



## **Modelagem para otimização da composição mássica da lâmina de minérios de abastecimento do Alto-forno: um estudo de caso.**

Bruno Martins Moreira (UEMG) – bruno.moreira@uemg.br  
Laura Ferreira Santos (UEMG) – laurafssantos@gmail.com  
Rubens Laender Faria Resende (UEMG)- laenderfaria@gmail.com  
Sérgio Moisés Magalhães Moura (UEMG)- sergiom2011@gmail.com

### **Resumo**

O setor de siderurgia compõe uma grande parte das indústrias situadas no centro-oeste de Minas Gerais. Com o intuito de otimizar a composição dos insumos do alto-forno, equipamento indispensável para a siderurgia, o presente trabalho utilizou da pesquisa operacional explorando a programação linear para definir o mix ideal de minérios para abastecimento do Alto-forno. Com o modelo desenvolvido foram determinadas as proporções ótimas dos componentes da mistura e os níveis ótimos das variáveis de processo. Após implementado, o modelo provou ser eficaz, atendendo a todos os requisitos no menor custo possível.

**Palavras-Chaves:** Siderurgia; Pesquisa Operacional; Alto-Forno; Otimização; Composição; Minério.

### **1. Introdução**

A indústria siderúrgica é uma das mais importantes no mundo, sendo seus produtos finais, como aços e ferros fundidos, utilizados principalmente nos setores de construção civil e automobilístico. De acordo com a pesquisa do jornal Valor Investe, o Brasil ocupa o 9º lugar dos maiores produtores de aço no mundo, tendo produzido 36 milhões de toneladas em 2021, com uma alta de 14,7%.

O Brasil está entre os 3 maiores produtores de ferro gusa do mundo, ao lado de Rússia e Ucrânia. Devido aos conflitos entre os dois últimos desde fevereiro de 2022, cabe ao Brasil atender essa oportunidade de demanda em escala global. Diante desse cenário, é importante a aplicação de métodos voltados para a produtividade, para que se tenha o máximo de eficiência nos processos, maior capacidade de produção e qualidade no produto final.



Utilizando da pesquisa operacional e técnicas de excel, juntamente com restrições e fórmulas, segundo Bello e Vieira (2010) é possível otimizar processos nas indústrias diminuindo desperdícios e economizando capital para a empresa. O trabalho desenvolvido tem como objetivo desenvolver um modelo matemático para definir a quantidade ótima de matéria-prima a ser inserida na lâmina de minérios, de forma a minimizar os custos de produção.

A escolha para a qualidade da matéria prima em um leito de fusão nas usinas siderúrgicas é de essencial importância, pois deve seguir as especificações solicitadas pelos clientes, seguindo uma série de restrições de qualidade química e física, para que o processo seja feito da melhor forma e com o menor custo. Segundo Ensinas (2008), pesquisas e análises podem proporcionar aumentos significativos na produção e diminuição de custos.

## **2. Referencial Teórico**

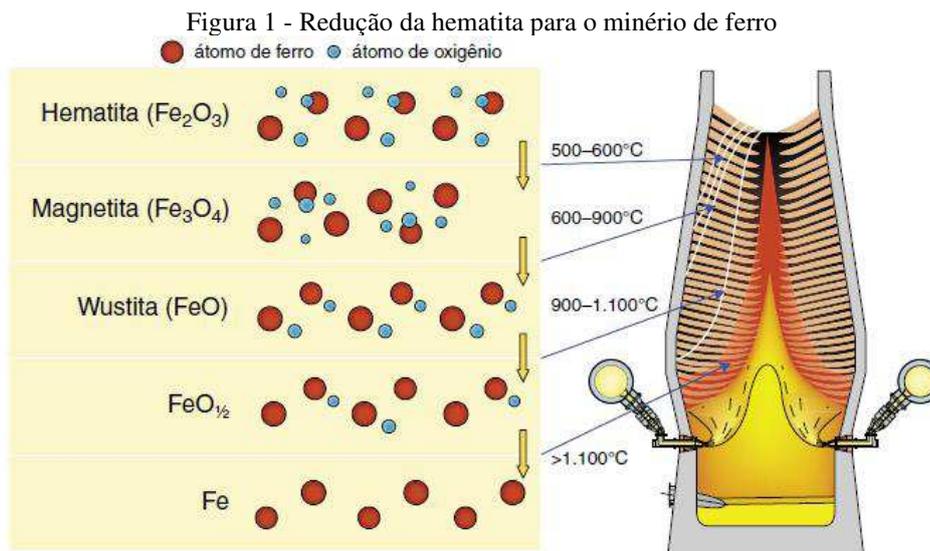
### **2.1. Siderurgia**

Segundo Mourão et al (2007), a Siderurgia é o processo de obtenção dos produtos finais desde a utilização do minério de ferro, seguindo as etapas de: extração do ferro pelo alto-forno, conversão do ferro gusa em aço, e o lingotamento do aço líquido na forma do produto desejado. Sendo assim, a siderurgia dispõe de um conjunto de técnicas, processos, conhecimentos para a fabricação e manipulação do ferro e do aço.

Segundo Malard (2009), dentro da siderurgia existem as Usinas Integradas, que dentro delas existem todas as etapas de fabricação do aço, desde a redução do minério de ferro (processo no qual reduz o oxigênio presente na hematita até obter o ferro puro); as Usinas semi-integradas, que consistem nas etapas de refino e laminação do aço; e as usinas não integradas, que participam apenas da etapa de redução, ou seja, na produção do ferro gusa.

De acordo com Geerdes e Vliet (2004), existem duas rotas na obtenção do aço, sendo a rota de produção pelo alto-forno a oxigênio, e a rota por meio do forno a arco elétrico. A primeira, utiliza carga metálica, que pode ser na forma de pelotas (aglomerados de finos de minério), sinter (minério, fundente e combustíveis unidos por meio de fusão) ou minério de ferro; combustíveis, como carvão vegetal ou mineral, que além de fornecer o calor necessário para o derretimento, também atua na redução; e os fundentes, utilizados auxiliar na remoção das impurezas, como o calcário.

O alto-forno é o elemento principal de uma usina não integrada, sendo um reator químico revestido por metal e construído internamente com tijolos refratários. Nele acontece o processo de redução, que é a transformação da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) para o ferro (Fe), de acordo com o processo apresentado na Figura 1.



Fonte: Geerdes e Vliet (2004, p 14)

### 2.1.2 Balanço de Massas

Segundo a lei de Lavoisier, ou lei de conservação de massas, o somatório da massa dos reagentes é igual ao somatório da massa dos produtos. Segundo Santos (2012), um balanço de massas pode ser desenvolvido com múltiplos materiais que afluem em um sistema. Com isso, podemos analisar que a matéria inserida em um alto forno, por exemplo, não poderia desaparecer, mas sim, se realocar em forma de gases, ferro gusa e subprodutos provenientes do processo.

### 2.1.3 Perda por Calcinação (PPC)

A perda por calcinação é um processo no qual o material perde parte da sua massa quando submetido a temperaturas elevadas. Segundo John (2014), a calcinação é a remoção dos materiais voláteis (como  $\text{CO}_2$ , que estão presentes nos óxidos de cálcio e de magnésio) no calcário, a uma temperatura de 900°C a 1200°C, para transformá-lo em cal virgem



## 2.2. Pesquisa Operacional

A programação linear e não linear é de suma importância na indústria para os engenheiros de produção, pois segundo Souto-Maior (2014) possibilita agilizar e otimizar processos complexos ou até mesmo simples. O trabalho desenvolvido segue a linha de raciocínio da pesquisa operacional, que é a área tema do projeto, onde utilizamos de fórmulas e um algoritmo específico para resolver o problema em questão.

Segundo Hillier e Lieberman (2006) a pesquisa operacional é aplicada a problemas de como conduzir e coordenar as operações na organização e tenta frequentemente encontrar a solução ótima, onde a hipótese que o gestor tem sobre o problema pode ser simulado com os modelos para trazer o máximo para vida real e chegar as melhores conclusões possíveis.

A Pesquisa Operacional busca estudar profundamente áreas da matemática, economia voltada as indústrias, informática com ênfase nos algoritmos e a estatística para resolver problemas de produção. Utilizando esses conhecimentos, juntamente com um programa para o seu desenvolvimento, no caso do projeto o Excel, segundo Ensinas (2008) é possível gerar economias não só de tempo como também na precisão do processo.

Segundo Hillier e Lieberman (2006), dentro da pesquisa operacional é possível utilizar diversos tipos de técnicas para se otimizar um processo na produção. Temos teorias das filas, simulações como a de Monte Carlo, estatística e probabilidades, programações lineares e não lineares, entre outros. Para a realização do projeto será utilizada uma abordagem específica da pesquisa operacional, conhecida como programação linear.

A programação linear leva em consideração alguns fatores para seu uso, são eles: variáveis de decisão, restrições, funções objetivo e as condições de não negatividade. Variáveis de decisão serão os diferentes tipos de minério de ferro que podem ser usados na lâmina. Segundo Souto-Maior (2014) as variáveis de decisão são os fatores que estão dentro do poder de decisão do administrador e podem ser escolhidas por ele. A função objetivo, por sua vez, varia do que a organização deseja analisar. No caso, será maximizar os lucros da empresa em questão.



As restrições são parte essencial da técnica, pois fazem a trava dos parâmetros quantitativos, químicos e físicos, segundo Souto-Maior (2014) as restrições são os fatores que estão fora do poder de decisão do administrador e não podem ser escolhidas por ele. Por fim as condições de não negatividade são apenas ferramentas para impedir a negatividade de algumas condições do sistema.

### 2.2.1. Problema da mistura

Segundo Arenales et al. (2007), o problema da mistura consiste na obtenção ou fabricação de um produto, chamado de mistura, combinando alguns materiais. A mistura é produzida a partir de ingredientes que possuem componentes desejados utilizando como referência o problema de mistura. O presente trabalho deseja-se determinar as quantidades de cada minério que devemos utilizar, para obter uma mistura com a restrição especificada no menor custo possível.

Desejamos minimizar este custo, portanto, o problema de mistura é escrito como:

$$\text{Minimizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2, + \dots + c_nx_n$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2, + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2, + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2, + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

$$x_1 + x_2, + \dots + x_n = 1$$

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

Sendo:

$x_j$ : a quantidade de cada minério  $j$  que deve ser utilizada em uma unidade de mistura,

$$j = 1, 2, \dots, n,$$



$a_{ij}$ : a fração do componente  $i$  no ingrediente  $j$ ,  $i = 1, \dots, m$  e  $j = 1, \dots, n$ ,

$b_i$ : a fração do componente  $i$  na mistura,  $i = 1, \dots, m$ ,

$c_j$ : o custo de uma unidade do ingrediente  $j$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

Por fim, como  $x_j, j = 1, \dots, n$ , são as quantidades dos ingredientes a serem utilizadas em uma unidade da mistura, então a soma dessas quantidades deve resultar em uma unidade da mistura, no caso a lâmina de minérios em estudo.

Além disso, o custo de uma unidade da lâmina de minérios é a soma dos custos de todos os ingredientes utilizados, ou seja:  $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ .

### 2.3. Ferramentas de Resolução de Problemas/Solver

As ferramentas de resolução de problemas, são basicamente sistemas ou programas que auxiliam nos cálculos matemáticos levando em conta os fatores da pesquisa operacional. Pela popularidade que o programa Excel possui, segundo Gomes Júnior e Souza (2004) é muito comum o mesmo ser usado para a resolução dos problemas utilizando a extensão Solver.

Segundo Gomes Júnior e Souza (2004) o Solver é uma ferramenta que está inserida no Software Microsoft Excel, que soluciona problemas de programação linear e não linear por meio de algoritmos matemáticos. É muito utilizado na pesquisa operacional por ser uma ferramenta de fácil manuseio, além da capacidade de gerar relatórios bem detalhados sobre a solução do problema desenvolvido.

Além disso, segundo Gomes Júnior e Souza (2004) o Solver atualiza os valores nas células de variáveis a fim de satisfazer aos limites sobre células de restrição e encontrar o resultado ideal para a célula objetiva. A partir do Solver no Excel é possível obter três tipos de relatórios, são eles:

- a) Relatório de Resposta: fornece os valores originais e finais da Célula objetiva e de todas as Células de restrições;



- b) relatório de Sensibilidade: fornece o valor final de cada célula de restrição, seu custo reduzido, o coeficiente da função objetivo, o acréscimo e o decréscimo do coeficiente da função objetivo para o qual a solução atual permanecerá ótima;
- c) relatório de Limite: fornece os limites inferiores e superiores de cada célula que é possível ajustar, mantendo todas as outras células em seus valores atuais e satisfazendo as restrições.

Este texto apresenta o caso de Artigo Identificado. Portanto, ele deve conter Título, Autores, Resumo e Palavras-chave. **Deve ser submetido também um DOC sem o nome dos autores, as respectivas instituições e os e-mails (Artigo não identificado).** O artigo completo não deve exceder **4.000 (quatro mil) palavras** e o tamanho do **arquivo não deve exceder 1 (um) Mb.** Tabelas poderão ser tratadas como figuras, para não contar palavras, mas a qualidade das mesmas é de sua responsabilidade. Procure tratar imagens e tabelas para que estas não deixem seu arquivo muito grande.

As margens devem ser: esquerda e superior de 3 cm e direita e inferior de 2 cm. O tamanho de página deve ser A4, impreterivelmente. Por favor, verifique esse aspecto com especial cuidado.

O artigo deve ser escrito no formato do programa *Microsoft Word 2003*, ou superior. Se você está lendo este documento, significa que você possui a versão adequada do programa.

Na sequência, passo a passo, serão especificados os detalhes da formatação.

### 3. Metodologia

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso, segundo Ventura (2007), o estudo de caso pode ser definido como uma pesquisa exaustiva, profunda e extensa, empiricamente verificável que permita seu conhecimento amplo e detalhado. Como objetivo de pesquisa o artigo buscou otimizar a alimentação do leito de fusão de uma siderúrgica, visando o menor custo e respeitando todos os requisitos necessários.

Dessa forma o trabalho iniciou com a coleta de dados relativos ao balanço de massa referente a redução do minério de ferro, para a obtenção do ferro gusa e da escória, sendo esses, produto e subproduto do alto forno respectivamente. Esses dados foram obtidos através dos registros de análises químicas feitos pela empresa e foram compilados em uma planilha de Excel. Posteriormente, foi feito uma análise e estudo de todos os dados e extraindo as necessidades críticas para o processo.

Após realizarmos o estudo teórico, elaboramos um modelo matemático, com todos os cálculos referente ao balanço de massa, e as restrições referente a matéria prima e aos requisitos do produto. A ferramenta escolhida para elaborar o modelo foi o Excel, devido a praticidade e disponibilidade para utilização. Para realizar a otimização do leito de fusão, em função do menor custo, foi utilizado o suplemento do Excel chamado de Solver.

Paralelamente, foram coletados dados da própria empresa, como custo das matérias-primas, composição química e granulométricas, além de todas as especificações dos produtos obtidos, e outras restrições pertinentes ao processo. Tais informações referentes a custos serviram como parâmetros de análise da real eficácia do modelo elaborado. Esses dados se referem aos dias entre 07 e 18 de setembro de 2021.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Restrições e Tabelas

Segundo análises químicas obtidas pelo laboratório da empresa em questão, foi estruturado uma tabela com os diferentes percentuais das substâncias em cada minério analisado. Sendo assim, a partir dessas análises foi possível o cálculo aproximado do mix ideal de minério para a lâmina proposta, como apresentado na TABELA 1.

TABELA 1: Composição Química das Matérias Primas

Minérios/Substâncias	Composição Química dos Tipos de Minério				
	Minério A	Minério B	Minério C	Minério D	Minério E
Ferro	53,48%	58,37%	51,30%	57,68%	61,72%
Dióxido de silício	13,20%	8,49%	17,92%	7,87%	5,02%
Óxido de Ferro III	3,83%	1,48%	0,72%	1,54%	1,09%
Manganês	0,12%	1,79%	2,84%	0,87%	0,35%
Fósforo	0,15%	0,10%	0,08%	0,09%	0,08%
PPC e outros	29,22%	29,77%	27,14%	31,95%	31,74%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Para a maior qualidade do ferro gusa seguindo as especificações dos clientes, é necessário ter restrições percentuais de mínimo e máximo percentual de utilização dos minérios. Estas restrições podem ser de origem operacional, determinado pela própria empresa, ou

determinado pelo cliente. Na TABELA 2 foram organizadas restrições utilizadas como parâmetros do Solver no Excel para os cálculos da lâmina de minérios, como mostra a seguir.

TABELA 2: Restrições % de Entrada de Minérios na Lâmina

Restrições do percentual de cada minério		
Tipo	Mínimo	Máximo
Minério A	0%	100%
Minério B	0%	100%
Minério C	0%	100%
Minério D	15%	20%
Minério E	0%	5%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Para o cálculo da batelada de minério representado por  $Z$ , onde  $\%_{Fe(leito)}$  é o percentual de ferro no leito,  $\%_{Fe(gusa)}$  representa o percentual de ferro presente no ferro gusa, ademais, precisamos de 1.000 quilogramas de ferro gusa final que será representado por  $Q_{Ferro\ Gusa\ (objetivo)}$ .

Temos então que  $Z = \frac{\%_{Fe(leito)}}{\%_{Fe(gusa)}} \times Q_{Ferro\ Gusa\ (objetivo)}$ , resultando em 1704,51 quilogramas de minério de ferro, e um peso bruto total de 1983,83 quilogramas matéria prima entrando no processo.

Uma restrição clara do projeto é a quantidade utilizada no leito para minérios finos, ou seja, a granulometria é extremamente essencial para que a queima ocorra da forma correta. Segundo Moraes (2010, Pg.9) “a distribuição gasosa, a permeabilidade, a eficiência de redução dentro do reator e a temperatura de fusão são interferidas pelo tamanho médio e distribuição granulométrica”. Para isso, a empresa em questão coloca como restrição o mínimo de 0% e máximo de 18% de grãos finos permitidos na alimentação do processo. Para isso classificam-se como minérios finos, aqueles que se encontram na faixa entre 0 a 4,75 milímetros. A TABELA 3 sumariza o teor de finos nas matérias primas, ou minérios utilizados no alto forno.

Tabela 3: Granulometria dos Minérios na Lâmina de Alimentação do Alto Forno

Minério	Granulometria dos Minérios no Lâmina			Σ	Relção Finos/Lâmina
	3,35mm a 4,75mm	>2,00mm	< 2,00mm		
Minério A	1,62%	4,65%	17,97%	24,24%	-
Minério B	0,89%	1,12%	3,12%	5,13%	-
Minério C	3,96%	11,87%	22,16%	37,99%	-
Minério D	2,30%	0,00%	25,97%	28,27%	-
Minério E	1,56%	0,78%	4,93%	7,27%	-
Média	2,07%	3,68%	14,83%	20,58%	13,00%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Além dos dados de granulometria, foi necessário inserir restrições para que o produto, o ferro gusa, atendesse as especificações do cliente, conforme as tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Especificação do Cliente

Restrições do Ferro Gusa			
Elemento	Mínimo	Máximo	Igual
Fósforo	0,00%	0,190%	-
Manganês	0,00%	1,00%	-
Silício	-	-	0,30%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Tabela 5: Teor Escória

Restrições da Escória			
Elemento	Mínimo	Máximo	Igual
Alumina	9,00%	15,00%	-
(Óxido de Cálcio)/(Sílica)	-	-	0,75

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

#### 4.2 Excel/Solver

O modelo matemático desenvolvido tendo como base o problema da mistura, foi executado no Excel utilizando o suplemento Solver. A implementação pode ser verificada nas figuras 2, 3 e 4.



Figura 2 – Dados de entrada Solver

Parte 1 - Dados de entrada									
Leito de Fusão						Quantidade	Quantidade	Custo	Custo
Minérios	Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	Ideal %	Ideal (Kg)	P/ Ton.	Final
Minério A	53,48	13,20	3,83	0,12	0,150	X1	623,84	R\$ 280,00	Y1
Minério B	58,37	8,49	1,48	1,79	0,100	X2	320,86	R\$ 343,90	Y2
Minério C	51,30	17,92	0,72	2,84	0,080	X3	342,91	R\$ 179,30	Y3
Minério D	57,68	7,87	1,53	0,87	0,092	X4	331,67	R\$ 281,69	Y4
Minério E	60,85	9,32	1,18	0,21	0,073	X5	85,23	R\$ 411,55	Y5
Média Ponderada	55,15	12,03	2,18	1,13	0,111	100%	1704,51	-	Z1

Granulometria							
Minério	3,35mm a 4,75mm	>2,00mm	< 2,00mm	Soma Finos	Peso Finos Leito	Custo P/ Ton.	Custo Finos Gerados
Minério A	0,58%	0,68%	4,95%	6,21%	38,76	R\$ 280,00	R\$ 10,85
Minério B	1,08%	1,12%	4,33%	6,53%	20,94	R\$ 343,90	R\$ 7,20
Minério C	1,81%	2,07%	13,48%	17,35%	59,51	R\$ 179,30	R\$ 10,67
Minério D	2,30%	0,00%	25,97%	28,27%	93,76	R\$ 281,69	R\$ 26,41
Minério E	1,56%	0,78%	4,93%	7,27%	6,20	R\$ 411,55	R\$ 2,55
Bauxita	-	-	100,00%	100,00%	2,42	R\$ 90,00	Y6
Relação Finos na Lâmina						13,00%	Z2

Cálculo Bauxita							
Fe	Al2O3	SiO2	P	Mn	Quantidade (Kg)	Custo P/ Ton.	Custo Final
8,20%	45,39%	21,23%	0,07%	0,15%	X6	R\$ 90,00	Y6

Peso de cada elemento na lâmina de minério em Kg				
Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P
940,00	205,08	37,19	19,30	1,898

Cálculo Calcário			
CaO	CaCO3 + Outros óxidos	Custo P/ Ton.	Custo Final
149,38	X7	R\$ 30,00	Y7

Minérios	Peso Minério Leito	Peso Finos Leito	Peso Minério+Finos
Minério A	623,84	38,76	662,61
Minério B	320,86	20,94	341,80
Minério C	342,91	59,51	402,42
Minério D	331,67	93,76	425,44
Minério E	85,23	6,20	91,42
Total	1704,51	219,17	1923,69

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Figura 3 – Balanço de massas

Parte 2 - Balanço de Massas			
<b>Cálculo da Lâmina de Minério</b> % de Fe objetivado no Gusa: 94% Fe na Lâmina Média Ponderada: 55,15 Peso da lâmina de minério (Kg): 1704,51		<b>Balanço da SiO2</b> Quantidade total na lâmina (Kg): 205,08 Quantidade de Si no Gusa (Kg): 3,00 Quantidade de SiO2 no Gusa (Kg): 6,42 Quantidade de SiO2 na Escória (Kg): 198,67 Quantidade de SiO2 na escória após balanceamento (Kg): 199,18	
<b>Balanço FeO Escória</b> FeO Escória: 3,13 Fe que não foi para o Gusa: 2,43		<b>Balanço do Mn</b> % de Taxa de absorção no Gusa: 51,81% Quantidade total na lâmina (Kg): 19,30 Quantidade de Mn no Gusa (Kg) com balanceamento: 10,00 Quantidade de MnO na Escória (Kg): 12,91 Quantidade de MnO na escória após balanceamento (Kg): 12,91	
<b>Balanço CaO</b> Quantidade de CaO para atingir IB (Kg): 149,00 Quantidade de CaO para atingir IB, após balanceamento (Kg): 149,38		<b>Balanço da Al2O3</b> Quantidade total na lâmina (Kg): 37,19 Quantidade de Al2O3 na escória (Kg): 37,19 Quantidade de Al2O3 na escória com balanceamento (Kg): 38,29 % na Escória: 9,0%	
<b>Escória</b> Peso Incompleto = SiO2 + CaO + MnO + Al2O3 (Kg): 399,76 Peso Completo = (Peso Incompleto / 93,97%) : 425,42			

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Figura 4 – Dados de saída

Parte 3 - Dados de saída							Parte 5 - Dados de Custo	
<b>Composição Ferro Gusa Teórico</b>							<b>Cálculo Economia Lâminas</b>	
-	Ferro	P	Si	Mn	C + Outros Metais	Total	-	Valores
Composição (Kg)	937,77	1,90	3,00	10,00	47,33	1000	Custo Minérios Lâmina (Z1)	R\$ 475,01
Composição (%)	93,78%	0,190%	0,30%	1,00%	4,73%	100%	Custo Finos (Z2)	R\$ 57,69
<b>Composição Escória Teórica</b>							Custo Bauxita	
-	SiO2	Al2O3	CaO	MnO	FeO	Total	Custo Calcário	R\$ 8,30
Composição (Kg)	199,18	38,29	149,38	12,91	3,13	402,89	Custo Total Antes	R\$ 559,22
Composição (%)	46,82%	9,00%	35,11%	3,04%	0,74%	94,71%	Custo Total Depois	R\$ 541,21
<b>Peso Completo Escória</b>							Economia P/ Lâmina	
425,42							Economia P/ Dia	
<b>Parte 4 - Dados de restrições</b>							Economia P/ Mês	
<b>Restrições Granulométricas</b>		Minérios		% Mínimo na Lâmina	% Máximo na Lâmina		R\$ 97.239,90	
% Máximo de Finos	13%	Minério A	0%	100%				
<b>Restrições Gusa</b>		Minério B	0%	100%				
% Máximo de Fósforo	0,19%	Minério C	0%	100%				
% Máximo de Manganês	1,00%	Minério D	15%	20%				
% Máximo de Silica	0,30%	Minério E	0%	5%				
<b>Restrições Lâmina</b>		<b>Restrições Escória</b>		(Óxido de Cálcio) / (Silica)		0,75		
Somatório %	100%	% Mínimo Óxido de Alumínio		9%				
Granulado máx	5%	% Máximo Óxido de Alumínio		15%				

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

### 4.3. Balanço de massa

Os elementos presentes no minério de ferro são incorporados no ferro gusa ou na escória. Os níveis de incorporação dependem de fatores operacionais e da qualidade da própria matéria prima. As Tabelas 6 e 7 a seguir representam um esquema da composição do leito teórico proposto (matérias primas), e a composição do ferro gusa e da escória (produto final e subproduto) respectivamente.

Tabela 6: Composição do Leito de Alimentação (Proposto)

Elemento/Matéria prima	Dados de entrada			Quantidade (Kg)
	Minério de ferro	Bauxita	Calcário	
Ferro	55,14%	8,20%	-	940,20
Dióxido de Silício	12,03%	21,23%	-	205,60
Alumina	2,18%	45,39%	-	38,29
Manganês	1,13%	0,15%	-	19,30
Fósforo	0,111%	0,070%	-	1,90
Carbonato de Cálcio	-	-	100,00%	276,64
PPC e outros Óxidos	29,41%	24,96%	-	501,90
Peso (Kg)	1704,51	2,41	276,64	1983,83

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

Tabela 7: Composição Ferro Gusa e Escória

Elemento/Produto	Dados de saída		Quantidade (Kg)
	Ferro Gusa	Escória	
Ferro	93,78%	-	937,80
Manganês	1,00%	-	10,00
Fósforo	0,190%	-	1,90
Silício	0,30%	-	3,00
Carbono	4,730%	-	47,30
Óxido de Ferro	-	0,74%	3,13
Dióxido de Silício	-	46,82%	199,18
Alumina	-	9,00%	38,29
Óxido de Cálcio	-	35,11%	149,38
Óxido de Manganês	-	3,04%	12,91
Outros Óxidos	-	5,29%	22,51
Peso (Kg)	1000	425,42	1425,42

Fonte: Elaborado pelos Autores (2023)

A massa total de saída não é equivalente a massa total de entrada, isso acontece devido às perdas por calcinação, além do gás gerado pelo alto forno que contém partículas sólidas. Porém esses dois dados não foram utilizados pela empresa para realizar o cálculo do leito e do balanço de massa.

#### 4.4 Custos

Com a composição teórica proposta no item 4.3, e levando em consideração os dados da empresa analisada, temos a seguinte tabela dos respectivos minérios e seus custos por quilograma. Para o correto cálculo do custo total é necessário que conste o custo da bauxita e do calcário, elementos importantes para a aglomeração dos finos para a produção da gusa.

Tabela 8: Relações de Custeio

Substância	Custo Kg	Quantidade		Custo	
		Antes	Depois	Tonelada	Tonelada
Minério A	R\$ 0,280	508,47	662,61	R\$ 142,372	R\$ 185,53
Minério B	R\$ 0,344	594,96	341,80	R\$ 204,607	R\$ 117,54
Minério C	R\$ 0,179	280,9	402,42	R\$ 50,365	R\$ 72,15
Minério D	R\$ 0,282	409,37	425,44	R\$ 115,317	R\$ 119,84
Minério E	R\$ 0,412	90,11	91,42	R\$ 37,085	R\$ 37,62
Bauxita	R\$ 0,090	20	2,41	R\$ 1,800	R\$ 0,22
Calcário	R\$ 0,030	255,94	276,64	R\$ 7,678	R\$ 8,30
Total	-	-	-	R\$ 559,22	R\$ 541,21



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A tabela 8 acima faz comparação entre o peso da lâmina de minérios antes e após o processamento dos dados no solver. Assim sendo, é possível calcular o custo final da tonelada de ferro gusa tendo a quantidade de minérios e agregados, importante lembrar que a quantidade final da lâmina leva em conta o peso do granulado grande e o peso dos finos de cada minério.

Então foi constatada uma redução de custo teórica na ordem de 3,22% ou R\$18,01, em números absolutos, em cada lâmina de minérios inserida nos altos fornos. Porém, é de suma importância ressaltar que são inseridas cerca de 180 lâminas de minérios por dia, ou seja, seriam economizados teoricamente R\$3.241,80 por dia e consequentemente R\$97.254,00 por mês.

## 5. Considerações finais

O trabalho contou com o estudo de vários aspectos do alto forno e do processamento de dados do Excel. A teoria química do processo de redução dos minérios e adição de componentes são os segmentos essenciais para a criação das restrições do projeto. A criação do projeto é complexa e demanda um alto tempo de compilação dos dados e análise dos mesmos, porém após implementado é de fácil atualização por parte dos colaboradores o que facilita o processo na indústria.

O trabalho trouxe uma proposta que abre portas para futuras continuações de implementações de variáveis, aperfeiçoando sua complexidade deixando assim o modelo mais robusto. O maior obstáculo na realização do projeto foram as tratativas dos dados que compõem uma base muito grande e também a criação das restrições e variáveis no Solver.

A literatura acadêmica acerca dos assuntos químicos de balanços de massa e sobre a área de siderurgia foi de extrema importância para que o trabalho pudesse ser baseado e criar fortes laços entre a prática e a teoria, agregando valor as simulações feitas. A redução nos custos de produção da empresa estudada foi apresentada no presente trabalho e o modelo resolveu a pergunta principal do projeto que seria qual a quantidade ótima dos diferentes tipos de minérios que poderiam entrar na composição mássica da lâmina para reduzir os custos e manter as qualidades físico-químicas do ferro gusa.



### Referências bibliográficas

ANDRADE, Roberto Silva de. **Efeito da basicidade e do teor de MgO no inchamento de pelotas de minério de ferro.** São Paulo, 2018.

BELLO, Luiz Henrique Abreu Dal; VIEIRA, Antonio Fernando de Castro; **Modelagem em Experimentos Mistura-Processo para Otimização de Processos Industriais.** Rio de Janeiro, 2010. 155p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ensinas, Adriano Viana. **Integração térmica e otimização termoeconômica aplicadas ao processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar.** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 207 p. Tese (Doutorado)

GEERDES, Maarten, T. H.; VLIET, Cor van der. **Modern blast furnace ironmaking : an introduction.** Second edition. IJmuiden: IOS Press, 2004.

HILLIER , FREDERICK S.; LIEBERMAN , GERALD J. **Introdução a Pesquisa Operacional. 8. ed. [S. l.]:** McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2006. 850 p. ISBN 85-86804-68-1.

JÚNIOR, Aloísio de Castro Gomes; SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. **Solver (excel): Manual de referência.** Ouro Preto: programa pró-ativa UFOP, 2004.

MACHADO, Ana Paula. **Produção mundial de aço cresce em 2021; produção brasileira tem alta de 14,7%.** Valor Investe, São Paulo, 25 de janeiro de 2022. Disponível em: <<https://valorinveste.globo.com/mercados/internacional-e-commodities/noticia/2022/01/25/producao-mundial-de-aco-cresce-em-2021-producao-brasileira-tem-alta-de-147percent.ghtml>>. Acesso em 15 de fev. de 2023.

MALARD, Antônio Augusto Melo. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais.** Ouro Preto: Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental, 2009.

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução à Siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.



PEREIRA, Michael Juno. **Calcinação e sinterização de finos de minério de manganês silicocarbonatado de Morro da Mina**. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2013.

SANTOS, Jorge Filipe Sequeira. **Metodologia de tratamento de lamas e organização do balanço de massas**. Lisboa: Instituto Superior De Engenharia, 2012.

SOUTO-MAIOR, Cesar Duarte. **Pesquisa Operacional: Formulação de Problemas. 3. ed.** Santa Catarina: [s. n.], 2014. 94 p. Disponível em: [http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB\\_2014\\_2/Modulo\\_4/Pesquisa\\_Operacional/Pesquisa%20operacional%203ed.pdf](http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB_2014_2/Modulo_4/Pesquisa_Operacional/Pesquisa%20operacional%203ed.pdf). Acesso em: 13 jul. 2022.

VENTURA, Magda Maria. **O Estudo de Caso como Modalidade de Pesquisa**. Rio de Janeiro: Pedagogia Médica, 2007.