

**UNIVERSIDADE FEDERAL UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**DETERMINAÇÃO DA MISTURA ÓTIMA DE COMBUSTÍVEIS
SECUNDÁRIOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO USANDO
O ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

CLÁUDIO ALVES VIEIRA FILHO

UBERLÂNDIA-MG

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DETERMINAÇÃO DA MISTURA ÓTIMA DE COMBUSTÍVEIS
SECUNDÁRIOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO USANDO
O ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

CLÁUDIO ALVES VIEIRA FILHO

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

UBERLÂNDIA-MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE CLÁUDIO ALVES VIEIRA FILHO APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 01/12/2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Fran Sérgio Lobato
Orientador – FEQUI/UFU

Prof. Fábio de Oliveira Arouca
FEQUI/UFU

Prof. Márcio Aurélio da Silva
MED/IMEPAC

DEDICATÓRIA

À minha família, minha namorada e aos meus amigos que sempre foram a minha força e sempre me deram todo apoio e suporte necessário para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato pelos excelentes conselhos e ensinamentos.

À minha família, amigos e minha namorada pelo carinho e ajuda.

A todos os meus professores por todo aprendizado.

À instituição e a coordenação pelo suporte oferecido.

Deus é maior que altos e baixos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Reaproveitamento de Recursos para a Indústria	15
2.2	Etapas Básicas do Processo de Produção de Cimento	15
2.3	Problema de Otimização	16
2.4	Classificação dos Métodos de Otimização	17
2.5	Algoritmo de Evolução Diferencial	18
3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1	<i>FO</i> Linear	23
4.2	<i>FO</i> Não Linear.....	24
5	CONCLUSÕES E SUGETÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	25
	REFERÊNCIAS	26

Lista de Figuras

Figura 1- Fluxograma do processo de fabricação do cimento. 15

Figura 2 - Classificação dos Métodos de Otimização. 17

Listas de Tabelas

Tabela 1 - Composições dos materiais considerados para a formulação do modelo que representa o processo de produção do cimento.	20
Tabela 2- Resultados obtidos para o estudo de caso linear.	23
Tabela 3 - Comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo de ED e os encontrado por Carpio <i>et al.</i> (2003).....	23
Tabela 4 - Resultados obtidos para o estudo de caso não linear.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Constante da Equação 1
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
B	Constante da Equação 1
$^{\circ}C$	Temperatura em Celsius
CaO	Óxido de Cálcio
CR	Probabilidade de Cruzamento
ED	Evolução Diferencial
F	Função Objetivo, Taxa de Perturbação
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
FO	Função Objetivo
g_j	Restrição de Desigualdade
h_k	Restrição de Igualdade
L	Limite Inferior
MS	Módulo de Sílica
MgO	Óxido de Magnésio
NP	Tamanho da População
p	Custo da Eletricidade
p_i	Preço da Matéria-Prima
SiO_2	Óxido de Silício (Silicato)
ton	Tonelada
U	Limite Superior
X	Variável de Projeto
X_1	Composição do Calcário
X_2	Composição da Argila
X_3	Composição da Areia
X_4	Composição do Minério de Ferro
X_5	Composição do Carvão
X_6	Composição do Coque de Petróleo
X_7	Composição dos Pneus
x_i	Composição do Material

RESUMO

A redução dos custos associados aos processos industriais configura uma área de grande interesse, já que o atendimento desta meta implica, naturalmente, no aumento do lucro. Neste contexto, o emprego de resíduos das indústrias como fonte de energia, além do reuso de componentes inertes de outros processos, são exemplos do reaproveitamento destas utilidades nas indústrias para fins de redução de custos. Diante disto, a presente proposta tem como objetivo formular e resolver um problema de otimização que consiste da determinação da composição ótima de uma mistura que contém carvão mineral, coque de petróleo e pneus usados, a ser utilizada em um forno rotativo empregado para a produção de cimento. Neste problema deseja-se determinar a composição da mistura de combustíveis de modo a minimizar o custo associado ao processo de produção de cimento. Como ferramenta de otimização será empregado a otimização o algoritmo de Evolução Diferencial. Os resultados obtidos indicam que é possível o reaproveitamento de resíduos da indústria para fins da redução dos custos totais associados ao processo de produção de cimento.

Palavras-chave: Mistura ótima de combustíveis, produção de cimento, otimização, Evolução Diferencial.

ABSTRACT

The reduction of costs associated with industrial processes is a field of great interest, to increase the profit. In this context, the use of waste from the industries as an energy source in association to reuse of inert components from other processes, are examples of utilities used in industries to cost reduction. This contribution aims to formulate and solve an optimization problem to determination of optimum composition of a mixture containing mineral coal, petroleum coke and used tires, to be utilized in a clinker kiln of cement industries to minimize the cost of process. As optimization tool will be used the Differential Evolution algorithm. The results indicate that is possible to find the composition optimum in order to reduce the costs associated with the cement production process.

Keywords: Optimum mixture of fuels, cement production, optimization, differential evolution.

1 INTRODUÇÃO

O cimento é um dos produtos mais importantes da indústria química. Isto se deve a quantidade de aplicações que podem ser encontradas considerando este material, dentre as quais pode-se citar o seu uso na construção civil, bem como em áreas mais delicadas como odontologia e medicina.

Em linhas gerais, a matéria-prima para a fabricação do cimento tem como constituintes básicos o calcário, areia, argila e óxido de ferro. O processo de fabricação do cimento inicializa-se com a mistura destes componentes em temperatura elevada por volta dos 1450°C. Em seguida, o material é resfriado bruscamente de forma a se obter o clínquer, isto é, a massa básica do cimento, que é moído essa moagem do clínquer é uma das etapas mais essenciais para sua fabricação do cimento, pois sua formação é extremamente decisiva para a qualidade final do cimento que estará na presença de sulfato de cálcio (Bernardo, 2009).

Conforme comentado anteriormente, para este processo faz-se necessário a obtenção de altas temperaturas. Neste contexto, é importante a utilização de combustíveis de alto poder calorífico. Dentre estes, destacam-se o carvão mineral, o óleo combustível e o gás natural, selecionados devido ao seu desempenho, estrutura química, e ao custo (Bernardo, 2009). Estes são reconhecidos como combustíveis primários. Como alternativa a estes combustíveis de alto custo associado, tem-se os secundários, que são aqueles que apresentam menor custo, o que implica na redução do custo total de produção. Dentre os principais representantes desta classe pode-se citar pneus usados, resíduos de madeira e coque de petróleo. Um outro fator que contribui para o uso dos combustíveis secundários é o fato de que o uso destes implica na redução do impacto ambiental, já que as cinzas provenientes destes deixam de ser, de alguma forma, descartadas na natureza (Carpio *et al.*, 2003, Oyepata e Obodeh, 2015).

Para um melhor aproveitamento destes combustíveis secundários utilizados na produção de cimento, faz-se necessário a formulação e a resolução de um problema de otimização. Este consiste da determinação da composição ótima de uma mistura que contém carvão mineral, coque de petróleo e pneus usados, a ser utilizada em um forno rotativo empregado para a produção de cimento. A função objetivo considerada é a minimização do custo associado ao processo de produção de cimento.

Diante do que foi apresentado, a presente contribuição tem por objetivo formular e resolver um problema de otimização associado a produção de cimento considerando o uso de combustíveis secundários. Para essa finalidade, considera-se como ferramenta de otimização o algoritmo de Evolução Diferencial (ED). Este trabalho está estruturado como segue. A

seção 2 apresenta as etapas básicas referentes ao processo de produção de cimento, bem como uma breve descrição do algoritmo de ED. A formulação matemática do problema de otimização é apresentado na seção 3. Já na quarta seção são apresentados os resultados considerando dois estudos de casos, a saber, um linear e um não linear. Na última seção são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reaproveitamento de Recursos para a Indústria

O fato de alguns materiais terem um longo período de degradação e, por sua vez, não terem um local apropriado para seu descarte, implica na necessidade de se apresentar alternativas para o seu descarte de acordo com a legislação vigente (Ribeiro *et al.*, 2014). Neste cenário, o reaproveitamento de recursos pela indústria configura uma linha de pesquisa de grande aplicabilidade nos dias atuais. Isto se deve, entre outros aspectos, a necessidade de redução de custos e ao correto descarte dos materiais que são gerados pelas indústrias químicas.

No contexto da indústria de cimento, nos últimos anos tem-se empregado combustíveis secundários como geradores de fonte de calor como alternativa aos combustíveis primários, que apresentam alto custo (Carpio *et al.*, 2003). Neste caso, além de reduzir os custos totais associados ao processo de produção de cimento, reduz-se a quantidade destes combustíveis secundários que, naturalmente, seriam descartados no meio ambiente.

2.2 Etapas Básicas do Processo de Produção de Cimento

Em linhas gerais, o processo para a produção do cimento é ilustrado na Figura 1, sendo enumerado de acordo com as seguintes etapas (Carpio *et al.*, 2003).

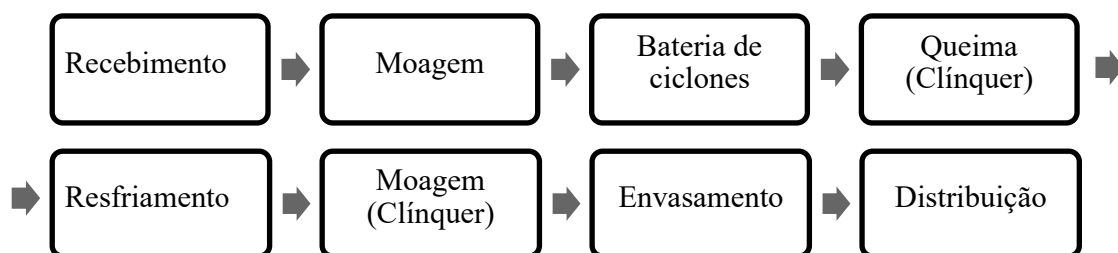


Figura 1- Fluxograma do processo de fabricação do cimento.

Fonte: Carpio *et al.*(2003).

1. Recebimento da matéria-prima;
2. Moagem da matéria-prima (os componentes básicos, a saber, calcário, areia, argila e óxido de ferro, são inseridos e triturados);
3. Em seguida, o material passa por uma bateria de ciclones onde acontecerá a homogeneização da matéria-prima;

4. Passado a etapa da homogeneização, ocorre a queima do clínquer considerando os combustíveis (primário e ou secundário);
5. Resfriamento do clínquer;
6. Moagem do clínquer com sulfato de cálcio;
7. Envasamento do produto final;
8. Distribuição do produto;

Conforme destacado anteriormente, deseja-se formular e resolver um problema de otimização associado à produção de cimento. Para essa finalidade, as próximas seções serão dedicadas a formulação e a resolução do problema de otimização, bem como uma breve revisão sobre a ferramenta de otimização considerada neste trabalho, a saber, o algoritmo de ED.

2.3 Problema de Otimização

O conceito de otimização está diretamente relacionado ao desejo de melhorar o que já existe, de projetar o novo com maior eficiência e menor custo. A otimização visa determinar a melhor configuração de projeto sem ter que testar todas as possibilidades envolvidas. O aumento significativo de sua aplicação a problemas reais é fruto da popularidade das ferramentas computacionais e dos mercados competitivos, associados a especificações de desempenho de processos cada vez mais exigentes e sujeitas a um número maior de restrições.

A otimização tem como vantagens diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitar o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização gráfica e/ou tabular, possibilitar a obtenção de um produto melhor. Como limitação, tem-se o aumento do tempo computacional quando o número de variáveis de projeto é alto, o tratamento de funções descontínuas que apresentam lenta convergência, funções com a presença de muitos mínimos locais (onde o mínimo global raramente é obtido) (Saramago, 1999).

O problema de otimização consiste em minimizar e/ou maximizar um vetor de funções objetivo, sujeitas ou não, a restrições de igualdade, desigualdade e restrições laterais. Matematicamente este problema pode ser escrito conforme as Equações 1 a 4. (Vanderplaats, 1999):

$$\min F(X), \quad X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \quad (1)$$

sujeito a:

$$h_g(X) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$g_j(X) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$$X_i^L \leq X \leq X_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

onde, $F(X)$ representa a função objetivo, g_j e h_k as restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente e $X_i^{(L)}$ e $X_i^{(U)}$ os limites inferior e superior das variáveis de projeto (X). O vetor de funções objetivo e as funções de restrições podem ser funções lineares ou não lineares em relação às variáveis de projeto, implícitas ou explícitas, calculadas por técnicas analíticas ou numéricas.

2.4 Classificação dos Métodos de Otimização

Os métodos de otimização são classificados em duas classes: a Determinística (ou Clássica) e a Não-Determinística (Técnicas Inspiradas na Natureza ou Heurística ou Evolutiva), assim como pode ser observado na Figura 2.

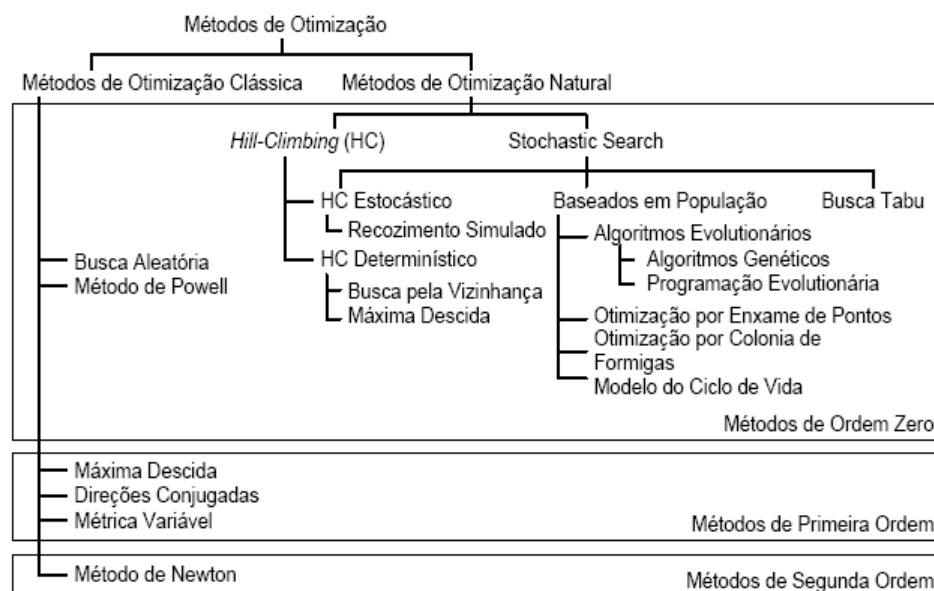


Figura 2 - Classificação dos Métodos de Otimização.

Fonte: Deb (2001).

Os Métodos Clássicos são fundamentados em princípios do Cálculo Diferencial e Integral, ou seja, fazem uso de informações sobre o gradiente da função objetivo e das

restrições para a determinação da direção de busca do ótimo. De forma geral, pode-se dizer que estes possuem como grande vantagem, rápida taxa de convergência quando uma “boa” estimativa inicial para o projeto é fornecida, o que implica em um pequeno número de avaliações da função objetivo. Contudo, estes métodos têm uma inabilidade intrínseca em lidar com mínimos locais. Como tais métodos investem todo esforço em um único ponto do espaço de projeto, ao se depararem com mínimos locais não conseguem avançar, convergindo prematuramente para um mínimo local (Vanderplaats, 1999).

Já as técnicas inspiradas na natureza são inspiradas em fenômenos naturais, físicos, químicos, biológicos ou em abordagens puramente estruturais (Deb, 2001; Lobato, 2008). Nessas metodologias, a função objetivo é avaliada várias vezes, sendo possível trabalhar com vários pontos do espaço de projeto ao mesmo tempo (população de pontos candidatos à solução do problema de otimização) em uma iteração (geração), o que naturalmente eleva o custo computacional destes métodos (Deb, 2001; Lobato, 2008). Entretanto, esta dificuldade é compensada pela menor probabilidade que estes métodos têm de se deixarem prender em mínimos locais, isto é, são reconhecidamente métodos de busca global (Deb, 2001).

2.5 Algoritmo de Evolução Diferencial

Dentre os inúmeros métodos de otimizaçãoevolutivos apresentados na literatura, o algoritmo de ED, desenvolvido por Storn e Price (1995), se configura como um dos principais métodos não determinísticos para a resolução de problemas de otimização. A ED é um método de otimização baseada numa população, sendo conceitualmente muito simples e eficiente ao mesmo tempo. A principal ideia por trás desta técnica é o esquema proposto para atualização do vetor de variáveis de projeto de uma população. Basicamente, a diferença ponderada entre dois indivíduos é adicionada a um terceiro indivíduo. O indivíduo gerado através deste esquema é avaliado pela função objetivo e pode inclusive substituir indivíduos mal sucedidos nas gerações seguintes. Desta forma, nenhuma distribuição de probabilidade em separado deve ser usada, o que torna este esquema completamente auto ajustável.

O seu procedimento geral é dado pelas seguintes etapas (Storn *et al.*, 2005):

- Inicialmente, gera-se uma população inicial com NP soluções factíveis (tamanho da população), isto é; cada variável de projeto satisfaz o domínio definido pelo usuário (a solução do problema deverá ser encontrada dentro deste domínio);
- Seleciona-se um indivíduo, de forma aleatória, para ser substituído. Dois outros diferentes indivíduos são selecionados para realizarem a subtração vetorial.

- Adiciona-se ao valor atual do indivíduo o resultado desta operação, sendo esta ponderada por um parâmetro, a saber, a taxa de perturbação (F), também definida pelo usuário. Este procedimento representa o operador de cruzamento na ED.
- A partir desta operação, modifica-se o valor do indivíduo selecionado, a depender do valor da probabilidade de cruzamento (CR) definida pelo usuário.
- Se o vetor resultante apresenta um melhor valor em termos da função objetivo, este substitui o candidato previamente escolhido, caso contrário, o candidato previamente escolhido é mantido na população.
- Este procedimento é repetido de forma que uma nova população, formada por novos e indivíduos remanescentes da população anterior, formam a nova população do algoritmo de ED.
- Para finalizar o algoritmo, adota-se como critério de parada o número máximo de gerações. Cabe ressaltar que outras estratégias para finalizar o processo evolutivo também podem ser adotadas.

Com relação à escolha dos parâmetros do algoritmo de ED, Storn e Price (1995) aconselham o uso dos seguintes valores: número de indivíduos da população como sendo um valor entre 5 e 10 vezes o número de variáveis de projeto, taxa de perturbação F entre 0,2 e 2,0 e probabilidade de cruzamento CR entre 0,1 e 1,0. Já o número de gerações deve ser avaliado para cada estudo de caso.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO

O processo de produção do cimento usando como fonte de calor combustíveis secundários foi estudado por Carpio *et al.* (2003). Este consiste da minimização da seguinte função objetivo (FO) Equação 5.

$$FO = \sum_{i=1}^7 p_i x_i + p A \exp^{(BMS)} \quad (5)$$

O primeiro termo (linear) representa o custo da matéria prima e dos combustíveis e o segundo termo (não-linear) representa o custo energético referente a moagem do clínquer. Nesta equação, X_1 representa a composição do calcário, X_2 a composição da argila, X_3 a composição da areia, X_4 a composição do minério de ferro, X_5 a composição do carvão, X_6 a composição do coque de petróleo e X_7 a composição dos pneus. p_i é o custo de cada matéria-prima, n é o número de componentes considerados, x_i é composição do i -ésimo material, A e B

são constantes que dependem da composição do clínquer formado (MS). p é o custo da eletricidade e energia requerida em kWh/ton.

O parâmetro MS , denominado módulo sílica, é definido pela seguinte relação, conforme a Equação 6:

$$MS = \frac{5X_1 + 61,62 X_2 + 93 X_3 + 7,06 X_4 + 9,32 X_5 + 22 X_7}{1,86 X_1 + 25,6 X_2 + 4,07 X_3 + 84,1 X_4 + 12,29 X_5 + 10,54 X_7} \quad (6)$$

A Tabela 1 apresenta as composições consideradas para o desenvolvimento do modelo matemático proposto por Carpio *et al.* (2003).

Tabela 1 - Composições dos materiais considerados para a formulação do modelo que representa o processo de produção do cimento.

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
X_1	50,66	5,04	1,19	0,67	0,78
X_2	1,23	61,62	16,59	9,01	-
X_3	1,13	3,00	2,87	1,20	0,10
X_4	0,71	7,60	1,13	82,97	-
X_5	-	9,32	5,08-	7,21	-
X_6	-	-	-	-	-
X_7	-	22,00	9,09	1,45	-

De acordo com a tabela apresentada, para cada componente, podem ser definidas restrições quanto as quantidades mínima e máxima, respectivamente.

Assim, o modelo final proposto por Carpio *et al.* (2003) onde a FO objetivo é representada pela Equação 7.

$$FO = 0,93X_1 + 0,54X_2 + 1,54X_3 + 0,77X_4 + 35X_5 + 40X_6 - 50X_7 + (0,31((5,76(MS) - 5,82)\exp^{(-0,2(MS) + 0,98)})) \quad (7)$$

Onde MS (módulo sílica) é dado pela Equação 6. Essa variável é importante para a formação de colagem, granulometria do clínquer, pois o clínquer quando mal formado ele endurece e caso isso ocorra a energia elétrica utilizada pela moagem pode aumentar em até 80% e os desgastes dos compostos refratários devem estar em torno de 2,3 até 2,7. Esse módulo é encontrado através da divisão do módulo sílica (SiO₂) com a soma óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃) encontrado na matéria-prima.

As Equações enumeradas de 8 até 26 descrevem as restrições do modelo:

$$g_1 \equiv 50,60X_1 + 1,23X_2 + 1,13X_3 + 0,71X_4 + 1,03X_5 + 0,93X_7 - 62 > 0 \quad (8)$$

$$g_2 \equiv 50,60X_1 + 1,23X_2 + 1,13X_3 + 0,71X_4 + 1,03X_5 + 0,93X_7 - 67 > 0 \quad (9)$$

$$g_3 \equiv 5,04X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 1,93X_7 - 19 > 0 \quad (10)$$

$$g_4 \equiv 5,04X_1 + 61,62X_2 + 93X_3 + 7,6X_4 + 9,32X_5 + 1,93X_7 - 25 < 0 \quad (11)$$

$$g_5 \equiv 1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,09X_7 - 2 > 0 \quad (12)$$

$$g_6 \equiv 1,19X_1 + 16,59X_2 + 2,87X_3 + 1,13X_4 + 5,08X_5 + 0,09X_7 - 9 < 0 \quad (13)$$

$$g_7 \equiv 0,67X_1 + 9,01X_2 + 1,2X_3 + 82,97X_4 + 7,21X_5 + 0,13X_7 - 1 > 0 \quad (14)$$

$$g_8 \equiv 0,67X_1 + 9,01X_2 + 1,2X_3 + 82,97X_4 + 7,21X_5 + 0,13X_7 - 5 < 0 \quad (15)$$

$$g_9 \equiv 0,78X_1 + 0,10X_3 + 0,44X_5 + 0,12X_7 - 6,5 < 0 \quad (16)$$

$$g_{10} \equiv 0,762X_1 + 2,74X_2 + 83,64X_3 - 185,83X_4 - 18,96X_5 + 1,422X_7 > 0 \quad (17)$$

$$g_{11} \equiv -0,018X_1 + 7,5X_2 - 82,011X_3 + 219,47X_4 + 23,88X_5 - 1,335X_7 > 0 \quad (18)$$

$$g_{12} \equiv 0,319X_1 + 4,877X_2 + 1,31X_3 - 106,73X_4 - 4,29X_5 - 0,074X_7 > 0 \quad (19)$$

$$g_{13} \equiv 0,619X_1 + 7,737X_2 + 0,37X_3 + 222,88X_4 + 14,387X_5 + 0,25X_7 > 0 \quad (20)$$

$$g_{14} \equiv 38,24X_1 - 155,67X_2 - 173,6X_3 - 164,34X_4 - 37,86X_5 - 2,93X_7 > 0 \quad (21)$$

$$g_{15} \equiv -35,48X_1 + 190,65X_2 + 212,43X_3 + 201X_4 + 46,51X_5 + 3,78X_7 > 0 \quad (22)$$

$$g_{16} \equiv 25392X_5 + 34436X_6 + 32100X_7 - 3600 = 0 \quad (23)$$

$$g_{17} \equiv 0,046X_5 + 0,07X_6 + 0,0123X_7 - 0,05 < 0 \quad (24)$$

$$g_{18} \equiv 32100X_7 - 900 = 0 \quad (25)$$

$$g_{19} \equiv 25392X_5 + 34436X_6 - 2700 < 0 \quad (26)$$

As Equações enumeradas de 8 até 16 representam restrições operacionais: o teor de CaO (óxido de cálcio), representado pelas Equações 8 e 9, deve estar de 62 até 67%, já o teor SiO₂ (óxido de sílica), representado pelas Equações 10 e 11, deve se encontrar entre a faixa de 19 até 25%, o teor do Al₂O₃ (óxido de alumina), representado pelas Equações 12 e 13, deve estar na faixa de 2 até 9%, o teor do Fe₂O₃ (óxido de ferro), dado pelas Equações 14 e 15, deve ser entre 1 e 5% e por fim o teor de MgO (óxido de magnésio), dado pela Equação 16, não deve exceder 6,5%. Já as Equações de numeração 17 à 22 são as restrições do controle da mistura para a formação do clínquer (melhor composição). A Equação 23 é responsável por controlar o calor específico exigido dos combustíveis para que tenha o melhor clínquer produzido. A Equação 24 controla a restrição do enxofre na mistura o qual não pode ultrapassar o valor de 0,05%. Para uma melhor formação a queima dos pneus Equação 25

deve se obter pelo menos 25% do calor exigido na Equação 23. E a última restrição representa a mistura de coque de petróleo e carvão e deve ser responsável por 75% do calor exigido na equação 23.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para aplicação da metodologia proposta neste trabalho, alguns pontos devem ser destacados:

- Parâmetros utilizados no algoritmo de ED (Stornet al., 2005; Lobato, 2008): população com 50 indivíduos, número de gerações igual a 500, probabilidade de cruzamento de 0,8 e taxa de perturbação igual a 0,5.
- Cada um dos estudos de caso foram simulados dez vezes considerando sementes distintas no gerador de números aleatórios;
- O critério de parada adotado neste trabalho foi o número máximo de gerações, isto é, o procedimento evolutivo é finalizado se esse valor é alcançado;
- É importante ressaltar que são necessárias 50+50x500 avaliações da função objetivo em cada execução do algoritmo;
- Para o tratamento das restrições será utilizado o Método da Penalidade Exterior (Vanderplaats, 1999);
- Para avaliar o desempenho da metodologia proposta foram considerados dois estudos de caso, a saber, o primeiro linear (a FO apresenta apenas o primeiro termo) e o segundo não linear (a FO apresenta apenas os dois termos).
- O custo relacionado com cada material é (Carpio *et al.*, 2003):
 $p_i = [\text{US\$}0,93/\text{ton} \text{US\$}0,54/\text{ton} \text{US\$}1,54/\text{ton} \text{US\$}0,77/\text{ton} \text{US\$}35,00/\text{ton} \text{US\$}40,00/\text{ton} \text{US\$}50,00/\text{ton}]$ ($i=1..7$). Já o custo da eletricidade (p) é $\text{US\$}31,00/\text{MWh}$.

Para a aplicação do algoritmo de ED são apresentados dois estudos de caso, um linear (em que somente o termo linear da função objetivo é considerado) e um outro não linear (em que a função objetivo original é considerada). As restrições são lineares.

4.1 FO Linear

Como descrito anteriormente, este estudo de caso considera apenas o primeiro termo (que é linear) na FO dada pela Equação 7. Assim, o modelo que, originalmente era não-linear, torna-se linear, pois todas as restrições algébricas apresentadas são lineares.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos (valor do vetor das variáveis de projeto, função objetivo e atendimento das restrições de desigualdade e igualdade) para o estudo de caso linear.

Tabela 2- Resultados obtidos para o estudo de caso linear.

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	g_1
1,2192	0,2204	0,0006	0,0000	0,0106	0,0686	0,0280	0,0000
g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
-4,9999	-1,0989	-4,9010	-3,9210	-3,2304	-1,9074	-2,0925	-5,5409
g_{10}	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}
-1,4302	-1,8164	-1,4298	-2,6405	-11,3066	0,0000	-0,0006	-0,0442
g_{18}	g_{19}	FO*	FO**	FO***			
0,0013	-0,0019	2,9905	5,0408	7,0330			

*melhor solução, **média e ***pior solução.

Nesta tabela observa-se o melhor valor, o valor médio e o pior valor obtido pelo algoritmo de ED. Para o conjunto de parâmetros considerados pelo algoritmo de otimização, como o objetivo nem sempre convergiu para um mesmo valor, observa-se que a solução obtida é função da semente (condição inicial) considerada. Além disso, observa-se o atendimento das restrições de igualdade e desigualdade nos resultados obtidos pelo algoritmo de ED. Ainda nesta tabela observa-se que os resultados obtidos pelo algoritmo de ED estão em concordância com aqueles obtidos por Carpio *et al.* (2003) (ver a Tabela 3), que resolveu este mesmo problema, todavia linearizando a função objetivo e aplicando o método da programação linear sequencial.

Tabela 3 - Comparação entre os resultados obtidos pelo algoritmo de ED e os encontrados por Carpio *et al.* (2003).

Este Trabalho				Carpio <i>et al.</i> (2003)			
X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
1,2192	0,2204	0,0006	0	1,2192	0,2223	0	0
X_5	X_6	X_7	FO	X_5	X_6	X_7	FO
0,0106	0,0686	0,028	2,9905	0	0,0784	0,028	2,99

Fisicamente, observa-se que a condição ótima de operação representa bons percentuais de consumo de minério de ferro, areia, carvão, croque de petróleo e pneus, bem como menores percentuais de calcário.

4.2 *FO* Não Linear

Para esta aplicação considera-se o modelo completo, isto é; a presença dos dois termos (linear e não linear) na *FO*. Assim, o modelo a ser resolvido é não linear.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos (melhor, valor médio e pior) para o estudo de caso não linear considerando o algoritmo de ED.

Tabela 4 - Resultados obtidos para o estudo de caso não linear.

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	g_1
1,2190	0,2121	0,0012	0,0065	0,0118	0,0627	0,0280	0,0000
g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
-4,9999	-0,5326	-5,3343	-3,1000	-3,8999	-2,4501	-1,2457	-5,5663
g_{10}	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}
0,0000	-3,4201	-0,6151	-4,2148	-11,3055	-0,0001	-0,0006	-0,0442
g_{18}	g_{19}	<i>FO*</i>	<i>FO**</i>	<i>FO***</i>			
0,0014	-0,0017	3,3758	3673,5583	85033,6641			

*melhor solução, **média e ***pior solução.

Assim como observado para o estudo de caso anterior, a *FO* nem sempre convergiu para o mesmo valor, o que enfatiza a influência da escolha da semente considerada para a inicialização do gerador de números aleatórios empregado na qualidade da solução. Neste caso, os piores valores para a *FO* implicam que uma ou mais das restrições consideradas não foram satisfeitas. Fisicamente, apesar da mudança no valor da *FO* observada devido ao acréscimo do termo não linear, os valores das variáveis de projeto não sofreram mudanças tão significativas. Cabe ressaltar que no trabalho de Carpio *et al.* (2003), o problema não linear não foi objetivo de estudo.

5 CONCLUSÕES E SUGETÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teórico-computacional teve por objetivo formular e resolver um problema de otimização que consistia da determinação da composição ótima de uma mistura que contém carvão mineral, coque de petróleo e pneus usados, a ser utilizada em um forno rotativo empregado para a produção de cimento. A função objetivo proposta consistia da minimização do custo associado ao processo.

Para resolver o problema de otimização foi considerado o algoritmo de Evolução Diferencial. De forma geral, observa-se que os resultados obtidos pela metodologia proposta, estão em concordância com aqueles reportados por Carpio *et al.* (2003), no que tange o problema linear. Finalmente, a partir dos resultados obtidos, foi possível observar que pode-se reaproveitar resíduos da indústria para fins de redução dos custos totais associados ao processo de produção de cimento.

Como sugestão para trabalhos futuros pretende-se formular e resolver um problema de otimização multi-objetivo considerando o processo em análise.

REFERÊNCIAS

- BERNADO, A, C, S. Otimização Estocástica Multi-objetivo na Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Resíduos e Adição de Mineralizadores. Tese Doutorado, 2009.
- CARPIO, R.C; SILVA, R, J; JORGE, A, B. Otimização da Mistura de Combustíveis Secundários Alternativos Visando Atender as Restrições Operacionais e Ambientais em Fornos de Cimenteiras, Pesquisa Operacional e os Recursos Renováveis 1939-1947, 2003.
- DEB, K. *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley International Series in Systems and Optimization, 498 pp, 2001.
- LOBATO, F, S. Otimização Multi-objetivo Para o Projeto de Sistemas de Engenharia. Tese de Doutorado, 2008.
- OYEPATA, J. S; OBODEH, O. Cement production optimization modeling: A case study BUA plant. *Journal of Engineering and Technology Research*, 54-58, 2015.
- RIBEIRO, L. et al. Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável no Estado do Rio de Janeiro. *Nova Economia*, 24(1), 2014.
- SARAMAGO, S. F. P. *Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e simulated annealing*. Minicurso do XXVI CNMAC, Uberlândia, MG, 1999.
- STORN, R., PRICE, K., LAMPINEN, J. A. *Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization*. Springer - Natural Computing Series, 2005.
- STORN, R., PRICE, K. *Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces*. *International Computer Science Institute*, 12, 1-16, 1995.
- VANDERPLAATS, G. N. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, Vanderplaats Research and Development, Inc., 3rd ed, 1999.

**UNIVERSIDADE FEDERAL UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**DETERMINAÇÃO DA MISTURA ÓTIMA DE COMBUSTÍVEIS
SECUNDÁRIOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO
USANDO O ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL**

CLÁUDIO ALVES VIEIRA FILHO

UBERLÂNDIA-MG

2017