

MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DE OTIMIZAÇÃO NO CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS NA INDÚSTRIA DO CIMENTO ENVOLVENDO CUSTOS, QUALIDADE E IMPACTO AMBIENTAL

Ricardo Carrasco Carpio

Instituto Federal Minas Gerais-Campus Formiga-MG

e-mail: ricardocarpio@cefetbambui.edu.br

Aladir Horácio dos Santos

Marcone dos Santos Guimarães

Ezequiel Antônio Barbosa

Mateus Rodrigues Costa

Centro Universitário de Formiga-UNIFOR-MG

RESUMO

Atualmente a indústria de cimento vem procurando, soluções no que diz respeito aos combustíveis utilizados para a fabricação do clínquer, a eletricidade consumida no processo de produção, ao controle das emissões de poluentes, à utilização de adições ativas, e tudo isto, sem perder a qualidade de seu principal produto final, que é o cimento. Estas soluções devem atender aos requisitos de qualidade do produto e às restrições ambientais, de modo a permitir alcançar um menor custo final de produção. Nesta proposta de trabalho, pretende-se desenvolver um software para otimizar a dosagem e homogeneização das matérias-primas e combustíveis na fabricação do clínquer, tendo como possibilidade patentear o produto final do presente trabalho de pesquisa. Assim mesmo, através desse software será possível avaliar os efeitos dos resíduos utilizados, na qualidade do clínquer, no meio ambiente, no custo de fabricação e no consumo de energia elétrica, tendo como objetivo garantir uma melhor estabilidade da operação do forno, a redução no consumo de energia e a minimização do impacto ambiental. Por outro lado, este software será de ajuda à indústria do cimento para uma rápida avaliação dos diferentes tipos de combustíveis alternativos que possam ser utilizados como substitutos dos combustíveis tradicionais (co-processamento). Para desenvolvimento do software de otimização será utilizada a linguagem Java. A escolha deste aplicativo atende ao objetivo de ser uma das linguagens de programação mais difundidas na indústria e no meio acadêmico.

Palavras-Chave: Software. Java. Co-processamento de Resíduos. Indústria de cimento. Otimização.

**MODELING AND DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION SOFTWARE IN CO-
PROCESSING OF WASTE IN THE CEMENT INDUSTRY COMPRISING COST,
QUALITY AND ENVIRONMENTAL IMPACT**

ABSTRACT

Recently, the Cement Industry has been searching for solutions concerning with the fuels used for clinker production taking account, the electricity consumed in the production process, the polluting emissions control and the use of active additions, keeping the final product quality, i.e., the cement. These solutions must attend the product quality requirements, the environmental restrictions and also allow reaching a lesser final production cost. This study is intended to develop a software application to optimize the dosage and homogenizing of the raw material and fuels in the clinker production. This study also intends to patent the developed software. Employing this software, it will be even possible to evaluate the effects of the used residues in the clinker quality, in the environment, in the costs generated, in the electrical energy consumption, aiming to guarantee a better kiln operation stability, the reduction of energy consumption and the minimization of the environmental impact. On the other hand, this software will be handy to the cement industry in making efficient evaluations of the different types of alternative fuels which can be used as a substitute of the traditional ones (coprocessing). Java language will be used to develop the optimization software. Java language was chosen because is one of the most used computational language in industries and college facilities. It is versatile and platform independent which makes it handling easy.

Keywords: Java. Co-processing of Residues. Cement industry. Optimization.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o campo da otimização vem tendo uma maior aplicação nas mais variadas áreas das ciências. Um problema de otimização tem por finalidade maximizar ou minimizar um determinado critério (custo, lucro, tempo, emissões, etc), sendo que as restrições impostas levam a uma solução dentro dos parâmetros fixados, que seja a melhor possível. (CARPIO, 2005).

Atualmente, a indústria de cimento vem procurando soluções no que diz respeito aos combustíveis utilizados para a fabricação do clínquer (componente utilizado na fabricação de cimento) à eletricidade consumida no processo de produção, ao controle das emissões de poluentes, à utilização de adições ativas, e tudo isto, sem perder a qualidade de seu principal produto final, que é o cimento. Estas soluções devem atender aos requisitos de qualidade do produto e às restrições ambientais, de modo a alcançar um menor custo final de produção.

Com a finalidade de melhorar o processo e reduzir o impacto ambiental, sem perder a qualidade, é possível utilizar técnicas de otimização, visando determinar a melhor configuração do sistema, melhorando ainda mais a eficiência da produção e possibilitando menores custos. As técnicas de otimização têm como vantagens diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitando o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e

restrições, de difícil visualização gráfica, e possibilitando a obtenção de soluções com um menor custo. (CARPIO, 2005).

O forno rotativo da indústria de cimento consome grandes quantidades de combustíveis tais como carvão mineral, óleo combustível, gás natural e outros. Cerca de 80% da energia total consumida numa instalação de produção de cimento Portland é referente à produção de clínquer.

Devido ao alto consumo de calor no processo de fabricação de clínquer para a produção de cimento, a indústria de cimento sempre preocupou-se, ao longo da história do setor cimenteiro, com a utilização de combustíveis de baixo custo, sem perda de qualidade. Uma das alternativas encontradas para se obter a economia de recursos energéticos foi o co-processamento de resíduos industriais e urbanos, o que, por outro lado, veio a ser uma solução para o tratamento e disposição desses resíduos. Esses resíduos tanto substituem o combustível primário quanto fornecem matéria-prima para a produção do clínquer através de suas cinzas, que são incorporadas ao clínquer. O processo consiste basicamente na substituição de uma parcela do combustível tradicional por um resíduo. Considerando-se que os fornos operam em altas temperaturas, os mesmos podem ser considerados ideais para a queima desses resíduos, permitindo a destruição térmica destes com alta eficiência (acima de 99,99% de eficiência de destruição). (CARPIO, 2005).

A grande preocupação atual é com a garantia da eficiência de destruição de resíduos perigosos no processo de queima de combustíveis alternativos, para que os níveis de emissões de poluentes sejam, pelo menos, considerados aceitáveis e seguros do ponto de vista ambiental.

A indústria cimenteira tem no co-processamento uma solução que satisfaz as atuais exigências de controle ambiental (CONAMA, 1999), pois proporciona, no momento da destruição térmica dos resíduos no sistema do forno, o aproveitamento térmico de seu poder calorífico, substituindo parcialmente a queima de combustíveis fósseis não renováveis, constituindo em uma forma adequada de destinação aos resíduos industriais gerados. Além disto, os vários componentes das matérias-primas reagem com as cinzas que se encontram nos gases, permitindo a sua incorporação na forma de sólidos no clínquer. (CARPIO, 2005).

A utilização de resíduos como combustíveis na produção de cimento não é novidade. Este processo é amplamente utilizado na Europa e nos Estados Unidos e a cada dia vem sendo mais utilizado no Brasil. Os primeiros testes de queima com resíduos em fornos de

cimenteiras foram realizados em 1970 nos Estados Unidos. (BENOIT E HAMEL, 1993). Na década de 80, o co-processamento tornou-se uma opção para as entidades ambientalistas reguladoras e para o público conscientizado quanto aos problemas do meio ambiente, passando a ser uma alternativa preferida para a disposição final de certos tipos de resíduos perigosos gerados. (BENOIT; HAMEL, 1993). Atualmente, nos Estados Unidos, a substituição de combustíveis tradicionais por meio do co-processamento tem permitido uma economia anual equivalente a um milhão de toneladas de carvão (Silicon, 2002). No Brasil, foram co-processados, entre 1991 e 2003, aproximadamente 1,6 milhões de toneladas de resíduos, e atualmente a indústria cimenteira nacional tem a capacidade de poder co-processar mais de 1,5 milhão t/ ano de resíduos. (FIMAI, 2004).

Segundo Hansen (2003), quando se utilizam resíduos como combustíveis nos fornos de cimento, é importante conhecer cada um deles, bem como as alterações que estes podem ocasionar na qualidade, na operação do forno e nas emissões de poluentes. Tais alterações podem ser verificadas: na queda da temperatura de chama devido a existência de maior umidade em muitos combustíveis residuais, na dificuldade de medições pela alimentação não uniforme dos resíduos em um determinado tempo da combustão, pelas modificações no processo de transferência de calor devido à queda da temperatura pelo excesso de ar utilizado, e a dificuldade na ignição que alguns combustíveis alternativos apresentam.

Cabe mencionar que os resíduos que podem ser utilizados nos fornos de cimento devem ter características orgânicas que permitam a substituição do uso de combustíveis não renováveis e respeitem a classificação de resíduos da norma Brasileira NBR 10.004 (1987).

Um outro fator a ser considerado durante a fabricação do cimento é o consumo de eletricidade. Cerca de 60% da energia elétrica requerida para produzir uma tonelada de cimento é consumida nos processos de moagem das matérias-primas e do clínquer. Isto é uma porcentagem significativa do custo total de produção do cimento. A energia consumida nos moinhos está na faixa entre 16,5 a 63,5 kWh/t com uma média de 36 kWh/t (TOKYAY, 1999).

Como descrito anteriormente, no sistema de produção de cimento, consome-se uma quantidade significativa de combustíveis fósseis, como principal fonte de energia térmica e, de forma secundária, para os diversos equipamentos auxiliares, tais como máquinas escavadoras, veículos de transporte, grupos geradores etc. Também se consome eletricidade para os sistemas de básculas, moagem, esteiras transportadoras etc. (CARPIO, 2005).

O consumo desses combustíveis origina a emissão de gases à atmosfera, como por

exemplo, dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂), com seus efeitos correspondentes ao meio ambiente. Os diferentes tipos de efeitos no meio ambiente, originados pela produção de cimento, estão associados ao tipo de impacto num âmbito geográfico, podendo ser de atuação global (efeito estufa), regional (acidificação e eutrofização – elevado conteúdo de nitrogênio nas reservas hidrológicas e solos agrícolas, provocando desequilíbrio do ecossistema) e local (contaminação do ar).

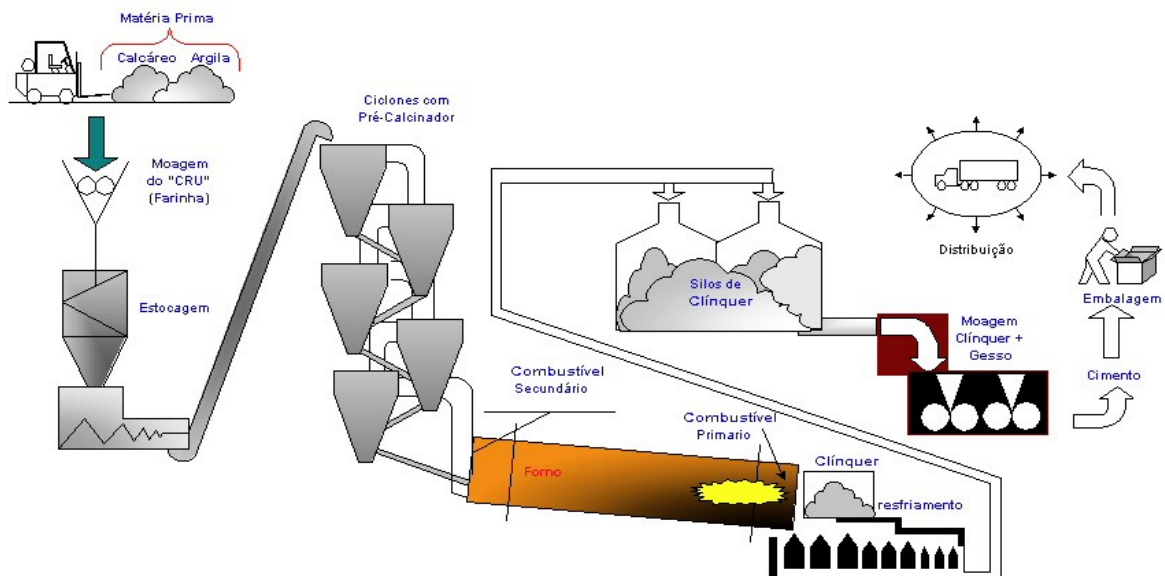
Estas emissões ambientais têm motivado o setor cimenteiro a realizar planejamentos ambientais, dedicados a reduzir a geração e as emissões de poluentes, e melhorar o processo de produção do clínquer. (CARVALHO FILHO, 2001). No Brasil, existem Resoluções por parte dos órgãos ambientais que regulam as emissões quando se realiza co-processamento de resíduos em fornos de clínquer como, por exemplo, a Resolução no 264, de 26 de Agosto de 1999 (CONAMA, 1999), além de outras Resoluções ou Deliberações Normativas, dos diferentes Estados da Federação, que tratam do mesmo assunto.

A maioria dos trabalhos realizados voltados para o setor cimenteiro tende à resolução de problemas específicos, quais sejam: na área de resistência, nos efeitos das incorporações de metais no clínquer, nas emissões de poluentes, dentre outros. Deve-se atentar que a complexidade do processo de fabricação do cimento abrange uma variedade de aspectos que devem ser considerados, como: a qualidade, o meio ambiente, os custos e a redução do consumo de combustíveis fósseis.

Portanto, como consequência do co-processamento de resíduos industriais e urbanos nos fornos rotativos da indústria de cimento, surge a necessidade de um estudo mais avançado, aplicando técnicas de otimização (clássicas e heurísticas), com o objetivo de garantir uma melhor estabilidade de operação do forno, a redução no consumo de energia e a minimização dos impactos ambientais.

O presente projeto visa contribuir para esse estudo, através do desenvolvimento de um modelo aplicado a fornos rotativos da indústria de cimento, o qual terá como produto um software de otimização quando se realiza o co-processamento de resíduos industriais. Através desse software, será possível avaliar os efeitos dos resíduos utilizados, na qualidade do clínquer, no meio ambiente no custo de fabricação, no consumo de energia elétrica, entre outros. Isto possibilitará um entendimento da ocorrência das reações químicas e um estudo das influências dos principais parâmetros operacionais durante a operação do forno. O processo da fabricação do cimento Portland é apresentado na FIG. 1.

Figura 1 - Etapas do processo de fabricação do cimento Portland



Fonte: Carpio, 2005.

2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A modelagem utilizará algoritmos de otimização, os quais terão como objetivo garantir uma melhor estabilidade da operação do forno, a redução no consumo de energia e a minimização do impacto ambiental, sendo que serão modelados os seguintes aspectos: (FIG. 2)

- a) Os efeitos que a utilização de combustíveis alternativos possam causar:
- na qualidade do clínquer, através da composição química da matéria-prima e combustível;
 - na temperatura do forno, através do uso de mineralizadores;
 - no meio ambiente, através das emissões de CO_2 e SO_2 da matéria-prima e do combustível;
 - na saúde humana, através das emissões dos metais pesados contidos na matéria-prima e combustíveis;
 - no custo de fabricação do clínquer, levando em consideração os custos da matéria-prima e combustíveis, obtendo como resultado uma composição ótima de matéria-prima e combustíveis para a fabricação do clínquer.

b) O custo e o consumo de energia elétrica requerida na moagem do clínquer para a fabricação do cimento Portland. (TOKYAY, 1999).

O produto moído deve atender a determinados limites de granulometria de modo a criar melhores condições para o processo de endurecimento. (DUDA, 1977). A equação que representa a energia elétrica requerida na moagem deverá ser expressa em função da superfície específica e dos módulos de controle da mistura.

3 TÉCNICA DE OPTIMIZAÇÃO

Neste trabalho foi utilizado Algoritmo de Busca Aleatória Controlado (CRSA) que é um método de otimização apropriado para procurar o mínimo global de uma função real contínua (função objetivo). A função objetivo e as restrições do modelo foram extraídas de Carpio et al. (2004).

3.1 Java software

A criação da linguagem Java teve início em 1991, mas não obteve muito sucesso nessa época. Foi a partir de 1995, com o surgimento da internet e a construção de aplicativos Web em Java, que a linguagem foi reconhecida. Atualmente é uma das linguagens mais usadas e ganhou popularidade por ser a primeira linguagem livre de plataforma.

Quando um programa Java é compilado, um código intermediário é gerado, chamado de *bytecode*. Este *bytecode* é interpretado pelas máquinas virtuais java (JVMs) para a maioria dos sistemas operacionais. A máquina virtual é a responsável por criar um ambiente multiplataforma, ou seja, se alguém construir um sistema operacional novo, basta criar uma máquina virtual java que traduza os *bytecodes* para o código nativo desse sistema e a aplicação será executada sem problemas.

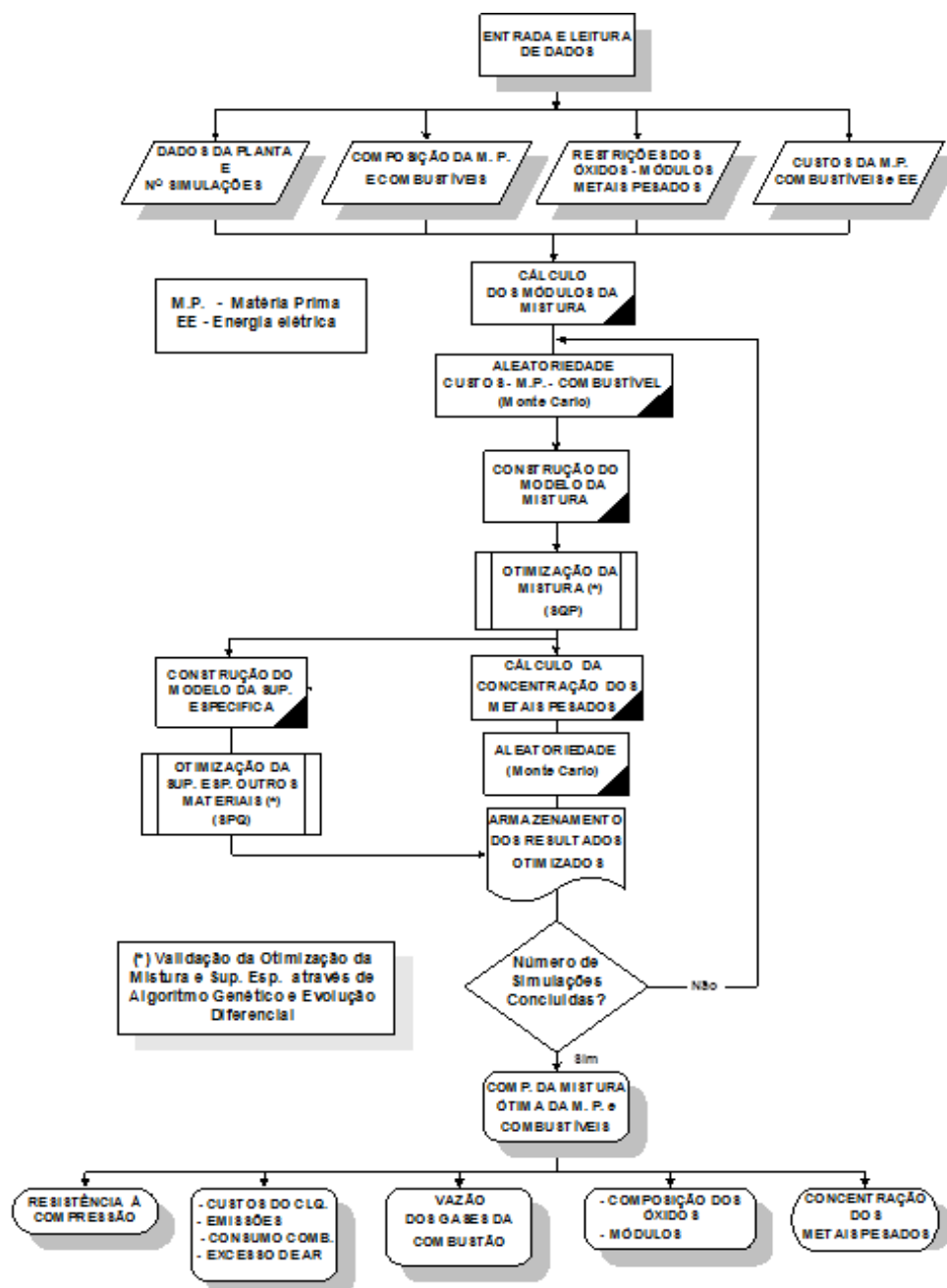
Além de sua portabilidade, a linguagem Java destacou-se também por outras características:

- Orientação a Objeto: o código é organizado em classes, que podem estabelecer relacionamentos de herança entre si;
- Recursos de Rede: possui extensa biblioteca de rotinas que facilitam a

cooperação com protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*), como http (*Hyper Text Transfer Protocol*) e FTP;

- Sintaxe similar a Linguagem C / C++;
- Desalocação de memória automática por processo de coletor de lixo (*Garbage Collector*);
- Bytecode: interpretado, ao invés de compilado.

Figura 2 - Fluxograma do modelo quando se realiza co-processamento de resíduos industriais



Fonte: Carpio, 2005.

3.2 Por que escolher o Java

Por seu grande sucesso e funcionalidade, a linguagem Java é uma das mais usadas atualmente. Ela possui uma extensa biblioteca de rotinas, que permite uma grande facilidade para programar. É bastante segura, permitindo a execução de programas via rede. Java é uma linguagem que não se prende a nenhuma arquitetura e a nenhuma empresa. Ela é rápida e estável. Devido a esses benefícios e por não existir ainda no mercado um software como esse, escolhemos a linguagem Java para o desenvolvimento do projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir apresenta-se um exemplo de cálculo através do programa desenvolvido para o modelo proposto. Cabe mencionar que o programa foi estruturado para ter uma interface amigável com o usuário, devido a que inicialmente se requer de uma considerável entrada de dados. Entre as principais características do programa temos:

- pode trabalhar com um grande número de iterações;
- que não existem limites para os diferentes dados de entrada, podendo o usuário realizar simulações em situações críticas (fora dos limites estabelecidos);
- que se utiliza o algoritmo de otimização Algoritmo de Busca Aleatória Controlada (CRSA);
- que o próprio programa constrói os principais modelos, como das matérias-primas e combustíveis, assim como da superfície específica e módulos da mistura (FIG. 3);
- no caso dos combustíveis, este pode trabalhar com até sete combustíveis simultaneamente, entre sólidos, líquidos e gasosos.

Na continuação são apresentadas, resumidamente, as telas do programa com os dados de entrada e os resultados, com a finalidade de dar uma ideia de como é realizada a simulação.

Na FIG. 3, são fornecidos os principais dados da planta como: produção diária de clínquer, consumo específico de calor que o forno precisa para a fabricação do clínquer e o número de iterações, sendo que estes dados podem mudar em função da planta a ser simulada.

A FIG. 4 mostra o custo das principais matérias-primas e combustíveis utilizados para o presente modelo. Cabe mencionar que os valores dos custos fornecidos são adotados pelo modelo como uma média, sendo de importância fornecer o desvio-padrão, com a finalidade

de que estes preços possam variar em cada iteração.

Os dados de entrada referente às matérias-primas e metais pesados são apresentados, resumidamente, na FIG. 5. Estes valores são lidos pelo programa para logo formar parte do modelo de fabricação de clínquer.

Os dados de entrada referente aos combustíveis utilizados são apresentados, resumidamente, na FIG. 6. Cabe mencionar que os combustíveis utilizados para o presente modelo podem mudar em função do tipo de forno a ser simulado e do combustível que pode ser queimado neste.

A FIG. 7 apresenta as restrições do modelo proposto, estas restrições estão baseadas na legislação existente, sendo estas agrupadas da seguinte forma: referentes à presença dos principais óxidos presentes no clínquer, assim como os módulos de controle da mistura, sendo que estes devem ficar entre um valor mínimo e máximo.

Também é possível modelar a porcentagem de oxigênio O_2 livre nos gases de exaustão, sendo que no modelo é realizada a reação de combustão estequiométrica e com excesso de ar com a finalidade de poder calcular a vazão dos gases de exaustão e a concentração dos metais pesados. No modelo, é possível limitar a entrada de alguns metais pesados como zinco, vanádio e cromo assim como controlar a saída de outros como: cádmio, chumbo, mercúrio e tálio, que tem um efeito prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana.

Os resultados da simulação realizada são apresentados, resumidamente, nas FIG. 8 e 9. Como pode-se observar, a FIG. 8 apresenta os possíveis custos que o clínquer pode adotar, sendo que estes valores estão em função dos custos propostos para a presente simulação. Por outro, lado é apresentado o excesso de ar que participa durante o processo de combustão, sendo um parâmetro de importância para poder controlar as emissões de CO_2 nos gases de exaustão, das matérias-primas e dos combustíveis utilizados.

O consumo das matérias-primas e dos combustíveis também é apresentado na tela de resultados da FIG. 8. Cabe mencionar que todos os resultados mostram a média e o desvio padrão, sendo que estes resultados podem variar em cada iteração.

Na FIG. 9, é apresentada a composição dos principais óxidos presentes na estrutura do clínquer, sendo que estes valores devem ficar dentro dos limites adotados para a presente simulação. Também são apresentados os valores para a composição dos principais silicatos que formam o clínquer.

Como pode-se observar, os resultados obtidos apresentados de forma tabular,

respondem satisfatoriamente às restrições impostas ao modelo. Está claro que o próprio modelo penaliza quando alguma restrição de qualidade, restrição ambiental ou outra é violada, procurando obter a composição ótima para as matérias-primas e combustíveis, utilizados no processo. Com estes resultados, é possível calcular outros parâmetros que são de grande interesse para a indústria de cimento, tais como resistência à compressão, vazão dos gases da combustão, emissões de CO₂, concentração dos metais pesados, temperatura da chama, entre outros.

Finalmente, através do modelo apresentado, é possível prever a composição do cru quando se deseja queimar resíduos como combustíveis secundários nos fornos rotativos nas fábricas de cimento. Também é possível calcular os níveis de substituição do combustível primário pelo combustível alternativo derivado de resíduos, considerando-se os níveis aceitáveis de emissões de poluentes. Este modelo mostrou-se satisfatório com base nos resultados apresentados, tanto por manter os valores de composição química dentro dos parâmetros de qualidade como também por encontrar custos menores de produção.

Figura 3 - Entrada de dados da planta e número de iterações

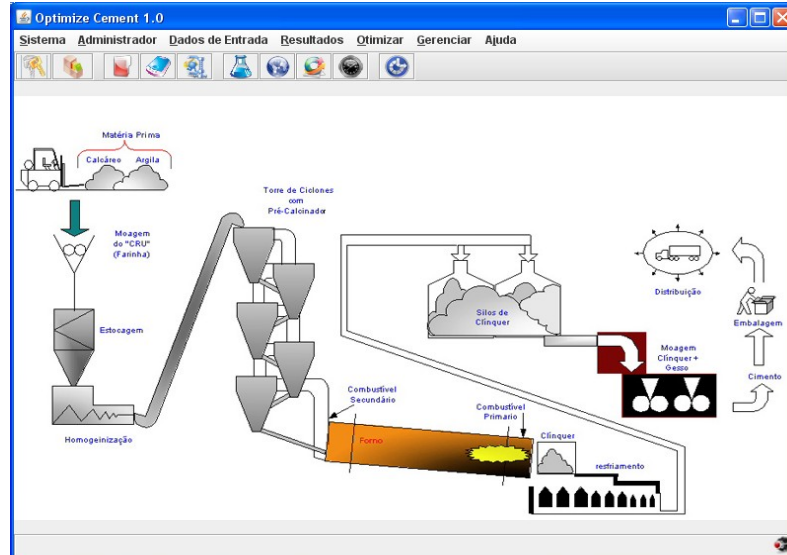


Figura 4 - Dados de entrada do custo da matéria-prima e combustíveis

Matéria Prima & EE		Combustível	
	R\$ / t		R\$ / t
Matéria Prima 1	0.8526	Combustível 1	34.0704
Matéria Prima 2	0.5611	Combustível 2	43.8139
Matéria Prima 3	1.5326	Combustível 3	49.6354
Matéria Prima 4	0.7430	Combustível 4	0
Energia Elétrica	0.0268 R\$ / kWh		

Aceitar Cancelar Fechar

Figura 5 - Dados de Entrada de dados da matéria-prima

Óxidos		Óxidos	
	% Peso		% Peso
CaO	50.66	Na2O	0.1
SiO2	5.04	K2O	0.3
Al2O3	1.19	MgO	0.78
Fe2O3	0.67	SO3	0.1

Metais Pesados		Metais Pesados	
	% Peso		% Peso
Cloro	0	Cromo	0
Antimônio	0	Chumbo	0
Arsênio	0	Mercúrio	0
Bário	0	Prata	0
Berílio	0	Tálio	0
Cádmio	0		

Aceitar Cancelar Fechar

Figura 6 - Dados dos combustíveis

Óxidos			Óxidos			Óxidos		
	% Peso		% Peso		% Peso		% Peso	
CaO	1.03	MgO	0.44	Oxigênio	0.9			
SiO2	9.32	Carbono	63.9	Nitrogênio	1.8			
Al2O3	5.08	Hidrogênio	3.6	PCI	25392			kJ/kg
Fe2O3	7.21	Enxofre	4.6					

Metais Pesados			Metais Pesados			Metais Pesados		
	% Peso		% Peso		% Peso		% Peso	
Cloro	0	Cádmio	0.001	Tálio	0.0004			
Antimônio	0	Cromo	0.008	Zinco	0.0648			
Arsênio	0.00017	Chumbo	0.027	Vanádio	0.04			
Bário	0	Mercúrio	0					
Berílio	0	Prata	0					

Aceitar Cancelar Fechar

Figura 7 - Restrições dos óxidos, modulo de mistura e metais pesados

Restrições dos Óxidos, Módulos da Mistura e Metais Pesados - O2 Livre

Restrições de Óxidos		Módulos		Metais Pesados	
	Mínimo % Peso	Máximo % Peso		Mínimo % Peso	Máximo % Peso
CaO	62	67	Módulo de Sílica	2.3	2.7
SiO2	19	25	Módulo de Alumina	1.3	2.7
Al2O3	2	9	Fator de Saturação da Cal	93	98
Fe2O3	1	5	O2 livre (%)	7	
MgO	6.5				
SO3	0.2	2.07			
Na2O	0.03	0.33			
K2O	0.31	1.76			

Metais Pesados	
	Limite Máximo
Cádmio	0.1 mg/Nm3
Chumbo	0.35 mg/Nm3
Mercúrio	0.05 mg/Nm3
Tálio	0.1 mg/Nm3
Zinco	0.5 % Peso
Vanádio	1 % Peso
Cromo	0.5 % Peso
Enxofre	0.05 %

Aceitar Cancelar Fechar

Figura 8 - Resultado do custo do clínquer, emissões e consumo de combustível

Custos

Clínquer

Custo do Clínquer 7.3337 R\$ / Kg clq

Emissões

CO2 Combustível 0.2815 Kg/Kg clq CO2 Matéria Prima 0.4853 Kg/Kg clq

Consumo de Combustível

Excesso de Ar 64.0552 % Combustível 1 Consumo 1.2001E-13 t/d

Combustível Requerido 0.1021 Kg/Kg clq Combustível 2 Consumo 139.9151 t/d

Matéria Prima Requerida 1.4293 Kg/Kg clq Combustível 3 Consumo 56.7735 t/d

Fechar

Figura 9 - Resultado da composição dos óxidos do clínquer e módulos de controle de mistura

Composição do Clínquer

Composição dos Óxidos		Bogue	
CaO	61.8006	C3S	61.8097
SiO2	19.9382	C2S	10.6183
Al2O3	4.8150	C3A	8.3156
Fe2O3	2.6296	C4AF	7.9940
MgO	0.9520		
K2O	0.7265		
SO3	0.1891		
Na2O	1.3754		
CaO livre	0.2412		

Módulos de Controle da Mistura

Módulo de Sílica 2.6782

Módulo de Alumina 1.8310

Fator de Saturação da Cal 98.1516

Fechar

5 CONCLUSÕES

Como descrito no início deste trabalho, a preocupação atual das indústrias de cimento é a eficiência de destruição de resíduos oriundos da queima de combustíveis alternativos, como eles podem se comportar no interior do forno, e as mudanças que estes podem ocasionar na qualidade, produção e o incremento nas emissões.

Com a queima direta no forno, através do chamado teste de queima, pode-se obter o comportamento destes combustíveis no forno de clínquer, mas a legislação vigente é bastante rigorosa a esse respeito, devendo-se cumprir uma série de requisitos impostos pelos órgãos ambientais antes de se realizar qualquer teste, motivo pelo qual a modelagem apresentada pode ser uma ferramenta para as indústrias de cimento, ajudando a compreender o comportamento dos principais parâmetros que influenciam num determinado processo, com menores custos para as indústrias. Claro está que estes modelos não refletem a realidade, devido à complexidade no mundo real. Mas no caso da indústria do cimento, através da modelagem é possível simular o comportamento da utilização de alguns resíduos, como substitutos parciais dos combustíveis tradicionais.

No modelo apresentado, é possível prever a composição do cru quando se deseja queimar resíduos como combustíveis secundários nos fornos rotativos nas fábricas de cimento. Também é possível calcular os níveis de substituição do combustível primário pelo combustível alternativo derivado de resíduos, considerando-se os níveis aceitáveis de emissões de poluentes e considerando as normas de qualidade do cimento.

REFÊRENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos**: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

BENOIT, M. R.; HAMEL, B. B. Tratamento e destruição de resíduos perigosos em fornos de cimento Portland. **Revista brasileira de engenharia química**, v. 13, n. 3, p. 10-16, dez. 1993.

CARPIO, R. C.; SILVA, R. J.; JORGE, A. B. Heavy metals influence in the mixture optimization of Industrial waste fuels in cement industry. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 25., 2004, Recife. **Anais...** Recife: CILAMCE, 2004.

CARPIO, R. C. **Optimization in the co-processing of waste in the cement industry comprising cost, quality and environmental impact.** 2005. Thesis (PhD) - Federal University of Itajubá-UNIFEI, Institute of Mechanical Engineering, Itajubá, 2005.

CARVALHO FILHO, A. C. **Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento.** 2001. Tesis (Doctoral)-Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2001.

CONAMA. Brazilian's National Council for the Environment. **Resolution number 258,** August 26, Environmental Minister, 1999.

DUDA, W. H. **Manual tecnológico del cemento.** Barcelona: Editores Técnicos Associados, 1997.

FEIRA INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, 6., 2004, São Paulo. **Seminário de co-processamento:** destinação final de resíduos em fornos de cimento: uma solução inteligente. São Paulo: FIMAI, 2004. 1 CD-ROM.

HANSEN, E. R. Changing process priorities when firing alternative fuels. Technical Consultant to Cadence Environmental Energy. In: CEMENT INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2003, Dallas, Texas. **Proceedings...** Dallas: IEEE, 2003. p. 219-230.

TOKYAY, M. Effect of Chemical composition of clinker on grinding energy requirement. **Cement and Concrete Research,** Pergamon Press, vol. 29, p. 531-535, 1999.