



SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NO COPROCESSAMENTO DE REDÍDUOS INDUSTRIAIS E COMBUSTÍVEL DERIVADO DO RESÍDUO (CDR) NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Humberto Faria Rezende ¹; Lorena Cremonin de Lima ²; Ricardo Carrasco Carpio ³

¹ Humberto faria Rezende, Engenharia Mecânica, IFMG Campus Arcos, Arcos - MG;

² Lorena Cremonin de Lima, Bolsista, Engenharia Mecânica, IFMG Campus Arcos, Arcos - MG; lorena.cremonin@gmail.com

³ Orientador: Ricardo Carrasco Carpio, Campus Arcos; ricardo.carpio@ifmg.edu.br

RESUMO

O presente projeto de pesquisa apresenta um modelo de otimização para a fabricação de cimento, incluindo o custo de fabricação do clínquer, sendo este a base do cimento. Foi desenvolvido na linguagem de programação Python, buscando diminuir custos com materiais e insumos energéticos, mantendo a qualidade final do produto. O modelo implementa uma função de custo que calcula o menor valor total de produção, respeitando restrições químicas e físicas. As bibliotecas *Tkinter*, *Scipy.optimize* e *Numpy*, foram utilizados para cálculos matemáticos. A interface gráfica permite inserir valores de custos e visualizar os resultados, oferecendo simplicidade e acessibilidade, o programa é dividido em funções que ajustam a quantidade de cada material dentro dos limites estabelecidos, garantindo um processo final adequado, algumas restrições específicas foram aplicadas para garantir que a combinação de materiais esteja dentro das exigências de produção.

PALAVRAS CHAVES: Otimização, Custos, Cimento, Modelagem, Software.

INTRODUÇÃO:

A produção do cimento de forma industrial, que envolve a queima e moagem de matérias-primas para formar o clínquer, expandiu-se no final do século XIX. Portanto, mesmo que o processo seja eficiente, no desenvolvimento tem geração de CO₂, representando cerca de 7-8% das emissões globais (The European Cement Association, 2013).

O presente relatório apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de otimização de custos em um processo de fabricação de cimento, utilizando o ambiente de programação *Python*. O alto custo na fabricação de cimento, por consequência dos produtos utilizados, como as matérias primas: calcário, argila e areia, além de insumos energéticos como *petcoke*, *blend*, que é o subproduto gerado no processo de mistura de resíduos, utilizado como combustível alternativo em fornos de fábricas de cimento, e moinha de carvão vegetal foram a motivação para o desenvolvimento. O programa implementa uma função de custo que tem como objetivo minimizar o custo total de produção, atendendo restrições químicas e físicas do processo. Este modelo de otimização oferece uma solução prática e eficiente para a indústria cimenteira, permitindo a combinação ideal de materiais que diminui custos operacionais, mantendo as especificações para a qualidade do produto final. Ao executar a



tarefa de variáveis de custo, o modelo proporciona uma ferramenta para auxílio que resulta em melhorias de custos e impactos ambientais.

METODOLOGIA:

Para o desenvolvimento do programa, foram empregues três bibliotecas principais do *Python*: *Tkinter*, *Scipy.optimize* e *Numpy*. O *Tkinter* é uma biblioteca padrão do *Python* para criação de interfaces gráficas, que permite a inserção de valores e iterações com o modelo de forma involuntária. A interface inclui caixas de entrada para os valores de custo dos materiais e um botão para execução da otimização (Python, 2024). O *Scipy.optimize* é uma biblioteca que oferece algoritmos de otimização com o método *minimize* e o método *Sequential Least Squares Programming (SLSQP)* (MDO Lab, 2024) que são utilizados para resolução de problemas de minimização da função de custo, respeitando as restrições (Scipy, 2024). O *Numpy* é utilizado para manipulação de *arrays* e cálculos matemáticos, dentro da função objetivo (Numpy, 2024).

O código foi dividido em partes, com a primeira sendo o cálculo dos módulos (modulo de sílica (MS), modulo de alumina (MA) e modulo hidráulico (MH)), que controlam a qualidade, traz eficiência para a produção e garante as propriedades finais do produto. Após isso, foi realizada a montagem da equação de otimização em função dos módulos, com a intenção de encontrar uma combinação de materiais para a diminuição de gastos na produção (Tokay, 1999). A relação entre os parâmetros químicos dos clínquer e as constantes A e B da equação exponencial foram utilizadas para o cálculo de otimização. Um exemplo segue no Quadro 1:

Parâmetro	A	B
Modulo de Sílica	$5.67(MS) - 5.82$	$-0.2(MS) + 0.98$
Modulo de Alumina	$11.23e^{-0.25(MA)}$	$0.07\ln(MA) + 0.49$
Modulo Hidráulico	$138.29(MH)^2 - 613.09(MH) + 686.75$	$-4.76(MH)^2 + 21.12(HM) - 22.87$

Quadro 1- Dados sobre a relação de parâmetros

Fonte: Tokay (1999).

A função objetivo faz o cálculo de custo total a partir de variáveis de decisão, que representam a quantidade de cada material e combustível a ser utilizado, elas são multiplicadas pelo valor unitário de cada material e combustível necessário, para que assim, em seguida, o custo seja ajustado em um valor, que considera a razão entre duas expressões de quantidade de materiais.

A definição de restrições é realizada para a garantia de resultados viáveis para a otimização, com base na tese “Otimização no Coprocessamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos,



Qualidade e Impacto Ambiental” (Carpio, 2005), algumas restrições foram implementadas, definidas para assegurar que a combinação estava dentro dos limites, como o limite máximo e mínimo de quantidade de materiais e, restrições de igualdade e desigualdade, garantindo que o processo final esteja em condições físicas e químicas apropriadas. A configuração de otimização realiza a leitura dos valores inseridos e utilizando os valores iniciais de cada material, chama o otimizador e realiza a aplicação das restrições necessárias.

A interface gráfica permite que seja inserido valores de custos dos materiais e visualize os resultados da otimização, interagindo com o sistema podendo preencher caixas de entrada para os custos e executando o comando para a otimização, do qual vai realizar os cálculos e exibir os valores de cada variável e custo mínimo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

O projeto explora a aplicação de algoritmos de otimização avançados e interfaces interativas como ferramentas para resolução de problemas complexos encontrados em custos na fabricação do cimento. Ao executar o programa, o projeto torna processos comuns atualmente de forma mais eficiente, econômica e sustentável. A interface de execução é intuitiva para monitoramento e ajuste, otimizando recursos, melhorando a qualidade do produto final e reduzindo desperdícios. A aplicação desse projeto pode tornar uma produção mais ágil e contribuir para a evolução da indústria com inovação e tecnologia.

A interface do programa ficou intuitiva e de uso fácil, ela ficou igual para todos os casos, como: modulo de sílica, modulo de alumina e modulo hidráulico. Como exemplo, a Imagem 1:

Programa de Otimização

Valor Calcário (R\$/ton):

Valor Argila (R\$/ton):

Valor Areia (R\$/ton):

Valor Minério de Ferro (R\$/ton):

Valor Carvão Mineral (R\$/ton):

Valor Coque (R\$/ton):

Valor Pneu (R\$/ton):

Valor Energia (R\$/kWh):

Executar Otimização

Resultado:



Imagem 1 – Interface do programa

Fonte: Próprios Autores

CONCLUSÕES:

O programa desenvolvido é um modelo eficiente de otimização de custos que possibilita o ajuste da combinação de materiais em um processo de fabricação de cimento, com a intensão de atingir o menor custo, cumprindo todas as restrições necessárias. Essa ferramenta pode ser aplicada na indústria no auxílio de tomada de decisões, permitindo uma produção mais econômica e mantendo a qualidade dos produtos finais. Uma interface gráfica traz a facilidade de interação do usuário com o sistema, fazendo com que o processo de otimização se torne mais acessível para indústrias que não necessariamente possuem experiência com programação.

REFERÊNCIAS:

CARPIO, Ricardo Carrasco. “Otimização no co-processamento de resíduos na indústria do cimento envolvendo custos, qualidade e impacto ambiental.” Cap. 6 e Cap. 7, 2005.

CEMBUREAU. “The european cement association.” 2013. doi: <https://www.cembureau.eu>. Acesso em: 12 nov. 2024.

MDO LAB – “PyOptSparse.” SLSQP. 2024. doi: <https://mdolab-pyoptsparse.readthedocs-hosted.com/en/latest/optimizers/SLSQP.html>. Acesso em: 12 nov. 2024.

NUMPY. “The fundamental package for scientific computing with Python.” 2024. doi: <https://numpy.org>. Acesso em: 12 nov. 2024.

PYTHON. Tkinter -” Interface Python para Tcl/Tk.” 2024. doi: <https://docs.python.org/pt-br/3.13/library/tkinter.html>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SCIPY. “Optimization (scipy.optimize).” 2024. doi: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/optimize.html>. Acesso em: 11 nov. 2024.

TOKYAY M. “Effect of chemical composition of clinker on grinding energy requirement.” p. 531–535. 1999.



seminário
de iniciação
científica

ISSN 2558-6052

