



OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE SUCATAS E OUTRAS MATÉRIAS-PRIMAS PARA COMPOSIÇÃO DA CARGA DE FORNO ELÉTRICO A ARCO ¹

Rafael Corrêa França ²
Fernando Loures da Silva ³
Elton Destro ⁴
Paulo Santos Assis ⁵

Resumo

Um desafio que as empresas do setor siderúrgico possuem é o cumprimento das exigências do mercado com melhoria da qualidade dos produtos fabricados e minimização simultânea dos custos de produção. As siderúrgicas do tipo *mini-mill* possuem normalmente Forno Elétrico a Arco (FEA) na sua fase inicial de produção do aço, que ocorre a partir da fusão de sucatas metálicas como principal matéria-prima utilizada. O gasto com a carga metálica representa uma importante parcela na determinação do custo final por tonelada de aço produzido. Assim, uma vez estabelecidos os preços das diferentes matérias-primas disponíveis bem como seus rendimentos e gastos no processo, faz-se necessário determinar qual a mistura ótima que irá compor a carga do forno. Neste contexto, este trabalho propõe resolver este problema de mistura utilizando-se técnicas da Pesquisa Operacional de tal forma que o custo final por tonelada de aço produzido seja minimizado.

Palavras-chave: Otimização; Logística; Sucata, Produção de aço.

OPTIMIZATION OF THE SCRAPS MIXTURE AND OTHER RAW MATERIALS FOR ELECTRIC ARC FURNACE LOAD

Abstract

One challenge that companies have in the steel industry is to meet the market requirements to improve the quality of manufactured products and the simultaneous minimization of production costs. Steelmakers such as "mini-mill" have typically Electric Arc Furnace (EAF) in its initial stage of steel production, which occurs from the fusion of scrap metal as the main raw material used. Spending on the metallic charge is an important portion in determining the final cost per ton of steel produced. Thus, once established the prices of various raw materials available as well as your income and expenses in the process, it is necessary to determine the optimum mix that will form the furnace load. In this context, this paper proposes to solve this problem using Operations Research techniques such that the final cost per ton of steel produced is minimized.

Keywords: Optimization; Logistics; Scrap; Steelmaking.

¹ *Contribuição técnica ao 31º Seminário de Logística – Suprimentos, PCP, Transportes, 19 a 22 de junho de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista graduado pela UFOP*

³ *Graduando em Engenharia Metalúrgica - UFOP*

⁴ *Mestre em Engenharia Mineral. Doutorando pela Redemat - UFOP*

⁵ *Doutor em Metalurgia. Prof. Titular da Escola de Minas e Prof. da Redemat - UFOP*



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

1 INTRODUÇÃO

O problema da otimização da mistura de sucatas e outras matérias-primas para compor a carga metálica de um Forno Elétrico a Arco (FEA), busca estabelecer a mistura que atende as especificações de operação do forno além de ser aquela que irá minimizar o custo de produção do aço.

A utilização de um modelo de Programação Matemática que auxilie na determinação da mistura ótima de sucatas e outras matérias-primas, além de minimizar o custo por tonelada de aço produzido, permite uma redução na variação da qualidade do aço e podem tornar viável a utilização de matérias-primas que eventualmente não seriam utilizadas no processo por possuírem propriedades consideradas não adequadas

Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia baseada em técnicas da Pesquisa Operacional para otimizar a mistura de sucatas e outras matérias-primas na composição da carga metálica do Forno Elétrico a Arco, buscando garantir um custo mínimo por tonelada de aço produzido. A função objetivo do modelo de programação matemática levará em conta, além do custo por tonelada das matérias-primas, os gastos relativos ao consumo de energia e de eletrodos associados a cada material.

Algumas destas matérias-primas já se encontram estocadas nas empresas e outras deverão ser compradas de fornecedores. Frequentemente, uma determinada matéria-prima estocada foi comprada por um preço diferente daquele que tem hoje. Caberá, então, ao modelo de otimização, permitir estabelecer qual a quantidade de material estocado que será utilizada na mistura e qual a quantidade desta mesma matéria-prima que deverá ser adquirida do mercado.

Deve-se ressaltar, ainda, que a redução de custos associados à fabricação do aço, a menor variação na sua qualidade, uma maior eficiência na sua produção e a utilização de matérias-primas antes consideradas inadequadas, não são as únicas vantagens obtidas através de uma logística aplicada à escolha dos materiais. As empresas que utilizam este tipo de matéria-prima possuem um importante papel ambiental, uma vez que lidam com a reciclagem, característica de enorme relevância nos dias de hoje.

2 VISÃO GERAL

2.1 Pesquisa Operacional

Segundo Wagner,⁽¹⁾ a Pesquisa Operacional (PO) pode ser conceituada como uma abordagem científica para problemas de cunho administrativo, gerencial e tático. Pode-se, através de técnicas e métodos científicos, coordenar e conduzir problemas organizacionais que antes eram tratados de forma intuitiva e empírica. Para que se possa otimizar um determinado problema, deve-se observar, modelar e formular precisamente o mesmo, ou seja, especificar as variáveis relevantes, o que se quer melhorar (objetivo), quais as restrições e, de posse disso, aplicar alguma heurística ou algoritmo matemático adequado para buscar a melhora ou otimização do processo.

Ainda segundo o mesmo autor, as seguintes etapas devem ser seguidas:

- formulação do problema;
- construção do modelo;
- obtenção de uma solução para o modelo matemático;



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

- transformação de uma solução matemática em decisão; e
- implementação dos resultados.

2.2 Forno Elétrico a Arco

Existe uma diferença fundamental entre as usinas chamadas integradas e as semi-integradas, conhecidas com mini-mills. Essa diferença consiste na matéria-prima básica para a obtenção do aço. Na rota semi-integrada, as matérias primas fundamentais são a sucata e a energia elétrica, enquanto que na rota integrada, os minérios de ferro e o carvão mineral constituem os principais elementos para a produção de aço.⁽²⁾

Segundo Carvalho,⁽³⁾ o ciclo de operação para produção de aço através de sucata é função das práticas adotadas pelas aciarias e dos níveis de automação das várias manobras. Esta autora descreve a sequência de procedimentos para produção do aço:

1. O material a ser fundido, previamente selecionados em função do tipo de aço que se pretende obter, é carregado no forno.
2. Uma vez completada a carga, fecha-se o forno e inicia-se a operação do forno através da ignição, que consiste de um curto-circuito entre os eletrodos e a sucata. Um dos eletrodos toca na sucata e para. O segundo, ao tocar na sucata, fecha um curto-circuito bifásico através da carga. Ao recuarem, esses dois eletrodos estabelecem arcos elétricos entre as suas extremidades e a sucata. Um terceiro eletrodo ao tocar na carga, já encontra um curto-circuito fechado através dos arcos dos dois eletrodos, processando a ignição do seu arco.
3. A fase seguinte é conhecida como fusão. Nela, toda a carga em volta dos eletrodos é fundida e se inicia logo após a ignição do arco.
4. Após a fusão, é usual completar o volume útil do forno com material fundido com uma ou duas recargas, antes de se iniciar a fase de refino. Isso se justifica devido ao reduzido volume de material fundido ocupado na primeira fusão, em comparação com o volume inicial ocupado pela sucata bruta.
5. Uma vez completada a fusão, tem início o refino, quando são adicionados, em geral, outros componentes metalúrgicos como carbono, manganês etc. O refino pode processar no próprio equipamento ou no forno panela.

A norma NBR 8746⁽⁴⁾ classifica a sucata em três categorias:

- *interna*: gerada pela própria usina, constituída de cascões de panela, lingotes curtos, derramamento de aço, pontas cortadas na tesoura de lingotes, de placas ou de tarugos recorrentes das linhas de acabamento etc.;
- *de processamento*: criada na transformação do aço em produto acabado, restos de estamparia, retalhos de chapa etc.; e
- *de obsolescência*: comumente chamado de ferro-velho.

Ainda segundo a referida Norma Brasileira, a sucata é classificada segundo o modo de sua preparação em:

- não preparada;
- prensada;
- briquetada;
- tesourada;
- fragmentada (shredded);
- quebrada;
- cortada; e



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

- recuperada.

Na produção do aço em um Forno Elétrico a Arco, os gastos com sucata, energia elétrica e eletrodos representam cerca de 95% do custo total da produção do aço (Figura 1). Esta informação é um dos fatores que motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

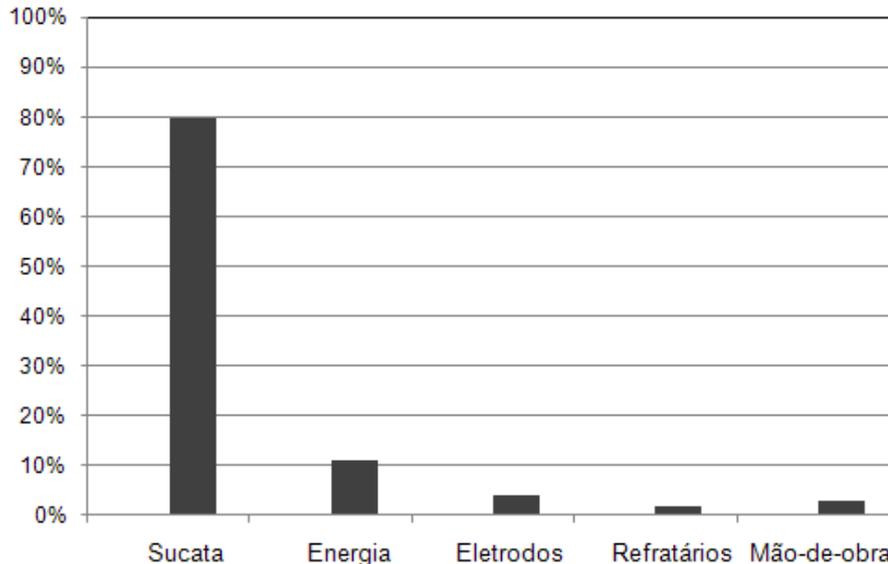


Figura 1. Distribuição dos custos de produção de um Forno Elétrico a Arco.⁽⁵⁾

3 INSTÂNCIA TESTE

Foram considerados dois cenários para determinação da mistura de matérias-primas para carga do FEA e uma produção de aço igual a 10.000 t / mês. O primeiro cenário considerou a solução obtida pelo otimizador, através da implementação de um modelo de Programação Matemática. O segundo cenário considerou a escolha das matérias-primas simulando a ação de uma pessoa com essa função de trabalho. Para os dois cenários, admitiu-se que todas as restrições impostas para produção do aço são atendidas.

Foram utilizadas na avaliação dos cenários 18 tipos de matérias-primas divididas em quatro grupos:

- gusa;
- sucata prensada;
- sucata *shredded*; e
- sucata interna.

As características destes materiais são apresentadas na Tabela 1.

Para a determinação dos custos associados aos consumos de energia e eletrodos, foram considerados os valores de \$0,10/kWh e \$10/kg, respectivamente.

As soluções encontradas para os dois cenários obedecem as restrições relativas aos consumos de energia e de eletrodos, rendimento e densidade da mistura, e também os limites inferior (mín) e superior (máx) para a participação percentual dos 4 grupos de matérias-primas, conforme Tabela 2.

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

Tabela 1. Dados de entrada para o modelo de otimização e cenário não otimizado

Grupo	MP	Qest	PrEst	Qmerc	PrMerc	Qmin	Energia	Eletrodos	Rend	Dens
		(t)	(\$)	(t)	(\$)	(t)	(kWh/t)	(kg/t)		(t/m ³)
1	S1	690	610	2400	580	0	330	1,55	0,89	2,70
	S2	1200	560	1900	600	0	357	1,60	0,91	2,90
	S3	500	710	700	690	0	325	1,65	0,87	3,10
2	S4	720	480	900	510	0	395	1,93	0,79	1,40
	S5	1020	495	800	490	0	391	1,87	0,81	1,30
	S6	300	575	1200	550	0	342	1,82	0,80	2,20
	S7	650	420	2900	445	0	388	1,98	0,83	1,50
	S8	900	590	1300	580	0	342	1,69	0,82	2,10
3	S9	1350	620	1700	665	0	323	1,53	0,85	1,75
	S10	450	510	500	530	0	367	1,83	0,84	1,20
	S11	630	490	910	505	0	359	1,95	0,86	1,65
	S12	200	430	850	450	0	394	1,75	0,87	1,20
	S13	450	495	1250	490	0	382	1,72	0,80	1,15
	S14	700	535	1500	545	0	359	1,81	0,86	1,76
4	S15	300	415	500	470	0	389	1,72	0,88	1,50
	S16	410	580	320	560	0	348	1,72	0,87	1,80
	S17	290	530	400	550	0	374	1,81	0,85	1,90
	S18	350	490	390	505	0	364	1,92	0,89	1,85

MP = matéria-prima, Qest = quantidade em estoque, PrEst = preço da matéria-prima estocada, Qmerc = quantidade disponível no mercado, PrMerc = preço de mercado, Qmin = quantidade mínima a ser utilizada da matéria-prima, Rend = rendimento e Dens = densidade

Tabela 2. Restrições estabelecidas para os dois cenários

	Energia	Eletrodos	Rend	Dens	Mix			
					Gusa	Prensada	Shredded	Interna
					(kWh/t)	(kg/t)	(t/m ³)	%
mín	#	#	0,84	1,50	22	25	30	6
máx	385	2,00	0,95	2,20	25	40	45	15

4 METODOLOGIA

A otimização da mistura de sucatas e outras matérias-primas foi feita utilizando-se a Programação Linear Inteira Mista. Esse método permite fornecer uma solução ótima e se baseia em relações matemáticas representadas pelas equações e/ou inequações lineares que definem o modelo.

A forma literal do modelo de otimização implementado é apresentada a seguir:

Dados de Entrada

Sucatas	:	Conjunto de sucatas
precoEst _i	:	preço pago pela matéria-prima <i>i</i> disponível no estoque (\$/t)
precoMerc _i	:	preço previsto para compra de novas matérias-primas <i>i</i> (\$/t)
custoENERGIA	:	custo da energia elétrica consumida (\$/kWh)
custoELETRODO	:	custo associado ao consumo de eletrodos (\$/kg)

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

consEnergia _i	:	consumo de energia associado à materia-prima i (kWh/t)
consEletrodo _i	:	consumo de eletrodo associado à materia-prima i (kg/t)
RM _i	:	rendimento metálico da materia-prima i
RMmin	:	rendimento metálico mínimo da mistura (%)
RMmax	:	rendimento metálico máximo da mistura (%)
Dens _i	:	densidade da materia-prima i (t/m ³)
DENSmin	:	densidade mínima da mistura (t/m ³)
DENSmax	:	densidade máxima da mistura (t/m ³)
Prod	:	produção de aço (t)
Qest _i	:	quantidade disponível em estoque da materia-prima i (t)
Qmerc _i	:	quantidade disponível no mercado da materia-prima i (t)
ELETRODOmax	:	consumo máximo de eletrodos (kg/t)
ENERGIAMax	:	consumo máximo de energia elétrica (kWh/t)
SHRmin	:	quantidade mínima de sucatas shredder na mistura (%)
SHRmax	:	quantidade máxima de sucatas shredder na mistura (%)
INTERNamin	:	quantidade mínima de sucatas internas na mistura (%)
INTERNamax	:	quantidade máxima de sucatas internas na mistura (%)
PRENSmin	:	quantidade mínima de sucatas prensadas na mistura (%)
PRENSmax	:	quantidade máxima de sucatas prensadas na mistura (%)
GUSamin	:	quantidade mínima de gusa na mistura (%)
GUSamax	:	quantidade máxima de gusa na mistura (%)
M	:	valor suficientemente grande (\$)

Variáveis de Decisão

x_i	:	Quantidade da materia-prima i na mistura (t)
z_i	:	$\begin{cases} 1, & \text{se } x_i \geq Q_{estoque}_i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

As relações (4.1) a (4.24) representam a formulação do modelo de Programação Matemática desenvolvido para o problema da mistura de sucatas.

$$Min \left(\sum_{i \in \text{Sucatas}} \text{custoMP}_i \right) + c_{Energia} * \text{precoEnergia} + c_{Eletrodo} * \text{precoEletrodo} \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in \text{Sucatas}} x_i * RM_i = \text{Prod} \quad (4.2)$$

$$x_i \leq Q_{est}_i + Q_{merc}_i \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.3)$$

$$\text{custoMP}_i \geq x_i * \text{precoEst}_i - M * z_i \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.4)$$

$$\text{custoMP}_i \geq Q_{est}_i * \text{custoEst}_i + (x_i - Q_{est}_i) * \text{precoMerc}_i + M * z_i - M \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.5)$$

$$c_{Energia} = \sum_{i \in \text{Sucatas}} x_i * \text{consEnergia}_i \quad (4.6)$$

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

$$cEnergia - ENERGIAMax * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.7)$$

$$cEletrodo = \sum_{i \in Sucatas} x_i * consEletrodo_i \quad (4.8)$$

$$cEletrodo - ELETRDOMax * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in Sucatas} x_i * RM_i - RMmin/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \geq 0 \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in Sucatas} x_i * RM_i - RMmax/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in Sucatas} x_i - DENSmin * \sum_{i \in Sucatas} x_i/Dens_i \geq 0 \quad (4.12)$$

$$\sum_{i \in Sucatas} x_i - DENSmax * \sum_{i \in Sucatas} x_i/Dens_i \leq 0 \quad (4.13)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 1 \text{ e } i \leq 3}} x_i - GUSAmín/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \geq 0 \quad (4.14)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 1 \text{ e } i \leq 3}} x_i - GUSAmáx/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.15)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 15 \text{ e } i \leq 18}} x_i - INTERNAmín/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \geq 0 \quad (4.16)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 15 \text{ e } i \leq 18}} x_i - INTERNAmáx/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.17)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 4 \text{ e } i \leq 8}} x_i - PRENSmín/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \geq 0 \quad (4.18)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 4 \text{ e } i \leq 8}} x_i - PRENSmáx/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \leq 0 \quad (4.19)$$

$$\sum_{\substack{i \in Sucatas \\ i \geq 9 \text{ e } i \leq 14}} x_i - SHRmín/100 * \sum_{i \in Sucatas} x_i \geq 0 \quad (4.20)$$



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

$$\sum_{\substack{i \in \text{Sucatas} \\ 1 \leq i \leq 14}} x_i - \text{SHR}_{\text{max}}/100 * \sum_{i \in \text{Sucatas}} x_i \leq 0 \quad (4.21)$$

$$x_i \geq \text{Qest}_i + M * z_i - M \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.22)$$

$$x_i \leq \text{Qest}_i + M * z_i \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.23)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \text{Sucatas} \quad (4.24)$$

A função objetivo está representada pela relação (4.1) e visa minimizar o custo associado ao consumo de matérias-primas, energia e eletrodos. A relação (4.2) indica a quantidade de cada matéria-prima que deverá ser utilizada para atingir a produção de aço desejada. As restrições (4.3) limitam o consumo máximo de matérias-primas às quantidades disponíveis em estoque e no mercado. As relações (4.4) e (4.5) estabelecem o custo associado ao preço das matérias-primas (custoMP). (4.6) e (4.7) são as restrições associadas ao consumo máximo de energia, enquanto que (4.8) e (4.9) se referem a quantidade máxima para consumo de eletrodos. As quantidades cEnergia e cEletrodo representam o consumo de energia e eletrodos, respectivamente. Os limites inferior e superior para o rendimento metálico foram considerados na relações (4.10) e (4.11). Para a densidade da mistura, foram consideradas no modelo as restrições (4.12) e (4.13), definindo valores mínimo e máximo para este parâmetro. As restrições (4.14) a (4.21) estabelecem as quantidades mínima e máxima de cada grupo de matéria-prima permitida para a carga do FEA. (4.22) e (4.23) são relações de não-interferência e (4.24) define z como uma variável binária.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a determinação do custo associado à produção de 1 t de aço, foram levados em conta, para os dois cenários, a soma dos gastos com matérias-primas, energia elétrica e com o consumo dos eletrodos associados aos constituintes da carga metálica do FEA, conforme já mostrado na relação 4.1.

O solução otimizada para o cenário 1 mostrou que o custo mínimo para produção de 1 tonelada de aço, atendendo as solicitações de carregamento do forno, foi de \$635,11 distribuídos da seguinte forma: \$ 570,37 para matérias-primas, \$ 43,46 para energia elétrica e \$ 21,28 com eletrodos. A Tabela 3 mostra a solução encontrada para este cenário.

Para o cenário 1, foram necessárias 11.596,0 t de material para produzir 10.000t de aço por mês, das quais 4.694,9 t serão utilizadas do estoque da empresa e 6.901,1 t deverão ser compradas no mercado.

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

Tabela 3. Resultado para o cenário 1 (otimizado)

	Gastos Calculados			Quantidades Calculadas			
	Matéria-Prima	Energia	Eletrodos	x	xE	xM	Mix
	(\$)	(\$)	(\$)	(t)	(t)	(t)	(%)
S1							
S2	1.482.673,51	91.075,07	40.817,96	2551,1	1200,0	1351,1	22,00
S3							
S4	228.521,04	18.805,38	9.188,45	476,1	476,1	0,0	4,11
S5							
S6							
S7	1.563.500,00	137.740,00	70.290,00	3550,0	650,0	2900,0	30,61
S8							
S9							
S10	229.500,00	16.515,00	8.235,00	450,0	450,0	0,0	3,88
S11	768.250,00	55.286,00	30.030,00	1540,0	630,0	910,0	13,28
S12	468.500,00	41.370,00	18.375,00	1050,0	200,0	850,0	9,05
S13							
S14	234.759,84	15.753,04	7.942,34	438,8	438,8	0,0	3,78
S15	359.500,00	31.120,00	13.760,00	800,0	300,0	500,0	6,90
S16							
S17							
S18	368.450,00	26.936,00	14.208,00	740,0	350,0	390,0	6,38

MP = matéria-prima, x = quantidade total da matéria-prima na mistura, xE = quantidade de matéria-prima disponível em estoque, xM = quantidade de matéria-prima que deverá ser adquirida do mercado, Mix = participação percentual de cada matéria-prima na mistura.

Com relação às restrições impostas à carga metálica, pode-se perceber, analisando a Tabela 4, que todas foram atendidas no cenário otimizado.

Tabela 4. Resultado para os parâmetros considerados nas restrições para o modelo otimizado

	Energia	Eletrodos	Rend	Dens	Mix			
					Gusa	Prensada	Shredded	Interna
	(kWh/t)	(kg/t)		(t/m ³)	%	%	%	%
mín	#	#	0,84	1,50	22	25	30	6
máx	385	2,00	0,95	2,20	25	40	45	15
cal	374,8	1,84	0,86	1,67	22,00	34,72	30	13,28

Já a solução não otimizada do cenário 2 possui um custo para produção de 1 tonelada de aço de \$ 645,89 distribuídos da seguinte forma: \$ 580,92 para matérias-primas, \$ 43,66 para energia elétrica e \$ 21,31 com eletrodos. A solução encontrada para este cenário é mostrada na Tabela 5.

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

Tabela 5. Resultado para o cenário 2 (não otimizado)

	Gastos Calculados			Quantidades Calculadas			
	Matéria-Prima	Energia	Eletrodos	x	xE	xM	Mix
	(\$)	(\$)	(\$)	(t)	(t)	(t)	(%)
S1							
S2	1.310.298,14	80.818,74	36.221,28	2263,8	1200,0	1063,8	19,43
S3	213.000,00	9.750,00	4.950,00	300,0	300,0	0,0	2,57
S4	336.000,00	27.650,00	13.510,00	700,0	700,0	0,0	6,01
S5	445.500,00	35.190,00	16.830,00	900,0	900,0	0,0	7,72
S6							
S7	1.182.496,09	104.519,88	53.337,47	2693,8	650,0	2043,8	23,12
S8							
S9							
S10	130.627,39	9.400,05	4.687,22	256,1	256,1	0,0	2,20
S11	768.250,00	55.286,00	30.030,00	1540,0	630,0	910,0	13,21
S12	468.500,00	41.370,00	18.375,00	1050,0	200,0	850,0	9,01
S13							
S14	347.750,00	23.335,00	11.765,00	650,0	650,0	0,0	5,58
S15	359.500,00	31.120,00	13.760,00	800,0	300,0	500,0	6,86
S16							
S17							
S18	247.250,00	18.200,00	9.600,00	500,0	350,0	150,0	4,29

MP = matéria-prima, x = quantidade total da matéria-prima na mistura, xE = quantidade de matéria-prima disponível em estoque, xM = quantidade de matéria-prima que deverá ser adquirida do mercado, Mix = participação percentual de cada matéria-prima na mistura.

Para o cenário 2 (ou não otimizado), foram necessárias 11.653,8 t de material para produzir 10.000 t de aço por mês, das quais 6.136,1 t serão utilizadas do estoque da empresa e a diferença (5.517,7 t) deverá ser comprada do mercado.

De maneira análoga à que ocorreu para o cenário 1, todas as restrições impostas à carga metálica do cenário 2 também foram atendidas (Tabela 6).

Tabela 6. Resultado para os parâmetros considerados nas restrições para o modelo não otimizado

	Energia	Eletrodos	Rend	Dens	Mix			
					Gusa	Prensada	Shredded	Interna
	(kWh/t)	(kg/t)		(t/m ³)	%	%	%	%
mín	#	#	0,84	1,50	22	25	30	6
máx	385	2,00	0,95	2,20	25	40	45	15
cal	374,7	1,83	0,86	1,65	22,00	36,84	30	11,16

Como era esperado, uma análise dos dados apresentados na tabela 7 mostra que o cenário otimizado apresentou menor custo total para produção de 1 t de aço, sendo a diferença de \$ 10,78. O gasto com matérias-primas é o maior responsável pelo aumento do custo total quando se compara os cenários 1 e 2, uma vez que a diferença dos custos associados a energia e eletrodos sofreram pouca alteração.

31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

Tabela 7. Comparação dos custos entre os cenários 1 e 2 para produção de **1 t de aço**

	Cenário 1 (Otimizado)	Cenário 2 (Não Otimizado)
Custo Total (\$)	635,11	645,89
Custo com Matérias-Primas (\$)	570,37	580,92
Custo com Energia (\$)	43,46	43,66
Custo co Eletrodos (\$)	21,28	21,31

Observa-se nos cenários analisados que a quantidade de matéria-prima consumida foi maior que as 10.000 t de aço produzido (11.596,0 t e 11.653,8 t nos cenários 1 e 2, respectivamente). Isso se deve ao rendimento metálico, uma vez que nem toda a massa da matéria-prima é transformada em aço, sendo gerada, nesse processo, escória.

6 CONCLUSÕES

O aplicativo computacional desenvolvido mostrou-se bastante eficiente, fornecendo soluções rápidas para o modelo de Programação Matemática implementado. A solução ótima do cenário 1 foi encontrada em um tempo < 5 s (processador Pentium Dual-Core, Sistema Operacional Windows XP e 1 GB de memória RAM), o que permitirá poupar tempo e trabalho na definição da mistura ótima.

Outros pontos relevantes merecem ser destacados:

- A mistura de menor custo (mistura ótima) foi encontrada, obtendo-se com ela uma economia de \$ 10,78 por tonelada de aço produzido em comparação com o cenário não otimizado, fator importante para enfrentar a concorrência vigente no mercado. Para a produção que foi estabelecida em 10.000 t / mês, a economia é de \$107.800,00/mês.
- É um aplicativo computacional simples de ser utilizado.
- Auxilia na tomada de decisões, uma vez que diversos cenários distintos podem ter suas soluções comparadas rapidamente.
- É possível adicionar outras restrições ao modelo com a finalidade de atender as necessidades específicas de cada empresa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Redemat (UFOP-CETEC-UEMG), a CAPES, a Escola de Minas-UFOP e a Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

- 1 WAGNER, H. M. Pesquisa operacional. 2.ed., Rio de Janeiro, Prentice-Hall, 1986, 851p.
- 2 ZANONI, C. Análise exergética de um forno elétrico a arco. Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PUC-RS, Dissertação (Mestrado), 2004, 161 p.
- 3 CARVALHO, E. B. Otimização da Operação de Fornos Elétricos de Arco Direto, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação (Mestrado), 1998, 78p.
- 4 Normas Brasileiras. ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8746 - Sucata de Aço - Classificação.



31º Seminário de Logística

Suprimentos - PCP - Transportes

- 5 CHRISTOFF, B. A. Fornos a Arco: Fundamentos e características gerais, operação e manutenção. Encontro Técnico sobre Fornos Elétricos, Belo Horizonte - MG. Anais. CNBE, Belo Horizonte-MG, 1995. *In*: CARVALHO, E. B. Otimização da Operação de Fornos Elétricos de Arco Direto, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação (Mestrado), p.45, 1998, 78p.