

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – *CAMPUS* ITABIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

PATRÍCIA FREDERICO

MIX ECONOMICAMENTE ÓTIMO DE MATÉRIAS-PRIMAS EM ALTOS-FORNOS
UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E O MODELO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR

ITABIRA

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – CAMPUS ITABIRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

PATRÍCIA FREDERICO

MIX ECONOMICAMENTE ÓTIMO DE MATÉRIAS-PRIMAS EM ALTOS-FORNOS
UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E O MODELO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

ÁREA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. EMERSON JOSÉ DE PAIVA

ITABIRA

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – *CAMPUS* ITABIRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

PATRÍCIA FREDERICO

MIX ECONOMICAMENTE ÓTIMO DE MATÉRIAS-PRIMAS EM ALTOS-FORNOS
UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E O MODELO DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. EDUARDO MIGUEL DA SILVA -
EXAMINADOR EXTERNO

PROF. DR. TARCÍSIO GONÇALVES DE
BRITO – EXAMINADOR INTERNO

PROF. DR. EMERSON JOSÉ DE PAIVA -
ORIENTADOR

ITABIRA

2022

RESUMO

Altos-fornos são equipamentos de produção contínua, destinados a fundir e reduzir o minério de ferro em presença de carvão vegetal ou coque e fundentes, para produção de ferro-gusa. Manter o fornecimento contínuo de matérias-primas é fator crítico e relevante nesse processo. Além disso, a seleção e a preparação dessas matérias-primas, são de grande importância para estratégia da produção de aço, visto que impactam diretamente na qualidade do produto produzido e no custo associado. Para otimizar a produção deste equipamento, mantendo seu abastecimento contínuo e preço competitivo, este trabalho tem por finalidade, investigar o processo de abastecimento dos altos-fornos, especialmente, o descarregamento de carvão vegetal, contemplando desde o seu recebimento, descarga e abastecimento dos silos, até a sua estocagem nas células, e identificar o mix ideal de matérias-primas que garantam qualidade ao produto final como menores custos de produção. O método de análise teve como base uma abordagem híbrida entre a modelagem e simulação de eventos discretos, utilizando o software Promodel, e a otimização, atrelado à programação linear, a partir de um modelo de Programação Linear.

O resultado obtido com a simulação, foi a melhor visualização do sistema de descarregamento, possibilitando assim a tomada de ações corretivas na configuração de entrada dos veículos transportadores de carvão vegetal, com intuito de otimizar o seu descarregamento e, conseqüentemente, garantir o fornecimento da matéria-prima de forma constante. Além disso, a modelagem matemática e a programação linear possibilitaram o estudo da melhor opção de mix de minério para configuração da carga, atrelando condições comerciais de custo e disponibilidade e restrições de composição química adequadas, os quais foram comprovados por meio de testes com cargas e configurações reais.

Palavras-chave: Alto-forno; Biorredutor; Simulação de Eventos Discretos; Programação Linear; Otimização.

ABSTRACT

Blast furnaces are continuous production equipment intended to melt and reduce iron ore in the presence of charcoal or coke and fluxes, for the production of pig iron. Maintaining the continuous supply of raw materials is a critical and relevant factor in this process. In addition, the selection and preparation of these raw materials are of great importance for the steel production strategy, as they directly impact the quality of the product produced and the associated cost. In order to optimize the production of this equipment, maintaining its continuous supply and competitive price, this work aims to investigate the supply process of the blast furnaces, especially the unloading of charcoal, contemplating from its reception, unloading and supply of the silos. , until its storage in the cells, and identify the ideal mix of raw materials that guarantee the quality of the final product with lower production costs. The analysis method was based on a hybrid approach between modeling and simulation of discrete events, using the Promodel software, and optimization, linked to linear programming, from a Linear Programming model.

The result obtained with the simulation was the best visualization of the unloading system, thus enabling corrective actions to be taken in the input configuration of vehicles transporting charcoal, in order to optimize their unloading and, consequently, guarantee the supply of material. press steadily. In addition, mathematical modeling and linear programming made it possible to study the best ore mix option for load configuration, linking commercial conditions of cost and availability and appropriate chemical composition restrictions, which were proven through tests with loads and real settings.

Keywords: Blast Furnace; Bioreducer; Discrete Event Simulation; Linear Programming; optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões de um alto-forno.....	18
Figura 2 - Força impulsora de um alto-forno	20
Figura 3 - Fluxograma geral de produção de ferro-gusa em altos-fornos	21
Figura 4 - Matérias-primas e produtos dos altos-fornos.....	23
Figura 5 - Processo de Tomada de Decisão.....	28
Figura 6 - Fases do estudo da Pesquisa Operacional.....	29
Figura 7 - Simbologia do Processo Esquemático IDEF-SIM.....	36
Figura 8 - Fluxograma do descarregamento de carvão vegetal	37
Figura 9 - Modelo Conceitual da descarga de carvão vegetal nos altos-fornos	38
Figura 10 - Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo	43
Figura 11 - Gráfico das distribuições de entradas – Toco	44
Figura 12 - Gráfico das distribuições de entradas – Carreta.....	44
Figura 13 - Simulação do descarregamento de carvão vegetal no software ProModel® Corporation (2011).	45
Figura 14 - Fluxograma do Modelo de Otimização	47
Figura 15 - Custo de Produção	48
Figura 16 - Carta de Amplitude Móvel (percentual de minérios consumidos)	50
Figura 17 - Modelo da Planilha Excel	53
Figura 18 - Rodada Solver 1	56
Figura 19 - Rodada Solver 2.....	57
Figura 20 - Rodada Solver 3.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Zonas Internas alto-forno	19
Quadro 2 - Materiais alto-forno.....	22
Quadro 3 - Entradas e Saídas do alto-forno.....	23
Quadro 4 - Características do Carvão Vegetal em altos-fornos	26
Quadro 5 - Modelo Matemático	30
Quadro 6 – Etapas do Processo de Simulação.....	34
Quadro 7 - Descrição das opções de destino do carvão vegetal.....	38
Quadro 8 - Origens dos caminhões de carvão vegetal.....	40
Quadro 9 - Peças-chave para formulação no software ProModel	42
Quadro 10 - Definições do Modelo Matemático	49
Quadro 11 - Dados dos minérios	54
Quadro 12 - Dados Reais AF1 e AF2.....	55
Quadro 13 - Consumo de minérios e custo real.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química típica de minérios de ferro.....	24
Tabela 2 - Discretização das Entidades	43
Tabela 3 - Relação entre a produção transportada pela Carreta e pelo Toco	46
Tabela 4 - Resultados obtidos ao final da simulação.....	46
Tabela 5 - Estatísticas Descritivas – Relação resultados obtidos no Solver e Real.....	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AF	Alto-forno
AF'S	Altos-fornos
AF I	Alto-forno I
AF II	Alto-forno II
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
BPM	<i>Business Process Modeling</i>
HBI	<i>Hot Briquetted Iron</i>
IDEF-SIM	<i>Integrated Definition Methods – Simulation</i>
MMP	Matérias-primas
PO	Pesquisa Operacional
SED	Simulação de Eventos Discretos
TPV	Tempo de Permanência de Veículos

LISTA DE SIMBOLOS

%Fe_mix	Porcentagem de ferro no mix de minérios
%minx	Percentual de disponibilidade de Minério
%Mn_mix	Percentual de manganês no mix de minérios
%P_mix	Percentual de fósforo no mix de minérios
%SiO ₂ _mix	Percentual de ferro no mix de minérios
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
C	Carbono
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CH ₄	Metano
CM_minXB	Consumo de Minério x Produção
CMB	Consumo de Minério Bruto
CML	Consumo de Minério Líquido
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico
FeO	Óxido de Ferro
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
I _N	Vetor do limite
K ₂ O	Óxido de potássio
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
MnO ₂	Dióxido de manganês
N ₂	Nitrogênio
Na ₂ O	Óxido de sódio
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
S	Enxofre
SiO ₂	Dióxido de silício
<i>u_N</i>	Vetor do limite
X ₁	Custo do Redutor
X ₂	Custo Operacional
X ₃	Custo Fundantes
X ₄	Custo Retorno

X_5
 x^B
 x^k
 x^N

Custo Mix de minérios
Vetor das variáveis básicas
Ponto viável
Vetor das variáveis não básicas

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE QUADROS	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	9
LISTA DE SIMBOLOS.....	10
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (colocar um fluxograma do seu trabalho com as etapas que você desenvolveu)	18
3.1 Alto-forno.....	18
3.1.1 Estrutura do alto-forno e zonas de reação	18
3.1.2 Princípio de Funcionamento.....	19
3.1.3 Matérias-primas.....	21
3.1.3.1 Minério de ferro	24
3.1.3.2 Carvão Vegetal.....	26
3.1.3.1 Fundentes	26
3.2 Processo de Otimização	27
3.3 Modelagem Matemática.....	28
3.4 Gradiente Reduzido Generalizado	31
3.6 Simulação de Eventos Discretos	33
3.6 Modelagem Conceitual	35
4. DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO.....	37
4.1 Planejamento do Projeto e Conceitualização do Modelo.....	37
4.2 Verificação e Validação do Modelo Computacional	39
4.3 Coleta de Dados	39
4.4 Simulação Computacional.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Capacidade do Abastecimento e comportamento do sistema simulado.....	45
6. DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR	46
5.1 Definição do Problema.....	47
5.2 Construção do Modelo Matemático	47

7. CONCLUSÃO	59
8. REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

A produção de aço é uma atividade de grande potencial para geração de crescimento econômico e social de uma região ou país, seja pela necessidade de mão-de-obra qualificada, elevada utilização de matérias-primas e insumos, ou pela concepção de várias indústrias de fornecimento de equipamentos, componentes e serviços (RIZZO, 2005).

O processo de produção de aço nas indústrias siderúrgicas mundiais, é predominantemente composto por duas rotas tecnológicas: usinas integradas e semi-integradas. Nas usinas integradas, as áreas de transformação do minério de ferro e do aço, encontram-se em uma única unidade industrial, sendo seu processo produtivo composto de três etapas: redução (fabricação do ferro-gusa), refino (produção e resfriamento do aço) e transformação mecânica (produtos siderúrgicos destinados à comercialização). Em contrapartida, as usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, onde as aciarias são alimentadas principalmente por sucata ferrosa e, em menor quantidade, ferro-gusa e pré-reduzidos (ferro diretamente reduzido – *hot briquetted iron*, HBI).

A produção mundial de aço bruto somou $1.877,3 \times 10^6$ t no ano de 2020, tendo a China participação de 56% e o Brasil 9º lugar com 1,7% Instituto Aço Brasil (2021). O que nos traz um cenário desafiador, a produção de aço de qualidade, com valor competitivo.

O presente estudo, tem por finalidade, estudar a etapa de redução das usinas integradas, mais precisamente o alto-forno, reator metalúrgico, empregado na produção de ferro-gusa.

A necessidade de produção de ferro-gusa de qualidade, com baixos custos, maior eficiência energética tem impulsionado estudos acerca do comportamento desses reatores. A estratégia para alcançar um processo mais eficiente, econômico e competitivo, tem sido um diferencial de sucesso nas indústrias de transformação.

Dentre esses estudos podemos destacar:

- Destro et al. (2009), ressalta como a indústria siderúrgica tem problemas de otimização nos seus processos produtivos, destacando o transporte de produtos, corte e embalagem, as alocações de recursos, o problema de misturas de matérias-primas, entre outros. Sendo a etapa de aquisição de matérias-primas, uma etapa fundamental em termos de estratégia do negócio.
- Wu S., Han, H. e Lix X. (2009), apresentam um modelo de otimização de cargas construído de acordo com a teoria da programação linear com aplicação no processo de produção do ferro-gusa. Onde destaca a necessidade de garantir a qualidade do produto, a partir de matérias-primas com propriedades químicas e

metalúrgicas que estão em conformidade com as exigências tecnológicas do processo.

- Yang et al. (2017) apresentam um modelo para o controle de processo da distribuição de carga em alto-forno, objetivando otimização dinâmica da produção e mantendo a estabilidade operacional do alto-forno.
- Montiano, Díaz-Faes, Barriocanal e Alvarez (2014), conduziram um estudo para determinar a influência da matéria-prima (biomassa) na qualidade do coque metalúrgico. Saxén, Gao e Gao (2013), apresentaram uma revisão dos modelos linear e não-linear para previsão dos níveis de silício no produto final.

Os resultados de produtividade desses equipamentos são muito influenciados pela data de construção, pelos investimentos destinados à modernização, pelo mix de matérias-primas, pela prática operacional adotada e pelas exigências em relação à qualidade do ferro-gusa para produção de aço na aciaria (RIZZO, 2009).

A produção de um ferro-gusa e, conseqüentemente, um aço de alta qualidade, depende fundamentalmente da escolha e da preparação adequada das matérias-primas necessárias ao processo, visto que uma parcela significativa dos custos de uma usina siderúrgica está ligada à aquisição e forma de consumo dessas matérias-primas.

O minério de ferro (granulado e/ou sinter e/ou pelota), coque ou carvão vegetal (combustíveis/redutores) e fundentes, são as três matérias-primas que compõe a carga sólida do alto-forno. A carga para abastecimento do reator é peneirada, pesada e armazenada em silos, dispostos e dimensionados de acordo com o planejado para cada componente. Utiliza-se um sistema de carregamento em lotes, bem definidos, normalmente separados em carvão e minérios, os quais são transportados para o topo do forno através de correias transportadoras ou sistemas de carrinho (*skips*). A carga sólida é carregada de maneira periódica, sendo realizada a drenagem contínua (ferro-gusa e escória) pela parte inferior, com a constante injeção de ar quente e hidrocarbonetos pelas ventaneiras (RIZZO, 2009).

Diante da variabilidade dos diversos minérios de ferro disponíveis no mercado e das inúmeras condições que influem no carvão vegetal utilizado nesses reatores, torna-se desafiadora e complexa a utilização das técnicas usuais de preparação de carga, o que impulsiona estudos acerca da utilização de meios que auxiliem na mistura ótima de consumo.

Nesse contexto, a Pesquisa Operacional (PO) e a Simulação computacional, conforme descrevem Saxén, Gao e Gao (2013), têm sido adotadas nas indústrias siderúrgicas, como ferramentas de auxílio na tomada de decisão, a fim de que sejam minimizadas as incertezas,

riscos e complexidades inerentes ao processo, escolhendo dentre as alternativas disponíveis, a mais assertiva.

Assim, com intuito de aumentar a produtividade dos altos-fornos, foi proposto um estudo da configuração para escolha do mix de minérios e a forma de descarregamento e abastecimento do carvão vegetal utilizado no processo de redução. Uma abordagem híbrida das metodologias da Pesquisa Operacional, especificamente, a Programação Linear, e a Simulação de Eventos Discretos, utilizando-se o software ProModel® Corporation (2011), foi utilizada para se obter os resultados esperados.

Tal abordagem foi adotada para se garantir o cumprimento dos objetivos, a qual foi verificada a partir de um estudo de caso realizado em uma usina siderúrgica situada na região metropolitana de Belo Horizonte.

A relevância do estudo é assegurada pela importância que os valores ótimos, referentes ao mix ideal de matérias-primas para produção de ferro-gusa em altos-fornos, exercem sobre a produção de aço de alta qualidade, dependentes fundamentalmente dessa condição de otimalidade.

Para relatar as etapas de condução do presente estudo de caso, este trabalho apresentará, em nível de detalhamento adequado, as seguintes sessões:

1. Introdução – o presente capítulo visa contextualizar o cenário de estudo, situando o objeto de pesquisa, a otimização dos parâmetros ideais de matérias-primas, neste contexto, apresentando, também, o objetivo geral e específicos para esse propósito.
2. Um referencial teórico apresentará todas as técnicas e/ou metodologias existentes, necessárias e aplicáveis, referentes à operacionalização da produção do aço nas indústrias siderúrgicas, e à otimização dos parâmetros de processo, pela aplicação de modelos matemáticos e análises estatísticas.
3. O caso, objeto de estudo, será caracterizado e uma metodologia para a condução do estudo será apresentada no capítulo seguinte.
4. No capítulo 4, serão abordadas as técnicas consideradas aplicáveis ao tratamento e análise estatística dos dados coletados e um procedimento de otimização dos parâmetros de entrada será proposto e devidamente conduzido.
5. Por fim, no capítulo 5, os resultados obtidos serão apresentados e discutidos, à luz dos objetivos – geral e específicos – propostos para o estudo, culminando nas conclusões observadas e sugeridas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudo da carga sólida utilizada na fabricação de ferro-gusa nos altos-fornos, a partir da aplicação de técnicas de pesquisa operacional, modelagem e simulação computacional para otimização da fabricação de ferro gusa, relacionando o mix de minérios de ferro disponíveis e o sistema de descarregamento de carvão vegetal.

2.2 Objetivos Específicos

Para que os resultados esperados sejam alcançados o objetivo geral foi desdobrado e detalhado nos objetivos específicos a seguir:

- a) Otimizar o abastecimento de carvão vegetal nos altos-fornos, a partir de um modelo simulação de eventos discretos, utilizando o software ProModel® Corporation (2011).
- b) Criar um modelo de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), que apoie na decisão de escolha do mix de minério ideal, aumentando a produtividade e minimizando os custos do ferro-gusa.

2.3 Limitações

Como limitações para o trabalho, podemos citar:

- a) Modelo de dados para determinada empresa;
- b) Adaptação da produção contínua para o modelo discreto, devido ao software de simulação ProModel;
- c) Apenas o carvão vegetal foi alvo de estudo de descarregamento;
- d) O modelo de otimização foi gerado no Solver, pela disponibilidade do software tanto na academia, quanto na empresa, sendo o algoritmo utilizado GRG escolhido, pela mesma facilidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Face ao objetivo estabelecido, de se obter melhor condição de descarregamento de matérias-primas, garantindo a continuidade da produção, e a redução dos custos, pelo estabelecimento de um mix ótimo dessas matérias-primas, apresenta-se, a seguir, a teoria necessária à compreensão e implementação da abordagem proposta.

Destaca-se uma breve explanação dos princípios de funcionamento dos altos-fornos, a apresentação da Pesquisa Operacional, a partir de modelos desenvolvidos em Programação Linear e a teoria acerca da modelagem e simulação de sistemas a partir da utilização de softwares de Simulação de Eventos Discretos.

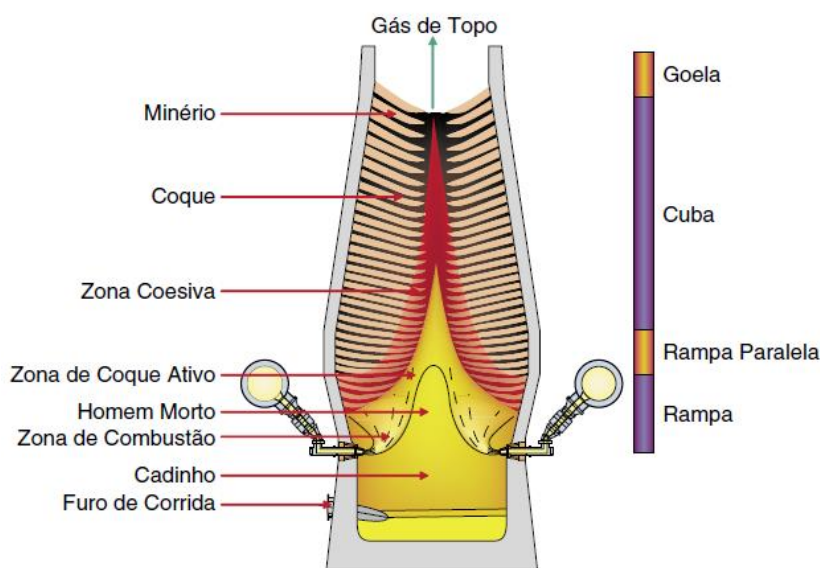
3.1 Alto-forno

3.1.1 Estrutura do alto-forno e zonas de reação

O alto-forno é um reator metalúrgico, empregado na produção de ferro-gusa. De maneira geral é constituído por equipamentos de descarga e pesagem de matérias-primas, equipamentos de carga no topo do forno, o forno propriamente dito, equipamentos para operação de alta pressão e regeneradores de calor (RIZZO, 2009).

Este reator, tem forma cônica típica e possui cinco regiões: goela, cuba, rampa paralela ou ventre, rampa e o cadinho, conforme a Figura 1, as quais guardam uma relação de dimensões como altura, ângulos, diâmetros, de acordo com o projeto de construção (RIZZO, 2009).

Figura 1 - Regiões de um alto-forno



Fonte: (GEERDES; VLIET; TOXOPEUS, 2004).

Com base em estudos de dissecação de altos-fornos, realizados na década de 1970 no Japão, onde altos-fornos foram congelados, além de sondagens com fornos em operação, cinco

Zonas internas foram definidas, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Zonas Internas alto-forno

Zonas	Descrição
Granular	Minério e coque ou carvão vegetal ficam sobrepostos em camadas alternadas.
Coesiva	Formada por camadas de coque ou carvão vegetal e camadas coesivas (massas semifundidas de partículas de minério de ferro).
Gotejamento	Contém e na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o ferro-gusa e a escória.
Combustão	Região parcialmente vazia em frente às ventaneiras, devido a elevada energia cinética do sopro do ar quente. À medida que as partículas do combustível circulam, vão sendo queimadas e gerando o gás redutor e energia.
Cadinho	Local onde se depositam o material líquido (ferro-gusa e a escória) que se separam em duas camadas por diferença de densidade.

Fonte: (MOURÃO et al., 2007).

3.1.2 Princípio de Funcionamento

O processo de produção de ferro-gusa nos altos-fornos, consiste em carregar pelo topo, na goela, as matérias-primas (carga sólida) como minério de ferro, combustível redutor e fundentes, enquanto o ar, enriquecido com oxigênio ou não ou carvão pulverizado, é inserido pelas ventaneiras na parte inferior do forno (RIZZO, 2005).

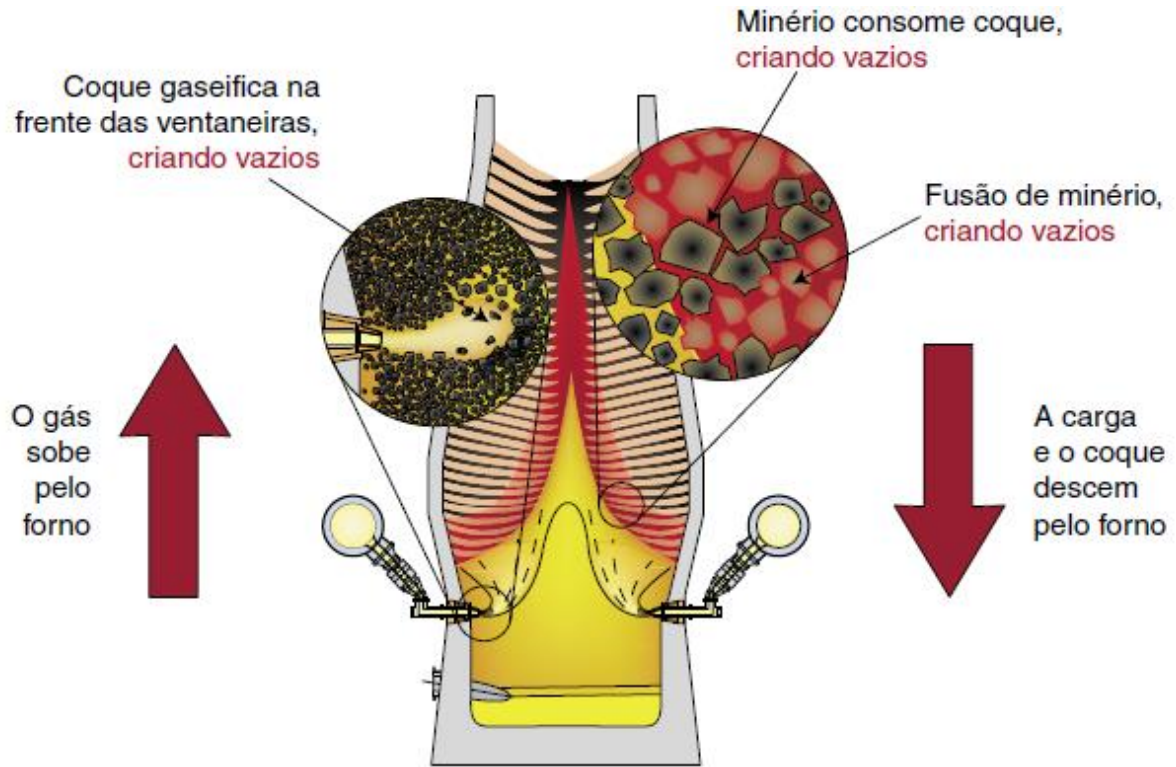
A carga sólida carregada, durante a redução transforma-se em ferro-gusa, escória, gás do alto-forno e poeira. A redução dos óxidos de ferro se processa à medida que o minério, agente redutor (coque ou carvão vegetal) e os fundentes (calcário, quartzo e dolomita), descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar quente injetado em alta velocidade, soprado pelas ventaneiras. Estas se localizam perto da base da coluna de carga (ARAUJO, 2005).

Durante este processo, a carga desce no interior do forno, enquanto os gases resultantes da combustão do carvão vegetal (ou coque) na altura das ventaneiras, ao acenderem através da coluna de carga, reduzem o minério e pré-aquecem os materiais. Durante o aquecimento, a composição dos integrantes da mistura vai se alterando (secagem e calcinação) até realizarem-se as reações de redução, quando o oxigênio combinado com o ferro do minério passa, sob a forma de óxidos de carbono, a fazer parte dos gases. O processo de redução é acompanhado de outras reações químicas, como a formação dos carbonetos e fusão da ganga e dos fundentes para constituírem a escória (ARAUJO, 2005).

O alto-forno pode ser considerado um trocador de calor de contracorrente e massa: o calor é transferido do gás para carga e o oxigênio da carga para o gás. A característica de

contracorrente do processo o faz extremamente eficiente, conforme podemos observar na Figura 2, onde observa-se a força impulsionadora de um alto-forno.

Figura 2 - Força impulsionadora de um alto-forno

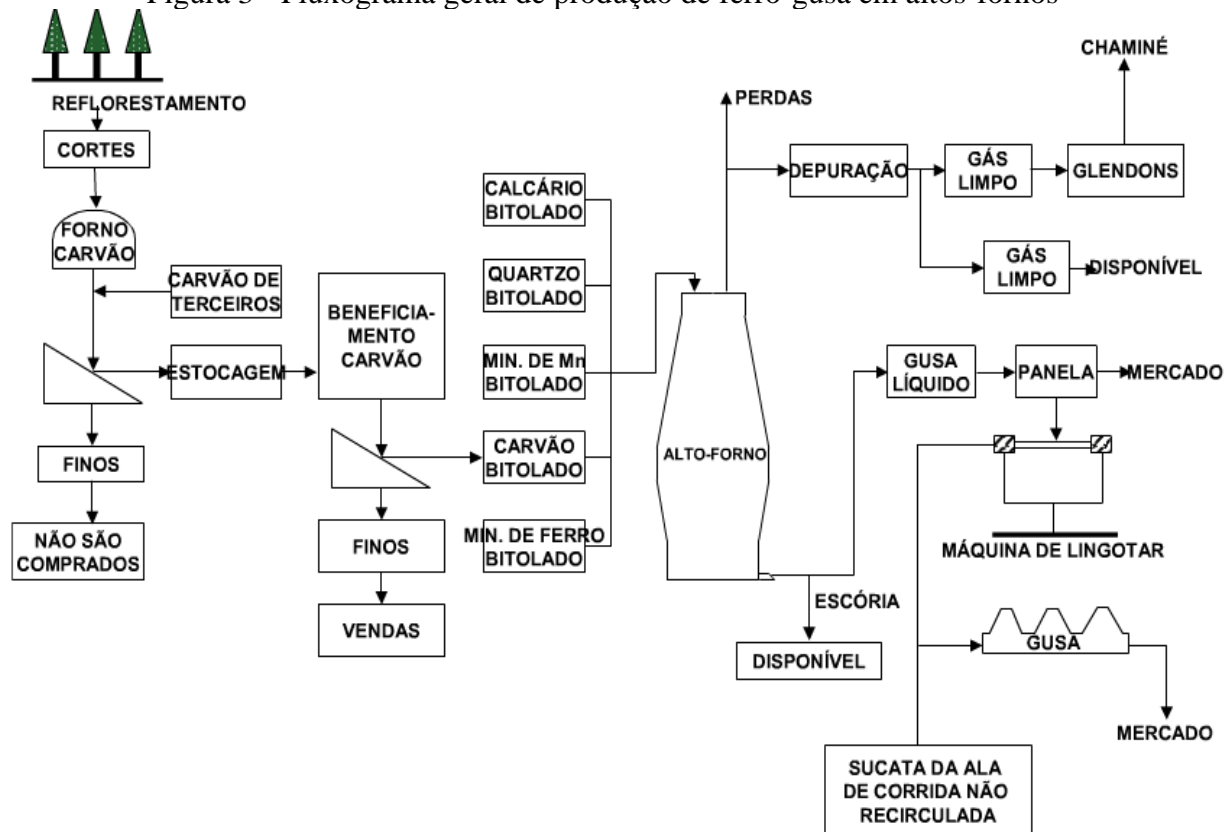


Fonte: (GEERDES; VLIET; TOXOPEUS, 2004).

A alta produção com baixo consumo de combustível, conhecido como “boa marcha do forno” só é possível quando os gases ascendentes são aproveitados ao máximo, ou seja, quando o teor de CO_2 é o mais alto e a temperatura a mais baixa possível. Para isto, é importante que a permeabilidade da carga em toda a seção do forno seja uniforme, o que só é viável quando a carga tem uma boa granulometria. É necessário que a carga do alto-forno apresente uma boa uniformidade e minério de elevado teor de ferro (Fe) para se obter baixo consumo de coque ou carvão vegetal (RIZZO, 2009).

Considerando a operação do alto-forno constituída das fases de carregamento, sopro de ar, vazamento e tratamento dos gases de topo, verifica-se que todos os equipamentos associados a estas fases necessitam de informações do processo para seu dimensionamento. A Figura 3 mostra o fluxo do processo de produção de ferro-gusa em altos-fornos à carvão vegetal.

Figura 3 - Fluxograma geral de produção de ferro-gusa em altos-fornos



Fonte: (ARAUJO, 2005).

3.1.3 Matérias-primas

A preparação das matérias-primas na produção do aço tem papel de grande importância. Segundo Araujo (2005), o escopo desta etapa de preparação de materiais é aumentar a permeabilidade da carga metálica e o contato entre os sólidos e o gás redutor, além do aumento da velocidade de redução. Para siderurgia brasileira, a aquisição da matéria-prima é uma etapa fundamental na estratégia do negócio, principalmente no que diz respeito ao combustível redutor, o qual impacta substancialmente no custo final do ferro-gusa.

O objetivo principal do forno é transformar óxido de férrico (Fe_2O_3) em ferro metálico (Fe), isto é, retirar o oxigênio (O_2) que está ligado ao ferro. Para que esse processo seja eficiente, necessária energia (calor) que é gerada a partir da reação do carbono (C) com o oxigênio (O_2). Esses materiais são encontrados nos minérios, sinter, redutor e ar, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Materiais alto-forno

Materiais		Comentários
Fe ₂ O ₃ (óxido férrico)	Minério de ferro, sinter e na pelota	Contém também dióxido de silício (SiO ₂), óxido de alumínio (Al ₂ O ₃), óxido de manganês (MnO ₂), pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e água (H ₂ O)
C (carbono)	Carvão vegetal ou coque que, além do carbono, têm materiais voláteis, cinza e água (H ₂ O)	Os materiais voláteis do carvão vegetal ou do coque são formados pelos gases: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO ₂), hidrogênio (H ₂) e metano (CH ₄). A cinza do carvão vegetal ou do coque é formada pelos compostos: óxido férrico (Fe ₂ O ₃), dióxido de silício (SiO ₂), (óxido de alumínio) Al ₂ O ₃ , óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅), óxido de potássio (K ₂ O), óxido de sódio (Na ₂ O) e S (enxofre).
O ₂ (oxigênio)	Ar , que é composto de oxigênio (O ₂), nitrogênio (N ₂) e água (H ₂ O)	

Fonte: (GERDAU, 2018).

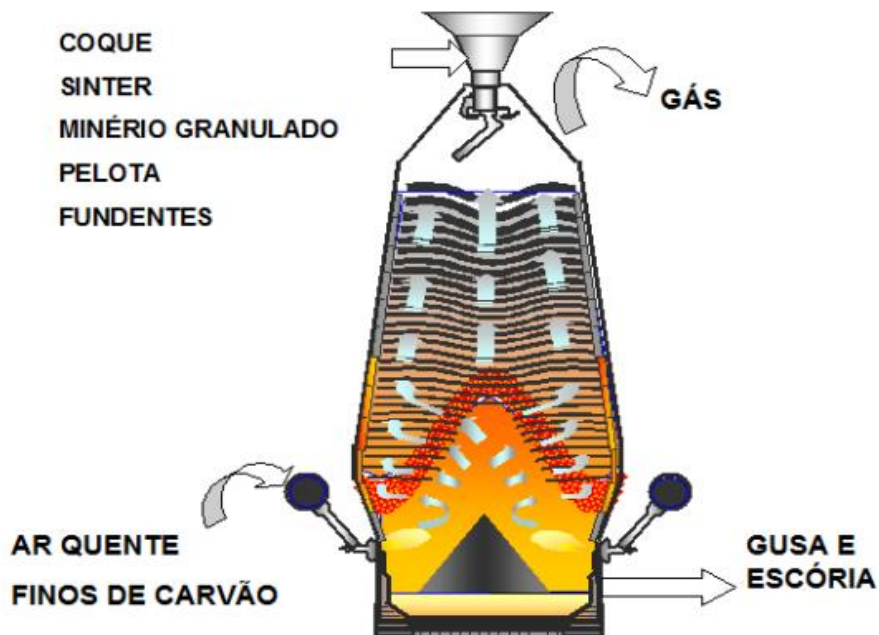
Os óxidos que são carregados no alto-forno e que não são reduzidos saem na escória, que deve estar líquida e fluida para auxiliar na sua retirada do reator. Para que a escória tenha uma composição química adequada, que a torne líquida e fluida, outros materiais são utilizados como: quartzo, calcário, dolomita e bauxita. Eles são chamados de **fundentes** (GERDAU, 2018).

Toda a carga entra no alto-forno na temperatura ambiente e o ar é soprado em altas temperaturas.

A produção de um ferro gusa e de um aço de alta qualidade depende fundamentalmente da escolha e da preparação adequadas das matérias-primas necessárias.

As principais matérias-primas utilizadas no alto-forno em estudo são: minério de ferro, redutores (carvão vegetal e/ou coque) e fundentes (quartzo, calcário e dolomita), conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Matérias-primas e produtos dos altos-fornos



Fonte: (ARAUJO, 2005).

Dessa forma, podemos observar em resumo no Quadro 3, as entrada e saídas de componentes desse reator metalúrgico.

Quadro 3 - Entradas e Saídas do alto-forno

ENTRADAS		SAÍDAS	
Fórmula	Composto Químico	Fórmula	Composto Químico
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico	Fe FeO	Ferro Óxido de Ferro
C	Carbono	C	Carbono
SiO ₂	Dióxido de silício	SiO ₂ Si	Dióxido de silício Silício
MnO ₂	Dióxido de manganês	MnO Mn	Óxido de manganês Manganês
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo	P	Fósforo
S	Enxofre	S	Enxofre
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CaO CaCO ₃	Óxido de cálcio Carbonato de cálcio	CaO	Óxido de cálcio
MgO MgCO ₃	Óxido de magnésio Carbonato de magnésio	MgO	Óxido de magnésio
K ₂ O	Óxido de potássio	K ₂ O	Óxido de potássio
Na ₂ O	Óxido de sódio	Na ₂ O	Óxido de sódio
O ₂	Oxigênio	CO CO ₂	Monóxido de carbono Dióxido de carbono
N ₂	Nitrogênio	N ₂	Nitrogênio
H ₂ O	Água	H ₂ O	Água
H ₂	Hidrogênio	H ₂	Hidrogênio
CH ₄	Metano	CH ₄	Metano

Fonte: Autoria Própria.

A partir da observação das entradas e saídas dos altos-fornos, podemos observar um conceito importante da metalurgia: o balanço de massa. Ele se baseia no Princípio de Lavoisier, o qual define que a matéria não pode ser criada ou destruída em um dado sistema, apenas transformada. Assim, em um dado sistema, pode-se afirmar que o valor de massa inserida é igual ao valor de massa retirada (AGUIAR; CASTRO, 2016), ou seja, há equivalência das massas. Constituindo principais balanços, o do Fe, no qual deve-se calcular a massa do minério de entrada para se obter a quantidade final de Fe no gusa, e do CaO, no qual a quantidade que entra no calcário, deve sair na escória.

Assim como o balanço de massa, para o processo apresenta-se, também, o balanço térmico, no qual o calor de aquecimento do ar deve ser igual ao calor de aquecimento dos gases do topo, somados ao calor de aquecimento do gusa e escória.

3.1.3.1 Minério de ferro

As características dos minérios de ferro utilizados nos altos-fornos têm um efeito significativo no processo. Suas principais características, de acordo com Rizzo (2009), são:

a) Análise química:

Os minérios de ferro contêm além do ferro (na forma de Fe_2O_3), outros óxidos, tais como SiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2 , P_2O_5 etc. De um modo geral, a análise dos minérios de ferro usados em altos-fornos está dentro das faixas listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise química típica de minérios de ferro

Componente	Teor (%)
Fe - Ferro	60 - 80
Fe_2O_3 - Óxido Férrico	86 - 97
SiO_2 - Dióxido de silício	0,5 - 10
Al_2O_3 - Óxido de alumínio	0,3 - 2
Mn (na forma de MnO_2 – Dióxido de manganês)	0,1 - 0,3
P (na forma de P_2O_5 – Pentóxido de fósforo)	0,02 - 0,08

Fonte: Adaptado (RIZZO, 2009).

Normalmente o aumento dos teores de SiO_2 e Al_2O_3 no minério, causa uma elevação na quantidade de escória formada. Esse aumento no volume de escória, compromete a produtividade do alto-forno, aumentando o consumo de energia (maior consumo de combustível – coque ou carvão vegetal).

O teor de fósforo tem efeito sobre a qualidade do ferro-gusa. O fósforo contido no minério é incorporado ao ferro-gusa, ou seja, quanto mais fósforo presente no minério, maior é a quantidade de fósforo presente no ferro-gusa.

Alguns minérios possuem um certo teor de álcalis, K_2O e Na_2O . Esses materiais tendem a circular no forno, sendo difícil sua eliminação. Normalmente estão associados à formação de cascos (reduzindo a seção transversal útil dos fornos e, conseqüentemente, sua produtividade) Rizzo (2009).

b) Redutibilidade

No alto-forno o Fe_2O_3 contido no minério de ferro é reduzido pelo gás que é gerado no interior deste reator. Um dos fatores que mais afeta a redutibilidade é a porosidade: quanto mais poroso o minério, maior é sua redutibilidade.

c) Distribuição granulométrica

Para se obter elevada produtividade dos altos-fornos é essencial a passagem de gás entre as partículas dos sólidos seja facilitada. Dessa forma, consegue-se facilitar esse escoamento do gás usando-se um minério de ferro com a faixa granulométrica a mais estreita possível e completamente isento de materiais com granulometrias mais finas (finos), pois estes, podem se alojar nos vazios entre as partículas maiores, obstruindo a passagem de gás. Esta limitação é que impede o uso de minérios com granulometrias abaixo de 6 mm em altos-fornos (ARAÚJO, 2005).

d) Resistência mecânica

Os minérios utilizados em altos-fornos são submetidos a esforços de queda (carregamento), abrasão (atrito) e compressão (durante o movimento descendente no interior do forno). Dessa forma, é essencial que os minérios de ferro suportem estes esforços sem sofrer uma degradação significativa. Caso contrário ocorreria a geração de finos que comprometem o escoamento gasoso no forno (FIGUEREDO e TAVARES, 1984).

e) Crepitação

Tendência dos minérios de sofrer degradação e gerar finos, quando submetidos a aquecimento rápido. Dessa forma, deve-se priorizar minérios de ferro que apresentem baixos índices de crepitação.

3.1.3.2 Carvão Vegetal

Na produção do ferro-gusa líquido em altos-fornos, o carbono exerce papel de combustível, gerando energia para atender o processo, de redutor, gerando monóxido de carbono, CO, que é o principal responsável pela redução do Fe_2O_3 a Fe metálico e fonte de carbono ao ferro-gusa (RIZZO, 2005, 2009).

O consumo de combustível é medido em quilogramas combustível consumido na produção de uma tonelada de ferro-gusa. Em função do elevado custo destes combustíveis, é necessário empenho, para obter na operação do alto-forno um consumo mínimo. Como os custos do carvão pulverizado e os finos de carvão vegetal são menores, é importante atingir altas taxas de injeção desses materiais (MOURÃO et al., 2007).

As principais características que devem ser observadas em um carvão vegetal, quando se destina à altos-fornos, podem ser observadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Características do Carvão Vegetal em altos-fornos

Característica	Descrição
Análise química	- Carbono fixo 60 a 75% - Material volátil 20 a 35% - Cinzas 2 a 5% - Umidade 5 a 30%
Distribuição granulométrica	Deve possuir faixa granulométrica mais estreita possível, 6 mm para fornos menores e 12 mm para fornos maiores.
Densidade	Usual de variação é de 200 a 300 kg/m ³
Resistência Mecânica	Deve ser o mais alta possível, para evitar a presença de finos.
Reatividade a CO ₂	Tem grande influência sobre os níveis de temperatura no interior do alto-forno, na velocidade das reações de redução dos óxidos de ferro e conseqüentemente no consumo de carbono.

Fonte: Adaptado de (MOURÃO et al., 2007; RIZZO, 2009).

3.1.3.1 Fundentes

Fundentes são matérias-primas minerais utilizadas para reduzir o ponto de fusão da ganga escorificando as impurezas introduzidas pelos minérios, e permitindo posterior retirada do ferro-gusa (RIZZO, 2005).

São matérias-primas para conferir às escórias, uma proporção adequada de seus quatro óxidos principais ($\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$), variando sua proporção de acordo com a fluidez da escória e suas propriedades dessulfurantes (remoção de S) e de eliminação de outras

impurezas, tais como, álcalis (K_2O , Na_2O) e óxido de zinco (ZnO), carregados no alto-forno (MOURÃO et al., 2007).

Os principais fundentes são: quartzo como fonte de SiO_2 , o calcário como fonte de CaO , o dunito ou serpentino como fonte de MgO e SiO_2 , e a dolomita como fonte de CaO e MgO .

3.2 Processo de Otimização

No contexto desta pesquisa, o que se propõe é encontrar um conjunto de condições ótimas para produção do ferro-gusa, capaz de manter a qualidade do produto final, sem comprometer o nível de recursos necessários, reduzindo-se os custos de produção e o volume dispendido de matéria-prima.

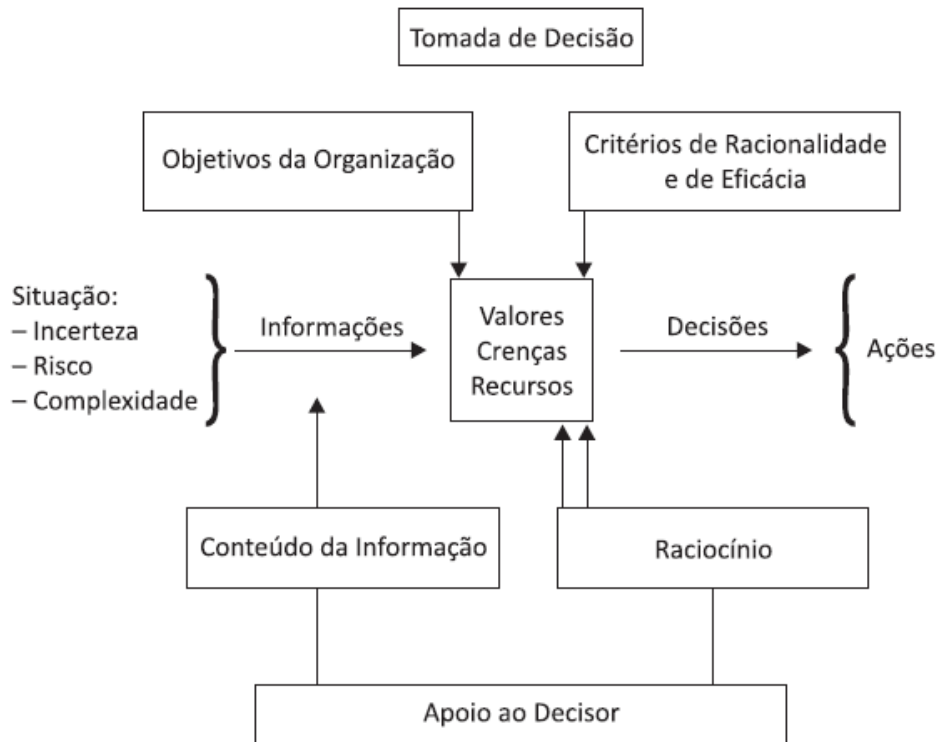
O processo de otimização da fabricação do ferro-gusa requer que um modelo matemático representativo do sistema seja desenvolvido e, em seguida, resolvido, adotando-se, para tanto, algumas (uma ou mais) das diferentes técnicas de tomada de decisão disponibilizadas pela pesquisa operacional.

A pesquisa operacional, ou PO, consiste na utilização de um método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para auxílio na tomada de decisões (FÁVERO; BELFIORE, 2013).

O componente científico está relacionado aos métodos matemáticos empregados, e aos processos para articular e modelar problemas de decisão, determinando os objetivos que se pretende atingir e as restrições sob as quais o sistema deve operar. O tecnológico, associado às ferramentas de software e *hardware*, utilizados para coletar, comunicar e organizar os dados, com intuito de otimizar modelos e reportar resultados (ARENALES et al., 2015).

A tomada de decisão, pode ser descrita como o processo de identificar um problema ou oportunidade e selecionar uma linha de ação para resolvê-lo. Está diretamente relacionada com os objetivos da organização, considerando incertezas, complexidades, riscos e recursos disponíveis para desenvolver estratégias capazes de obter os resultados desejados, conforme explana a Figura 5.

Figura 5 - Processo de Tomada de Decisão



Fonte: (LACHTERMACHER, 2018).

Ainda em apoio à tomada de decisão, dentre as ferramentas disponibilizadas pela PO, nesse caso relacionado ao mix ótimo de minérios e o descarregamento de carvão vegetal na fabricação do ferro-gusa, destacam-se a Programação Linear e a Simulação de Eventos Discretos (SED), as quais permitem, a partir da análise das condições ótimas estabelecidas pela resolução do modelo matemático, avaliar quais os impactos da decisão implementada, sem, no entanto, comprometer o sistema real (CHWIF; MEDINA, 2015).

Nas seções seguintes, esses elementos da PO, “modelagem matemática”, “algoritmos de solução” e “simulação de eventos discretos”, necessários à condução desta pesquisa, serão abordados, de forma a se obter a compreensão necessária das técnicas adotadas neste trabalho.

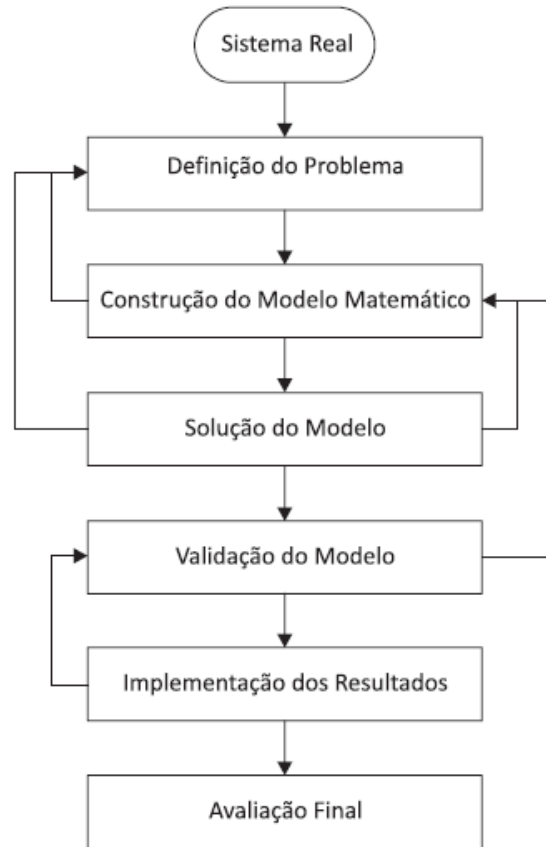
3.3 Modelagem Matemática

A pesquisa operacional, em especial a programação matemática, auxiliam diretamente no processo decisório de uma organização, e faz uso de modelos matemáticos que representam o problema real, a fim de extrair as restrições inerentes aos processos.

O processo de tomada de decisão a partir da utilização da modelagem, forçam os gestores a tornarem explícitos seus objetivos, reconhecerem as limitações e identificarem variáveis a serem incluídas e em que termos são quantificáveis (LACHTERMACHER, 2018).

Uma forma de sintetizar as fases usuais de um estudo de PO, pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Fases do estudo da Pesquisa Operacional



Fonte: (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Para que se garantam que as decisões tomadas sejam corretamente implementadas e surtam os resultados almejados, as fases definidas pelo diagrama da Figura 6 devem ser executadas completamente, as quais assim se descrevem:

a) Definição do Problema

Definição clara dos objetivos a serem alcançados, prováveis caminhos para solução do modelo, limitações técnicas do sistema, além das relações desse sistema com outros da empresa ou do ambiente externo (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Complementando, Taha (2008), define essa etapa como o delineamento do escopo do problema sob análise, e estabelece três elementos principais para identificá-los:

1. Descrição das alternativas de decisão;
2. Determinação do objetivo de estudo;
3. Especificações das limitações sob as quais o sistema modelado funciona.

b) Construção do Modelo Matemático

O termo modelo matemático é usado como objeto abstrato, o qual procura reproduzir as principais características de um objeto real com o intuito de representá-lo (ARENALES et al., 2015).

O modelo matemático tem por finalidade a otimização e eficiência do sistema, proporcionando alternativas para identificação de suas limitações, aumento da produtividade ou a estrutura ideal de um projeto futuro. Sua composição pode ser descrita em quatro elementos principais, conforme o Quadro 5.

Quadro 5 - Modelo Matemático

Elementos	Descrição
Variáveis de Decisão	Incógnitas, ou valores desconhecidos, que serão determinados pela solução do modelo (contínuas, discretas ou binárias).
Parâmetros	Valores fixos previamente conhecidos do problema.
Função Objetivo	É uma função matemática que determina o valor-alvo que se pretende alcançar ou a qualidade da solução, em função das variáveis de decisão e dos parâmetros, podendo ser uma função de maximização ou de minimização.
Restrições	Conjunto de equações e inequações em que as variáveis de decisão do modelo devem satisfazer.

Fonte: Adaptado de (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

c) Solução do Modelo

A partir da utilização de um algoritmo de solução qualquer, o problema recém-modelado deve ser resolvido, para que seus resultados possam ser avaliados. Conforme será observado adiante, diversos algoritmos estão disponíveis na literatura. Para esse estudo e conforme descrito nas limitações do trabalho, o pesquisador se restringiu ao algoritmo GRG pela sua disponibilidade e o modelo de solução gerado corresponde ao modelo sugerido para tal algoritmo

d) Validação e Verificação do Modelo

Um modelo é considerado válido se conseguir representar ou prever, com precisão satisfatória, o comportamento do sistema estudado. Quanto à validação, diversas técnicas se encontram disponíveis, as quais permitem verificar o quão confiável é o modelo. (HILLIER; LIEBERMAN, 2013) descrevem algumas técnicas, dentre elas, a avaliação por especialistas, em busca de “erros óbvios” ou descuidos, ou o teste retrospectivo, no qual se utilizam dados

históricos para remontar fatos passados e aplicá-los ao modelo para avaliar seu comportamento, visto que já se conhecem os resultados.

e) Implementação dos Resultados

Implementação dos resultados obtidos e acompanhamento de equipe responsável, de forma a detectar e corrigir possíveis mudanças nos valores das novas soluções. Nessa etapa, é fundamental que o sistema esteja bem documentado, incluindo o modelo, os procedimentos para solução, e os procedimentos operacionais para aplicação do modelo conforme solicitado, e que essa operação possa ser replicada a qualquer momento, independentemente de quem será o analista à época (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

f) Avaliação Final

Verificar se o objetivo final foi alcançado. Também se faz importante que toda a documentação seja revisada, a fim de compor um guia robusto de aplicação e replicação do modelo em problemas futuros.

3.4 Gradiente Reduzido Generalizado

Gradiente Reduzido Generalizado, ou GRG, é um algoritmo muito utilizado na resolução de problemas de otimização. Apresentado por Abadie e Carpentier (1969) para solucionar problemas de programação matemática com uma função objetivo, linear ou não linear, e restrições, lineares ou não lineares.

O GRG é o método mais empregado na resolução de problemas com múltiplas respostas, devido a facilidade da sua utilização a partir do Solver, software da Microsoft Excel (KÖKSOY; YALCINOZ, 2006).

O método atinge uma base teórica geral, e assegura resultados empíricos para solução de problemas não-lineares em geral. Como característica essencial, o método também apresenta uma adequada convergência global, principalmente quando inicializado suficientemente próximo à solução (LASDON; WAREN, 1977).

A expressão “gradiente reduzido” vem da substituição das restrições na função objetivo, o que reduz o número de variáveis e acarreta a redução de gradientes (NASH e SOFER, 1996; PAIVA, 2008).

O problema não linear, para ser resolvido pelo método GRG, representado de forma geral, conforme sugerido por Lasdon e Waren (1977), descrito pelo sistema de Equação (1).

$$\text{Minimizar } f(x) \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } g_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j, \quad j = 1, \dots, n$$

Onde: x é um vetor de n variáveis de processo (x_1, \dots, x_n) , f é a função objetivo, e g_i é a restrição. Os g_i e u_j representam, respectivamente, os limites inferiores e superiores do processo. Algumas formulações também incluem inequações como restrições, que, para o método GRG deverão ser convertidas em equações pela introdução de variáveis de folga (PAIVA, 2008).

Usando substituição direta, o modelo geral do método GRG, é baseado na conversão das restrições do problema para uma irrestrrição (LASDON; WAREN, 1977). Neste caso, o vetor da variável de processo x pode ser particionado em dois subvetores $x = (x^B, x^N)^T$, onde x^B é o m vetor das variáveis básicas (dependentes) e x^N é o $n-m$ vetor das variáveis não básicas (independentes) (PAIVA, 2008). Assim, reescrevendo o problema de NLP, a maneira reduzida poderia ser descrita na Equação (2) (CHEN; FAN, 2002; LASDON; WAREN, 1977).

$$\text{Minimizar } F(x) = f(x^B(x^N), x^N) \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } l_N \leq x^N \leq u_N$$

Onde l_N e u_N são vetores dos limites para x^N .

Iniciando-se com um ponto viável x^k , o algoritmo GRG tenta encontrar uma direção de movimento para otimizar a função objetivo. A direção do movimento pode ser obtida pelo gradiente reduzido através da Equação (3).

$$r^k(x_N) = \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_N^k} \right]^T - \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_B^k} \right]^T \left[\frac{\partial g^k}{\partial x_B^k} \right]^{-1} \left[\frac{\partial f g^k}{\partial x_N^k} \right] \quad (2)$$

O algoritmo é interrompido, quando a magnitude do gradiente reduzido no ponto corrente é tão pequena quanto o desejado. De outro modo, um procedimento de pesquisa é executado para localizar um novo ponto na direção do gradiente reduzido. Este procedimento é executado repetidamente (LASDON; WAREN, 1977).

A busca do ponto ótimo do algoritmo é interrompida quando a magnitude do gradiente reduzido atinge o valor do erro desejado. Caso contrário, uma nova busca é realizada para localizar um novo ponto na direção do gradiente reduzido. Este procedimento é executado até que a melhor solução viável seja encontrada (LASDON; WAREN, 1977).

3.6 Simulação de Eventos Discretos

Com intuito de simular o descarregamento de carvão vegetal e buscar a melhor forma de abastecimento desse combustível na produção de ferro-gusa, optou-se, neste trabalho, pela utilização da Simulação de Eventos Discretos (SED), técnica utilizada para representar um processo ou sistema, simulando seu comportamento.

A simulação computacional de sistemas, ou, simplesmente, simulação, consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo (sistemas) do mundo real, com intuito de avaliar e melhorar seu desempenho (FREITAS, 2008).

Robinson (2004), apresenta uma definição de simulação construída gradativamente, a partir de três diferentes óticas, a saber:

- a) Uma imitação de um sistema – mera representação de algum sistema;
- b) Uma imitação (em um computador) de um sistema à medida que progride no tempo – a representação do sistema agora é segmentada no tempo, talvez a partir de eventos que ocorrem no decorrer do tempo, que pode ser gerada (e/ou executada) com o auxílio de computadores;
- c) Experimentação com uma imitação simplificada (em um computador) de um sistema de operações à medida que progride no tempo, com a finalidade de melhor compreender e/ou melhorar esse sistema – nessa ótica (a final), não só se representam os sistemas, como, também, se experimentam com eles, gerando novos cenários, modificando novos parâmetros, testando condições diversas.

Os sistemas de simulação são ditos discretos quando as variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis. É aquela na qual as mudanças no estado do sistema acontecem instantaneamente em pontos aleatórios no tempo como resultado da ocorrência de eventos discretos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

ProModel é uma tecnologia de software de simulação de eventos discretos, utilizada para planejar, projetar e melhorar a manufatura, a logística e outros sistemas novos ou existentes. Ela permite que você represente com precisão os processos do mundo real, incluindo sua variabilidade e interdependências inerentes, a fim de conduzir análises preditivas sobre mudanças em potencial (PROMODEL CORPORATION, 2021). Segundo ProModel® Corporation (2011), “a definição dos passos a serem seguidos para se obter bons resultados em simulação com um mínimo dispêndio de recursos varia muito de acordo com o projeto, porém os procedimentos básicos são essencialmente os mesmos”. Estes procedimentos para conduzir

uma simulação serão apresentados a seguir, no Quadro 6.

Quadro 6 – Etapas do Processo de Simulação

Etapas	Definição
Formulação e Análise do Problema	Os objetivos e propósitos principais do estudo devem ser estabelecidos, assim como as hipóteses, prerrogativas e resultados esperados.
Planejamento	Consiste em estabelecer objetivos e definir ferramentas, pretende-se ter a certeza de que se possuem recursos e tempo suficientes. A especificação da simulação deve ser bem definida, assim como o escopo, descrição dos cenários que serão estudados e as restrições, principalmente as que se referem a tempo e custo, estabelecendo um cronograma temporal contemplando todas as atividades que serão desenvolvidas.
Definição do Sistema	Identificação do modelo conceitual no qual o sistema será baseado. Nesse passo há tomada de dados, e para ajudar a organizar o processo de junção e análise desses dados para a definição do sistema os seguintes passos são indicados: definição dos dados requeridos, fonte apropriada de dados, fazer certas considerações quando necessário, converter os dados apropriadamente e documentar e aprovar os dados.
Construção do Modelo Computacional	O objetivo da construção do modelo é prover uma representação válida do sistema definido, traçando um esboço do sistema (pseudocódigo), definindo componentes e descrevendo as variáveis. Recomenda-se que o modelo comece de forma simples e vá crescendo de forma gradativa até alcançar algo mais complexo.
Verificação e Validação	Confirmar a operação do modelo segundo a intenção do analista. Garantindo que o modelo construído satisfaça os objetivos do estudo, e que as informações geradas sejam confiáveis.
Condução do Experimento	Fundamentado no resultado da simulação o modelador tem um retorno sobre a validade de suas hipóteses. Em um experimento de simulação há a entrada de variáveis definindo o modelo, tais variáveis são independentes e podem ser manipuladas. O efeito dessa manipulação é então medido e correlacionado. Embora o software ajude nessa fase, cabe ao modelador decisões do tipo: número de replicações do teste, o tamanho e complexidade da simulação, etc.
Análise dos Resultados	Quando se faz a condução de experimento de simulação, há a necessidade de extrema cautela para analisar os resultados. O maior benefício da simulação é dar ideias de “o que aconteceria se”.
Reportando os Resultados	O último passo é dar recomendações para melhoramentos no sistema atual baseado nos resultados da simulação, deve ser realizado por toda a equipe participante. Tais resultados devem ser claramente apresentados para a tomada de decisão final.

Fonte: Adaptado de (BANKS; CARSON II; NELSON, 2000; LAW; KELTON, 2000; PEGDEN; SHANNON; SADOWSKI. R.P., 1991).

O Promodel é um software de simulação de eventos discretos utilizados nos mais variados processos. Yadav e Jayswal (2019), investigaram os efeitos da implementação de diferentes layouts de uma planta de manufatura, variados segundo os resultados de um arranjo de Taguchi sobre os fatores: *a)* mix de peças; *b)* tipo de layout; *c)* condição de lotes; *d)* taxa de utilização do sistema; *e)* tempo de ciclo. Rehman, Mian, Umer e Usmani (2019) utilizaram o software para reconfiguração de um sistema de manufatura celular, a partir de uma abordagem híbrida entre lógica Fuzzy e Análise Hierárquica de Processos. Xavier, Silva e Moura (2019) apresentaram uma possível solução para o número de atendentes de caixa em um supermercado, pelo uso combinado da SED com Promodel e a Teoria das Filas. Abad (2018) avaliou o cenário ergonômica das estações de trabalho de um fábrica de roupas, de forma a mitigar os problemas de seu layout. Campos, Danta e Menezes (2016) utilizaram a abordagem da SED com Promodel para comparar a produtividade de duas linhas de produção de uma indústria de produtos para saúde.

3.6 Modelagem Conceitual














A modelagem conceitual, é uma abordagem utilizada para reproduzir visualmente como a empresa conduz suas operações, definindo e descrevendo seus processos, atividades, entidades, recursos e a relação entre eles.

Dentre as etapas de criação do modelo conceitual, a mais importante é a criação do modelo conceitual, visto que impacta de forma significativa na coleta de dados, velocidade do modelo, validação, velocidade da experimentação e confiança dos dados. Dessa forma, a escolha da técnica de modelagem deve ser feita com cautela, pois fornecerá a base para o projeto de simulação (ROBINSON, 2014).

A técnica de modelagem escolhida para esta etapa foi a IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008). Ela utiliza e adapta elementos lógicos de técnicas de modelagem, permitindo a elaboração de modelos conceituais com informações úteis ao modelo computacional.

O IDEF-SIM combina duas técnicas de modelagens de processos em *Business Process Modeling* (BPM), o IDEFØ e IDEF3. A Figura 7 apresenta a simbologia adotada na técnica IDEF-SIM.

Figura 7 - Simbologia do Processo Esquemático IDEF-SIM

Simbologia	Descrição
	Fluxo de Entrada no Sistema Modelado
	Entidades (IDEF3)
	Funções (IDEF0)
	Fluxo de Entidade (IDEF0 e IDEF3)
	Recursos (IDEF0)
	Controles (IDEF0)
	Movimentação (Fluxograma - ANSI)
	Informação Explicativa
	Ponto Final do Sistema
	Conexão com outra figura
 Regra 'E'  Regra 'OU'  Regra 'E/OU'	Regra para fluxos paralelos e/ou alternativos (IDEF3)

Fonte: Adaptado de (LEAL; ALMEIDA; MONTEVECHI, 2008).

Segundo Chwif et al. (2015) o modelo conceitual deve ser convertido para um modelo computacional através de uma linguagem de programação ou algum simulador comercial. Neste estudo o software escolhido foi o ProModel® Corporation (2011), importante aliado na verificação e validação do modelo, devido a sua capacidade gráfica e de animação.

O modelo conceitual deve ser válido no sentido de representar a realidade e incluir somente elementos que influenciam no problema a ser solucionado (ROBERT et al., 2013).

A literatura apresenta algumas técnicas para validação do modelo conceitual, como: duplicação do modelo, comparação com modelos anteriores e validação face-a-face.

Como técnica de validação, utilizou-se a validação face-a-face, a qual reflete uma discussão com especialistas, objetivando alcançar com estes, o aval para uso do modelo conceitual e operacional (CHWIF; MEDINA, 2015; KLEIJNEN, 1995; SARGENT, 2005).

A simulação é uma importante ferramenta de análise de processos, mas exige um empenho metodológico e um intenso estudo estatístico. Desta forma, a partir de todo conteúdo referido pelos autores citados, é possível a construção de um modelo de simulação com êxito.

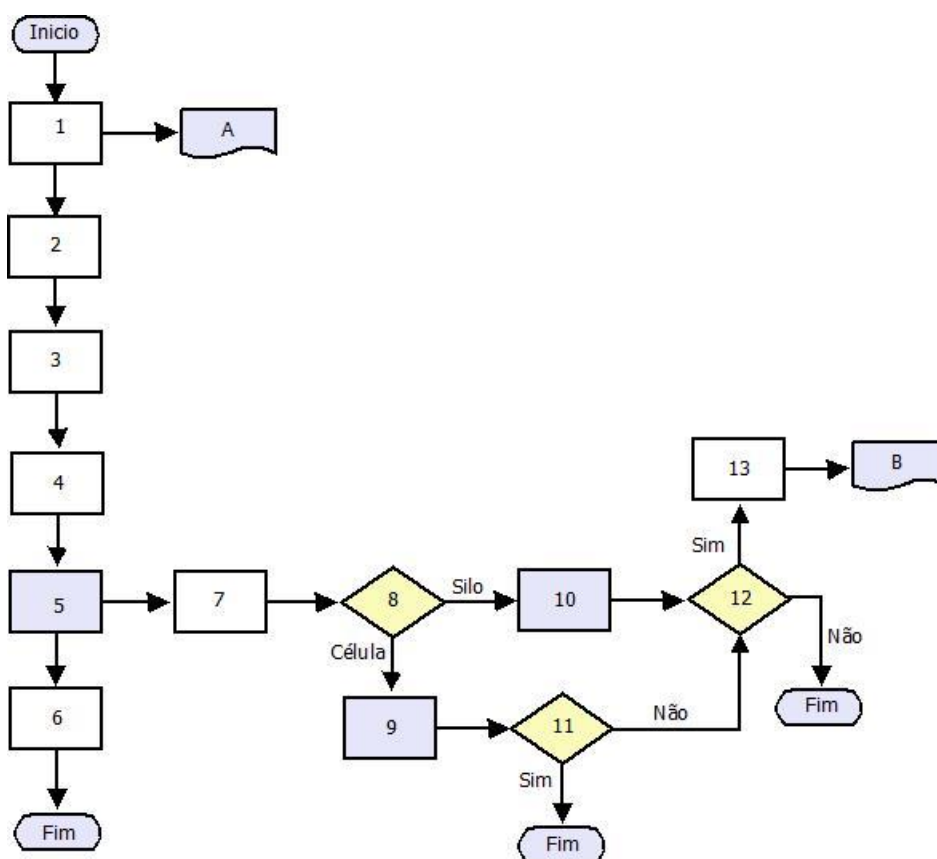
4. DESENVOLVIMENTO DA SIMULAÇÃO

O modelo foi desenvolvido e conduzido, conforme a metodologia adaptada, citada na seção 3.6.

4.1 Planejamento do Projeto e Conceitualização do Modelo

Com o intuito de obter uma melhor visualização do sistema, fluxo de informações, equipamentos ou materiais foi desenvolvido um fluxograma do processo, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do descarregamento de carvão vegetal



Legenda	
1 – Entrada do caminhão de carvão vegetal	9 – Armazenagem do carvão vegetal na célula
2 – Pesagem e medição do volume do carvão vegetal	10 – Armazenagem do carvão vegetal no silo
3 – Manobra do caminhão	11 – Há carvão vegetal no silo?
4 – Travamento do caminhão	12 – AF's estão consumindo?
5 – Descarga do carvão vegetal	13 – Carvão vegetal é descarregado nos AF's
6 – Saída do caminhão	B – Alto-forno 1 e alto-forno 2
7 – Correia transportadora	A – Próprio, terceiro ou paliçada
8 – Silo ou célula?	

Fonte: Autoria Própria.

O processo de descarregamento de carvão vegetal se inicia com a entrada de caminhões com a matéria-prima na usina. As denominações para os caminhões são de acordo com capacidade de abastecimento, sendo eles “toco” ou “carreta”. Ao entrarem na usina os caminhões são pesados e seu volume medido, conforme coleta de dados, descrita na seção 4.3.

Após a conferência da carga, ocorre a manobra e travamento do caminhão no basculador. Posteriormente o carvão vegetal é descarregado em correias transportadoras, podendo ter como destino três opções: células, silos e paliçada, funções descritas no Quadro 7.

Quadro 7 - Descrição das opções de destino do carvão vegetal

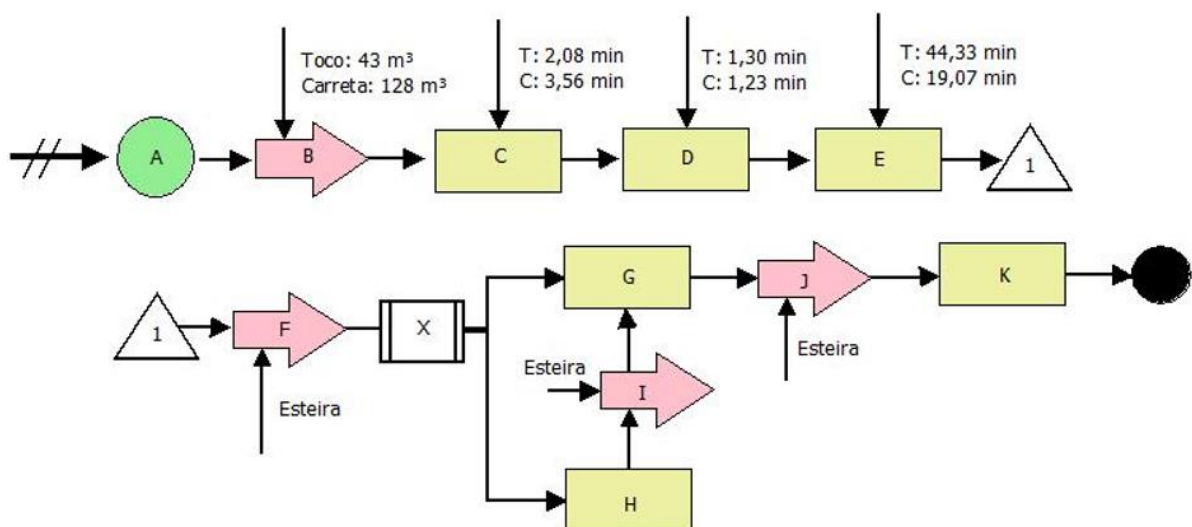
Destino	Descrição
Célula	Local de “estoque de segurança” do carvão vegetal (Consumo secundário)
Silo	Local de armazenagem do carvão vegetal (Consumo primário)
Paliçada	Local externo à siderúrgica que armazena carvão vegetal

Fonte: Autoria Própria.

A escolha ocorre de acordo com a produção dos altos-fornos e volume de matéria-prima disponível. O carvão vegetal consumido pelos altos-fornos advém dos silos. Caso a descarga dos caminhões seja ineficiente, correias transportadoras transportam o carvão vegetal das células ao silo. À paliçada destina-se de forma aleatória 0,28% do carvão vegetal.

Para melhor entendimento do processo e a rota percorrida pela entidade, foi desenvolvido o modelo conceitual com o auxílio da técnica IDEF-SIM, o qual podemos observar na Figura 9.

Figura 9 - Modelo Conceitual da descarga de carvão vegetal nos altos-fornos



Legenda	
A – Entrada de carvão vegetal	G – Silo: Armazenagem do carvão vegetal
B – Caminhão: Transporte do carvão vegetal	H – Célula: Armazenagem do carvão vegetal
C – Manobra: Caminhão	I - Esteira: Transporte do carvão vegetal
D – Travamento: Caminhão	J - Esteira: Transporte do carvão vegetal
E – Descarga: Carvão vegetal	K – Altos-fornos: Consumo do carvão vegetal
F – Esteira: Transporte do carvão vegetal	

Fonte: Autoria Própria – Software Dia.

4.2 Verificação e Validação do Modelo Computacional

Após a construção do modelo, a etapa de verificação e validação é de suma importância para garantir que o modelo satisfaça aos objetivos e metas do estudo, e os dados coletados sejam consistentes.

Neste trabalho, a verificação foi realizada através dos recursos do ProModel® Corporation (2011). O processo de teste, foi realizado desde o início do processo, verificando se as entradas (número de caminhões) e os tempos medidos (manobra, travamento e descarga) correspondiam à realidade. Posteriormente verificou-se as interações dos componentes (tempo e tipo de caminhão, destinação do carvão aos silos e células).

Garantindo que todos os dados, tempos e interações estavam corretos, verificou-se com os facilitadores e colaboradores responsáveis pelo processo, a partir do método de “face a face”, a validação do processo como um todo, com intuito de assegurar que o modelo funciona para a finalidade que foi criado.

4.3 Coleta de Dados

De acordo com Robert et al. (2013), a coleta de dados é um dos pontos mais importante do processo de simulação, pois, se os dados coletados não forem consistentes, o modelo também não o será.

Após a validação do mapeamento do processo foram identificados os dados relevantes para a construção do modelo de simulação. Considerando para análise 12 meses de entradas, consumos e medições. As etapas para condução desse procedimento de coleta de dados, estão descritas a seguir.

Etapa 1 – Origem dos Caminhões

Os caminhões podem ter origens distintas conforme se observa no Quadro 8.

Quadro 8 - Origens dos caminhões de carvão vegetal

Origem	Descrição
Próprio	Caminhões de propriedades da empresa
Terceiros	Caminhões de propriedades de terceiros
Paliçada	Caminhões do pátio de estocagem

Fonte: Autoria Própria.

A origem dos caminhões, pode ser relacionada com a origem do carvão vegetal, caminhões de origem “próprio” são caminhões advindos das fazendas produtoras da própria usina, caminhões “terceiros”, correspondem às entregas de fornecedores externos e paliçada é mix de carvão terceiro e próprio que fica estocado em um pátio, à aproximadamente 8 km da usina.

Etapa 2 – Tipos de Caminhões

Os tipos de caminhões que entram na usina siderúrgica foram nomeados com intuito de identificar sua capacidade de transporte, e assim prever a ideal configuração de entrada.

Definidos como “Toco” e “Carreta”, de acordo com sua capacidade/volume de carregamento de carvão vegetal, constituem sua forma usual de identificação. Os caminhões do tipo Carreta possuem capacidade de transporte equivalente a 128 m³ e os Toco 43 m³.

Etapa 3 – Tempo de Descarregamento

O processo de descarregamento foi desdobrado, e o tempo de manobra, travamento e basculamento foram medidos de acordo com o tipo do caminhão.

Sendo a manobra correspondente ao tempo de manobrar o caminhão no pátio de veículos e posiciona-lo dentro da área de descarregamento, posteriormente as rodas dos caminhões são travadas para que o mesmo descarregue o carvão vegetal.

Etapa 4 – Destino do carvão vegetal

Após a descarga do carvão vegetal, o mesmo pode ser transportado por meio de correias transportadoras a dois destinos, sendo eles: células, silos.

Esta é uma etapa relevante, pois a identificação de destino conduz o modelo de simulação a diferentes processos.

Os silos correspondem a ao consumo direto, material que é transportado para consumo nos altos-fornos I e II, já as células, correspondente a locais de estoque de carvão, que serão consumidos posteriormente.

Etapa 5 – Volume consumido pelos altos-fornos

O volume histórico de consumo dos altos-fornos (2 anos) foi analisado com intuito de estabelecer uma relação entre este parâmetro e o destino do carvão vegetal.

Etapa 6 – Volume dos silos e células

O volume dos silos e células foram pesquisados junto ao setor de engenharia, com intuito de se identificar a real capacidade desses locais e dimensionar a quantidade dos materiais que seriam destinados à ambos.

Etapa 7 – Tempo de permanência de veículos

O tempo de permanência de veículos, ou TPV, é gerado a partir da cronometragem, desde a entrada do caminhão na usina, até sua saída.

Etapa 8 – Velocidade e capacidade da esteira transportadora

O comprimento e largura das esteiras transportadores de carvão vegetal foram pesquisados junto ao setor de matérias-primas da usina. O tempo do transporte, por meio das esteiras transportadoras, desde o descarregamento aos silos foram medidos. E assim, por meio desses dados, a velocidade da esteira foi calculada.

De posse de todos esses dados, procedeu-se à construção do modelo computacional, conforme descrito na seção 4.4.

4.4 Simulação Computacional

Para construção do modelo computacional foi utilizado o software ProModel® Corporation (2011). O software foi escolhido pela excelente interface gráfica, o que facilita a validação do modelo e análise dos dados simulados, pela disponibilidade da versão ilimitada e a gama de resultados que oferece.

De acordo com ProModel® Corporation (2011), uma sequência padrão deve ser seguida, sendo fundamental que no modelo formulado, sejam criados Locais, Entidades, Processos e Chegadas. Os tópicos contendo as peças-chaves da construção do modelo serão abordados no Quadro 9.

Quadro 9 - Peças-chave para formulação no software ProModel

Peças-chave	Descrição
Formulação do Modelo	Primeiramente metas e objetivos foram estipulados, posteriormente as variáveis de decisão do modelo determinadas, assim como os cenários/experimentos. O número de entidades foi estabelecido, e foi definido se usavam nomes ou atributos separados.
Ajuste do Modelo	Para melhor compreensão do modelo, uma planta do local foi utilizada como gráfico de fundo e neste foi determinado os espaços necessários no layout para disposição dos dados aspirados.
Definição dos Locais	Local de destino dos objetos para que as operações sejam realizadas, como uma prateleira onde o material espera para ser utilizado, uma esteira onde as peças se movem para o próximo ponto de processamento, uma mesa onde são processadas as ordens ou uma doca onde os pedidos são expedidos.
Definição das Entidades	As entidades são elementos que sofrem ação do sistema. Podem ser objetos animados, como pessoas, ou inanimados como peças, pallets, etc.
Redes de Caminhos	A rede de caminho especifica em qual rede de caminho a entidade irá se movimentar para chegar a seu destino, devem conectar todos os lugares onde os recursos dinâmicos devem transitar e todos os lugares onde entidades andam por si mesmas ou com recursos. O que significa que a entidade está se movendo sozinha e com sua “própria” energia.
Processos	Descrevem qual entidade, em qual lugar, tem qual operações realizadas nela. O roteamento descreve onde a entidade vai, qual regra segue e como ela se move ao destino.

Fonte: Adaptado de (PROMODEL CORPORATION, 2021).

A formulação do modelo foi realizada a partir das metas traçadas de descarregamento de carvão vegetal, tendo por intuito o abastecimento dos fornos de forma eficiente. As variáveis traçadas foram relacionadas ao tipo de caminhão que entra na usina, o tempo de descarregamento até a correia transportadora e o destino do carvão vegetal.

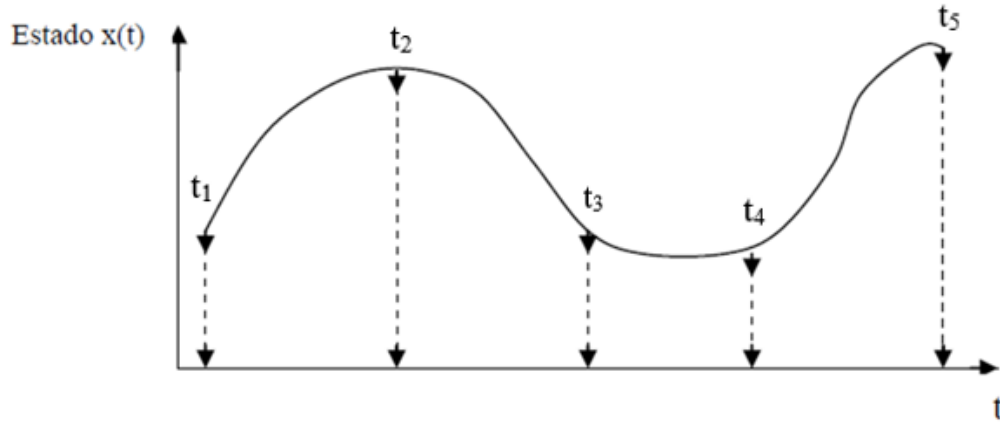
Os locais definidos, correspondem aos pontos finais de descarga do carvão vegetal (célula e silo) e todo os locais percorridos até estes pontos, assim como as redes de caminho percorrida pelas entidades a estes pontos.

A entidade principal do programa de simulação é o carvão vegetal, item que é objeto de estudo da simulação. Como forma de transporte dessa entidade, consideramos também no programa, os caminhões, carreta e toco.

O sistema de descarregamento de altos-fornos é um processo contínuo, de modo que suas variáveis se alteram continuamente ao longo do tempo. Desta forma, fez-se necessária a discretização dos dados, com intuito de simular o processo em um software de simulação a

eventos discretos. Suas variáveis variam constantemente, porém os valores são amostrados apenas em instantes discretos, como podemos observar na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo



Fonte: Adaptado de Carvalho (2003).

Desta forma, para a criação do modelo computacional, as entidades carvão vegetal, toco e carreta foram discretizadas. A Tabela 2 apresenta os valores adotados para entidade.

Tabela 2 - Discretização das Entidades

Entidade	Unidade	m ³
Carvão vegetal	1	1
Carreta	1	128
Toco	1	43

Fonte: Autoria Própria.

A frequência das chegadas para as entidades (Toco e Carreta) foram definidas no software StatFit, onde os dados das entradas (intervalo de tempo) foram transformados em segundos e as distribuições foram encontradas, como podemos notar na Figura 11 e 12.

Figura 11 - Gráfico das distribuições de entradas – Toco

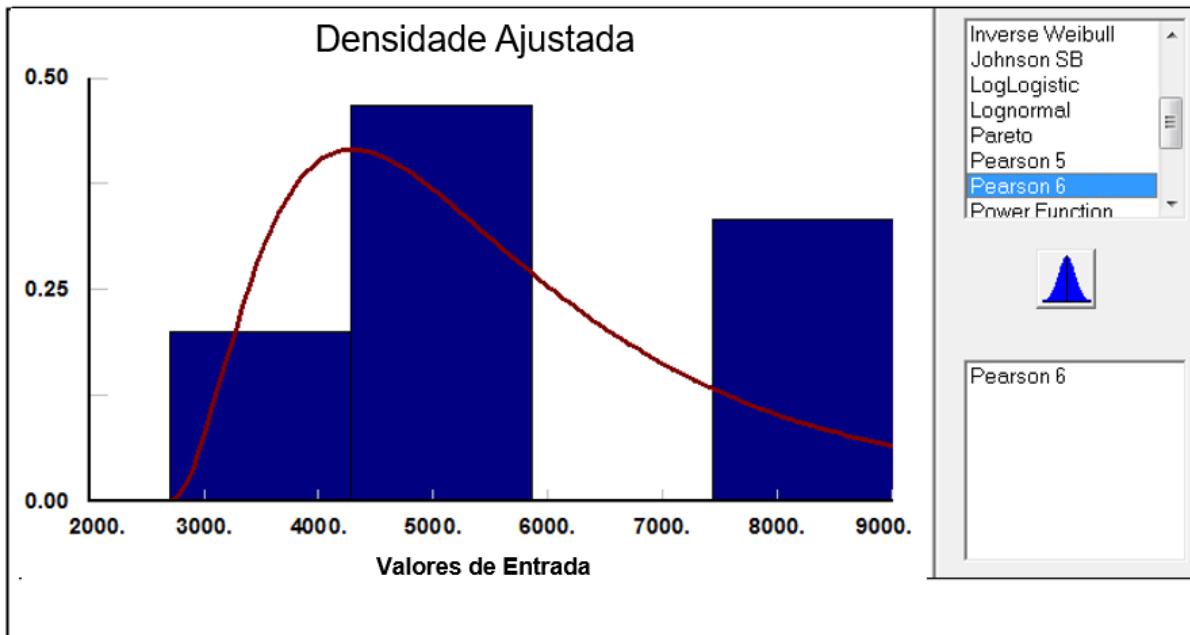
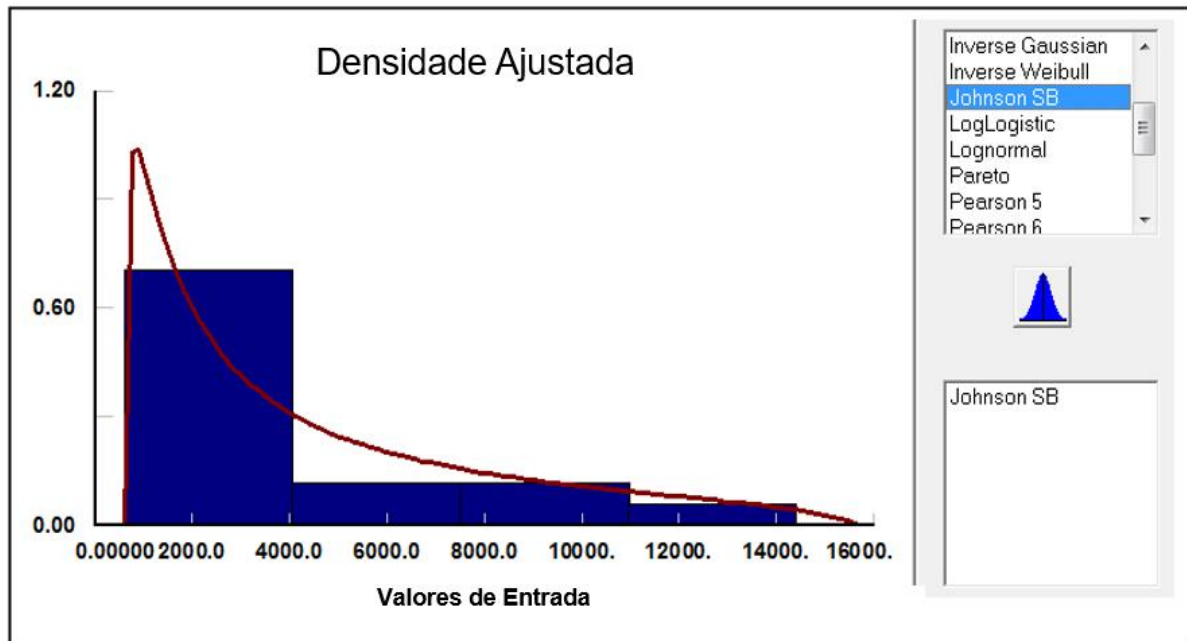


Figura 12 - Gráfico das distribuições de entradas – Carreta



Fonte: Autoria Própria - Software StatFit.

Os gráficos das distribuições de entrada do toco e carreta, descrevem o resultado do teste de aderência realizado no Statfit, conforme conjunto de dados referente às entradas dos tipos de caminhões. Onde observa-se o histograma resultante, onde a curva característica correspondente a função densidade de probabilidade. Para esse caso observa-se uma maior aderência a distribuição de Pearson, no caso do toco e Johnson para carreta.

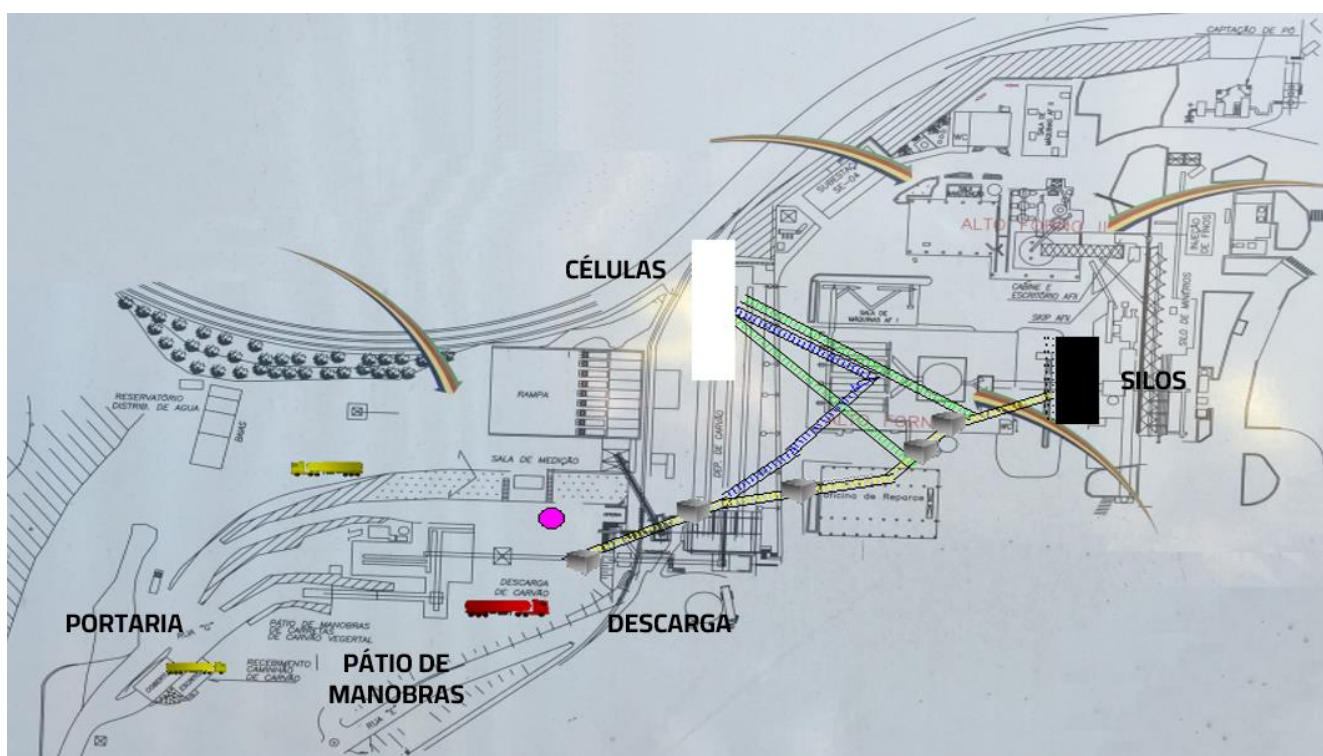
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com intuito de atingir o objetivo almejado “Otimizar a produção de ferro-gusa nos altos-fornos”, diversas análises foram realizadas, as quais serão desdobradas a seguir.

5.1 Capacidade do Abastecimento e comportamento do sistema simulado

A partir da distribuição da entrada dos caminhões e coleta de dados o cenário atual foi simulado, como podemos visualizar na Figura 13.

Figura 13 - Simulação do descarregamento de carvão vegetal no software ProModel® Corporation (2011).



Fonte: Autoria Própria – Software ProModel® Corporation (2011).

A partir do modelo executado, pôde-se observar que a capacidade de abastecimento do carvão vegetal deveria ser vinculada aos tipos de caminhões que entram na usina e ao agendamento (programação do tipo e quantidade por dia).

Diversos modelos foram simulados com intuito de se obter a configuração ideal para entrada dos caminhões. Concluiu-se que o tempo para o descarregamento de um caminhão do tipo toco é 38% maior que o mesmo volume descarregado em uma carreta. Visto que veículos do tipo carreta descarregam 2,6 m³ por minuto, enquanto o tipo toco 1,8 m³ por minuto. Para melhor entendimento dos dados de descarregamento, os volumes transportados pelos

caminhões foram multiplicados pelo tempo em hora do processo, e a seguinte correlação foi estabelecida, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre a produção transportada pela Carreta e pelo Toco

Variáveis	Coefficientes Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Nível de Significância
Constante	0,0751	0,2185	0,34	0,736
Toco	1,42851	0,00018	7726,21	0,000

Equação de Regressão - Carreta = 0,075 + 1,43 Toco

Fonte: Autoria Própria - Software Minitab.

Confrontando os dados obtidos a partir do software ProModel® Corporation (2011), e Minitab (2019) e dados históricos de descarregamento e produção, foi possível notar que o abastecimento de silos e células se comportariam de forma eficaz se a porcentagem de entrada de carreta fosse aproximadamente 70% e de toco 30%. Os resultados de tempo obtidos a partir dessa configuração, podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos ao final da simulação

Nome	Total de Saídas	Tempo Médio no Sistema (min)	Tempo Médio em Operação (min)
Toco	8,00	455,12	19,07
Carvão Vegetal (Biorredutor)	905,00	573,30	145,77
Carreta	6,00	427,04	44,33

Fonte: Autoria Própria - Software ProModel.

A partir dos resultados obtidos com a simulação, verificou-se que, para o cenário simulado:

- O tempo médio de TPV seria de 455,12 minutos para toco e 427,04 minutos para carreta;
- Seria descarregado em média 905 m³ de carvão vegetal.

Os valores encontrados permitiram que a empresa tratasse a incerteza da oferta da matéria-prima, identificando a quantidade necessária para atender a demanda dos altos-fornos.

Através da associação do volume planejado de consumo com o tipo/quantidade de caminhões necessários para abastecer a usina diariamente.

6. DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

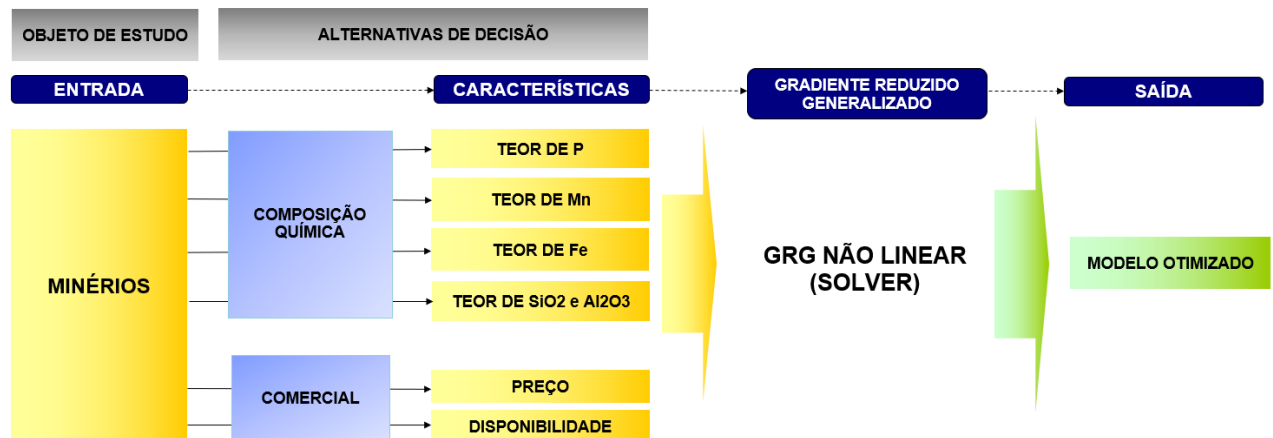
Baseado nas fases do estudo da Pesquisa Operacional, mencionados no referencial, foi desenvolvido um modelo de otimização, usando como base modelos de mistura ou dosagem

(blending). O objetivo é obter o desempenho econômico do processo em função do mix de minérios disponíveis.

5.1 Definição do Problema

Para melhor entendimento do modelo de otimização, a Figura 14 expõe um fluxograma, o qual, descreve o objeto de estudo e as alternativas de decisão.

Figura 14 - Fluxograma do Modelo de Otimização



Fonte: Autoria Própria.

Conforme o modelo de otimização proposto, o objeto de estudo, são os minérios utilizados na produção de ferro-gusa em altos-fornos, os quais tem um efeito significativo sobre a eficiência e economicidade do processo.

Dentre as alternativas de decisão, duas importantes divisões foram feitas para que o custo fosse minimizado.

1 – Composição Química: para que o ferro-gusa produzido apresente a qualidade necessária para aciaria, foi respeitada a composição química necessária, respeitando as faixas dos elementos químicos e balanço de massa.

2 - Definições Comerciais: foi observado além do custo de cada minério, a quantidade disponível para consumo em estoque.

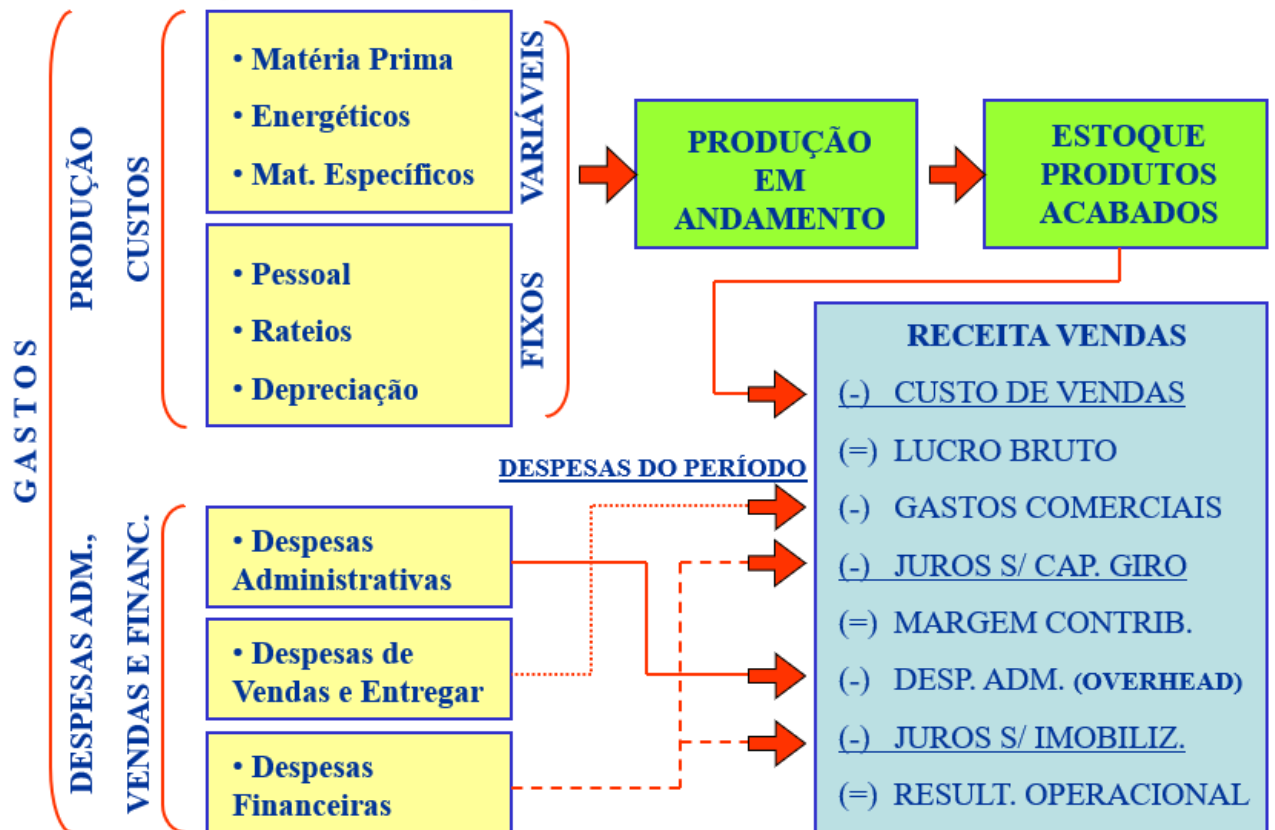
5.2 Construção do Modelo Matemático

Para construção do modelo matemático, foi realizado o levantamento de dados na siderúrgica estudada. Como dados de entrada, foram coletados dados de produção, correspondente aos parâmetros de cálculo do custo do gusa.

O custo do gusa é calculado pelo modelo de absorção, o qual considera todos os custos do produto, independente do custo ser variável ou fixo. Sendo basicamente composto pelos

custos variáveis (matérias primas, energéticos e materiais específicos) e fixos (pessoal, rateios e depreciação) conforme Figura 15. O foco do presente estudo é obter o menor custo de produção, por meio da escolha do mix de minérios, custo de valor variável e possível de redução.

Figura 15 - Custo de Produção



Fonte: Autoria Própria.

De forma simplificada, o custo parcial da produção do gusa corresponde ao custo dos minérios e fundentes (matérias-primas), custo do redutor (carvão vegetal), somado ao custo operacional variável, operacional fixo subtraído pelo retorno (coprodutos), basicamente pela Equação (4).

$$\text{Custo parcial Gusa} = (\text{Custo MMP} + \text{Custo Redutor} + \text{Custo Operacional}) - \text{Retorno} \quad (3)$$

O modelo proposto, obedece ao balanço de massa do alto-forno incluindo as variáveis de decisão, função objetivo e restrições, conforme Quadro 10.

Quadro 10 - Definições do Modelo Matemático

Elementos	Descrição
Variáveis de Decisão	Porcentagem de cada tipo de minério que deverá ser utilizado na produção de gusa
Parâmetros	Consumo médio dos altos-fornos e disponibilidade dos minérios em estoque.
Função Objetivo	A função objetivo, foi definida como o custo total obtido a partir do mix ideal de minérios
Restrições	As restrições do modelo são referentes a disponibilidade dos minérios, preço e consumo dos altos-fornos

Fonte: Autoria Própria.

a) Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão correspondem às porcentagens de cada minério utilizada no alto-forno 1 e no alto-forno 2. Sendo a variável x_j , onde j corresponde à porcentagem do minério enornado.

b) Parâmetros

Como parâmetros do modelo, estabeleceu-se por histórico:

- O consumo de minério de cada alto-forno, sua disponibilidade em estoque e custo;
- Produção mensal e diária de ferro-gusa;
- Consumo e custo do redutor;
- Custos Operacionais;
- Custo dos Fundentes;
- Retorno da venda de coprodutos.

c) Função Objetivo

A função objetivo corresponde ao menor valor resultante da escolha do mix de minérios considerando as demais restrições do processo. Pode ser representado pelo modelo de restrições, seguiu-se o modelo descrito na Equação (5).

$$\text{Min_Custo_Z} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad (4)$$

Onde:

- X_1 : Custo do Redutor (pré-estabelecido)
- X_2 : Custo Operacional (pré-estabelecido)
- X_3 : Custo dos Fundentes (pré-estabelecido)
- X_4 : Custo do Retorno (pré-estabelecido)

- X_5 : Custo do Mix de minérios

Onde $X_5 = (\text{Preço_min}_x) \times (\% \text{min}_x)$

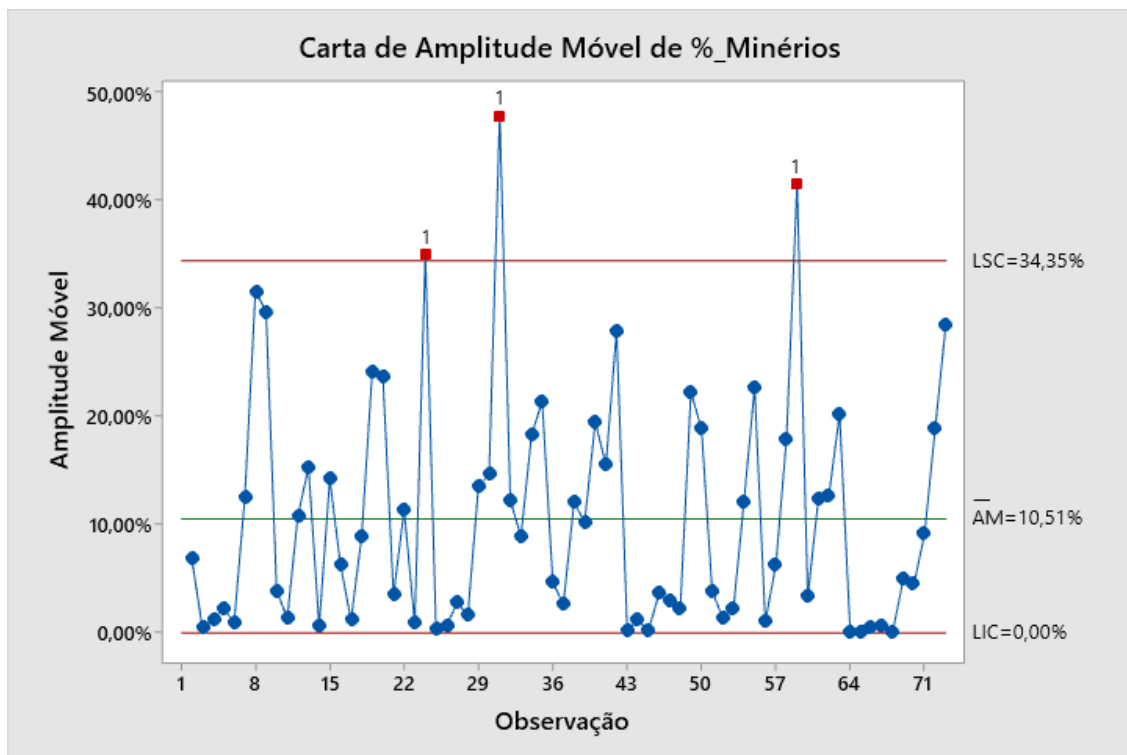
d) Restrições

Para que a produção de ferro gusa seja eficiente e o aço produzido na aciaria esteja dentro das especificações, foi necessário que o modelo desenvolvido respeitasse a disponibilidade dos minérios em estoque e sua composição química.

Devido as restrições de disponibilidade o consumo de minério não pode ser maior que sua disponibilidade.

Assim, para que os resultados não fossem pré-direcionados aos minérios de menor custo, foi gerada uma carta de controle da amplitude móvel do percentual de consumo médio dos minérios, no período de um ano, estabelecendo-se, assim, limites de consumo, considerando o limite superior da carta, em 34,35%, conforme Figura 16.

Figura 16 - Carta de Amplitude Móvel (percentual de minérios consumidos)



Fonte: Autoria Própria – Software Minitab.

Os limites da carta de controle, foram obtidos a partir da teórica da carta de amplitude móvel, conforme CARPINETTI (2012).

Assim, as restrições estabelecidas, está descrita na Equação (6):

$$\text{consumo min}_x \leq \text{disponibilidade min}_x \quad (5)$$

$$\%min_x \leq 34,35\%$$

c) Solução do Modelo

A partir dos dados já citados, foi necessário estabelecer relações entre a quantidade dos minérios disponíveis e o percentual de Fe, SiO₂, P, Mn, e a relação da quebra e Fe com o consumo bruto do minério, para que o custo do mix fosse calculado. Como base, segue as relações estabelecidas a seguir:

- **Relação %Fe no mix (%Fe_{mix}):** O percentual de ferro foi calculado pela média do percentual do mix selecionado e consumo, representado pela Equação (7).

$$\%Fe_{mix} = \sum(min_1 \times \%Fe_{min_1}) + (min_2 \times \%Fe_{min_2}) \dots + (min_x \times \%Fe_{min_x}) \quad (6)$$

Onde %Fe_{mix} = percentual de ferro no mix de minérios

- **Relação %SiO₂ no mix (%SiO₂_{mix}):** O percentual de dióxido de silício, foi calculado pela média do percentual do mix selecionado e consumo, conforme Equação (8).

$$\%SiO2_{mix} = \sum(min_1 \times \%SiO2_{min_1}) + (min_2 \times \%SiO2_{min_2}) \dots + (min_x \times SiO2_{min_x}) \quad (7)$$

Onde (%SiO₂_{mix}) = percentual de ferro no mix de minérios

- **Relação % P no mix (%P_{mix}):** O percentual de fósforo, foi calculado pela média do percentual do mix selecionado e consumo, conforme Equação (9).

$$\%P_{mix} = \sum(min_1 \times \%P_{min_1}) + (min_2 \times \%P_{min_2}) \dots + (min_x \times \%P_{min_x}) \quad (8)$$

Onde (%P_{mix}) = percentual de fósforo no mix de minérios

- **Relação % Mn no mix (%Mn_{mix}):** O percentual do manganês foi calculado pela média do percentual do mix selecionado e consumo, conforme Equação (10).

$$\%Mn_{mix} = \sum(min_1 * \%Mn_{min_1}) + (min_2 * \%Mn_{min_2}) \dots + (min_x * \%Mn_{min_x}) \quad (9)$$

Onde (%Mn_{mix}) = percentual de manganês no mix de minérios

- **Consumo de Minério Líquido (CML):** O consumo de minério líquido é calculado a partir do percentual de Fe no mix de minério pela produção planejada do dia, conforme Equação (11).

$$CML = \%Fe_{mix} \times produção_{dia} \quad (10)$$

- **Consumo de Minério Bruto (CMB):** O consumo de minério bruto é calculado a partir do percentual de Fe no mix de minério pela produção planejada do dia, dividido pela quebra do minério, conforme Equação (12).

$$CMB = \frac{\%Fe_{mix} \times produção_{dia}}{Quebra} \quad (11)$$

- **Consumo de Minério x Produção (CM_minxB):** Essa etapa foi desenvolvida, buscando a relação entre o consumo e a produção dos AF's. Para cálculo do consumo de minério de cada AF, considerou-se o percentual de cada minério consumido, de acordo com a produção conforme a Equação (13).

$$CM_{min_xB} = (\% min_x \times min_xbruto \times \sum necessidade_{min_x}) \quad (12)$$

Onde (CM_min_xB) = corresponde ao consumo de minério por AF, de acordo com a produção.

O modelo de otimização resultado é representado pelo seguinte sistema de Equações:

$$\text{Minimizar: } Min_Custo_Z = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5$$

Sujeito a:

$$\%min_x \leq 34,35\%$$

$$\%Fe_{mix} = \sum (min_1 \times \%Fe_{min_1}) + (min_2 \times \%Fe_{min_2}) \dots + (min_x \times \%Fe_{min_x})$$

$$\%SiO2_{mix} = \sum (min_1 \times \%SiO2_{min_1}) + (min_2 \times \%SiO2_{min_2}) \dots + (min_x \times SiO2_{min_x})$$

$$\%P_{mix} = \sum (min_1 \times \%P_{min_1}) + (min_2 \times \%P_{min_2}) \dots + (min_x \times \%P_{min_x})$$

$$\%Mn_{mix} = \sum (min_1 * \%Mn_{min_1}) + (min_2 * \%Mn_{min_2}) \dots + (min_x * \%Mn_{min_x})$$

$$CML = \%Fe_{mix} \times produção_{dia}$$

$$CMB = \frac{\%Fe_{mix} \times produção_{dia}}{Quebra}$$

$$CM_{min_xB} = (\% min_x \times min_xbruto \times \sum necessidade_{min_x})$$

$$\sum \%min_x = 100\%$$

Para compilar os dados, foi montada uma planilha no Excel, utilizando o GRG Solver, com intuito de calcular o menor preço do gusa, considerando os parâmetros e restrições estabelecidos, conforme Figura 17.

Figura 17 - Modelo da Planilha Excel

DESEMPENHO ECONÔMICO DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO MIX DE MINÉRIO										
Altos-Fornos	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_10
AF1										
AF2										
Disponibilidade										
Preço Minério										
Consumo AF1										
Consumo AF2										
Consumo Total										
Fe										
SiO ₂										
Al ₂ O ₃										
P										
Mn										
Quebra										

Dados Teóricos		
	AF1	AF2
Consumo Minério Líquido		
Consumo Minério Bruto		
Rendimento Metálico		
Volume de Escória		
% Fe Mix	0,00	0,00
% SiO ₂ Mix	0,00	0,00
% Al ₂ O ₃ Mix	0,00	0,00
% P Mix	0,00	0,00
% Mn Mix	0,00	0,00
% Quebra Mix	0,00	0,00

Produção Média Dia		
AF1	AF2	Total
		0

Necessidade de Minério		
AF1	AF2	Total
		0

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Quebra	Soma%
						100
						100

Custo do Mix		
AF1	AF2	Total
		0,00

Custo do Redutor	Custo Operacional
Custo Retorno	Custo dos Fundentes
Custo Total	
0,00	

Fonte: Autoria Própria.

Para solução do modelo em GRG, as seguintes etapas foram seguidas:

1 – Levantamento de dados referentes aos altos-fornos:

Para que a planilha solver, fosse preenchida foi necessário que os dados referentes ao processo fossem coletados, conforme Quadro 11, onde temos, os minérios que serão utilizados durante as rodadas, e seus respectivos preços e características químicas e de quebra de cada um.

Preço, e características químicas de quebra dos minérios utilizados, conforme Quadro 11.

Quadro 11 - Dados dos minérios

Minérios	Preço	Características (%)					
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Quebra
Minério 1	US\$ 192,98	67,48	1,3	0,87	0,04	0,04	18
Minério 2	US\$ 128,44	61,23	5,46	2,07	0,07	0,07	18
Minério 3	US\$ 189,52	56,55	5,79	1,48	0,052	0,78	5
Minério 4	US\$ 124,33	66,52	0,97	1,09	0,05	0,68	18
Minério 5	US\$ 119,00	62,8	5,74	1,41	0,06	0,08	5
Minério 6	US\$ 110,78	67,48	1,3	0,87	0,04	0,04	18
Minério 7	US\$ 129,46	65,41	3,01	1,46	0,074	0,59	18
Minério 8	US\$ 135,06	64,23	3,22	1,63	0,05	0,1	18
Minério 9	US\$ 159,93	64,23	3,22	1,63	0,05	0,1	18
Minério 10	US\$ 193,27	64,23	3,22	1,63	0,05	0,1	18

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos dados obtidos, é preenchido as características químicas e de quebra de cada minério, assim como sua disponibilidade no estoque e custo.

- Definição e cálculo dos itens representados como dados teóricos na planilha, tendo como forma de cálculo às Equações (5), (6), (7), (8), (9) e (10);
- Definição da relação entre a disponibilidade, consumo e características químicas dos minérios, correspondentes às Equações (11), (12) e (13);
- Construção do modelo no Solver, a partir das restrições estabelecidas e preenchimento de custos e produção citados anteriormente, nos parâmetros.

d) Validação do Modelo

O modelo foi validado comparando os valores obtidos no solver, com os valores mensais reais.

Dessa forma, para validação do programa, foi realizado 3 rodadas de comparação com os dados reais, referentes a 3 meses aleatórios de produção, para garantir resultados idôneos. Os dados comparativos foram estão dispostos no Quadro 12 e 13.

Quadro 12 - Dados Reais AF1 e AF2

Mês	Produção		Custos			
	AF1 (t)	AF2 (t)	Custo Redutor US\$	Custo Fundente US\$	Custo Retorno US\$	Operacional US\$
nov/17	279,81	511	331,16	16,97	-13,31	150,92
jan/18	338,51	515	319,41	18,34	-13,31	138,89
mar/18	358,03	483	332,95	18,26	-13,31	140,49

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 13 - Consumo de minérios e custo real

Minério	Estoque out/17	Consumo nov/2017	Estoque dez/17	Consumo jan/2018	Estoque fev/18	Consumo mar/2018
Minério 01	1.306.064	2%	8.276.502	35%	12.883.051	25%
Minério 02	13.465.725	44%	8.451.423	22%	21.929.675	43%
Minério 03	1.882.224	21%	-	-	3.818.180	7%
Minério 07	-	-	3.408	18%	12.876.808	25%
Minério 09	9.238.191	26%	1.564.667	21%	-	-
Minério 10	1.225.206	7%	1.204.739	4%	-	-
Custo Total		801,41		794,01		793,13

Fonte: Autoria Própria.

As três rodadas foram executadas no solver, de acordo com o mês, de forma que os dados da primeira rodada correspondam a Nov/2017, a segunda a Jan/2018 e a terceira a Mar/2018. Os meses foram escolhidos de forma descontinuada, para que não houvesse interferência nos resultados. As rodadas estão dispostas nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Rodada Solver 1

DESEMPENHO ECONÔMICO DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO MIX DE MINÉRIO										
Altos-Fornos	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_10
AF1	0	34	0	0	0	0	34	0	31	0
AF2	0	34	0	0	0	0	34	0	31	0
Disponibilidade	1.306.064	13.465.725	0	0	0	0	1.882.224	0	9.238.191	1.225.206
Preço Minério	192,98	128,44	189,52	124,33	119,00	110,78	129,46	135,06	159,93	193,27
Consumo AF1	0	1.487	0	0	0	0	1.487	0	1.355	0
Consumo AF2	0	4.959	0	0	0	0	4.959	0	4.519	0
Consumo Total	0	6.446	0	0	0	0	6.446	0	5.873	0
Fe	67,48	61,23	56,55	66,52	62,80	67,48	65,41	64,23	64,23	64,23
SiO₂	1,30	5,46	5,79	0,97	5,74	1,30	3,01	3,22	3,22	3,22
Al₂O₃	0,87	2,07	1,48	1,09	1,41	0,87	1,46	1,63	1,63	1,63
P	0,04	0,07	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05
Mn	0,04	0,07	0,78	0,68	0,08	0,04	0,59	0,10	0,10	0,10
Quebra	12,00	16,00	16,00	12,00	16,00	12,00	14,00	14,00	14,00	14,00

Dados Teóricos		
	AF1	AF2
Consumo Minério Líquido	440	803
Consumo Minério Bruto	516	942
Rendimento Metálico	157,22	157,22
Volume de Escória	82,66	150,96
% Fe Mix	63,60	64,69
% SiO₂ Mix	3,92	3,92
% Al₂O₃ Mix	1,72	1,72
% P Mix	0,07	0,07
% Mn Mix	0,26	0,26
% Quebra Mix	14,69	14,69

Produção Média Dia		
AF1	AF2	Total
280	511	791

Necessidade de Minério		
AF1	AF2	Total
4.329	14.436	18.765

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Quebra	Soma%
63,60	3,92	1,72	0,07	0,26	14,69	100
64,69	3,26	1,47	0,06	0,22	14,00	100

Custo do Mix		
AF1	AF2	Total
138,65	138,65	277,30

Custo do Redutor	Custo Operacional
331,16	150,92

Custo Retorno	Custo dos Fundentes
-13,31	16,97

Custo Total
763,03

Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 - Rodada Solver 2

DESEMPENHO ECONÔMICO DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO MIX DE MINÉRIO										
Altos-Fornos	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_10
AF1	0	34	0	0	0	0	34	0	31	0
AF2	12	34	0	0	0	0	8	0	34	11
Disponibilidade	8.276.502	8.451.423	0	0	0	0	3.408	0	1.564.667	1.204.739
Preço Minério	192,98	128,44	189,52	124,33	119,00	110,78	129,46	135,06	159,93	193,27
Consumo AF1	0	2.176	0	0	0	0	2.176	0	1.983	0
Consumo AF2	1.710	5.017	0	0	0	0	1.232	0	5.017	1.630
Consumo Total	1.710	7.193	0	0	0	0	3.408	0	7.000	1.630
Fe	67,48	61,23	56,55	66,52	62,80	67,48	65,41	64,23	64,23	64,23
SiO₂	1,30	5,46	5,79	0,97	5,74	1,30	3,01	3,22	3,22	3,22
Al₂O₃	0,87	2,07	1,48	1,09	1,41	0,87	1,46	1,63	1,63	1,63
P	0,04	0,07	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05
Mn	0,04	0,07	0,78	0,68	0,08	0,04	0,59	0,10	0,10	0,10
Quebra	12,00	16,00	16,00	12,00	16,00	12,00	14,00	14,00	14,00	14,00

Dados Teóricos		
	AF1	AF2
Consumo Minério Líquido	532	809
Consumo Minério Bruto	624	945
Rendimento Metálico	157,22	157,04
Volume de Escória	100,00	148,07
% Fe Mix	63,60	63,68
% SiO₂ Mix	3,92	3,75
% Al₂O₃ Mix	1,72	1,68
% P Mix	0,07	0,06
% Mn Mix	0,26	0,12
% Quebra Mix	14,69	14,45

Produção Média Dia		
AF1	AF2	Total
339	515	854

Necessidade de Minério		
AF1	AF2	Total
6.335	14.606	20.941

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Quebra	Soma%
63,60	3,92	1,72	0,07	0,26	14,69	100
63,68	3,75	1,68	0,06	0,12	14,45	100

Custo do Mix		
AF1	AF2	Total
138,65	154,13	292,78

Custo do Redutor
319,41

Custo Operacional
138,89

Custo Retorno
-13,31

Custo dos Fundentes
18,34

Custo Total
756,11

Fonte: Autoria Própria.

Figura 20 - Rodada Solver 3

DESEMPENHO ECONÔMICO DO PROCESSO EM FUNÇÃO DO MIX DE MINÉRIO										
Altos-Fornos	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_10
AF1	0	34	0	0	0	0	34	0	31	0
AF2	34	34	0	0	0	0	31	0	0	0
Disponibilidade	12.883.051	21.929.675	3.818.180	0	0	0	12.876.808	0	0	0
Preço Minério	192,98	128,44	189,52	124,33	119,00	110,78	129,46	135,06	159,93	193,27
Consumo AF1	0	2.434	0	0	0	0	2.434	0	2.218	0
Consumo AF2	4.322	4.322	0	0	0	0	3.938	0	0	0
Consumo Total	4.322	6.756	0	0	0	0	6.372	0	2.218	0
Fe	67,48	61,23	56,55	66,52	62,80	67,48	65,41	64,23	64,23	64,23
SiO₂	1,30	5,46	5,79	0,97	5,74	1,30	3,01	3,22	3,22	3,22
Al₂O₃	0,87	2,07	1,48	1,09	1,41	0,87	1,46	1,63	1,63	1,63
P	0,04	0,07	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05
Mn	0,04	0,07	0,78	0,68	0,08	0,04	0,59	0,10	0,10	0,10
Quebra	12,00	16,00	16,00	12,00	16,00	12,00	14,00	14,00	14,00	14,00

Dados Teóricos		
	AF1	AF2
Consumo Minério Líquido	563	747
Consumo Minério Bruto	660	868
Rendimento Metálico	157,22	154,59
Volume de Escória	105,77	120,25
% Fe Mix	63,60	64,69
% SiO ₂ Mix	3,92	3,26
% Al ₂ O ₃ Mix	1,72	1,47
% P Mix	0,07	0,06
% Mn Mix	0,26	0,22
% Quebra Mix	14,69	14,00

Produção Média Dia		
AF1	AF2	Total
339	515	854

Necessidade de Minério		
AF1	AF2	Total
7.087	12.581	19.668

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	Quebra	Soma%
63,60	3,92	1,72	0,07	0,26	14,69	100
64,69	3,26	1,47	0,06	0,22	14,00	100

Custo do Mix		
AF1	AF2	Total
138,65	150,93	289,58

Custo do Redutor	Custo Operacional
332,95	140,49

Custo Retorno	Custo dos Fundentes
-13,31	18,26

Custo Total
767,97

Fonte: Autoria Própria.

A partir da comparação dos resultados reais obtidos, e dos resultados dos modelos simulados, podemos observar a redução do custo final em aproximadamente 4%, a partir da readequação do mix de minérios, conforme estatísticas descritivas observadas na Tabela 5.

A tabela 5 evidencia os valores empíricos e reais e a diferença destacada anteriormente. Observe, por exemplo, a variação do desvio padrão obtida pelo modelo de otimização do solver comparado ao desvio padrão dos dados reais, correspondendo a 24%.

Tabela 5 - Estatísticas Descritivas – Relação resultados obtidos no Solver e Real

Variável	N	N*	Média	EP Média	DesvPad	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Solver	3	0	762,37	3,44	5,96	756,11	756,11	763,03	767,97	767,97
Real	3	0	796,18	2,63	4,55	793,13	793,13	794,01	801,41	801,41

Fonte: Autoria Própria – Software Minitab.

e) Implementação dos Resultados

O modelo desenvolvido a partir do Solver, foi implementado para verificação do mix ideal de carga de minérios para os altos-fornos que obtivesse o menor custo alocado à produção, aliado à disponibilidade.

Assim, a implementação do modelo de cálculo de mix foi implementado pela equipe responsável, de forma a verificar e validar os valores obtidos.

f) Avaliação Final

O objetivo do modelo de escolha do mix foi atendido, onde a distribuição da carga do minério com melhores características e custo foram obtidos, respeitando as restrições de estoque.

Todos os resultados estão sendo documentados para que se identifique eventuais valores que possam estar distorcidos ou restrições que devam ser adicionadas ao modelo, sejam realizadas.

7. CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido, demonstrou a importância da simulação e pesquisa operacional em processos de produção contínua como a dos altos-fornos, visto que se trata de uma produção intermitente, interferências e testes no processo são praticamente inviáveis e impraticáveis.

O resultado da simulação permitiu a melhor visualização do descarregamento de carvão vegetal, fornecendo aos gestores informações confiáveis, para melhor configuração do agendamento de veículos transportadores da matéria-prima citada.

A solução para um descarregamento contínuo é a configuração de entrada dos tipos de caminhões, a partir da análise da simulação, onde percebeu-se que alterando somente esta

configuração de 70%, próprio, e 30%, terceiros, o sistema se tornaria eficiente. Desta forma, não haveria a necessidade de construção de um sistema de basculamento auxiliar.

Assim a solução proposta a partir do modelo simulado, permitiu a visualização dos gargalos do abastecimento, assim como a percepção de problemas na gestão de estoque (agendamento).

Referente ao modelo de Programação Linear, o desenvolvimento nos traz a aplicabilidade para suporte na tomada de decisão. Os modelos simulados no Solver nos trouxeram percepções e alternativas diversas para trabalhar com mix diferentes de minérios, minimizando o custo do produto final, respeitando as restrições químicas e comerciais de disponibilidade.

Inicialmente o modelo nos trouxe uma melhor percepção e visualização do processo, mas, comparando-se com resultados reais do processo, a utilização do solver para montagem da carga e balanço de massa, se mostra eficiente, reduzindo em aproximadamente 4% o custo final do produto.

Dessa forma, buscando aprimorar os itens que impactam diretamente nas empresas siderúrgicas, os modelos de simulação e programação linear, se mostraram muito eficientes, de forma que, por se tratar de um ambiente extremamente complexo, os gestores devem ter uma visão do todo, para que possam tomar decisões eficazes.

Um desenvolvimento futuro do trabalho, seria a interligação da planilha de balanço de massa dos altos-fornos, com a da aciaria, buscando adequar ao tipo de aço produzido ao gusa obtido nos altos-fornos e as ligas e/ou sucata que serão adicionadas no processo, de forma a unificar e reduzir o preço do aço.

8. REFERÊNCIAS

ABAD, J. D. **Ergonomics and simulation-based approach in improving facility layout.** Journal of Industrial Engineering International, v. 14, pp.783–791. 2018.

Anuário Estatístico / Instituto Aço Brasil. - 2021 - Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2021.

ARAUJO, L. A. DE. **Manual de Siderurgia.** 2ª ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2005.

ARAUJO, L. A. DE. **Manual de siderurgia.** São Paulo: Arte & Ciência, 1997.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia.** 2ª edição ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2015.

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L. **Discrete event system simulation.** 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional: Para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BELGE. **O primeiro e único simulador do mercado em Português**.

CAMPOS, D. P.; DANTAS, M. J. P.; MENEZES, J. E. **Aplicação da modelagem e simulação computacional como ferramenta comparativa entre duas linhas de produção de uma indústria de produtos para saúde**. Anais do XLVIII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2016.

CARPINETTI, L. C. R.; MIGUEL, P. A. C.; GEROLAMO, M. C. **Gestão da Qualidade ISO 9001:2008**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008.

CHEN, M. C.; FAN, S. S. Tolerance evaluation of minimum zone straightness using nonlinear programming techniques: a spreadsheet approach. **Comp. Ind. Eng**, p. 437–453, 2002.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos –Teorias & Aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

DESTRO, E.; ASSIS, P. S.; SILVA, G. L. R.; CARIAS, R. D. A.; OLIVEIRA, F. O. M. **Operational Research to Optimize the Iron Raw Materials for Blast Furnace Burden**. In: 5th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, October 19-23, 2009, Shangai.

EM, P. D. E. P. et al. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 2015.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. [s.l.] Elsevier, 2013.

FIGUEREDO, R. M; TAVARES, R. P. **Tecnologia de Fabricação de Gusa líquida em alto forno**, Volume 7, Escoamento gasosa e troca térmica na zona seca do alto forno, Fundação Christiano ottoni, Belo Horizonte, 1984.

FREITAS, P. **Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. [s.l.] Visual Books, 2008.

GEERDES, M.; VLIET, C.; TOXOPEUS, H. **O Processo do Alto-Forno**. IJmuiden: [s.n.].

GERDAU. **AF REF - Principais Matérias-primas na Siderurgia**. [s.l: s.n.]. v. 4

GUIMARÃES OLIVEIRA AGUIAR, P.; FERNANDO ANDRADE DE CASTRO, L. **“Balanço de massa integrado entre altos-fornos e aciaria da Aperam South America.”** Belo Horizonte: [s.n.].

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. Tradução: Ariovaldo Griesi. 9. ed ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

KLEIJNEN, J. P. C. Theory and Methodology: Verification and validation of simulation models. **European Journal of Operational Research**, v. 82, p. 145–162, 1995.

KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T. Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 175, n. 2, p. 1657–1674, abr. 2006.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 5. ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LASDON, L. S.; WAREN, A. D. **Generalized reduced gradient software for linearly and nonlinearly constrained problems**. . [s.l: s.n.].

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2000.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. **In: Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2008.

MONTIANO, M. G.; DÍAZ-FAES, E.; BARRIOCANAL, C.; ALVAREZ, R. **Influence of biomass on metallurgical coke quality**. Fuel, v. 116, pp. 175-182. 2014.

LOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira e Metalurgia e Materiais, 2007.

PAIVA, E. **Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseadas em Índices de Capacidade**. Itajubá: [s.n.].

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R.P. **Introduction to simulation using SIMAN**. . 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

PROMODEL CORPORATION. **ProModel**.

RIZZO, E. M. DA S. **Introdução aos Processos Siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

RIZZO, E. M. S. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno**. Vitória-ES: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2009.

ROBERT, E. B. et al. **SIMULAÇÃO DE SISTEMAS.pdf**. Tradução: Et Norman de Alain D'Audenhove. 1. ed. ed. São Paulo: Elsevier, 2013.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use**. John Wiley & Sons Ltd. 2004.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use**. Palgrave Macmillan, 2014. (Nota técnica).

SARGENT, R. G. Validation and Verification of simulation models. **In: Winter Simulation Conference**., 4 dez. 2005.

SAXÉN, H.; GAO, C.; GAO, Z. **Data-Driven Time Discrete Models for Dynamic Prediction of the Hot Metal Silicon Content in the Blast Furnace - A Review**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 9, NO. 4. 2013.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. [s.l.] Pearson Prentice Hall, 2008a.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. Tradução: Arlete Simille Marques. 8. ed. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008b.

WU S.; HAN, H.; LIU X. **Mathematical Model for Blast Furnace Burden Optimization Based on the High-temperature Reactivity.** *ISIJ International*. Beijing, v. 50, n. 7, p. 987-993, Nov. 2009.

XAVIER, A. S.; SILVA, A. A.; MOURA, M. J. C. **Simulação computacional para previsão do número de caixas operacionais em um supermercado.** *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Limeira. 2019.

YADAV, A.; JAYSWAL, S. C. **Evaluation of batching and layout on the performance of flexible manufacturing system.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.101, pp. 1435–1449. 2019.

YANG, Y. YIN, D. WUNSCH, S. ZHANG, X. CHEN, X. LI, S. CHENG, M. WU, AND K.-Z. LIU. **Development of blast furnace burden distribution process modeling and control.** *Isij International*, pages ISIJINT–2017, 2017.