LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Otimização da mistura de resíduos no coprocessamento: Um estudo de caso em uma indústria cimenteira

Maria Regina Ferreira de Araújo
Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba
maria.regina2@academico.ufpb.br

Ricardo Lukas de Medeiros França
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas,
Universidade Federal da Paraíba
ricardo.lukas@academico.ufpb.br

Luciano Costa e Hugo Harry Kramer
Departamento de Engenharia de Produção / Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal da Paraíba
{luciano.costa, hugo.kramer}@academico.ufpb.br

RESUMO

A grande demanda energética de uma cimenteira é um aspecto amplamente conhecido. Para suprir parte dessa necessidade técnicas sustentáveis têm sido adotadas, dentre as quais se destaca o coprocessamento. O coprocessamento sobressai pela utilização de variados tipos de resíduos, seja de origem doméstica ou industrial, como combustível para os fornos de clínquer. Entretanto, devido às diferentes propriedades químicas desses resíduos, uma mistura inadequada antes da queima pode comprometer a qualidade final dos cimentos. Este trabalho apresenta a aplicação de um modelo matemático desenvolvido para otimizar a qualidade da mistura de resíduos no setor de coprocessamento de uma cimenteira, além dos resultados após o período de monitoramento. As análises dos resultados comprovam o impacto da aplicação da pesquisa operacional e de ferramentas da qualidade na melhoria dos processos industriais. O projeto alcançou maior estabilidade e controle no processo após implementar a otimização da composição de resíduos no forno de clínquer.

PALAVRAS CHAVE. Modelagem Matemática, Seis Sigma, Coprocessamento.

ABSTRACT

The high energy demand of a cement plant is a widely known aspect. To meet part of this need, sustainable techniques have been adopted, among which co-processing stands out. Co-processing is notable for using various types of waste, whether from domestic, industrial, or agricultural origins, as fuel for clinker kilns. However, due to the different chemical properties of these wastes, improper mixing before burning can compromise the final quality of the cements. This work presents the application of a mathematical model to optimize the quality of waste mixtures for the co-processing sector of a cement plant, as well as the results after the monitoring period. The analysis of the results confirms the impact of applying operations research and quality tools to improve industrial processes. The project achieved greater stability and control in the process after implementing the optimization of the waste composition in the clinker kiln.

KEYWORDS. Mathematical Modeling, Six Sigma, Co-processing.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

1. Introdução

No atual cenário industrial, caracterizado por uma competição crescente, inovações constantes e avanços tecnológicos, as empresas se veem diante de desafios significativos para manter sua relevância e eficiência. A indústria de produção de cimento não é exceção a essa realidade. Sendo uma operação contínua e complexa, a otimização dos processos desempenha um papel vital na busca pela excelência operacional. À medida que a demanda por cimento cresce, os desafios se multiplicam, exigindo soluções cada vez mais complexas para os problemas enfrentados.

A indústria cimenteira é amplamente reconhecida pela sua elevada demanda de energia, que se manifesta de duas maneiras distintas. A primeira é a utilização de energia elétrica, que desempenha um papel crucial em todas as fases do processo industrial, desde o setor de britagem e das correias transportadoras até o acionamento de fornos e moinhos. A segunda é a utilização de calor, empregado nos fornos rotativos durante o processo de queima na fabricação do clínquer. É crucial ressaltar que a maior parte do consumo de energia nessa indústria, aproximadamente 63%, está diretamente associada à produção de clínquer [Santi e Sevá Filho, 2004].

Analisar os custos energéticos e financeiros na indústria cimenteira destaca a importância de implementar práticas sustentáveis. O coprocessamento surge como uma proposta sustentável, sendo utilizado na queima em fornos de clínquer. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o coprocessamento é a técnica de destruição total de resíduos, sem geração de novos passivos ambientais, em fornos de cimento, amplamente utilizado no Brasil desde a década de 90. Essa técnica envolve a substituição parcial de combustíveis convencionais por resíduos durante a combustão no forno, proporcionando a destruição segura de grandes volumes de resíduos sem comprometer a qualidade do cimento [ABCP, 2010].

A técnica surgiu durante a crise do petróleo dos anos 80, com o objetivo de reduzir os custos de produção, e é amplamente adotada na Europa há mais de 40 anos. No Brasil, a técnica em indústrias cimenteiras é regulamentada pela Resolução CONAMA Nº 499/2020 [BRASIL, 2020], a qual determina que resíduos com poder calorífico, como borras oleosas, borras de tinta, lodos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), plásticos e papéis contaminados, podem ser explorados como fontes alternativas de energia para o processo de coprocessamento. Por outro lado, proíbe o uso de materiais como resíduos domiciliares brutos, radioativos, de serviços de saúde, explosivos e agrotóxicos. O coprocessamento tem um impacto direto no meio ambiente, uma vez que proporciona uma destinação final aos materiais, evitando a geração de novos resíduos e reduzindo a exploração de recursos naturais não renováveis, como coque, gás, calcário, argila, e outros elementos. Essas práticas representam uma alternativa viável para a indústria cimenteira [Ferrari, 2002].

Conforme indicado por Rocha et al. [2011], a utilização de resíduos industriais como combustível complementar coloca a indústria cimenteira em uma condição inédita, passando a lucrar com a recepção de resíduos para coprocessamento. Além dos aspectos econômicos, o coprocessamento contribui para mitigar os problemas associados à alteração ambiental decorrente de toda a cadeia produtiva, destacando a importância do coprocessamento para a indústria e a necessidade de busca constante por otimização desse processo. A complexidade se destaca no processo de criação de mistura a partir desses resíduos, o *blend*, onde se busca superar os desafios relacionados à gestão dos materiais e à necessidade de aprimorar o desempenho do processo.

Neste contexto, há uma imensa variedade de resíduos existentes para uso, resultante de composições materiais extremamente diversas. Este cenário leva a desafios de estabilidade do processo na utilização dos resíduos nos fornos de clínquer, pois cada resíduo possui características químicas específicas, tornando a composição ideal do *blend* um desafio diário. Os desafios no coprocessamento podem aumentar quando o processo de determinação da receita do *blend* é conduzido manualmente, especialmente sem um método eficiente para garantir a conformidade com os

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

parâmetros químicos exigidos. É crucial garantir uma combinação adequada de resíduos na composição do *blend* para manter a qualidade do clínquer produzido e a eficiência do processo produtivo, protegendo tanto o produto quanto o mecanismo do forno.

Neste trabalho, será explorada a otimização do processo de criação da composição da mistura de resíduos para alimentação no forno de clínquer. A proposta do modelo matemático visa a maximização de utilização de resíduos através de variáveis de decisão operacionalmente simplificadas para o cotidiano da empresa estudada, isto é, o uso do número de conchas da pá carregadeira utilizada para a operação. Assim, espera-se proporcionar o aumento na capacidade de produção, a redução de desperdícios e a melhoria da qualidade do processo.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2, aprofundamos nas características do setor de coprocessamento de uma cimenteira, onde são apresentadas as características do *blend* e os aspectos fundamentais para seu uso no forno de clínquer. A Seção 3 apresenta o modelo matemático. Já os resultados e suas discussões são apresentadas na Seção 4. E, finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

2. Descrição do Problema

Na empresa analisada, a produção de cimento Portland se inicia com a extração de calcário na mina. Em seguida, o calcário é direcionado para a britagem, onde sua granulometria é reduzida e sua composição homogeneizada. Posteriormente, o calcário britado é misturado com outros minerais e enviado para o forno de clínquer. No forno, o calcário misturado é queimado a temperaturas extremamente elevadas, entre 1400°C a 1500°C, utilizando coque de petróleo e *blend* de resíduos coprocessados como combustíveis. Esse processo resulta na obtenção do clínquer, que é a principal matéria-prima do cimento. Durante a queima, ocorrem reações químicas entre os combustíveis e a matéria-prima, essenciais para garantir a qualidade desejada do cimento.

Esse *blend* utilizado para substituir parcialmente o coque na produção de clínquer é gerenciado pelo setor de coprocessamento, o qual realiza a administração dos resíduos industriais e/ou urbanos utilizados para compô-lo. O desafio se dá na busca pela maximização no uso de resíduos para alimentar o forno de clínquer, onde a dificuldade em atingir essa meta está relacionada à variação nos padrões de qualidade dos resíduos utilizados na composição do *blend*. O coque tende a manter consistentes suas características de qualidade, com apenas algumas pequenas variações dos seus componentes, devido à sua origem e propriedades geralmente constantes. Por outro lado, os insumos que compõem a mistura alimentada no forno provêm de diferentes fontes e apresentam uma ampla variedade de suas características químicas. Assim, dentre os materiais coprocessados estão: pneus, papéis e plásticos contaminados, óleos usados, sólidos trituráveis, equipamentos de proteção individual (EPIs) usados, borras oleosas, resíduos do ETE, catalisadores usados, terras e serragens contaminadas. Isso ocorre por diversos motivos, como a consideração do custo-benefício na aquisição de um insumo específico ou a falta de disponibilidade no mercado. Por essa razão, para uma visão aprofundada do problema, o processo do setor de coprocessamento na cimenteira analisada foi dividido nas seguintes etapas: recebimento de insumos, análise química laboratorial, estocagem e própria blendagem.

Na empresa, o processo é iniciado com o recebimento diário de uma ampla variedade de resíduos, cada um com suas origens e qualidades distintas, e com volumes imprevisíveis. Ao receber novos lotes de insumos, são coletadas amostras para análise por meio de testes químicos de qualidade. As características destes insumos devem ser rigorosamente mapeadas, a fim de processá-los e combiná-los em uma única mistura que atenda a critérios de qualidade requeridos. No processo, é comum que os resíduos sejam armazenados em pilhas em um galpão específico para o setor, organizados com base nos seus recebimentos e características químicas (Figura 1). Apesar de serem registrados no sistema da empresa, é importante acompanhar os estoques físicos de forma indivi-

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

dualizada para monitorar as entradas e saídas do processo. A etapa de blendagem visa criar uma composição única com os resíduos para que possam ser blendados e utilizados no forno. Ela se inicia com a alimentação de uma planilha eletrônica, atualizada diariamente. Nesta planilha, são registrados os insumos disponíveis, juntamente com suas respectivas qualidades químicas. Para alcançar a qualidade desejada, são ajustados manualmente a quantidades dos insumos, através do peso, a fim de obter a melhor composição possível.



Figura 1: Galpão do Coprocessamento

Nesse contexto, características como umidade, teor de cloro, PCI, cinzas e densidade, devem atender aos padrões específicos. Logo, a receita do *blend* precisa atender aos requisitos:

1. **Umidade**: Para otimizar a eficiência da queima, a umidade deve ser consistentemente inferior ao limite máximo definido da composição do blend. Caso ultrapasse esse limite, comprometerá a eficiência da queima, o que resulta no aumento no consumo de energia. No entanto, devido as variações nos padrões de qualidade a média da umidade no processo deve ser delimitado o limite mínimo e máximo de umidade.
2. **Cloro**: O teor de cloro é um parâmetro crítico. Altos teores de cloro na composição podem resultar em aderências de material nas paredes do forno de clínquer, afetando sua eficiência e durabilidade. Portanto, o teor de cloro no *blend* não deve exceder o limite máximo definido.
3. **PCI**: Quanto maior o PCI do *blend*, melhor. Segundo a Agencia Nacional do Petróleo (ANP), PCI do coque é 8390 kcal/kg, caso a composição do *blend* de resíduos fique abaixo do valor máximo estimado, resultará em menor eficiência energética. Sendo assim, deve ser ajustado para que permaneça dentro da faixa estabilidade.
4. **Cinzas**: Resultantes da queima, elas são os resíduos não totalmente consumidos. No coprocessamento, essas cinzas são direcionadas para o forno e se juntam a composição do clínquer. Porém, seu excesso pode afetar a qualidade dessa matéria-prima. Portanto, a quantidade de cinzas no *blend* deve ser delimitada dentro de padrões estimados.
5. **Densidade**: A densidade do *blend* é crítica para o funcionamento adequado do equipamento de classificação e direcionamento. Se a densidade for muito baixa, o equipamento terá dificuldade em movimentar o material pela correia, enquanto uma densidade muito alta impedirá o processamento adequado.

Portanto, devido à falta de padronização das matérias-primas utilizadas no processo de coprocessamento e a manualidade observada na execução da tarefa para uma tomada decisão, foi necessário considerar uma abordagem mais elaborada para a composição e a blendagem dos resíduos a serem consumidos, com o objetivo de garantir a estabilidade na qualidade do processo. Assim foi desenvolvido um modelo matemático com o objetivo de maximizar a quantidade de *blend* produzido por lote para abastecer o forno. O modelo em questão visa a respeitar a composição ideal do *blend* e considera que o peso de cada resíduo utilizado deve ser menor do que os estoques físicos disponíveis. Dessa maneira, ferramentas estatísticas, como análise de tendências e gráficos de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

controle, foram utilizadas para monitorar as características do *blend*. Isso permitiu detectar desvios significativos em relação às médias planejadas. Essa abordagem ajuda a tomar medidas corretivas quando necessário.

Embora o problema abordado neste estudo se assemelhe ao clássico problema de mistura, a complexidade do modelo aumenta significativamente devido à necessidade de considerar apenas quantidades inteiras, evitando frações. Na operação diária do setor de coprocessamento da cimenteira, a mistura é feita com o auxílio de uma pá carregadeira equipada com balança em sua concha. A dinâmica de operação da mistura exige precisão e agilidade, apresentando desafios para manter a qualidade da mistura. Para alinhar o modelo matemático com as práticas operacionais, optou-se por definir a quantidade de conchas de cada tipo de resíduo como a variável de decisão na composição do *blend*, ao invés de se basear estritamente no peso dos resíduos. Essa decisão é justificada pelo uso da pá carregadeira, que, apesar de estar equipada com uma balança, não oferece uma medição de peso precisamente exata, mas é capaz de transportar quantidades específicas por concha. Portanto, a aplicação de um modelo de programação linear, que consideraria as variáveis de decisão com base no peso dos resíduos, não se mostra viável operacionalmente. A substituição dessas variáveis por outras que contabilizem o número de conchas, embora aumente a complexidade do modelo, pois leva a definição de um modelo de programação inteira, também o torna mais realista e adaptado à realidade operacional da cimenteira.

Para ilustrar as diferenças entre as abordagens, as Tabelas 1 e 3 mostram soluções com dados fictícios para 80 toneladas de insumos, onde há 10 toneladas para cada um dos 8 tipos disponíveis. Ambas as tabelas estão organizadas da mesma maneira, onde na primeira coluna, nomeada *Resíduo*, são informados quais insumos estão sendo determinantes para a composição do *blend*. Em seguida estão as características de cada um desses insumos na ordem: peso em toneladas por concha; quantidade de conchas; peso total em toneladas, o produto entre as duas colunas anteriores; porcentagem, o percentual do insumo presente na composição do *blend*; percentual de umidade; percentual cloro; PCI em quilocaloria por quilograma; percentual de cinzas; e densidade em toneladas por metro cúbico. A Tabela 1 apresenta a solução, a qual considera as variáveis de decisão o peso total, enquanto a Tabela 3 utiliza a quantidade de conchas.

Tabela 1: Variáveis de decisão por peso

Resíduo	Peso por Concha (t)	Qnt. de Conchas	Peso Total (t)	Porcent. $(\%)$	Umidade $(\%)$	Cloro $(\%)$	PCI $(kcal/kg)$	Cinzas $(\%)$	Densidade (t/m^3)
Insumo 1	1,50	6,67	10,00	12,50	20,00	0,40	4.000	10,00	0,43
Insumo 2	2,00	5,00	10,00	12,50	2,00	0,01	3.000	35,00	0,57
Insumo 3	1,60	6,25	10,00	12,50	5,00	0,00	3.500	40,00	0,46
Insumo 4	3,00	3,33	10,00	12,50	15,00	0,20	2.000	15,00	0,86
Insumo 5	3,50	2,86	10,00	12,50	18,00	0,30	1.500	50,00	1,00
Insumo 6	4,00	2,50	10,00	12,50	25,00	0,15	3.000	20,00	1,14
Insumo 7	2,50	4,00	10,00	12,50	20,00	0,05	4.500	5,00	0,71
Insumo 8	1,90	5,26	10,00	12,50	40,00	0,10	1.000	10,00	0,54
Mix de Resíduos	2,50	35,87	80,00	100,00	18,13	0,15	2.813	23,13	0,71

A solução apresentada na Tabela 1 apresenta a dificuldade operacional mencionada, ou seja, a quantidade de conchas torna-se fracionária. Para tentar contornar esse problema, uma das propostas foi fazer o arredondamento da quantidade de concha para os valores inteiros mais próximos, entretanto essa alternativa tornou-se inviável de várias maneiras. Em condições operacionais isso se tornaria uma etapa manual, o que não seria conveniente para o projeto. Além disso, mesmo com a automatização do arredondamento, soluções inviáveis poderiam ser obtidas, de modo que violariam as restrições dos parâmetros químicos e físicos da composição do *blend*, ou até mesmo violariam a disponibilidade de recursos, conforme apresentado na Tabela 2.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

Tabela 2: Arredondamento da solução encontrada na Tabela 1

Procedência	Conchas	Peso Total
Insumo 1	7,00	10,50
Insumo 2	5,00	10,00
Insumo 3	6,00	9,60
Insumo 4	3,00	9,00
Insumo 5	3,00	10,50
Insumo 6	3,00	12,00
Insumo 7	4,00	10,00
Insumo 8	5,00	9,50
Total	36,00	81,10

Portanto, a proposta de consideração de variáveis inteiras foi implementada, transformando as quantidades de conchas dos resíduos em variáveis de decisão. Assim, a resolução do modelo não depende de etapas subsequentes e é adaptada ao contexto operacional da fábrica. A solução para o problema, utilizando as novas variáveis, é apresentada na Tabela 3. O modelo, agora, não requer intervenção manual, permitindo a obtenção de soluções vantajosas e viáveis para a operacionalização no chão de fábrica.

Tabela 3: Variáveis de decisão por número de conchas

Resíduo	Peso por Concha (t)	Qnt. de Conchas	Peso Total (t)	Porcent. $(\%)$	Umidade $(\%)$	Cloro $(\%)$	PCI $(kcal/kg)$	Cinzas $(\%)$	Densidade (t/m^3)
Insumo 1	1,50	6,00	9,00	12,48	20,00	0,40	4.000	10,00	0,43
Insumo 2	2,00	5,00	10,00	13,87	2,00	0,01	3.000	35,00	0,57
Insumo 3	1,60	6,00	9,60	13,31	5,00	0,00	3.500	40,00	0,46
Insumo 4	3,00	3,00	9,00	12,48	15,00	0,20	2.000	15,00	0,86
Insumo 5	3,50	2,00	7,00	9,71	18,00	0,30	1.500	50,00	1,00
Insumo 6	4,00	2,00	8,00	11,10	25,00	0,15	3.000	20,00	1,14
Insumo 7	2,50	4,00	10,00	13,87	20,00	0,05	4.500	5,00	0,71
Insumo 8	1,90	5,00	9,50	13,18	40,00	0,10	1.000	10,00	0,54
Mix de Resíduos	2,50	33,00	72,10	100,00	17,88	0,14	2.865	22,39	0,69

3. Modelo Matemático

Com base nos objetivos e restrições mencionados anteriormente, propõe-se um modelo de programação inteira para encontrar a solução ótima para o problema em questão. A estrutura do modelo é definida por um conjunto $I = \{1, \ldots, n\}$, representando os n tipos de resíduos. Para cada resíduo $i \in I$, os pesos por concha são representados por p_i, a quantidade de conchas por x_i, e o peso disponível no estoque por Q_i. Os parâmetros do problema relacionam-se com as especificações requeridas, incluindo os limites mínimos e máximos para características físicas e químicas essenciais como umidade, cloro, PCI, cinzas e densidade de cada resíduo. Assim, para cada resíduo $i \in I$ na composição do *blend*, tem-se: Percx_{Umid_i} para o percentual de umidade; Percx_{Cloro_i} para o percentual de cloro; PCI_i para o Poder Calorífico Inferior; Percx_{Cinzas_i} para o percentual de cinzas; $Dens_i$ para a densidade. Além disso, os limites são definidos como segue: $Umid_{\min}$ e $Umid_{\max}$, para umidade; $Cloro_{\min}$ e $Cloro_{\max}$, para cloro; $PCI_{\min}$ e $PCI_{\max}$, para o PCI; $Cinzas_{\min}$ e $Cinzas_{\max}$, para as cinzas; $Dens_{\min}$ e $Dens_{\max}$, para a densidade. Este modelo visa assegurar que cada componente do *blend* atenda às especificações desejadas, maximizando a eficiência do processo de coprocessamento enquanto se mantém dentro dos parâmetros ambientais e operacionais estabelecidos. O modelo de otimização referente ao problema pode ser escrito como segue:

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

$$(\mathcal{FNL}) \quad max \quad \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{1}$$

sujeito a

$$Umid_{\text{min}} \leq \frac{p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Umid}_i}}{\sum_{i \in I} p_i x_i} \leq Umid_{\text{max}} \tag{2}$$

$$Cloro_{\text{min}} \leq \frac{p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Cloro}_i}}{\sum_{i \in I} p_i x_i} \leq Cloro_{\text{max}} \tag{3}$$

$$Cinzas_{\text{min}} \leq \frac{p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Cinzas}_i}}{\sum_{i \in I} p_i x_i} \leq Cinzas_{\text{max}} \tag{4}$$

$$PCI_{\text{min}} \leq \frac{p_i x_i PCI_i}{\sum_{i \in I} p_i x_i} \leq PCI_{\text{max}} \tag{5}$$

$$Dens_{\text{min}} \leq \frac{p_i x_i Dens_i}{\sum_{i \in I} p_i x_i} \leq Dens_{\text{max}} \tag{6}$$

$$p_i x_i \leq Q_i \qquad \forall i \in I \tag{7}$$

$$x_i \in Z \qquad \forall i \in I \tag{8}$$

A função objetivo (1) visa maximizar a quantidade de *blend* produzido, representada pela soma dos produtos das quantidades de conchas x_i pelo peso de cada concha p_i para cada resíduo $i \in I$. As restrições (2)–(6) garantem que os limites máximos e mínimos dos parâmetros de umidade, cloro, cinzas, PCI e densidade sejam respeitados, considerando o percentual dessas características em cada resíduo $i \in I$. Adicionalmente, as restrições (7) limitam as quantidades de insumos i utilizadas na composição do *blend* para que não excedam os estoques disponíveis Q_i dos resíduos. Por fim, as restrições (8) definem o tipo das variáveis de decisão. No entanto, é importante observar que as restrições (2)–(6) apresentam natureza não linear. Portanto, para viabilizar a utilização de um solver de programação linear, foi necessário reescrever essas restrições, a quais são apresentadas como (10)–(14):

$$(\mathcal{FL}) \quad max \quad \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{9}$$

sujeito a

$$Umid_{\text{min}} \sum_{i \in I} p_i x_i \leq p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Umid}_i} \leq Umid_{\text{max}} \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{10}$$

$$Cloro_{\text{min}} \sum_{i \in I} p_i x_i \leq p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Cloro}_i} \leq Cloro_{\text{max}} \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{11}$$

$$Cinzas_{\text{min}} \sum_{i \in I} p_i x_i \leq p_i x_i \text{Perc}x_{\text{Cinzas}_i} \leq Cinzas_{\text{max}} \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{12}$$

$$PCI_{\text{min}} \sum_{i \in I} p_i x_i \leq p_i x_i PCI_i \leq PCI_{\text{max}} \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{13}$$

$$Dens_{\text{min}} \sum_{i \in I} p_i x_i \leq p_i x_i Dens_i \leq Dens_{\text{max}} \sum_{i \in I} p_i x_i \tag{14}$$

$$p_i x_i \leq Q_i \qquad \forall i \in I \tag{15}$$

$$x_i \in Z \qquad \forall i \in I \tag{16}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

4. Resultados

Com o intuito de democratizar o acesso, a solução foi desenvolvida e implantada através de uma planilha do Microsoft Excel®, a fim de qualquer pessoa possa utilizar a ferramenta para resolver o problema apresentado. O modelo proposto foi implementado e resolvido com o auxílio do OpenSolver (`https://opensolver.org/`), um suplemento externo ao Excel que possibilita utilização do COIN-OR *Branch-and-Cut* (COIN-OR CBC) como resolvedor dos problemas implementados. Isso garante uma abordagem mais robusta e eficiente na busca pela solução ótima.

A planilha foi estruturada para melhor gerenciamento dos insumos utilizados no processo em duas abas. Para a manipulação automatizada dos dados foram criadas *macros* executadas através de botões na planilha. As macros foram definidas através da linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*). Uma macro foi definida para realização do cadastro de insumos e a outra foi definida para acomodar apenas os insumos que tenham estoque maior do que zero. A estrutura das colunas da primeira aba tem o objetivo de organizar o cadastro, sendo elas:

- **Procedências**: Registro da fonte ou do local de origem dos resíduos, os nomes são atribuídos pela equipe química laboratorial.
- **Resíduo**: Especificação do tipo de resíduo (*blend*, biomassa ou borracha).
- **Peso por Concha**: Registro do peso médio da concha do resíduo.
- **Estoque Físico**: Quantidade atual disponível no estoque físico do resíduo.

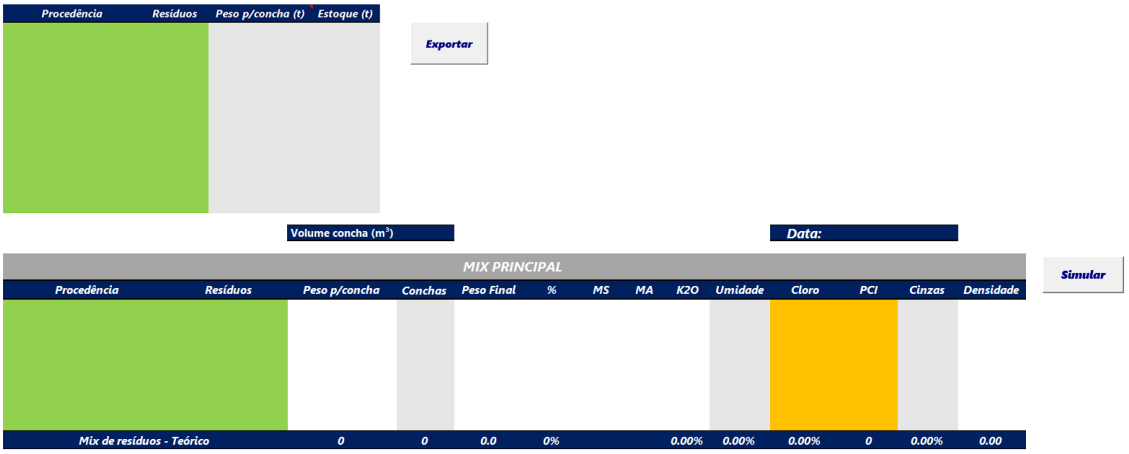


Figura 2: Primeira e segunda aba da planilha de simulação

O botão *Exportar*, na primeira aba, atualiza os dados na segunda aba com os dados dos resíduos com estoque positivo. A segunda aba é dedicada à simulação da composição do *blend* de consumo. É nesta etapa que se faz uso do modelo de programação inteira desenvolvido. Ao exportar os resíduos com estoque positivo, os dados mais recentes de análises são automaticamente extraídos, incluindo módulo de sílica (MS), módulo de alumina (MA), óxido de potássio (K_2O), umidade, cloro, PCI e cinzas, diretamente das planilhas de qualidade disponibilizadas pela equipe do laboratório químico. Com esses dados devidamente validados, basta clicar na opção *Simular* para que a macro VBA acione o OpenSolver, o qual resolve o problema para a instancia apresentada e exibe a solução correspondente.

4.1. Ferramentas de monitoramento

Para monitorar adequadamente os resultados obtidos com a implementação do novo processo para a obtenção da mistura a ser utilizada nos fornos de clínquer, foram implementadas ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP). Dessa forma, a coleta e verificação dos resultados ocorrem através de métodos comprovados, como a utilização das sete ferramentas da qualidade

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

[Montgomery, 2016], as quais proporcionam o funcionamento adequado e a melhoria contínua, tanto do modelo matemático quanto do processo em si. Para tal foram implementadas as cartas de controle estatístico da qualidade. Essas cartas desempenham um papel crucial ao estabelecer limites superiores e inferiores para a qualidade do processo. Além disso, elas têm a função de comparar os dados teóricos de composição gerados pelo modelo com os resultados reais obtidos por meio das análises do laboratório de qualidade. Essa comparação permite garantir que o modelo matemático produza resultados positivos e contribua para a melhoria contínua do processo. O uso do gráfico de controle é fundamental para representar a amostragem do processo e identificar variações controladas e não controladas, o que possibilita a eliminação das causas raiz e a estabilização do processo ao longo do tempo.

Essa abordagem integrada permite uma avaliação completa e contínua do desempenho do processo, e identificação de discrepâncias entre as previsões teóricas e as medições reais do laboratório. Quando ocorrem desvios significativos, são acionados planos de ação para melhorar os dados que estejam fora do padrão, com o objetivo de otimizar a composição do *blend* e garantir que o processo atenda consistentemente às metas estabelecidas. Desta forma, a implementação das cartas de controle proporciona um controle de qualidade mais rigoroso e uma abordagem proativa para aprimorar o processo.

4.2. Aplicação do modelo

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à utilização do modelo de otimização no processo de composição do *blend* de resíduos no forno de clínquer. Anteriormente, esse processo era realizado de forma manual, o que resultava em instabilidade operacional. Isso é demonstrado no mapeamento dado pelas cartas de controle das Figuras 3, 4, 5 e 6 onde se há a previsão de resultados dado pela receita do *blend* (linhas em verde) e a aferição da qualidade do *blend* pela equipe química laboratorial (linhas em vermelho). Essa abordagem permitiu evidenciar a considerável instabilidade enfrentada na qualidade devido ao processo anteriormente utilizado de composição aleatória do *blend*.

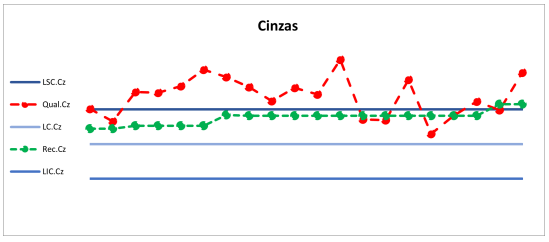


Figura 3: Carta de Controle - Cinzas

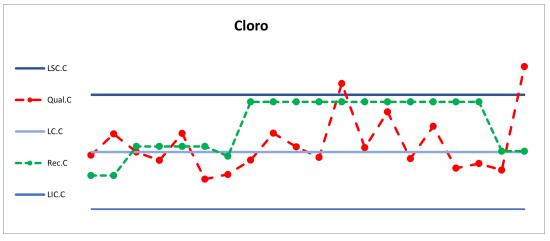


Figura 4: Carta de Controle - Cloro

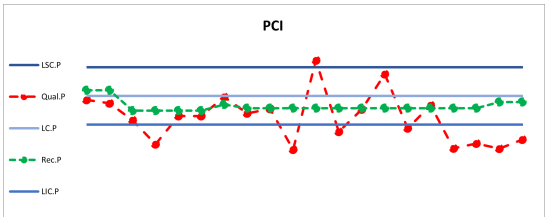


Figura 5: Carta de Controle - PCI

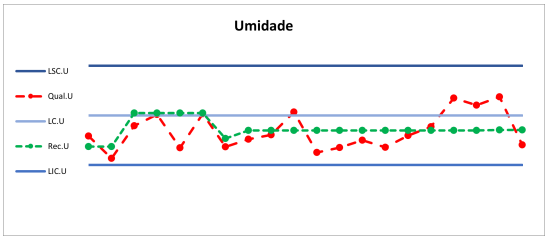


Figura 6: Carta de Controle - Umidade

Ao analisar os dados obtidos durante a época em que uma abordagem manual era adotada para composição do *blend*, notava-se um baixo índice sigma, ou seja, um baixo nível de qualidade do processo de produção. O que indica que o nível de qualidade do processo de produção que poderia ser aprimorado.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

Conforme demonstrado no mapeamento das Figuras 7, 8, 9 e 10, destaca-se na análise que os resultados da composição ocorriam majoritariamente descentralizados, isto é, fora dos limites inferiores (LSL) e/ou superiores (USL). Dessa maneira, em casos como o PCI e Umidade nas Figuras 9 e 10, respectivamente, a capabilidade (*Cpk*) mostrou-se negativa. Portanto, significa que a média está fora dos limites desejados.

O caso mais crítico é o da Umidade, visto na Figura 10, pois seus resultados estavam majoritariamente fora dos limites desejados. Assim como é visto através da curva de longo prazo (linha tracejada), a qual indica tendencia de piorar seu índice sigma (*Z.Bench*) de -1.68 para -2.10. Já os gráficos 7, 8, 9 para cinzas, cloro e PCI, respectivamente, apresentaram ter maior estabilidade, dado o comportamento da curva de curto prazo (linha vermelha) e da curva de longo prazo, pois possuem tendência de se estabelecer dentro dos limites. Entretanto, estes parâmetros ainda possuem nível sigma baixo.

Após a adoção da abordagem baseada em programação matemática, a operação manual foi eliminada, sendo substituída por automação no preenchimento de planilhas e tomada de decisões. O modelo matemático desenvolvido possibilitou a criação de um padrão de qualidade para os materiais consumidos pelo forno, além de proporcionar uma melhor visualização dos dados teóricos e reais por meio de cartas de controle. Um dos benefícios observados foi a notável e contínua melhoria na estabilidade e capabilidade do processo. Outro benefício foi que ele assegurou o controle da estabilidade teórica da composição. Quanto às cartas de controle, elas permitiram a identificação de desconformidades entre os dados teóricos e os dados reais.

Este fator evidencia o aprimoramento da capabilidade e do nível sigma do processo em apenas um mês após a implementação do projeto, conforme ilustrado nas Figuras 11, 12, 13 e 14. O caso de maior destaque volta a ser a Umidade, Figura 14. Dentre os parâmetros avaliados o *Z.Bench* aumentou, assim como a capabilidade do modelo. Além disso, o parâmetro de Umidade não apenas ficou dentro dos limites desejados como obteve maior índice sigma de 1.10, e o índice potencial de 1.62, o qual aponta para oportunidades de melhoria e de melhor controle dos parâmetros.

A otimização do processo de composição de resíduos no forno de clínquer melhorou a eficiência e sustentabilidade do processo. A aplicação do modelo trouxe estabilidade e controle ao processo, substituindo a abordagem manual por automação e modelos matemáticos. Isso resultou em um padrão consistente de qualidade nos materiais consumidos, evidenciado pelas cartas de controle. A notável melhoria na capabilidade e estabilidade do processo em um curto período após a implementação é evidência clara do sucesso desse projeto, o que é evidenciado pela maior sobreposição entre as curvas de normalidade e tracejadas. Além disso, o aumento da taxa de substituição térmica contribuiu para a sustentabilidade ambiental e econômica da empresa.

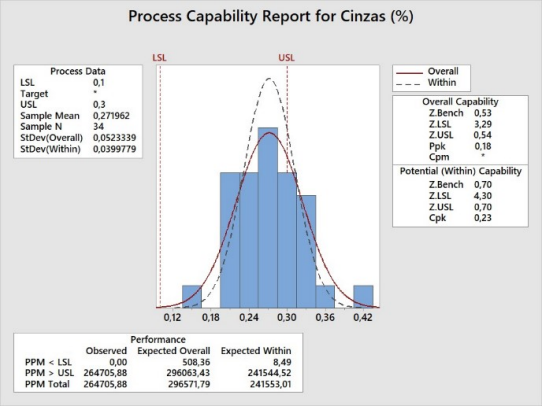


Figura 7: Cinzas antes da otimização

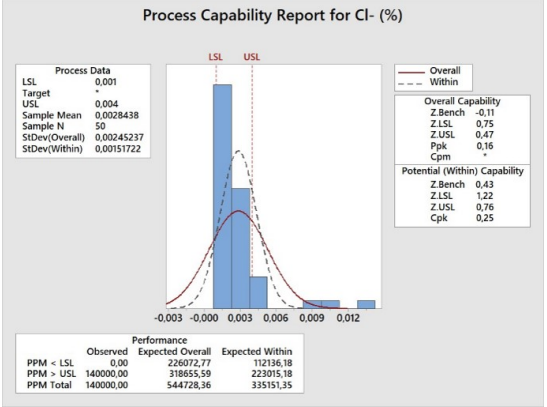


Figura 8: Cloro antes da otimização

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

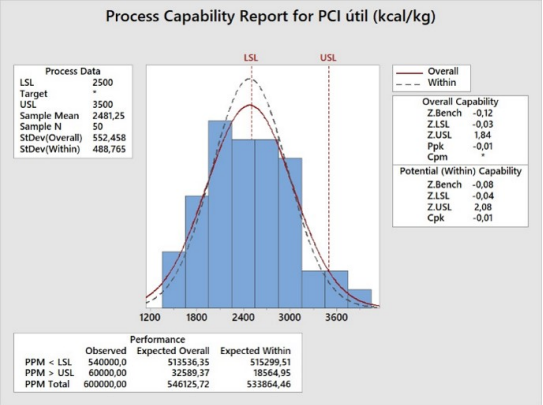


Figura 9: PCI antes da otimização

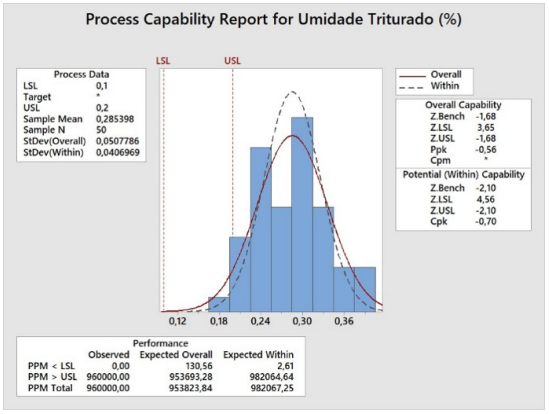


Figura 10: Umidade antes da otimização

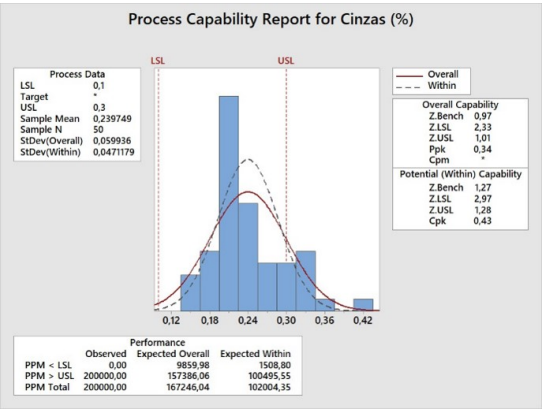


Figura 11: Cinzas depois da otimização

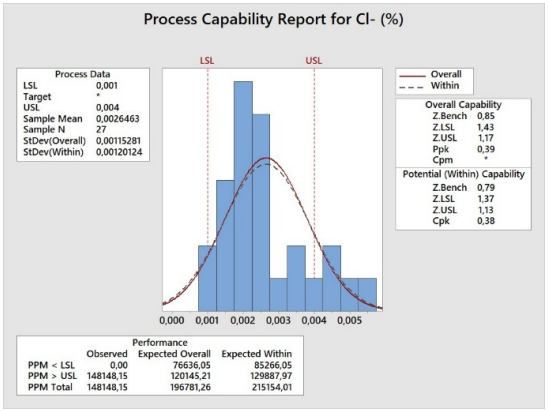


Figura 12: Cloro depois da otimização

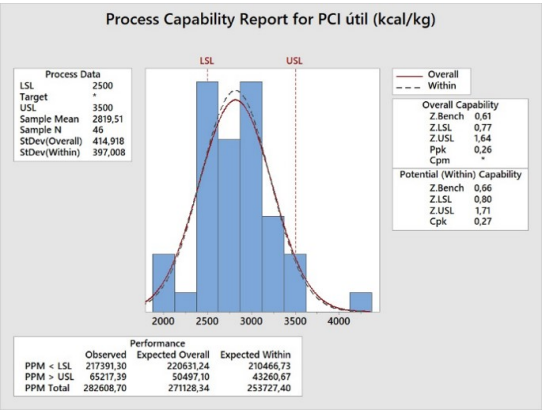


Figura 13: PCI depois da otimização

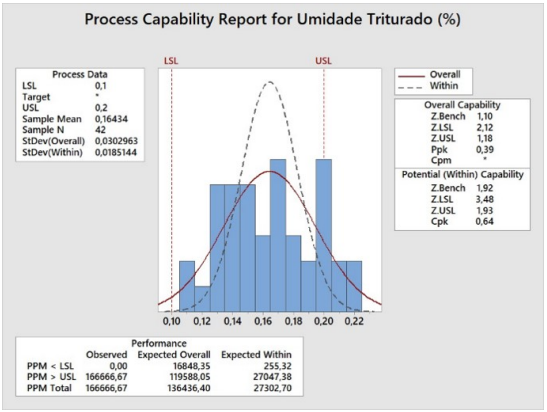


Figura 14: Umidade depois da otimização

5. Conclusões

O trabalho em questão apresentou o desenvolvimento de um modelo de programação inteira para definição da mistura de resíduos no processo de coprocessamento de uma indústria cimenteira. A utilização de tal abordagem permitiu uma melhoria considerável do controle de qualidade no processo de coprocessamento de resíduos. Antes da implementação deste modelo, a indústria enfrentava desafios relacionados à falta de controle nas medidas de Cinzas, Cloro, PCI e Umidade dos resíduos, o que resultava em variações na qualidade do produto final e possíveis impactos ambientais adversos. Com a introdução do modelo, esses parâmetros críticos passaram a ser monitorados e ajustados de maneira precisa, garantindo que os valores permanecessem dentro dos limites aceitáveis.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br

A capacidade do modelo de integrar-se a ferramentas de uso cotidiano, como planilhas Excel, facilitou a sua adoção e operacionalização, permitindo uma transição suave para as novas práticas de controle. Como resultado, a indústria conseguiu não só melhorar a estabilidade da composição dos resíduos, mas também aumentar a taxa de substituição térmica, reforçando o compromisso com a sustentabilidade ambiental e econômica. Propostas como as apresentadas neste trabalho demonstram o impacto transformador que soluções baseadas em pesquisa operacional e ferramentas matemáticas podem ter em processos industriais complexos, promovendo uma maior responsabilidade ambiental e eficiência produtiva.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio financeiro parcial da Chamada n. 03/2020 Produtividade em Pesquisa PROPESQ/PRPG/UFPB, código do projeto de pesquisa no SIGAA PIF13387-2020, da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), projetos de pesquisa 3182/2021 e 041/2023, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, processo nº 8887.824802/2023-00, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo n^o 404807/2021-6.

Referências

Associação Brasileira de Cimento Portland (2010). Coprocessamento: Saiba mais sobre essa solução. https://abcp.org.br/coprocessamento-saiba-mais-sobre-essa-solucao/. Acessado em: 2023-12-11.

BRASIL (2020). RESOLUÇÃO CONAMA N° 499, DE 6 DE OUTUBRO DE 2020. https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-*-282075827. Acessado em: 2024-05-15.

Ferrari, R. (2002). Co-processamento de resíduos industriais em fornos de clínquer. *Companhia de Cimento Itambé, Balsa Nova*.

Montgomery, D. C. (2016). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. LTC, Rio de Janeiro, 7 edition.

Rocha, S. D. F., Lins, V. d. F. C., e Santo, B. C. d. E. (2011). Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 16:1–10.

Santi, A. M. M. e Sevá Filho, A. O. (2004). Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na região do calcário ao norte de belo horizonte e possíveis generalizações.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193744
https://proceedings.science/p/193744?lang=pt-br