brasil tinha 15% de uso de combustíveis alternativos.

No ano de 2019, houve um aumento do índice para 31%. Embora seja um número expressivo e sinalize uma aceleração no setor, ainda está longe da média dos países europeus, o qual é de 50%. Em países como Alemanha e Áustria chega a 90%.

Por fim, apesar dos aspectos ambientais e de sustentabilidade positivos, o uso dos combustíveis alternativos na indústria cimenteira enfrenta dificuldades e limitações, como por exemplo, a disponibilidade dos combustíveis que alimentam o forno e limitações ligadas à segurança ambiental.

2.5.4 Características dos combustíveis

A indústria cimenteira visa buscar o melhor resultado do processo de clínquerização, analisando os critérios dos combustíveis e maximizando o seu uso, considerando as normas e resoluções, mitigando os impactos na qualidade no cimento e nas emissões ambientais.

Portanto, as principais características dos combustíveis utilizados pela indústria cimenteira em seu processo de clínquerização são poder calorífico, teor de voláteis, teor de umidade, teor de cinzas e enxofre.

O Poder Calorífico corresponde a quantidade de energia liberada pelo combustível no processo de combustão. É medido em calorias por unidade de massa (cal/g ou kcal/kg). Pode ser classificado em poder calorífico superior (PCS) ou inferior (PCI), sendo que a diferença entre eles equivale à quantidade de calor necessária para vaporizar a umidade contida no combustível (CARVALHO, 2022).

As análises visam determinar a qualidade e o poder calorífico, aplicável a todos os combustíveis que serão inseridos no forno.

O Teor de Voláteis apresenta um importante papel da ignição e nas etapas iniciais da combustão. Quanto maior o teor de materiais voláteis, mais fácil e rápido o combustível é consumido durante a combustão e maior seu poder de ignição (BIZZO, 2003).

De acordo com o combustível, o teor de materiais voláteis oscila e a característica mínima é definida: coque de petróleo >10%, carvão mineral >30%,

biomassa >3%, pneus >50% e no Combustível Derivado de Resíduos (CDR) >40%. Nota-se que os baixos níveis de materiais voláteis exigem maior moagem do combustível para que ele obtenha os requisitos para combustão (LORENZONI, 2019).

O Teor de umidade é de vital importância para a eficiência do combustível nos fornos. Pode ser expresso tanto em base úmida (BU) quanto em base seca (BS). O teor de umidade em base úmida é a relação entre a massa de água e a massa total do produto. É apontado como um dos fatores de maior influência, pois tem impacto significativo e direto na geração de calor. Por consequência, altos teores de umidade comprometem a temperatura no interior do forno, em virtude da energia requerida para vaporização da água presente no combustível, sendo que quanto maior a umidade do combustível, maior será a energia necessária para secá-lo.

Outro ponto importante é que os combustíveis precisam ser moídos antes de entrarem no forno, pois os altos teores de umidade podem dificultar o processo de moagem.

O Teor de Cinzas é constituído por materiais minerais que não fazem parte do processo de combustão e, sendo assim, quanto menor o teor de cinzas, maior o poder calorífico. O teor de cinzas não altera somente o potencial energético, mas também influencia nos custos do processo, isso porque altos teores de cinzas podem diminuir a vida útil dos equipamentos, provocando corrosões, aumentando a demanda de manutenções (HANSTED, 2016).

O Enxofre, em relação à quantidade total que se pode utilizar em forno de cimento, depende de uma série de fatores e deve sempre ser avaliada. Usualmente, o enxofre aportado via matérias-primas não pode ser modificado, uma vez que é característico das jazidas onde os minerais constituintes são extraídos.

Desta forma, a seleção de combustíveis torna-se extremamente importante, pois se torna a principal variável de ajuste da quantidade de enxofre a ser colocada no forno. O teor de enxofre nos combustíveis fósseis é um fator determinante em sua qualidade, isto ocorre porque se observa que o teor de dióxido de enxofre (SO_2) influencia no preço dos combustíveis fósseis e derivados de petróleo (FILGUEIRAS, 2018).

Portanto, no mercado global, os derivados de petróleo com grau mais leve são mais valiosos que os pesados e determina também o índice de moabilidade *Hardgrove Grindability Index* (HGI), índice de moabilidade do coque de petróleo e carvão. O coque de petróleo é normalmente fornecido com uma faixa entre de 30% e 100% de

HGI, sendo que quanto maior o HGI, menor será a resistência à moabilidade e de origem mais leve (BORGES, 2003).

Conforme a American Petroleum Institute (API), o grau do petróleo é uma escala aplicada na classificação do óleo bruto de petróleo como: leve, médio, pesado ou extrapesado. Desse modo, o grau API é importante e a classificação do tipo de petróleo pode ser: leve: API > 31,1; médio: API entre 22,3 e 31,1; pesado: API < 22,3 ou extrapesado: API < 10,0.

De acordo com Bhatti (1995), as razões para a escolha de um combustível partem de uma análise entre os elementos: custos e eficiência energética e qualidade e impactos ambientais, em que os custos devem incluir a despesa para aquisição do combustível e as despesas do processo de queima com suas consequências. Em geral, as alternativas de custos mais competitivas para a indústria do cimento do que outras fontes energéticas são os combustíveis de alto teor de enxofre que, normalmente, apresentam restrição ao seu uso em diversos outros tipos de processos.

O quadro 05 consolida as principais características dos combustíveis sólidos, combustíveis líquidos e os combustíveis alternativos usados no coprocessamento, considerando o poder calorífico, umidade, voláteis, cinzas, enxofre e HGI.

QUADRO 05 - Características dos combustíveis

Combustível	Poder calorífico kcal/kg	Teor de voláteis	Teor de umidade	Teor de cinza	Enxofre
Coque de petróleo	8200 -8500	10 - 13	08 - 10	0,3 – 0,7	< 5,5
Carvão mineral	6700 -6900	40 - 50	10 - 16	5 - 10	< 1
Carvão vegetal	6700 -6900	40 - 50	10 - 16	5 - 10	< 1
Biomassa	3.317	-	-	-	-
Óleos residuais	8.218	-	-	-	-
Pneus	7.000	-	-	-	-
Papel	4.785	-	-	-	-
Plástico	5.306	-	-	-	-
Solventes	5.861	-	-	-	-
Óleo Diesel	10.577	-	-	-	-
CDR	5.474	-	-	-	-
Farinha Animal	5.457	-	-	-	-
Lodo biológico de indústrias de papel	4.808	-	-	-	-
Lodos de ETE (23% umidade)	2.632	-	-	-	-

Fonte: EPE (2010)

3 METODOLOGIA

Este capítulo é destinado à apresentação das características da pesquisa, a fim de classificá-la conforme os aspectos metodológicos abordados. Tais aspectos referem-se à sua natureza, forma de abordagem e tipo de investigação. Também serão apresentados os procedimentos adotados para sua realização.

3.1 CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA

O presente estudo desenvolve uma pesquisa exploratória visando atingir, como objetivo geral, propor um modelo matemático para a definição da matriz energética capaz de auxiliar na tomada de decisão de escolha dos combustíveis atendendo aos parâmetros de produção com a função objetivo de minimizar os custos e de promover o desenvolvimento sustentável.

Para tal, o método utilizado será uma combinação de estudo de caso associado à programação linear e o método simplex e GRG (Gradient Réduit Généralisé, Generalized Reduced Gradient ou Gradiente Reduzido Generalizado), tais escolhas serão justificadas ao longo do presente capítulo.

O método de estudos de caso é uma estratégia de pesquisa que foca em entender a dinâmica existente nas configurações individuais, podendo empregar múltiplos níveis de análise e múltiplos tipos de coletas de dados, permitindo uma análise empregada para objetivar uma compreensão holística do fenômeno (Corrar, 2004).

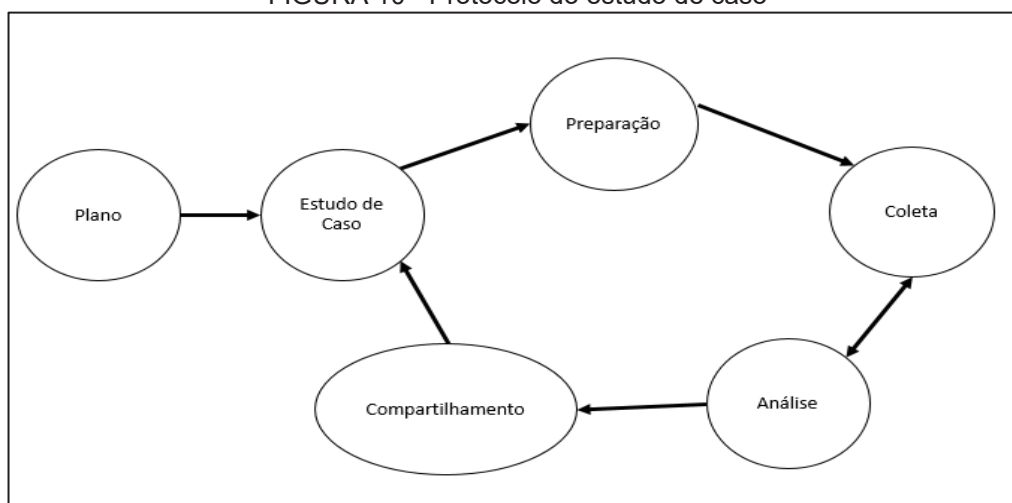
Um estudo de caso pode ter vários objetivos, como, por exemplo, testar, provar ou criar uma teoria, ou apenas descrever uma determinada situação e o objetivo (EISENHARD, 1989). Por fim, o objetivo desta pesquisa será testar, validar, desenvolver cenários de utilização do modelo um modelo matemático.

3.2 PROTOCOLO DE PESQUISA

A elaboração de um protocolo de pesquisa é recomendável para a melhoria da confiabilidade do trabalho elaborado (MELLO et al., 2012).

As etapas propostas por Yin (2015), para o desenvolvimento de um estudo de caso, são: plano, projeto, preparação, coleta, análise e compartilhamento (figura 10) e sendo essencial para a estruturação, organização das ideias e apresentação dos resultados.

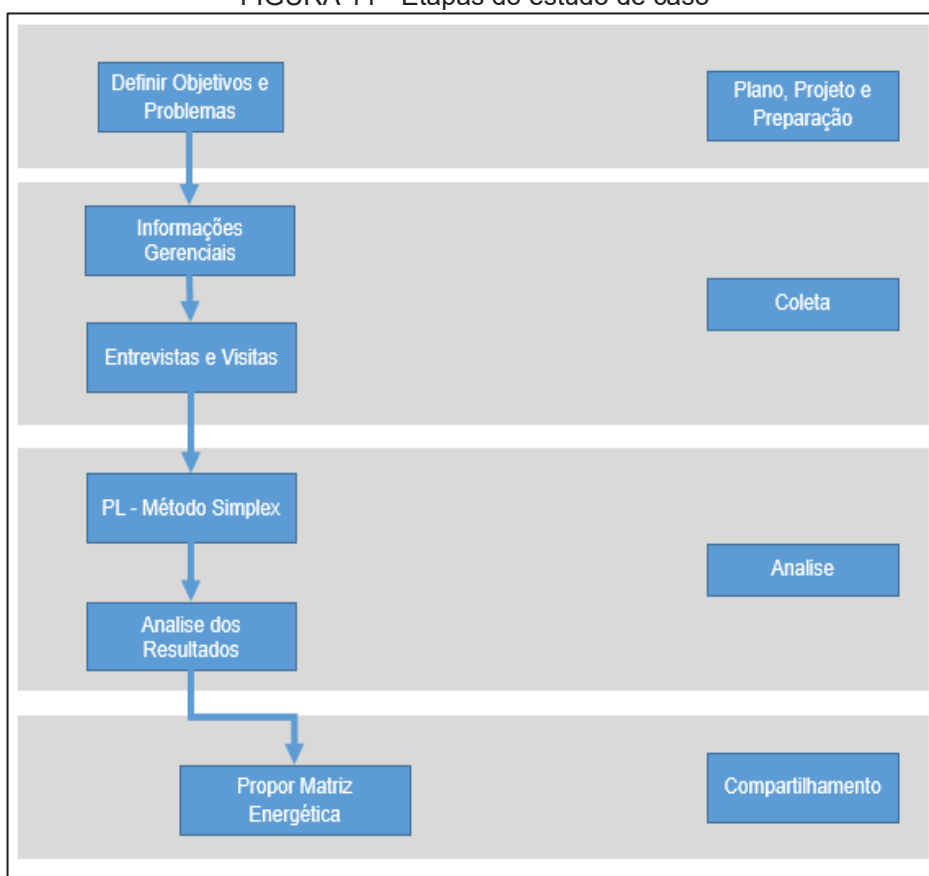
FIGURA 10 - Protocolo do estudo de caso



Fonte: Yin (2015)

Na sequência serão detalhadas cada uma das etapas (figura 11). Em relação às etapas de plano, projeto e preparação, estas buscam reconhecer o problema e o fundamento a ser analisado e desenvolvido durante a pesquisa. Tais etapas foram descritas e fundamentadas nos capítulos 1 e 2 da presente pesquisa.

FIGURA 11 - Etapas do estudo de caso



Fonte: Autor (2021)

A fase de coleta de dados se dará por meio das informações obtidas a partir da indústria cimenteira estudo de caso, através da análise de documentos, planilhas gerenciais de custos de produção e a análise dos custos dos combustíveis, bem como por observação direta na própria empresa. Com o intuito de complementar o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas entrevistas com membros da empresa, bem como com consultores independentes e colaboradores de outros grupos cimenteiros.

No que se refere à etapa de análise, será desenvolvido um modelo matemático visando minimizar os custos de produção do cimento entre os combustíveis pertencentes à matriz energética, confrontando com um grupo de características como disponibilidade de fornecimento, poder calorífico, custo do combustível e o custo energético (R\$/Gcal), entre outros.

Finalmente, em relação ao compartilhamento, este implica em apresentar os resultados e constatações ao encerramento da pesquisa através do documento em tela

3.3 AMBIENTE DA PESQUISA, POPULAÇÃO, AMOSTRA

Nesta pesquisa, o ambiente do estudo de caso é formado por uma indústria cimenteira, localizada na região metropolitana de Curitiba, na cidade de Balsa Nova/PR. A preferência pela empresa estudada fundamenta-se na necessidade apontada por ela, de um estudo da sua matriz energética capaz de orientar na otimização dos combustíveis e se deu pela conveniência e a facilidade de acesso às informações para elaboração do estudo.

A empresa, possui três fornos de cimentos e o forno denominado como “forno III” apresenta-se como o ambiente escolhido para estudo, devido a ser o equipamento com a tecnologia mais avançada e a menor restrição de tipos de combustíveis, sendo, portanto, uma amostragem intencional.

A determinação do número de Estudos de Caso depende dos requisitos para se efetivar a análise de falseabilidade dos argumentos da pesquisa (POPPER, 1983).

A falseabilidade ou irrefutabilidade é a propriedade de uma asserção, ideia, hipótese ou teoria de poder ser mostrada falsa, tendo sido um conceito proposto por Karl Popper nos anos 1930, como solução para o chamado “problema da indução”.

A análise da falseabilidade é uma forma crítica de reflexão, onde se busca verificar se um dado postulado teórico não é contrariado pelos fatos. No quadro 06, são apresentados as estratégias e características de Estudo de Caso.

QUADRO 06 - Definindo o número de estudos de caso

Estratégia	Tipo de Estudo de Caso	Característica
Múltiplos Estudos de Caso (≥ 2)	Representativo: seleção randômica	Busca menor tendenciosidade e maior refutabilidade na generalização
	Representativo: seleção estratificada	Busca generalização analítica para grupos específicos de uma dada população.
	Casos c/ variações máximas	Avalia a refutabilidade de um postulado teórico perante variações de um parâmetro
Estudo de Caso Único (≥ 1)	Casos extremos	Busca refutar teorias existentes ou obter novos postulados teóricos.
	Caso(s) longitudinal(is)	Busca a avaliação do comportamento de um fenômeno ao longo do tempo.
	Caso paradigmático	Busca de caso com inovações radicais com novos conceitos e princípios.

Fonte: Autor (2021)

De acordo com Yin (2015), o que justifica a utilização do método de estudo de caso único neste trabalho, é o fato de preencher as condições exigidas para testar os objetivos propostos no trabalho, se enquadrando como caso paradigmático.

3.4.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

O papel do modelo de Programação Linear (PL), na pesquisa, é minimizar a função objetivo associada ao custo da matriz de combustíveis, considerando a disponibilidade, as qualidades, e cumprindo as exigências e condições do forno.

De acordo com Prado (1999), a programação linear, envolve encontrar a solução ótima para um problema cujo modelo é representado por uma expressão linear, tornando a técnica simples e muito útil.

Segundo Andrade (2007), a programação linear é uma das técnicas mais utilizadas na solução de problemas. É um método de tomada de decisões que tem sido utilizado na busca de soluções para os problemas de otimização nas mais

diferentes atividades, como em indústrias, bancos e empresas de transporte, que têm gerado maiores lucros.

Portanto, trata-se de uma ferramenta da Pesquisa Operacional, que usa um modelo matemático composto por funções necessariamente lineares, tendo como objetivo, encontrar a melhor solução para os problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares, a grande aplicabilidade e simplicidade deve-se a linearidade do modelo (BARBOSA, 2014).

Na programação linear, a função objetivo é a maximização ou minimização de uma função linear, denominada de função objetivo, que respeita um sistema linear de igualdade ou desigualdade, denominadas de restrições (MARINS, 2011).

A programação linear usa um modelo matemático para descrever um problema em questão. O adjetivo linear significa que todas as funções matemáticas nesse modelo são necessariamente funções lineares. A palavra programação, nesse caso, não se refere à programação de computador; ela é, essencialmente, um sinônimo para planejamento. Portanto, a programação linear envolve o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis (MACHADO, 2016).

De fato, é um problema de otimização, ou seja, consiste na alocação de recursos limitados a atividades em competição, de forma ótima. Desta forma, segundo Colin (2007), o modelo de programação linear, possui três componentes básicos a ser analisados:

- Variáveis de decisão, que se deseja determinar;
- Uma ou um conjunto de restrições que a solução deve satisfazer;
- Função objetivo (meta) a ser otimizado (maximizado ou minimizado).

Especificamente, é possível tomar decisões mais eficazes e de estabelecer sistemas mais produtivos, por meio de informações mais completas realizam-se previsões cuidadosas de resultados e estimativas de risco com ferramentas atuais e técnicas de decisão (BERETTA, 2014).

Desta forma, à medida que novas restrições são adicionadas, torna-se difícil encontrar o ponto com o menor custo e o maior lucro.

Portanto, dada a similaridade do foco da pesquisa com o modelo conhecido como o problema de mistura, o método indicado para aplicação e resolução do estudo de caso foi pelo método simplex.

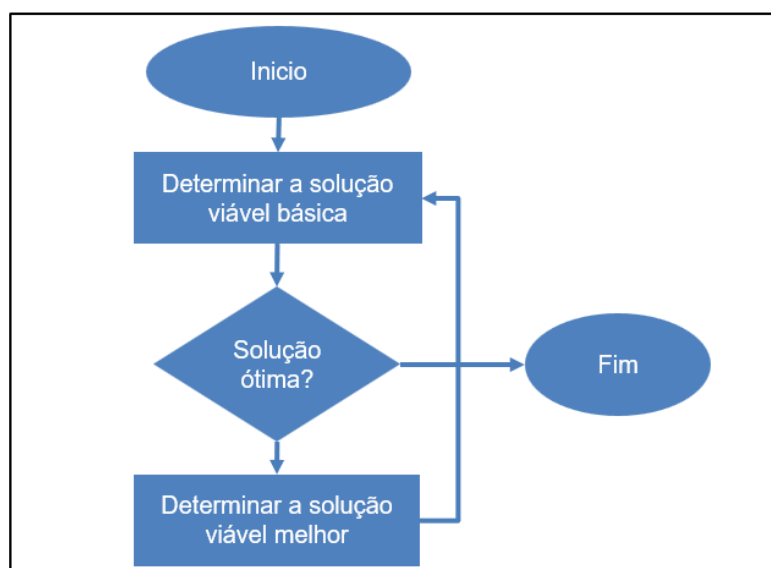
3.4.4 MÉTODO SIMPLEX E O PROBLEMA DA MISTURA

De acordo com Arenales (2015), deve-se aos pesquisadores liderados pelo norte americano George B. Dantzig, a origem do método chamado simplex que no início da década de 40 durante a Segunda Guerra Mundial, para apresentar subsídios técnicos para as tomadas de decisões que abrangessem a distribuição ótima de tropas e de suprimentos durante a batalha e como resultado desta pesquisa foi publicado posteriormente (Dantzig, 1963) e chamado Método Simplex.

Goldbarg e Luna (2005), o método simplex é caracterizado por um tipo de problema, a existência de um objetivo que pode ser explicitado em termos das variáveis de decisão do problema e a existência de restrições à aplicação dos recursos, tanto com relação às quantidades disponíveis quanto como relação à forma de emprego.

O método permite o melhoramento constante na resolução de problemas através da análise de um ponto extremo, ou vértice, buscando outras soluções eficazes, por meio de inversão de matrizes (OKIISHI, 2013), conforme a figura 12, fluxograma método simplex.

FIGURA 12 – Fluxograma Método Simplex



Fonte: De Almeida (2021)

No método simplex uma das aplicações mais antigas é o problema de mistura, que é típico da administração da produção. O objetivo em problemas de mistura é determinar, quanto se deve usar de cada componente para que a proporção dos ingredientes no produto acabado seja cumprida ao mínimo custo ou visando o máximo lucro possível (ARENALES et al., 2015).

Para Taha (2008), o problema da mistura visa minimizar o custo de um determinado produto obtido pela mistura de diversos componentes com diferentes composições (química e nutricional). Esse tipo de problema tem sido usado em diversas indústrias, tais como: alimentos, formulação de adubo, petróleo, siderurgia, metalurgia, mistura de carvões e minérios.

Belfiore e Fávero (2012) apresentam o problema da mistura visando encontrar a solução com o menor custo, ou maior lucro, a partir da combinação de ingredientes para a produção de um ou vários produtos.

PLOSKAS; SAMARAS (2014), o problema de programação linear (PPL), pode ser resolvido por métodos de resolução de sistemas de equações lineares.

Neste caso, transformar as inequações que representam as restrições em equações pela introdução das chamadas variáveis de folga.

As restrições de um PPL tratam da utilização de recursos que apresentam disponibilidades conhecidas. O uso deste recurso deve ser menor ou igual à sua disponibilidade, como mostrado nas seguintes relações:

$$\text{UTILIZAÇÃO} \leq \text{DISPONIBILIDADE}$$

ou

$$\text{UTILIZAÇÃO} + \text{FOLGA} = \text{DISPONIBILIDADE}$$

Em outras palavras, as condições de:

$$\text{se } \text{UTILIZAÇÃO} < \text{DISPONIBILIDADE} \in \text{FOLGA} > 0 \text{ e}$$

$$\text{se } \text{UTILIZAÇÃO} = \text{DISPONIBILIDADE} \in \text{FOLGA} = 0$$

A ferramenta Solver se encontra disponível no programa *Microsoft Excel*, amplamente conhecida que é utilizada para solução de problemas lineares e GRG para solução de problemas não-lineares e que permite resolver problemas de otimização descritos através de equações escritas nas células da planilha.

No solver existem três métodos de otimização sendo conhecido como: o LP Simplex, o GRG Não Linear e o Evolutionary.

No método LP Simplex é utilizado em problemas de otimização linear. O método GRG Não Linear é usado para problemas do tipo não linear e o método Evolutionary é utilizado em problemas do tipo não linear complexos.

O método ficou conhecido como Método do Gradiente Reduzido Generalizado e abreviado como GRG (SACOMAN, 2020).

Neste método considera-se o problema geral de programação não-linear, a formulação é geral e pode representar todos os problemas de programação não linear. Isto é possível, porque as restrições de desigualdade sempre podem ser transformadas em restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga (CAMPANA, 2022).

De acordo com Köksoy e Yalcinoz (2006), GRG é o método mais difundido para a resolução de problemas múltiplas devido à sua facilidade de implementação e ao fato de seu algoritmo estar disponível gratuitamente, pois o direito de uso comercial foi adquirido pela Frontline (www.solver.com), então em colaboração com a Microsoft, foi integrado à planilha desde 2010.

O método GRG não linear na sua forma mais básica é o método de resolução que analisa o gradiente ou a inclinação da função objetivo à medida que os valores de entrada (ou variáveis de decisão) mudam e determina que se atingiu uma solução ótima quando as derivadas parciais são iguais a zero (VALENTE, 2020).

Sendo utilizado, *software* de otimização e resolução dos problemas, que contribuem na assertividade nas operações que será apresentado abaixo.

3.4.4 SOFTWARES DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Alguns *softwares* são amplamente utilizados com o propósito de encontrar a solução ótima nas diversas áreas do conhecimento. Sendo assim, os *softwares* disponíveis no mercado para resolução de problemas de programação linear, destacam-se o EXCEL®, LINDO®, LINGO® e o Software R® que serão apresentados na sequência.

- Solver do Microsoft Excel: *software* de otimização que acompanha o Microsoft Excel. Na resolução de problemas de programação linear, não-linear e

inteira. Apresenta fortes limitações relativas ao número de variáveis, inteiros e restrições. As células da planilha são usadas para armazenar as variáveis, as restrições e a função objetivo do problema (MARINS, 2011).

- LINDO da Lindo Systems Inc.: é uma poderosa ferramenta para resolver problemas de otimização, minimizando ou maximizando a função objetivo de exercícios de programação linear. Apresenta um ambiente completo, sendo bastante veloz, e é comercializado em diversas versões, sendo que na versão de topo não apresenta limitações relativas ao número de restrições, inteiros ou variáveis. Pode ser utilizado em conjunto com aplicativos desenvolvidos em diversas linguagens de programação tais como Delphi, C ou Visual Basic (REHFELDT, 2009).

- LINGO da Lindo Systems Inc.: apresenta um ambiente completo para programação linear, não-linear e inteira. Como o LINDO é bastante veloz e comercializado em diversas versões, sendo que na versão de topo não apresenta limitações relativas ao número de restrições, inteiros ou variáveis. Também pode ser utilizado em conjunto com aplicativos desenvolvidos em diversas linguagens de programação tais como Delphi, C ou Visual Basic (WINSTON, 2004).

- Software R: é um eficiente instrumento computacional bastante utilizado na estatística e de domínio público existem uma série de pacotes que podem ser baixados gratuitamente da internet que complementam e ampliam a gama de aplicações do programa (GANDRUD, 2013).

Neste trabalho, a escolha pelo Solver do Microsoft Excel na resolução do problema se justifica por ser um dos *softwares* mais versáteis, livre e sem custos para a engenharia, sendo um dos mais difundidos e de fácil acesso no mercado.

3.5 TRABALHOS CORRELATOS

Nesta seção, trabalhos correlatos apresentam pesquisas que relacionam ao tema, modelo da indústria, método aplicado ou a matriz de combustíveis.

Até o momento publicados na literatura, foram identificados poucos trabalhos correlatos contendo similaridade de aplicação do setor da indústria cimenteira e,

portanto, foi realizado pesquisas relacionadas ao método e ou as ferramentas aplicadas.

Na indústria cimenteira, os trabalhos semelhantes, em geral, são para a minimização de custo e sobre a dosagem das matérias-primas, equipamentos e a otimização dos combustíveis ao longo do processo produtivo.

Alves et al (2016) em seu artigo da Revista Gestão e Produção sobre o “Modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento da produção: aplicação em uma fábrica de cimento para refratário”. A sinergia com a pesquisa, é que neste trabalho apresenta um problema de dimensionamento sendo abordadas três formulações matemáticas e o objetivo de comparar as formulações e a aplicabilidade como ferramenta de suporte à tomada de decisão.

Pesquisando os artigos publicados com assuntos correlatos ao tema da pesquisa e abrangendo a modelagem matemática, *blends* ou a problema da mistura temos selecionados.

A aplicação do método simplex, o artigo *The International Journal of Production Economics* (2019) com o tema: Otimização de métodos combinados de séries temporais para prever a demanda por café no Brasil, é uma abordagem multiobjetivo para encontrar o conjunto ideal, para isso, foram calculadas as séries de resíduos de cada um dos métodos de previsão previamente selecionados e, para combiná-los através de uma média ponderada, foram obtidos diversos conjuntos de pesos utilizando o método Simplex (BACCI, 2019).

Em outro artigo para a Revista em agronegócio e meio ambiente (RAMA) em 2019, com o título: “Um modelo matemático para minimizar os custos de distribuição de grãos em uma cooperativa”, propõe um modelo de otimização para a cadeia de suprimentos de uma cooperativa agroindustrial, visando a minimização dos custos totais com transporte e armazenagem e, ao mesmo tempo, atender as demandas da fábrica. O problema foi modelado utilizando métodos da Pesquisa Operacional e Programação Linear e resolvido usando o solver em dados reais da cooperativa (CZUSZ, 2021).

Na literatura internacional, devido a representatividade de alguns países na produção mundial de cimento, foram localizados artigos semelhantes, a proposta da pesquisa.

O autor FATRIAS (2018), apresentou o artigo publicado pela *Édition Diffusion Presse Sciences* EDP Sciences sobre: *Optimizing coal blending quality through*

supplier selection and order allocation: The case of cement industry. A pesquisa explora o problema de qualidade ótima de mistura de carvão em uma das maiores indústrias de cimento da Indonésia e o problema é selecionar um conjunto de fornecedores e determinar a alocação ótima, diferenciadas por certos requisitos de especificação, como qualidade do carvão, orçamento alocado de compra e capacidade do fornecedor. E como resolução, um modelo de programação linear é proposto para resolver o problema formulado.

Os autores: Yan Yuan, Qilin Qu, Luefeng Chen, Min Wu, em junho de 2020, apresentaram: *Modeling and optimization of coal blending and coking costs using coal petrography*, School of Automation, China University e publicado pela Information Sciences. Na pesquisa, propõe um método de modelagem e otimização baseado nas características do processo de blendagem do coque e carvão. Desta forma, melhorar a qualidade da mistura e reduzir os custos. A formulação final é um problema de programação linear inteira mista que visa minimizar o custo operacional global. Por fim, apresenta a eficácia do método de modelagem e otimização aplicando a dados reais do processo.

Nota-se durante a pesquisa dos trabalhos correlatos, a relevância dos autores asiáticos na literatura da indústria cimenteira e isto justifica-se porque a China é o principal país no mundo na produção de cimento. Em 2010, a China produziu 56% de todo o cimento produzido no mundo e segue na hegemonia, produzindo mais da metade do cimento do mundo. Na segunda colocação da produção mundial, a Índia, que produz cerca de 6% de acordo com dados do CEMBUREAU, OFICIMEN, SNIC e The Global Cement Report, 2019.

4 DESENVOLVIMENTO - MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo visa apresentar o problema de pesquisa mediante de um modelo matemático baseado em programação linear, sendo dividido nas secções: descrição do problema, coleta de dados, modelagem matemática, equações e solver.

Os valores monetários e demais informações numéricas (dias de produção, custos, combustíveis, produção e toneladas) representam a realidade, apesar de a empresa não ser identificada no estudo, o que permite o desenvolvimento das análises.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme descrito no capítulo 3, a indústria cimenteira do estudo de caso deseja minimizar o custo da matriz de combustíveis no forno III, considerando a disponibilidade dos combustíveis, o poder calorífico, as necessidades técnicas e o custo por tonelada. Além disto, os combustíveis utilizados nos fornos de cimento, devem atender a determinadas especificações de qualidade, técnicas e granulométricas.

Na composição da matriz energética do cimento, pode-se considerar uma variedade de opções de combustíveis e devido as especificações de qualidade, restrições técnicas e granulométricas. Faz-se necessário nesta pesquisa a classificação dos combustíveis em:

- Classe de Combustíveis;
- Grupo de Combustíveis;
- Combustíveis.

No período da pesquisa para atender a necessidade térmica do forno III, a matriz energética é composta por 11 combustíveis. No quadro 07, são apresentados a matriz de combustíveis.

QUADRO 07 – Matriz de Combustíveis

Classe de Combustíveis	Líquidos	Combustíveis Sólidos				Combustíveis Alternativos					
Grupo de Combustíveis		Coque de Petróleo		Carvão		Combustíveis Alternativos			Coprocessoamento		
Combustíveis	Diesel	Coque 1	Coque 2	Carvão Mineral	Carvão Vegetal	Cavaco de madeira	Triturados	Chip de Pneu	Pastosos	Resíduos	Lixo Urbano CDRU

Fonte: Autor (2022)

A tabela 02 apresenta a capacidade de produção de clínquer da indústria estudo de caso.

TABELA 02 – Capacidade de Produção de Clínquer

Dias de produção (mês)	30
Produção de Clínquer (ton. /dia)	3.300
Produção de Clínquer (ton. /mês)	99.000

Fonte: Autor (2022)

A tabela 03 demonstra a necessidade do consumo térmico para o forno III (poder calorífico), de acordo com a produção de clínquer estimada na tabela 02.

TABELA 03 – Consumo térmico

Consumo térmico Forno III (Kcal/kg)	817
Total Consumo térmico Forno III (Kcal/ton.)	80.883

Fonte: Autor (2022)

A tabela 04 ilustra os volumes máximos de disponibilidade mensal para aquisição de cada combustível e conforme a indústria cimenteira do estudo de caso.

TABELA 04 – Disponibilidade de Combustíveis

Combustíveis	Diesel (lts)	Coque 1 (ton.)	Coque 2 (ton.)	Carvão Mineral (ton.)	Carvão Vegetal (ton.)	Cavaco de madeira (ton.)	Triturado (ton.)	Chip de Pneu (ton.)	Pastosos (ton.)	Resíduos (ton.)	Lixo Urbano CDRU (ton.)
Volume	20.000	10.000	10.000	10.000	5.000	1.000	500	1.000	1.500	1.500	1.000

Fonte: Autor (2022)

Outra condição a ser considerada é a qualidade de cada combustível, que compõe a matriz. As variações de qualidade destes componentes, são determinantes e podem interferir na tomada de decisão, conforme apresentados na tabela 05.

TABELA 05 – Qualidade dos Combustíveis

Combustíveis	Diesel	Coque 1	Coque 2	Carvão Mineral	Carvão Vegetal	Cavaco de madeira	Triturado	Chip de Pneu	Pastosos	Resíduo	Lixo Urbano CDRU
Umidade	0,00%	10,32%	9,32%	18,31%	18,00%	27,99%	27,11%	1,99%	0,00%	27,11%	2,00%
Enxofre	0,03%	5,25%	5,25%	0,80%	0,01%	0,00%	14,76%	0,00%	10,00%	15,76%	0,04%
Voláteis	0,00%	11,32%	11,32%	37,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Cloro	0,00%	0,07%	0,07%	0,07%	0,00%	0,01%	0,03%	0,05%	0,04%	0,04%	0,00%
Kcal/kg	10.954	8.100	8.100	6.845	5.200	2.636	3.000	9.029	1.600	3.611	4.500

Fonte: Autor (2022)

Finalmente, na sequência são apresentados uma média dos custos de aquisição de cada combustível, considerando o valor final posto na fábrica e sem os impostos. Sendo que mensalmente, ocorrem oscilações de preços e na tabela 06 estão demonstrados uma média dos valores que compreende ao período da coleta de dados.

TABELA 06 – Custos dos Combustíveis

Combustíveis	Diesel (lts)	Coque 1 (ton.)	Coque 2 (ton.)	Carvão Mineral (ton.)	Carvão Vegetal (ton.)	Cavaco de madeira (ton.)	Triturado (ton.)	Chip de Pneu (ton.)	Pastosos (ton.)	Resíduo (ton.)	Lixo Urbano CDRU (ton.)
Custo R\$	6,30	1.377,21	1.312,70	1.103,33	550,00	200,00	200,00	489,65	134,48	169,88	100,00

Fonte: Autor (2022)

4.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados, ocorreu no período entre janeiro de 2022 e setembro de 2022, e foi realizada por meio das informações da empresa estudo de caso, documentos com as planilhas gerenciais de custos de produção, consumo dos combustíveis, consumo térmico por forno, produção mensal de clínquer, dados de amostragem da qualidade dos combustíveis e a análise dos custos de aquisição dos combustíveis.

Na sequência, ocorreram entrevistas com os gestores da unidade industrial, operadores e os analistas, com o intuito de entender o *modus operandi* sobre os cálculos realizados atualmente para escolha dos combustíveis e os impactos na cadeia de produção.

Por último, foram consolidadas as informações coletadas e iniciada a estruturação da modelagem da pesquisa.

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção será abordada a modelagem matemática desenvolvida para o problema de pesquisa, bem como as descrições dos índices, parâmetros, variáveis e as restrições aplicadas ao modelo. Apresentam-se a seguir as notações genéricas utilizadas para representar o modelo matemático proposto.

- ÍNDICES

Encontram-se os índices aplicados a modelagem e utilizada nos parâmetros, variáveis e as restrições:

- **f** = função objetivo: minimizar o custo da matriz de combustíveis;
- **i** = disponibilidade de combustíveis, onde $i \in J$ (J = forno III);
- **il** = combustível líquido;
- **is** = combustível sólido;
- **ia** = combustível alternativo;
- **j** = produção de clínquer forno III por dia;
- **Dj** = demanda de consumo térmico do forno j (kcal/kg);
- **Ci** = custo unitário combustível (R\$/ton.);
- **PJi** = poder calorífico do combustível;
- **$TMis$** = percentual de combustíveis sólidos;
- **$TMia$** = percentual de combustíveis alternativos;
- **$TMicm$** = percentual de carvão mineral;
- **Ai** = percentual de enxofre;
- **Cl** = percentual de cloro;
- **Um** = percentual de umidade.

- PARÂMETROS

Os parâmetros considerados na formulação matemática da pesquisa, foram coletados de acordo com a capacidade nominal de produção de clínquer do forno III e a indicação do fabricante.

No parâmetro, busca-se a definição da função objetivo do modelo matemático. Sendo assim, a minimização de custo dos combustíveis da matriz e suprir as variáveis e as restrições do modelo.

- VARIÁVEIS

As variáveis são compostas: dias de produção, produção do forno III, disponibilidade de combustíveis, o Custo unitário (R\$/ton.) e o Poder Calorífico e demonstrados da seguinte forma:

- Dias de produção (mês) = 30 dias;
- j = produção de clínquer forno III por dia;
- Dj = Demanda de consumo térmico do forno j (kcal/kg).
- i = disponibilidade de combustíveis;
- Ci = custo unitário combustível (R\$/ton);
- PJi = poder calorífico do combustível;
- Um = percentual de umidade.
- $TMicm$ = percentual de carvão mineral.

Entretanto, além das variáveis apresentadas, como condição complementar devem ser considerados os voláteis do carvão mineral, quando acima de 35% da matriz total de combustíveis, apresenta um aumento na produtividade de clínquer. O ganho previsto, neste caso, é de mais 10% por tonelada, sendo que o custo por tonelada do clínquer é de R\$ 175,00.

Outro fator importante e considerado na modelagem, é a variação da umidade de cada combustível. No momento da aquisição via suprimentos e no controle de estoque são considerados em base úmida (bu) e nos cálculos para introdução no forno são quantificados em base seca (bs).

- RESTRIÇÕES

Nas restrições são definidos os percentuais mínimos ou máximos de utilização da classe de combustíveis, enxofre e cloro na composição da matriz. A saber:

- **is** = combustível sólido $\leq 70\%$
- **ia** = combustível alternativo $\geq 20\%$
- **Ai** = percentual de enxofre $\geq 4,5\%$
- **Cl** = percentual de cloro $\geq 3\%$

4.4 EQUAÇÕES

A seguir são apresentadas as múltiplas equações da modelagem matemática desenvolvida para o problema de pesquisa.

$$\text{Minimizar CUSTO TOTAL} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J pij \ x_{ij} \quad - \text{Eq. (1);}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Pci) \ x_{ij} \geq 0 \quad - \text{Eq. (2);}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (TMis) \ x_{ij} \leq 40\% \quad - \text{Eq. (3);}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (TMia) \ x_{ij} \leq 20\% \quad - \text{Eq. (4);}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (Ai) \ x_{ij} \geq 4,5\% \quad - \text{Eq. (5);}$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = Pji \quad - \text{Eq. (6);}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} \geq 0 \quad - \text{Eq. (7).}$$

- Eq. (1) é a função objetivo, o custo total da matriz de combustíveis para o forno III.
- Eq. (2) - (5) denota quatro restrições diferentes que devem ser atendidas na matriz, a saber, poder calorífico (Pji), % de combustíveis sólidos e alternativos (TMis e TMia) e enxofre (Ai).
- Eq. (6) indica que toda a demanda do consumo térmico deve ser atendida.

- Por fim, a restrição de não negatividade é adicionada à Eq. (7).

Desta maneira, ao fim da aplicação do modelo matemático no *software* em sua ferramenta de otimização (Solver) tem-se implementado a determinação definição da matriz energética e a otimização dos custos.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados que visam atender ao objetivo da pesquisa que aplica a modelagem matemática e a ferramenta solver.

A análise dos resultados será feita com base na coleta de dados de uma amostra de três meses de pesquisa e dividida em duas etapas: a validação e os cenários possíveis de implementação da matriz energética que atendem aos parâmetros, variáveis e as restrições dos fornos.

A primeira etapa apresenta a abordagem da validação do modelo comparando com as informações do período da coleta de dados. A segunda etapa abrange dois cenários; o primeiro intensifica o uso da classe de combustíveis denominados combustíveis alternativos e o segundo simula condições semelhantes ao ocorrido na empresa estudo de caso, no que se refere ao objetivo de crescimento da substituição térmica.

5.1 VALIDAÇÃO

Nesta etapa, buscou-se a validação do modelo matemático proposto para a indústria cimenteira através da empresa estudo de caso, por meio da empregabilidade dos dados reais.

Silva et al. (2019) concordam que as resoluções de um problema, através de ferramentas da PO, envolvem as fases de definição do problema, construção e validação do modelo e implementação da solução. A validação do modelo prevê o adequadamente e o comportamento do modelo. A comparação dos resultados com dados históricos é um método para a verificação da validade do modelo.

Para validação do modelo, foi utilizado um comparativo entre os dados reais e os resultados do modelo. As simulações ocorreram em diferentes meses (junho a agosto/22), envolveram o custo, a qualidade e o processo, realizadas com o intuito de demonstrar a eficácia do modelo no apoio à tomada de decisão.

Durante a coleta de dados para a extração da amostra da pesquisa foi analisado o período de nove meses de produção de clínquer do forno III. A tabela 07 apresenta a produção durante o período, sendo que a indústria cimenteira tem como característica programar as manutenções dos fornos de cimento no primeiro trimestre do ano, por isso, ocorre uma redução da produção no mês de março.

TABELA 07 – Produção de Clínquer (mil/toneladas)

Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro
94.736	78.421	41.256	91.680	94.736	95.384	86.586	78.322	82.238

Fonte: Autor (2022)

A amostra selecionada de três meses é formada por um conjunto de variáveis quantitativas contínuas, as quais fornecem dados lineares, expressas por suas médias e desvio-padrão (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

Portanto, justifica-se a escolha do período de amostra entre o mês de junho a agosto por representar, no período escolhido maior e o menor volume de produção de clínquer e, conseqüentemente, a maior e a menor taxa de substituição de combustíveis alternativos, excluindo da amostra o mês de março devido a manutenções, deste modo, caracteriza-se na estatística por amostragem estratificada.

A tabela 08 demonstra a representatividade de cada um dos combustíveis da amostra relativa ao período entre junho de 2022 a agosto de 2022:

TABELA 08 – Amostra da Matriz de Combustíveis

Grupo de Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Junho/22	38,30%	47,58%	0,00%	0,09%	3,24%	0,66%	10,13%
Julho/22	33,05%	45,92%	0,27%	2,76%	3,42%	1,98%	12,60%
Agosto/22	45,09%	42,89%	0,45%	1,13%	3,05%	1,15%	6,24%

Fonte: Autor (2022)

Portanto, nota-se a relevância dos combustíveis fósseis sólidos (carvão e coque) na composição da matriz, aproximadamente 85%, acima do que é descrito na literatura (CHATZIARAS, 2016), em torno de 70% do total dos combustíveis inseridos no forno de cimento.

A tabela 09 apresenta os custos dos combustíveis em reais e por tonelada aplicados ao modelo matemático referente ao período da amostra entre os meses de junho de 2022 a agosto de 2022.

TABELA 09 – Amostra dos Custos dos Combustíveis em R\$

Combustíveis	Diesel (lts.)	Coque 1 (ton.)	Coque 2 (ton.)	Carvão Mineral (ton.)	Cavaco (ton.)	Triturado (ton.)	Chip (ton.)	Pastosos (ton.)	Resíduo (ton.)
Junho/22	6,26	1.449,43	1.306,77	1.050,00	185,00	201,00	489,65	134,48	169,88
Julho/22	6,56	1.300,83	1.300,83	1.050,00	185,00	201,00	489,65	134,48	169,88
Agosto/22	6,09	1.381,36	1.330,51	1.210,00	225,00	201,00	489,65	134,48	169,88

Fonte: Autor (2022)

Para mensurar o grau de ajuste do modelo matemático, empregou-se o desvio padrão (SE) e o erro médio relativo (P) descrito nas Equações 8 e 9:

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(R-Rm)^2}{GLR}} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{R-Rm}{R} \quad \text{Eq. (9)}$$

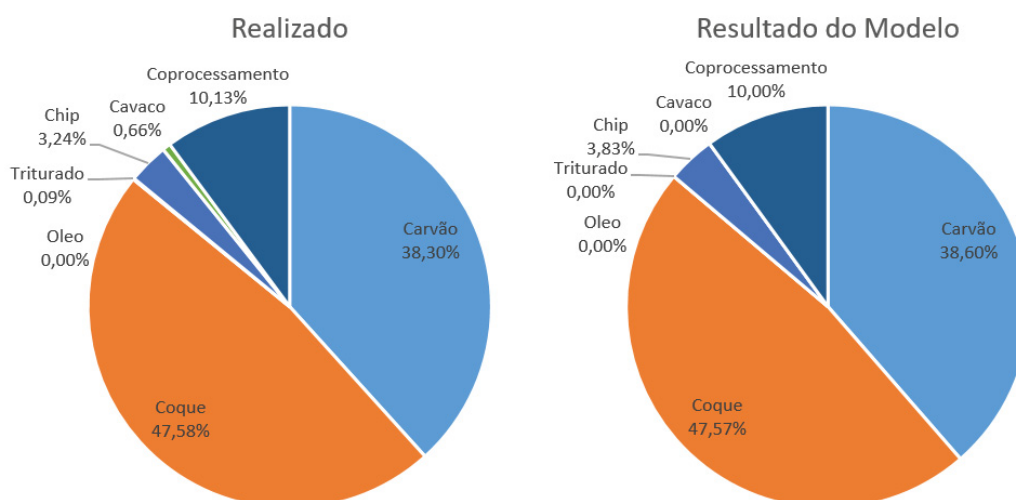
Em que:

- R: Valor Realizado;
- Rm: Resultado do modelo;
- GLR: Grau de liberdade.

A variação de 1% para cada um dos combustíveis analisados no consumo térmico do mês de referência é considerada um erro médio relativo.

No gráfico 05, observa-se o resultado comparativo entre as matrizes de junho de 2022: a matriz de combustíveis utilizada pela empresa (Realizado) e o retorno da modelagem (Resultado do Modelo). Salienta-se que durante o mês de junho houve a maior produção do clínquer da amostra, 95.383 toneladas, sendo o consumo térmico total de 78.270 kcal/kg e, por consequência, o gasto mais elevado de combustíveis, em um total de 13.385 toneladas.

GRÁFICO 05 – Comparativo Matrizes mês de junho



Fonte: Autor (2022)

A tabela 10 apresenta as informações sobre a variação dos combustíveis entre os dados reais e o resultado do modelo para o mês junho de 2022:

TABELA 10 – Variação % Grupo de Combustíveis mês de junho

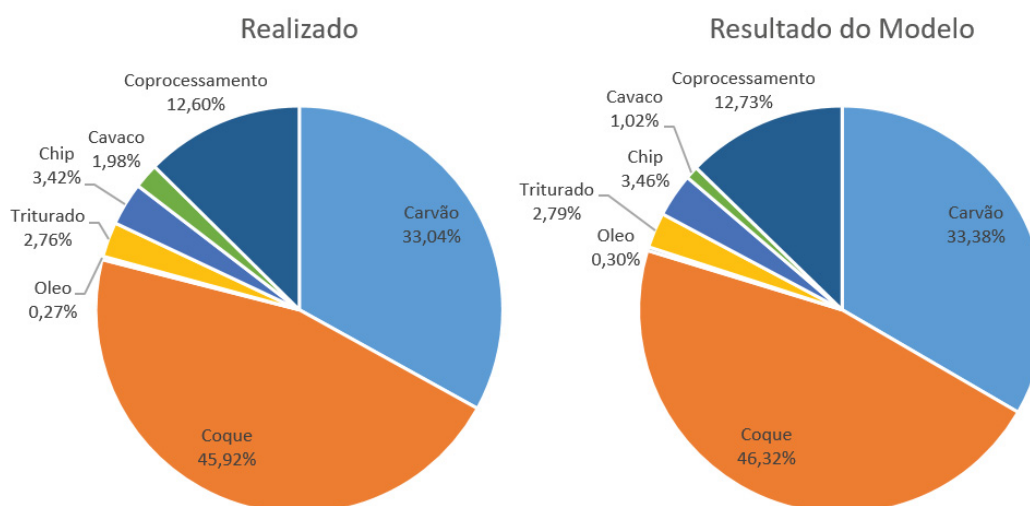
Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	38,30%	47,58%	0,00%	0,09%	3,24%	0,66%	10,13%
Resultado do Modelo	38,60%	47,57%	0,00%	0,00%	3,83%	0,00%	10,00%
Média (real X modelo)	38,45%	47,57%	0,00%	0,05%	3,54%	0,33%	10,07%
Erro médio relativo	-0,30%	0,01%	0,00%	0,09%	-0,59%	0,66%	0,13%
Desvio Padrão (real X modelo)	0,15%	0,01%	0,00%	0,05%	0,30%	0,33%	0,06%

Fonte: Autor (2022)

Com a análise comparativa entre os modelos mostra-se aderência entre os dados reais e o resultado do modelo está em conformidade com a variação máxima de 1% e o desvio padrão calculado entre os combustíveis demonstram que o parâmetro dos elementos está próximo e equilibrado.

Durante o mês de julho a produção do clínquer foi de 86.585,89 toneladas, o consumo térmico total de 68.483 kcal/kg e o gasto de combustíveis foi de 11.656 toneladas. O gráfico 06 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de julho.

GRÁFICO 06 – Comparativo Matrizes mês de julho



Fonte: Autor (2022)

A tabela 11 apresenta as informações sobre a variação dos combustíveis entre as duas matrizes de julho.

TABELA 11 – Variação % Grupo de Combustíveis mês de julho

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	33,04%	45,92%	0,27%	2,76%	3,42%	1,98%	12,60%
Resultado do Modelo	33,38%	46,32%	0,30%	2,79%	3,46%	1,02%	12,73%
Média (real X modelo)	33,21%	46,12%	0,29%	2,77%	3,44%	1,50%	12,67%
Erro médio relativo	-0,34%	-0,40%	-0,03%	-0,03%	-0,04%	0,96%	-0,13%
Desvio Padrão (real X modelo)	0,17%	0,20%	0,02%	0,01%	0,02%	0,48%	0,07%

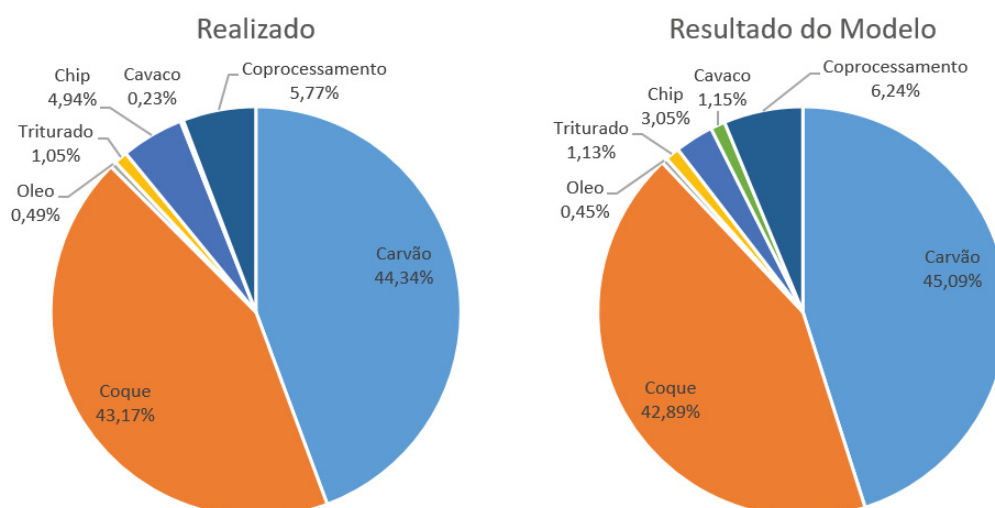
Fonte: Autor (2022)

Com a análise comparativa entre os modelos observa-se uma maior aderência entre os resultados, dentro da variação máxima de 1% permitida para cada combustível.

No decorrer do período em questão, foi observada nota-se a relevância do coprocessamento, obtendo uma representatividade média de 12,67% da matriz e o maior percentual do intervalo de tempo da coleta de dados.

O mês de agosto apresentou a menor produção do clínquer da amostra de 78.322,01 toneladas, o consumo térmico total de 64.312 kcal/kg e de combustíveis foram consumidas 10.261 toneladas. O gráfico 07 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de agosto de 2022.

GRÁFICO 07 – Comparativo Matrizes mês de agosto 2022



Fonte: Autor (2022)

A tabela 12 apresenta informações sobre a variação dos combustíveis entre as duas matrizes de agosto.

TABELA 12 – Variação % Grupo de Combustíveis mês de agosto

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	44,34%	43,17%	0,49%	1,05%	4,94%	0,23%	5,77%
Resultado do Modelo	45,09%	42,89%	0,45%	1,13%	3,05%	1,15%	6,24%
Média (real X modelo)	44,72%	43,03%	0,47%	1,09%	4,00%	0,69%	6,01%
Erro médio relativo	-0,75%	0,28%	0,04%	-0,08%	1,89%	-0,92%	-0,47%
Desvio Padrão (real X modelo)	0,37%	0,14%	0,02%	0,04%	0,95%	0,46%	0,23%

Fonte: Autor (2022)

A análise comparativa entre os modelos mostrou grande coerência entre os resultados, dentro a variação máxima de 1% para mais ou para menos.

Em agosto foi possível notar o oposto do ocorrido no mês de julho, com um menor percentual do coprocessamento, 6% da matriz, e o menor percentual entre as amostras do período de coleta.

Nota-se que a solução apresentada pelo modelo de otimização atende a margem de erro relativo, não ultrapassando a variação de 1% e satisfaz a todos os critérios exigidos pela cimenteira. Sendo considerado que o modelo foi modelado e validado com sucesso.

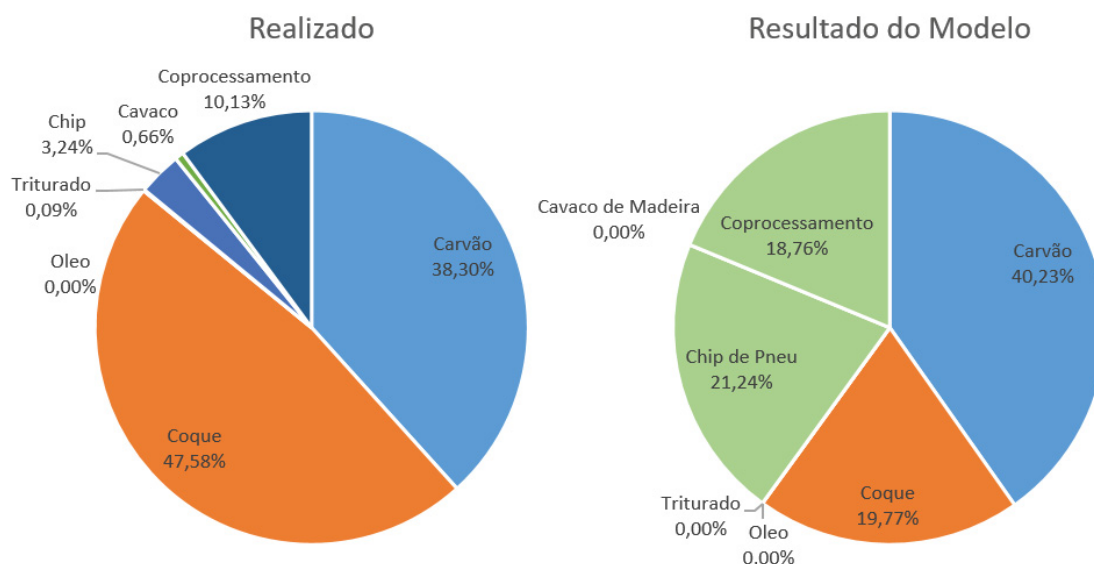
5.2 CENÁRIO 1

Nesta seção será apresentado o cenário 01, intensificando o uso de combustíveis sustentáveis ou, como denominado na pesquisa, combustíveis alternativos, logo, limitando a utilização dos combustíveis fósseis sólidos como o carvão e derivados do petróleo.

No cenário 01 serão aplicadas as mesmas condições da validação e de produção do período da coleta de dados, entretanto, não havendo limitações na disponibilidade de volumes da classe dos combustíveis alternativos e seguindo a recomendação do fabricante do forno III de até 40% do uso desse combustível. Atualmente, a empresa estudo de caso, encontra dificuldades internas e externas para aumentar o percentual de substituição dos combustíveis, entretanto, historicamente a representatividade desse conjunto oscila de 5% a 15% da matriz energética.

O gráfico 08 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de junho: a matriz de combustíveis utilizada pela empresa (Realizado) e o retorno da modelagem (Resultado do Modelo).

GRÁFICO 08 – Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês de junho



Fonte: Autor (2022)

No mês de junho, após a modelagem, e partindo da utilização de 40% de combustíveis alternativos, aqui distribuídos em 18,76% para coprocessamento e 21,24% Chip de Pneu. Observa-se que o modelo reduziu o coque em 27,81% enquanto no carvão, manteve o percentual acima de 35%. Dessa forma, observa-se a viabilidade da condição complementar dos voláteis do carvão mineral com aumento na produtividade de clínquer e o ganho de mais 10% por tonelada.

A tabela 13 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 01 entre as duas matrizes de junho, a matriz realizada e o resultado do modelo

TABELA 13 – Cenário 01 - Variação % Grupo de Combustíveis mês de junho

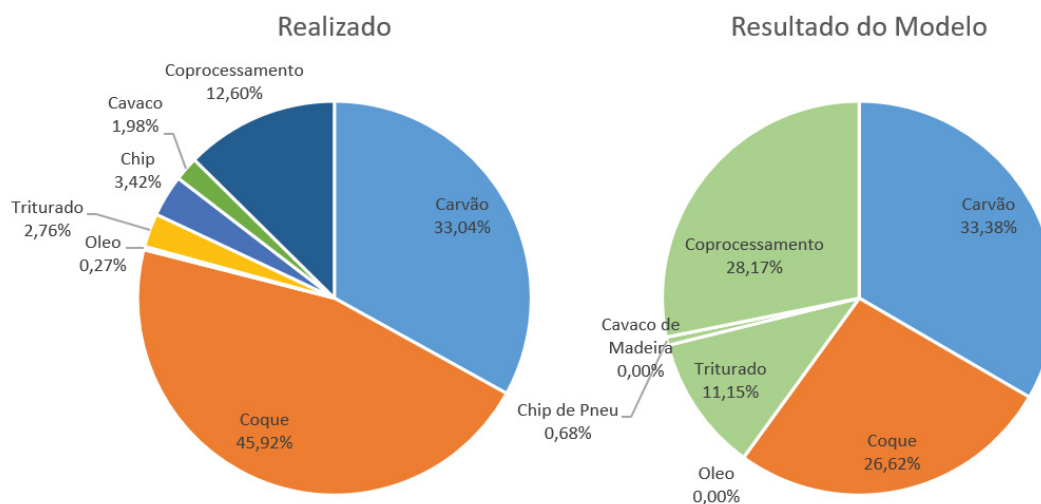
Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	38,30%	47,58%	0,00%	0,09%	3,24%	0,66%	10,13%
Resultado do Modelo	40,23%	19,77%	0,00%	0,00%	21,24%	0,00%	18,76%
Variação (real X modelo)	1,93%	-27,81%	0,00%	-0,09%	18,00%	-0,66%	8,63%

Fonte: Autor (2022)

Por fim, comparando os resultados financeiros, a matriz do período realizado totaliza R\$ 10.519 milhões e a matriz otimizada pelo modelo R\$ 9.261,51 milhões, sendo assim, há uma economia estimada em 11,95% na matriz energética.

No gráfico 09 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de julho de 2022.

GRÁFICO 09 – Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês julho



Fonte: Autor (2022)

A tabela 14 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 01 entre as duas matrizes de julho.

TABELA 14 – Cenário 01 - Variação % Grupo de Combustíveis mês julho

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	33,04%	45,92%	0,27%	2,76%	3,42%	1,98%	12,60%
Resultado do Modelo	33,38%	26,62%	0,00%	0,00%	11,83%	0,00%	28,17%
Variação (real X modelo)	0,34%	-19,30%	-0,27%	-2,76%	8,41%	-1,98%	15,57%

Fonte: Autor (2022)

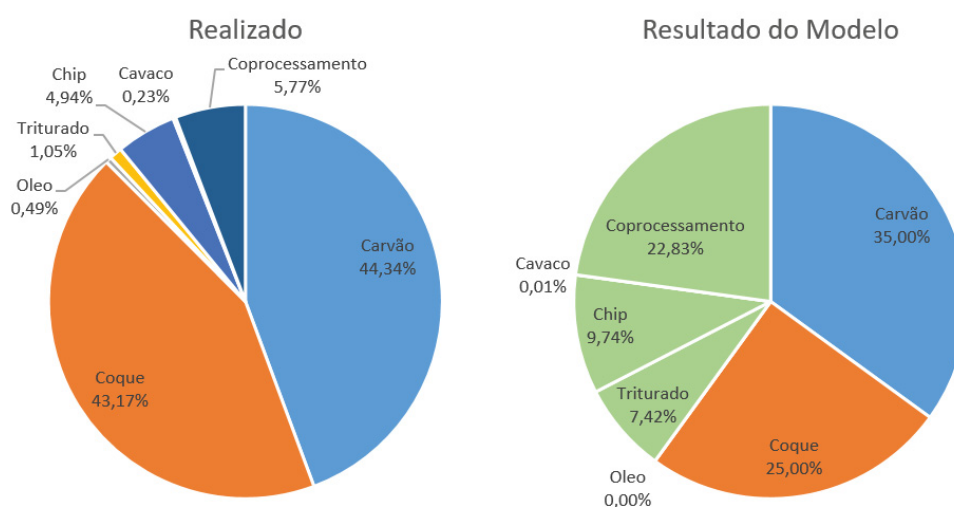
Durante o mês de julho, após a modelagem, o modelo obedeceu à premissa de 40% para os combustíveis alternativos, como destacado em verde no gráfico 10. Dessa forma, a distribuição otimizada foi o aumento da representatividade do coprocessamento de 12,60% para 28,17% em razão do custo competitivo no R\$/Gcal por tonelada.

Nos combustíveis fósseis sólidos (carvão e coque), observa-se que o modelo reduziu o coque em 19,30% e no carvão mantiveram-se em 33%. Podendo-se concluir que a variável da condição complementar dos voláteis não é rentável nesse mês.

Por fim, comparando os resultados financeiros entre as matrizes, retorna uma economia estimada de 16,66%.

O gráfico 10 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de agosto.

GRÁFICO 10 – Cenário 01 - Comparativo Matrizes mês agosto



Fonte: Autor (2022)

A tabela 15 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 01 entre as duas matrizes de agosto

TABELA 15 – Cenário 01 - Variação % Grupo de Combustíveis mês agosto

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Realizado	44,34%	43,17%	0,49%	1,05%	4,94%	0,23%	5,77%
Resultado do Modelo	35,00%	25,00%	0,00%	7,42%	9,74%	0,01%	22,83%
Variação (real X modelo)	-9,34%	-18,17%	-0,49%	6,37%	4,80%	-0,22%	17,05%

Fonte: Autor (2022)

Durante o mês de agosto, após a modelagem, o modelo manteve a continuidade apresentada nos meses anteriores para os combustíveis alternativos de 40% e retornou com crescimento do coprocessamento de 5,77% para 22,83% e do chip de pneu de 4,94% para 9,74%.

Em relação aos resultados financeiros, obteve-se a matriz do realizado totalizando R\$ 9.277,34 milhões e a matriz otimizada com o valor de R\$ 6.896,56

milhões, com a economia estimada de 25,66% na matriz energética. A redução mais expressiva neste mês explica-se devido ao aumento do custo dos combustíveis sólidos.

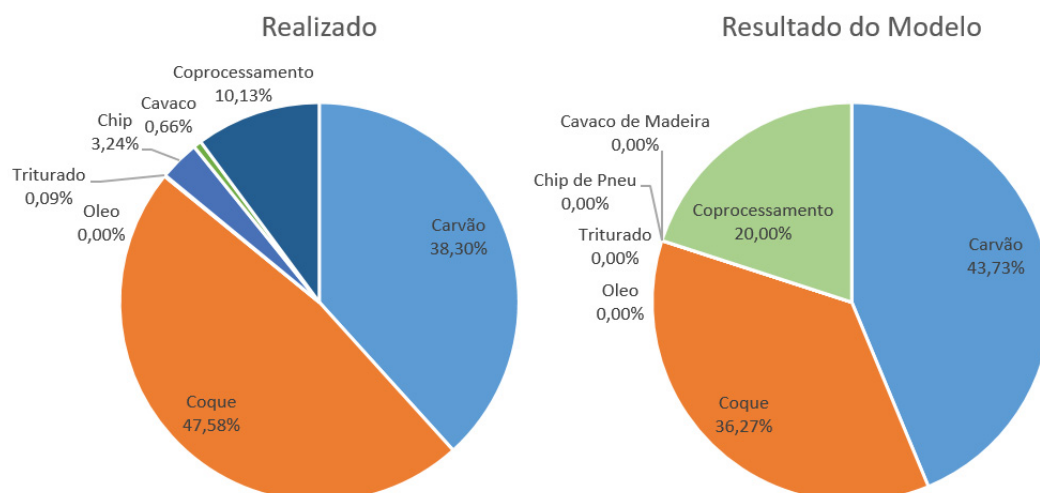
Portanto, no cenário 1, nota-se que a solução apresentada nos meses analisados obteve resultados financeiros positivos entre 11,95% a 25,66% de economia estimada na matriz energética, cumprindo os critérios exigidos do equipamento e a premissa de utilização máxima dos combustíveis selecionados. Entretanto, a solução requer investimentos em equipamentos, análise da disponibilidade dos combustíveis alternativos e desenvolvimento técnico para implantação dos cenários e a ampliação dos combustíveis alternativos.

5.3 CENÁRIO 2

No cenário 02 busca-se simular condições semelhantes ocorridas atualmente na empresa estudo de caso no que se refere ao objetivo de explorar um potencial de crescimento da substituição térmica. Portanto, neste cenário será considerado as mesmas condições de produção da validação, entretanto, alterando para 20% a classe dos combustíveis alternativos e considerando a taxa máxima de disponibilidade de cada parceiro de fornecimento.

O gráfico 11 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de junho.

GRÁFICO 11 – Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês junho



Fonte: Autor (2022)

No mês de junho, após a modelagem, percebe-se o aumento do coprocessamento em 9,87% e uma redução no coque em 11,31% como resultado da otimização.

A tabela 16 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 02 entre as duas matrizes do mês de junho.

TABELA 16 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês junho

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Limite máximo (t)	5.000	5.000	3.000	1.000	3.000	3.000	5.000
Resultado do Modelo (t)	3.505	4.226	0	0	0	0	3.808
Realizado (%)	38,30%	47,58%	0,00%	0,09%	3,24%	0,66%	10,13%
Resultado do Modelo (%)	43,73%	36,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%
Variação (real X modelo)	5,43%	-11,31%	0,00%	-0,09%	-3,24%	-0,66%	9,87%

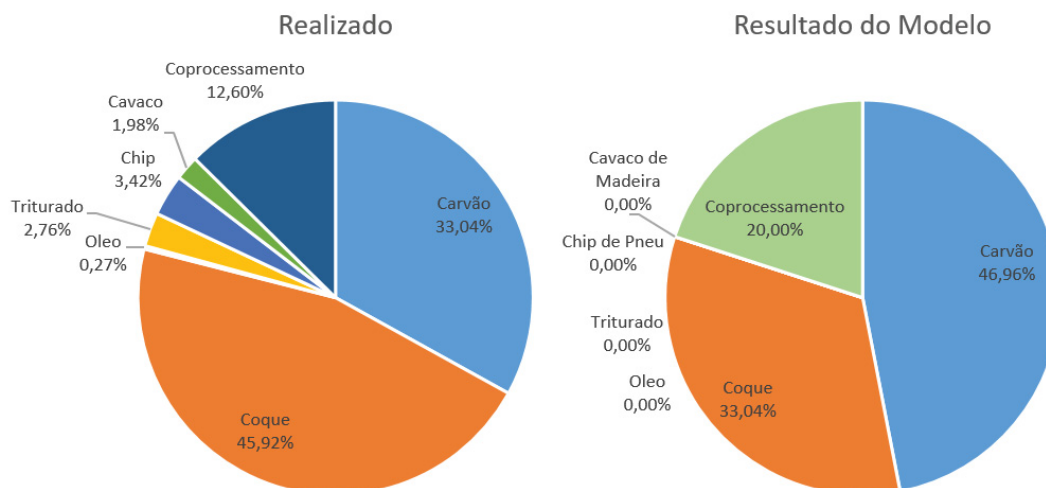
Fonte: Autor (2022)

Observa-se que o modelo manteve o carvão com o percentual acima 35% considerando a viabilidade da condição complementar dos voláteis do carvão mineral com aumento na produtividade de clínquer e o ganho de mais 10% por tonelada.

Analisando os resultados financeiros, a matriz do período realizado totaliza em R\$ 10.519 milhões e a matriz otimizada pelo modelo em R\$ 9.218,55 milhões. Sendo assim, o modelo encontrou um novo arranjo da matriz de combustíveis e gerando uma economia estimada de 12,36%.

O gráfico 12 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de julho.

GRÁFICO 12 – Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês julho



Fonte: Autor (2022)

No mês de julho, após a modelagem, o modelo manteve o coprocessamento com alternativa para otimização da matriz dos combustíveis conforme a limitação de substituição térmica e nos combustíveis sólidos, e o carvão como melhor alternativa frente ao coque de petróleo. A tabela 17 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 02 entre as duas matrizes de julho.

TABELA 17 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês julho

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Limite máximo (t)	5.000	5.000	3.000	1.000	3.000	3.000	5.000
Resultado do Modelo (t)	5.000	2.869	0	0	0	0	3.550
Realizado (%)	33,04%	45,92%	0,27%	2,76%	3,42%	1,98%	12,60%
Resultado do Modelo (%)	46,96%	33,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%
Variação (real X modelo)	13,92%	-12,88%	-0,27%	-2,76%	-3,42%	-1,98%	7,40%

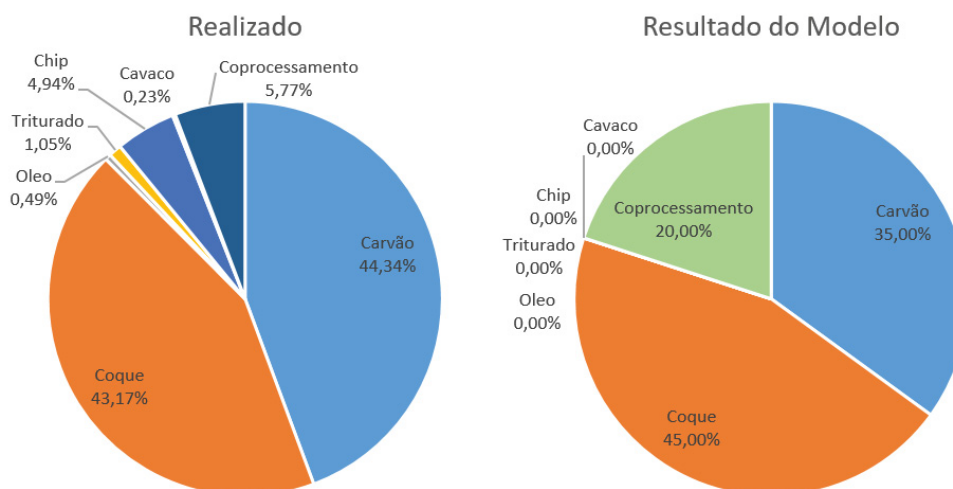
Fonte: Autor (2022)

Observa-se que o modelo reduziu a utilização de coque para 12,88% e, no carvão, manteve o percentual acima de 35% e o modelo seleciona o coprocessamento como uma alternativa, devido ao menor custo R\$/Gal mesmo quando comparado a alternativas como: triturado, chip de pneu e o cavaco de madeira.

Por fim, comparando os resultados financeiros, a matriz do período realizado totaliza R\$ 9.484,99 milhões e a matriz otimizada pelo modelo com R\$ 8.207,98 milhões. Sendo assim, uma economia estimada de 13,46% na matriz energética.

O gráfico 13 apresenta o resultado comparativo entre as matrizes do mês de agosto: a matriz de combustíveis utilizada pela empresa (Realizado) e o retorno da modelagem (Resultado do Modelo).

GRÁFICO 13 – Cenário 02 - Comparativo Matrizes mês agosto



Fonte: Autor (2022)

A tabela 18 apresenta informações sobre as variações dos combustíveis do cenário 02 entre as duas matrizes de agosto, a matriz realizada e o resultado do modelo.

TABELA 18 – Cenário 02 - Variação % Grupo de Combustíveis mês agosto

Grupo Combustíveis	Carvão Mineral	Coque	Óleo	Triturado	Chip	Cavaco	Coprocessamento
Limite máximo (t)	5.000	5.000	3.000	1.000	3.000	3.000	5.000
Resultado do modelo (t)	3.268	2.779	0	0	0	0	3.129
Realizado	44,34%	43,17%	0,49%	1,05%	4,94%	0,23%	5,77%
Resultado do modelo	35,00%	45,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	20,00%
Variação (real X modelo)	-9,34%	1,83%	-0,49%	-1,05%	-4,94%	-0,23%	14,23%

Fonte: Autor (2022)

No mês de agosto, após a modelagem, o gráfico 18, revalida o coprocessamento como alternativa para a otimização da matriz e refaz o ocorrido nos meses anteriores.

No entanto, percebe-se a inversão nos combustíveis sólidos e no combustível com o maior consumo, na composição da matriz o coque com 45% e o carvão 35% evento que não aconteceu nos meses anteriores, em razão do aumento do custo em R\$ por tonelada do carvão.

Observa-se que o modelo aumentou o coque em 1,83% e, no carvão, manteve o percentual em 35%. Dessa forma, calcula-se a viabilidade da condição complementar dos voláteis do carvão com aumento na produtividade de clínquer e o ganho de mais 10% por tonelada.

Por fim, comparando os resultados financeiros, a matriz do período realizado totaliza R\$ 9.277,34 milhões e a matriz otimizada pelo modelo com R\$ 8.230,89 milhões. Sendo assim, uma economia estimada de 11,28% na matriz energética.

Portanto os resultados mostraram que os valores encontrados na otimização do cenário 02 atingem o objetivo da pesquisa em uma redução do custo da matriz energética obtendo resultados financeiros positivos entre 11,28% a 13,46% de economia estimada e uma melhora significativa no tempo gasto para uma resposta ao problema da definição dos combustíveis.

O modelo respeitou as restrições solicitadas e percebe-se que, em todos os cenários, foi utilizado o percentual de 20% de coprocessamento, evidenciando o potencial energético desse grupo de combustível e sua competitividade.

Por fim, no cenário 02, nota-se que a solução apresentada nos meses analisados cumpriu os critérios exigidos. Com isso, podem ser produzidas a necessidade de clínquer e a adoção desta estratégia estima-se a redução de custos e o melhor aproveitamento dos combustíveis alternativos.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo apresentar um modelo matemático para a definição da matriz energética capaz de auxiliar na tomada de decisão de escolha dos combustíveis atendendo aos parâmetros, variáveis e restrições dos fornos e produção.

Para tal, foi considerada uma combinação de parâmetros de qualidade, físico-químicos, disponibilidade e custos por combustíveis da indústria cimenteira.

A metodologia empregada na pesquisa, foi de estudo de caso e fez uso da Pesquisa Operacional, associado a programação linear através do método simplex e aplicado ao Solver. A escolha pelo Solver, se deu, pois é uma ferramenta livre e sem custos para a engenharia sendo um dos mais difundidos e de fácil acesso no mercado.

Desta forma, o desenvolvimento da modelagem, ocorreu aplicando as metodologias citadas, objetivando um modelo matemático e aplicado no problema de otimização dos combustíveis.

Os resultados demonstraram a validação do modelo matemático e o comparativo de cenários para tomada de decisão, objetivando o menor custo da matriz energética atendendo as premissas, critérios, parâmetros e as exigências sobre o poder calorífico do forno. Deste modo, foi desenvolvido dois cenários de otimização para aplicação do modelo matemático.

No cenário 01, aborda a restrição do grupo de combustíveis alternativos seguindo os parâmetros do fabricante do forno de até 40% da classe dos combustíveis alternativos. O modelo apresentou assertividade na seleção dos combustíveis, atendendo as premissas utilizadas e obtendo resultados financeiros positivos.

Observa-se a necessidade de combustíveis alternativos mais sustentáveis em substituição aos combustíveis fósseis tradicionais da indústria cimenteira, havendo assim um fator estratégico, econômico e ambiental devido à redução do CO₂ na atmosfera.

Apesar da expressiva redução de custos e dos resultados ambientais também serem positivos, neste cenário, a indústria cimenteira enfrenta dificuldades no uso dos combustíveis alternativos, tais como: a necessidade de investimentos, a lentidão no licenciamento ambiental, falta de tratamento especializado dos resíduos, a sazonalidade e a regionalidade dos combustíveis.

Diante desse cenário, o exemplo internacional mostra que se não houver um processo de conscientização e integração entre a indústria, os órgãos ambientais e a comunidade, os combustíveis alternativos não terão sucesso no país.

No cenário 02, discorre as circunstâncias semelhantes ao enfrentado pela empresa estudo de caso, focando explorar um potencial de crescimento da substituição térmica de até 20% da classe dos combustíveis alternativos e considerando a taxa máxima de disponibilidade de cada fornecedor.

Entretanto, para atingir o objetivo de 20% na classe de combustíveis alternativos, ocorrem problemas semelhantes ao Cenário 01, como: a sazonalidade na biomassa, regionalização dos parceiros e as normas ambientais. Diante destas dificuldades, como estratégia para atingir o percentual de substituição térmica, algumas indústrias optam em firmar contratos e desenvolvimento de novos parceiros, obtendo assim os volumes mensais para suprir a sua demanda, desta forma mitigando o risco de ruptura e as oscilações de combustíveis.

Com isso, o assunto se torna de interesse da indústria cimenteira e sinaliza a importância na assertividade da otimização e na utilização dos combustíveis alternativos. Tendo como resultado os benefícios de uma matriz energética mais sustentável, a diminuição de resíduos descartados inadequadamente no meio ambiente, na geração de novos empregos, na preservação de jazidas, na substituição de recursos energéticos não renováveis por fontes alternativas de energia e uma forma de vantagem competitiva verde.

Dessa forma com o aumento das taxas de substituição dos combustíveis sólidos para alternativos, a indústria cimenteira responde positivamente em prol do progresso sustentável, diminuindo a sua atuação como geradora de poluição e cumprindo um papel importante na política de gerenciamento ambiental.

Em geral os combustíveis sólidos como o coque de petróleo e o carvão mineral, apresentaram como a melhor opção entre os grupos de combustíveis a serem utilizados para produção de cimento. O modelo demonstrou grande potencial deste grupo devido ao seu alto poder calorífico e aos parâmetros de qualidade.

Com isso, em todos os cenários analisados, completaram a matriz os combustíveis: coque e o carvão mineral, que oscilaram entre os maiores percentuais de consumo. Estes combustíveis têm a sua precificação vinculada a condição cambial e uma ampla cadeia de suprimentos, tendo em vista que são importados e sofrem interferências diversas de custos ao longo da operação logística, como por exemplo, a

variação de preço mensal. Logo, justifica-se a variação entre os combustíveis com a maior demanda de consumo.

Por fim, em ambos os cenários, o modelo obteve o menor custo possível da matriz de combustíveis, possibilitando uma maior eficiência na tomada de decisão e garantindo a qualidade do produto. Sendo assim, o modelo mostrou-se uma ferramenta ideal para a resolução do método simplex aplicado ao problema de mistura, tal como estudado neste trabalho.

Como contribuição, o modelo matemático desenvolvido permite vários cenários, retornando com soluções otimizadas para cada um dos cenários simulados, abrangendo diversos aspectos, tais como: custos, qualidade, disponibilidade, restrições e visando manter o poder calorífico aceitável e necessário para a produção do cimento.

Sendo assim, o modelo facilita na seleção da melhor solução e, também, coopera naquelas situações em que a tomada de uma decisão deve ser a mais rápida possível, circunstâncias rotineiras no ambiente da administração de produção.

Com isso, é possível perceber a importância da discussão das ferramentas apresentadas nesta pesquisa no auxílio de processos decisórios de custo e potencializando o sucesso na solução de problemas.

Entretanto a definição dos combustíveis da matriz energética da indústria é uma discussão estratégica, que envolve outros fatores decisórios tais como: acordos comerciais, sazonalidade dos combustíveis, investimento em equipamentos, normas ambientais e em geral cumpre um planejamento estratégico.

Estudos futuros poderão analisar algumas novas abordagens, como por exemplo: aplicação do modelo matemático com base no problema da mistura em outros segmentos industriais, o uso do modelo para análise e estudo de coprocessamento, analisar outros parâmetros que possam influenciar diretamente no processo produtivo do cimento e o estudo da cadeia de suprimentos dos combustíveis da indústria cimenteira. Após as devidas adequações poderão apresentar resultados relevantes e novas contribuições acadêmicas.

8. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, João Henrique Medeiros de. et al. **Demonstrações Contábeis: Um Estudo da Contribuição à Tomada de Decisões Ambientalmente Saudáveis**. In: IX ENGEMA – Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Curitiba. **Anais...** Curitiba, Paraná, 2007. Disponível em: www.engema.up.edu.br/arquivos/engema/pdf/pap0262.pdf. Acesso em: 09.maio 2008.

ALVES, Fernanda de Freitas et al. **Modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento da produção: aplicação em uma fábrica de cimento para refratário**. Gestão & Produção, v. 23, p. 204-218, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) **Coproprocessamento – Panorama do Coprocessamento 2019**. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Panoramaco_processamento_2019_v2-bx.pdf. Acesso em 20 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). A Indústria Brasileira do Cimento. **Realidade e Perspectivas**, 2019. Disponível em: <https://abcic.org.br/Arquivos/Apresentacao-%20SNIC-ABCP-ABCIC-Networking-IV.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **A nova norma de especificação de cimento ABNT NBR 16697: saiba o que mudou e o que não mudou**. Disponível em: <https://abcp.org.br/a-nova-norma-de-especificacao-de-cimento-abnt-nbr-16697-saiba-o-que-mudou-e-o-que-nao-mudou/> Acesso em: 21 de agosto de 2021. Acesso em: 28 maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Coproprocessamento – Coletânea de Trabalhos Técnicos. Volumes 1, 2 e 3**. Rio de Janeiro, 2002.

ARENALES, Marcos et al. Pesquisa operacional. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2015.

BACCI, Livio Agnew. **Otimização multivariada da combinação de métodos de previsão**. 2019.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L. **Discrete-event system simulation**. 2. ed. New Jersey, Prentice Hall, 548 p., 1996.

BARBOSA, Davi Prates Oliveira. **Um modelo matemático de otimização da mistura de variedades de açúcar para atender ao padrão de qualidade de países importadores**. 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento) - Instituto de Computação, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Conhecimento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

BARBOSA, G. M. **Utilização da programação linear na otimização de resultados de produção na empresa**. 2014. Disponível em: <https://www.usjt.br/prppg>. Acesso em: 11 jun. 2022.

BATTAGIN, A. F. O Cimento Portland no Brasil. In: CONCRETO, I. B. D. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2a. ed. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, v. 1, p. 761-790, 2010.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/ent/cont/n/estudo-roadmap-tecnologico-do-cimento-pretende-reduzir-emissoes-de-co2_80_19797. Acesso em: 28 maio 2022.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro. Elsevier, 2013.

BELATO, M. N. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais**. 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/795>. Acesso em: 28 maio 2022.

BERNARDO, A. C. de S. M. **Otimização estocástica multi-objetivos na produção de Cimento Portland com co-processamento de resíduos e adição de mineralizadores**. 2009. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1526>. Acesso em: 28 mai 2022.

BERETTA, Elisangela. Programação linear - modelagem. 2014. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAemMoAG/programacao-linear-modelagem>. Acesso em: 01 jun.2022.

BHATTY, J. I. **Role of Minor Elements in Cement Manufacture and Use**. Research and Development Bulletin, v.109, Portland Cement Association, Illinois, 1995.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Notas de aula: Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2022.

BLUMENSCHN, R. N.; DURANTE, L. C.; ZINA, C. M.. **Atributos de desempenho ambiental: um estudo sobre as potencialidades, dificuldades e soluções para o futuro**. In: IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UFSC 2021. Santa Catarina. **Anais** ... Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/228928/vol%2003%20-9-20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 maio 2022.

BORGES, C. N. **Modelagem matemática do processo industrial de coqueamento retardado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/T.3.2016.tde-29062016-162519. Acesso em: 29 maio 2022.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 264, de 26 de Agosto de 1999. Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. **Diário Oficial [da] da República Federativa do Brasil nº54**, Brasília, DF, p. 80-83, 20 mar. 2000. Seção 1.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.237**, de 22 de dezembro de 1997. Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 436**, de 26 de dezembro de 2011. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 382**, de 26 de dezembro de 2006. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 2006.

BRESSAN, Glaucia Maria; REGHIM, Daniely Cristiny Lucas; STIEGELMEIER, Elenice Weber. **Modelagem matemática de problemas agrícolas utilizando programação linear**. CQD-Revista Eletrônica Paulista de Matemática, 2019.

BRONSON, R.; NAADIMUTHU, G. **Operations Research**, 2nd Ed.. New York: McGraw-Hill, 1997.

CAMPANA, Omar Gutierrez. **Otimização de amortecedores de massa sintonizada tipo pêndulo para controle passivo de vibrações de estruturas altas e esbeltas sob excitações sísmicas**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAPONERO, J. & TENÓRIO, J. A. S., 2000, **Study of the pyrolysis reactors of brazilian waste tire using TGA and DTA**. Department de Engenharia Metalurgica e de Materiais, U.S.P. São Paulo, 1983.

CARDOSO, Andréa. **Fundamentos da Pesquisa Operacional**. Universidade Federal de Alfenas (Unifal), 2011. Disponível em: <http://www.unifalmg.edu.br/matematica/files/file/po.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

CARVALHO, A. C. B.; PORTO, A. J. V.; KIGUTI, A. P. M.; IANAMASU, R. Y. (1998). **Proposta de pesquisa sobre o uso da simulação e sua aplicação com usuários**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Niterói, setembro, 1998. Anais. Rio de Janeiro.

CARVALHO, Jéssica de Sousa. **Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior da biomassa de carnaúba com diferentes aglutinantes para uso em forno industrial**. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/64629>. Acesso em: 29 mai. 2022.

CEMBUREAU. **Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU**. Bélgica, 2016. Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Ecofys_Report_Market_Opportunities_Coprocessing_2016_0501.pdf. Acesso em: 29 maio 2022.

CHATZIARAS, N. et al. **Use of waste derived fuels in cement industry: a review**. Management of Environmental Quality: An International Journal, v.27, n.2 p.178 – 193, Nova York, 2016. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/MEQ-01-2015-0012/full/html>. Acesso em: 29 maio 2022.

CHIRALAKSANAKUL, A. Monte Carlo Methods for Multi-stage Stochastic Programs. Dissertation of Philosophy Doctor, University of Texas. Austin, Texas, 2003.

CIMENTO.ORG. **O mundo do cimento**. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-no-brasil/>. Acesso em: 20 agosto 2021

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas**. 1 ed. Rio De Janeiro. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2007

CORRAR, Luiz J; THEÓFILO, Carlos R et. all; **Pesquisa Operacional para Decisão em Contabilidade e Administração**. São Paulo, Atlas, 2004.

CZUSZ, Fernanda Braz Volpato et al. **Um modelo matemático para minimizar os custos de distribuição de grãos em uma cooperativa (RAMA)**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. Supl. 1, p. 1-18, 2021.

Dados, C. B. I. C. "Disponível em:< <http://www.cbicdados.com.br/>." Acesso em 01 de junho de 2022.

DAS GRAÇAS, Bruno Hermógenes. **Otimização da mistura de minérios no processo de sinterização objetivando minimização de custo**. 2017.

DE ALMEIDA, José Felipe Souza; MORAIS, Emerson Cordeiro; ANDRE, Otavio. Programação Matemática: **Otimização Linear e Não Linear**. Editora Dialética, 2021.

DE OLIVEIRA MINUCCI, Walter Bruno. **OTIMIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS EM FORNOS VERTICAIS DE FLUXO PARALELO REGENERATIVO NA INDÚSTRIA DA CAL**. Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Tecnologia Ambiental, p. 96-96, 2018.

DE PAULA PESSOA, Lídia; ALVES, José Maria do Carmo Bento. **Sistema de otimização do balanço de massas para alimentação de alto-forno: um estudo de caso**. Revista Eletrônica Produção & Engenharia, v. 4, n. 1, p. 355-364, 2013.

ECRA – European Cement Research Academy. **CCS – Carbon Capture and Storage**. 2022. Alemanha. Disponível em: <https://ecra-online.org/research/ccs/>. Acesso em: 23 abril 2021.

EISENHARDT, K. M. **Building theories from case study research**. *Academy of management Review*, v.14, n.4, p.532-550, 1989. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/258557?seq=1>. Acesso em: 29 maio 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA (EPE). **Pesquisa Energética, Atlas da Eficiência Energética - Brasil 2020: Relatório de Indicadores**. Brasília EPE,2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2020>. Acesso em: 20 jun. 2021.

EPE - Empresa **Pesquisa de Energia - Atlas da Eficiência Energética Brasil 2020: relatório de indicadores**. Brasília: EPE, 2020. 149 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 28 junho de 2021.

FATRIAS, Dicky et al. **Optimizing coal blending quality through supplier selection and order allocation: A case of cement industry**. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. p. 02005.

FERRARI, R. **Co-processamento de resíduos industriais em fornos de clínquer**. Companhia de Cimento Itambé, Balsa Nova, 2002. Disponível em: <http://coprocessamento.org.br/wpcontent/uploads/2019/09/Coprocessamento-apostila-Itambe2014.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

FILGUEIRAS, Paulo Roberto. **Uso da cromatografia gasosa bidimensional abrangente (GC× GC-qMS) para caracterizar as várias classes de compostos saturados em petróleos brasileiros**. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 4, 2018. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/2540>. Acesso em: 29 maio 2022.

GANDRUD, Christopher. **Reproducible Research with R and R Studio**. 2. ed. London: CRC The R Series, 2013. 294 p.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1996.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. São Paulo: Elsevier, 2005.

GOLDBARG, E.; GOLDBARG, M. **Programação Linear e Fluxo em Redes**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2015.

GOMES, Igor Alberto Silva. **Desenvolvimento de um reator de carbonização pressurizada para resíduos agroindustriais**. 2011. xix, 110 f., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/10020>. Acesso em: 29 maio 2022.

GREGÓRIO, G. F. P. LOZADA, G. **Simulação de sistemas produtivos**. Porto Alegre: SAGAH, 2019. Disponível em: <https://minhabiblioteca.ufpr.br>. Acesso em: 29 maio 2022.

HANSTED, Ana Larissa S. et al. **Caracterização físico-química da biomassa de Leucaena leucocephala para produção de combustível sólido**. Revista Virtual de Química, v. 8, n. 5, p. 1449-1460, 2016. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v8n5a14.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

JACQUES, J.R. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Concreto de Cimento Portland**. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/2129>. Acesso em: 29 maio 2022.

KIHARA, Y.; MARCIANO JR, E. **Qualidade e produtividade na indústria do cimento**. Informativo ABESC, ABESC, 1995.

KOKSOY, O. YALCINOZ, T. Mean square error criteria to multiresponse proces optimization by a new genetic algorithm, **Applied Mathematics and Computation**, 175 2006, pp. 1657–1674.

KOOKOS, Ioannis K. et al. **Classical and alternative fuel mix optimization in cement production using mathematical programming**. Fuel, v. 90, n. 3, p. 1277-1284, 2011.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. São Paulo, SP, Prentice Hall Brasil, 2009.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2. ed. USA, McGraw-Hill, 1991.

LIMA, Tiago França Melo et al. Modelagem de sistemas baseada em agentes: Alguns conceitos e ferramentas. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Natal, Brasil, p. 25-30, 2009. Disponível em: <http://martesid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.46/doc/5279-5286.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

LOBÃO, Elidio de Carvalho. **Discussão, sistematização e modelamento do processo de realização de estudos de simulação**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. doi:10.11606/T.18.2018.tde-11072018-105906. Acesso em: 29 maio 2022.

LOESCH, C., Hein, N. **Pesquisa Operacional**. Editora da FURB, Blumenau, 1999.

LOISON, Roger; FOCH, Pierre; BOYER, André. **Coke: Quality and Production**. Londres, Inglaterra: Cerchar, 1989.

LORENZONI, William Cristiano et al. Estudo de compostos voláteis de níquel e vanádio em cimento asfáltico de petróleo virgem e envelhecido. 74 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/17196/DIS_PPGQUIMICA_2019_LOR ENZONI_WILLIAM.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 29 maio 2022.

MACHADO, Leandro Ferreira. **Modelo de programação linear para otimizar o consumo de matérias-primas em altos-fornos**. 2016.

MADLOOL, N.A., SAIDUR, R., RAHIM N.A., KAMALISARVESTAN M. An overview of energy savings measures for cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 18-29, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112005977>. Acesso em: 22 maio 2022.

MARINS, Fernando A. S. Introdução à Pesquisa Operacional. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2011.

MELLO, C. H. P. et al. **Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução**. Produção, v. 22, n. 1, p. 1-13, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/BN5Yt8YSxPVk5RJZ3hNZmXK/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 29 maio 2022.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, ABEPRO, 2012.

MONKS, J. G. **Administração da produção**. São Paulo, McGraw-Hill, 1987.

MONTEVECHI, J. A. B. **Pesquisa Operacional (Programação Linear)**. Apostila da disciplina EPR05 – Pesquisa Operacional II. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 118p, 2000.

MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações**. 2.Ed. São Paulo: Cengage Learning, p.624, 2011.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.

MOTTA, F. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico**. Ambiente e Sociedade, v.11, n.1, p.167-184, 2008. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/asoc/a/LTPx7wtmmwSNTq4nNvChyNH/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 29 maio 2022.

OLIVEIRA, Gabriel Augusto Rodrigues Nunes. **Critérios de projeto para moinhos de cimento Portland**. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.ambientesquimicos.eq.ufrj.br/Nosso_ambito_3_files/2012GARNO-AZDPI-EQ-UFRJ-CriteriosdeProjetoparaMoinhosdeCimentoPortland.pdf. Acesso em: 29 maio 2022.

OKIISHI, Thaís Fernanda; DE SOUZA, Luciane de Fátima Rodrigues. **MÉTODO SIMPLEX APLICADO À MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE TRANSPORTE DE UMA REDE DE FARMÁCIAS**. Revista Eletrônica de Educação e Ciência, v. 3, n. 1, p. 15-21, 2013.

PARANÁ. Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEMA). Resolução Nº 76: Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento. **Diário Oficial de Santa Catarina**, Curitiba, SC, 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=144181>. Acesso em: 29 maio 2022.

PARANÁ. Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEMA). Resolução Nº 41: Critérios para o Controle da Qualidade do Ar. **Diário Oficial de Santa Catarina**, Curitiba, SC, 2002.

PETROBRAS. **Coque Verde de Petróleo. Informações Técnicas**. Gerência Desenvolvimento de Produtos – P&D em Refino e Gás Natural – Cenpes, 2019. Disponível em: <https://hmg.hotsitespetrobras.com.br/data/files/D9/72/D8/98/C942C710670F7FA70000000/Coque-Informacoes-Tecnicas.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

PIMENTEL, Renato. **Otimização: programação linear e modelagem**. 2021.

POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 1993.

PORTO, A. J. V. **Notas de aula de Simulação de Eventos Discretos: Disciplina oferecida no programa de Pós-Graduação do departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)**, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PRADO, D., Programação Linear. Belo Horizonte. EDG. 1999. 205p

PRIES, R. Coprocessamento de pneus inservíveis. *In*: II Simpósio MAUI – Brasil Alemanha – Meio Ambiente Urbano e Industrial, com o tema “Resíduos Sólidos: minimização e valorização. **Anais...**Curitiba, 2016. Disponível em: <https://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/residuos-solidos-sao-tema-de-simposio-com-palestrantes-do-brasil-e-da-alemanha/>. Acesso em: 23 maio 2022.

PENNA, Paulo Camillo. ESG: 5 iniciativas da indústria do cimento para reduzir impactos ambientais. *Massa Cinzenta–Itambé*. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta> .Acesso em: 15 junho 2022.

PEREIRA, Thiago Henrique Martins. **DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ÓTIMAS DO BLEND DE RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE BETIM/MG PARA COPROCESSAMENTO EM CIMENTEIRAS**. Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Tecnologia Ambiental, p. 93-93, 2018.

PLOSKAS, N.; SAMARAS, N. Efficient GPU-based implementations of simplex type algorithms. **APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTATION**, v. 250, p. 552–570, 2015.

REHFELDT, M. J. H. **A aplicação de modelos matemáticos em situações problema empresariais com uso do software lindo**. 299 p. Tese (Doutorado em Informática na Educação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

RETIZLAF, Alessandro. **Otimização da dosagem de escória alto-forno e demais componentes para produção de cimento supersulfatado**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROBERTO, F. A. D. C. **Balanço Mineral Brasileiro**. DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral. Ceará, p. 13. 2001.

RODRIGUES, Manuela Ferreira de Carvalho. **Uma análise preliminar da energia embutida no cimento considerando Brasil e Reino Unido**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/12580?locale-attribute=es>. Acesso em: 24 maio 2022.

SACOMAN, Marco Antônio Rahal. **Otimização de projetos utilizando GRG, Solver e Excel**. *In*: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 2012.

SANTI, A. M. M., **Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer**; investigação do maior pólo produtor de cimento do país. Região metropolitana de Belo Horizonte, MG. Tese de doutorado, Campinas, 2003.

SANTOS, Aguinaldo dos. **Seleção do método de pesquisa: guia para pós-graduando em design e áreas afins.** - Curitiba, PR: Insight, 2018.

SANTOS, Aldo Ramos. **A geração de coque de petróleo devido ao processamento de petróleos pesados e o seu uso na produção de clínquer de Cimento Portland.** 2007.

SÃO PAULO. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA). **Resolução nº 47, de 29 de agosto de 2020.** Diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR. São Paulo, SP, Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/sites/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

SCHWENCK. **Coprocessing in Allmendingen zementindustrie.** Trabalho apresentado no 9º Curso de Extensão Internacional na Alemanha em meio ambiente. Universität Stuttgart, Allmendingen, 2017.

SCOBOSA, Marcelo. **O problema da mistura em uma indústria de concreto.** 2020.

SHREVE, R. N.; BRINK Jr, J. A. **Indústrias de Processos Químicos.** 4ª ed., Guanabara Koogan, S.A. Rio de Janeiro, 1980.

SHRIVASTAVA, Sanjeev. **A systematic literature review on green manufacturing concepts in cement industries.** International Journal of Quality & Reliability Management, v.34, n.1, p.68 – 90, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312016322_A_systematic_literature_review_on_green_manufacturing_concepts_in_cement_industries. Acesso em: 29 maio 2022.

SILVA, E. M.; Gonçalves, V.; Silva, E. M.; Murolo, A. C. **Pesquisa Operacional,** Editora Atlas. São Paulo, 1995.

SILVA, E.S. **Influência da cura na resistência do concreto.** Juazeiro do Norte, 2009. Trabalho de conclusão de curso– IFCE- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará Campus Juazeiro do Norte - CE, 2009. Disponível em: <http://paulofilhoengenharia.com.br/download/Influencia-da-Cura-na-Resistencia-do-Concreto-a-Compressao.pdf>. Acesso em: 23 maio 2022.

SILVA, E. J. da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.

Silva, G. L. R., Destro, E., Marinho, G. M., & Assis, P. S. **Problema da otimização de mistura de carvão na produção de coque metalúrgico**, 2011.

SILVA, R. J. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1994. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1589/1/dissertacao_0034506.pdf. Acesso em: 23 maio 2022.

SILVA, F. G. F da. **Análise comparativa do desempenho de diferentes programas de cálculo automático de estruturas: Aplicação ao caso de um edifício em concreto armado**. 319 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Politécnico do Porto. Porto, Portugal, 2016. Disponível em: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/10500>. Acesso em: 29 maio 2022.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Roadmap tecnológico do cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Disponível: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em: 28 junho 2021.

SOBRAPO. **Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional**. Disponível em: Acessado em: 15 de junho de 2022.

SOUZA, Nayra. **As maiores fábricas de cimento do Brasil, como Votorantim, Lafarge, Itambé, Tupi, Axton**. 19 de julho de 2022. Disponível em <http://sohelices.com.br/9-maiores-fabricas-de-cimento-do-brasil/>. Acessado em: 07 de setembro de 2022.

SCOBOSA, Marcelo. **O problema da mistura em uma indústria de concreto**. UNESP. São José do Rio Preto, 2020.

TAO, J.; SUN, L.; TAN, X.; YUS ZHANG, Z. **Composition of waste sludge from municipal wastewater treatment plant**. Procedia Environmental Sciences, v.12, pt. B, p.964-971, 2012. Disponível em: [sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029612003738](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029612003738). Acesso em: 29 maio 2022.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H., 2014. **World cement production and environmental implications**. Environmental Development, v. 10, p. 36-47, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211464514000256>. Acesso em: 29 maio 2022.

VALENTE, Elizabeth Christine Marins. **Otimização em Problemas de Engenharia Civil**. 2020.

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. 2019.

WINSTON, W. L.; GOLDBERG, J. B. **Operations research: applications and algorithms**. Boston: Duxbury press, 2004. 1440 p.

WBCSD; IEA. **Cement Technology Roadmap 2009, Carbon Emissions Reduction up to 2050**, World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, Paris, 2009. Disponível em <http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climateprotection/technology-roadmap>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Guidelines for the selection and use of fuels and raw materials in the cement manufacturing industry**. 2005. Disponível em: <https://www.wbcd.org/contentwbc/download/2429/30121>. Acesso em: 21 de agosto de 2021.

World Business Council for Sustainable Development – Cement Sustainability Initiative (CSI) – Get the Numbers Right (GNR), 2022.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

YUAN, Yan et al. **Modeling and optimization of coal blending and coking costs using coal petrography**. Information Sciences, v. 522, p. 49-68, 2020.

9. ANEXO

MICROSOFT EXCEL SOLVER

No *software* foi elaborada uma planilha eletrônica com todos os campos e as informações iniciais de cada combustível.

Após completar o desenvolvimento, figura 13, a classificação por classe e grupos de combustíveis e contendo as informações como: umidade, enxofre, voláteis, cloro, poder calorífico, disponibilidade e o custo unitário descritas nas células, (B2 a O12).

Na tabela 2 são inseridos os parâmetros: a produção de clínquer e o consumo térmico do forno III que estão nas células (C16 a C17).

Nas células (C20 a C24) estão as restrições consideradas na modelagem da matriz de combustíveis.

Por fim, uma vez que as inequações técnicas de limites e relações entre a produção e os combustíveis tenham sido especificadas, a formulação pode ser realizada.

FIGURA 13 - Arquivo Modelagem

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2		Tabela1 Combustíveis	Líquidos	Combustíveis Sólidos				Combustíveis Alternativos							
3		Sub Família dos Combustíveis	Líquidos	Coque de Petróleo		Carvão		Combustíveis Alternativos				Triturados		Lixo Urbano	
4		Combustíveis Detalhado	Diesel	Coque VC	Coque Vibra	Carvão Mineral	Carvão Vegetal	Cavaco de madeira	Melaço de soja	Chip de Pneus	Pastosos	Triturados	Via pilha de combustíveis	Via matéria prima	CDRU
5		Umidade	0,00%	10,32%	9,32%	18,31%	18,00%	27,99%	0,00%	1,99%	0,00%	27,11%	40,00%	0,00%	0,00%
6		Enxofre	0,03%	5,25%	5,25%	1%	0,01%	0	0	0	0	16%	0	0	0
7		Voláteis	0	11,32%	11,32%	37,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
8		Cloro	0	0,07%	0,07%	0,07%	0,00%	0,01%	0,00%	0,05%	0,04%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
9		kcal/kg	10.954	8.100	8.100	6.845	5.200	2.636	3.000	9.029	1.600	3.611	2.936	2.500	4.500
10		kcal/ton.	10.954	8.100	8.100	6.845	5.200	2.636	3.000	9.029	1.600	3.611	2.936	2.500	4.500
11		Disponibilidade dos Combustíveis em Base Úmida	0	0	3.500	2.800	0	0	230	400	0	800	1.150	0	0
12		Custo dos Combustíveis em R\$/ton. (sem impostos)	R\$ -	R\$ 1.190,12	R\$ 1.128,77	R\$ 1.210,00	R\$ 920,00	R\$ 225,00	R\$ 169,88	R\$ 489,65	R\$ 150,00	R\$ 150,00	R\$ 55,00	R\$ 169,88	R\$ 30,00
14															
15		Tabela2 Parâmetros	Produção	Unidade de Medida	Produção -10%	Resultado R\$									
16		Produção Clínquer W3	94.357	Toneladas	85.779	1.501									
17		Consumo térmico W3	818	kcal/kg											
18															
19		Tabela3 Restrição	%	Condição											
20		% Combustível Sólido	70%	Mínimo											
21		% de Combustível Carvão (ganho clínquer)	35%	Mínimo											
22		% Substituição (CA)	20%	Máximo											
23		Enxofre	4,50%	Máximo											
24		Cloro	4,50%	Máximo											

Fonte: Autor (2022)

Em seguida, preencher todos os “Parâmetros do Solver”, tais como: “Definir Objetivo”, “Para”, “Alterando Células Variáveis”, “Sujeito às Restrições” e o método de solução em GRG Não linear. Por fim, clicar no botão “Resolver”, como apresentado na figura 14.

FIGURA 14 – Parâmetros do Solver

Fonte: Autor (2022)

O método executado gerando assim a equação para formulação dos combustíveis ótima de mínimo custo conforme ilustra a figura 15.

FIGURA 15 – Resultados Solver

Fonte: Autor (2022)

Essa análise permite ao usuário saber quais variações podem existir no problema de tal forma que a solução ótima.

Portanto, o *software* selecionado juntamente da modelagem matemática pode formular a matriz ótima de custo mínimo para matriz de combustíveis de qualquer forno de cimento.