



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO
IMPACTO CAUSADO PELA ALTERAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO DE
UMA ACIARIA**

THIAGO GERALDO DOS SANTOS

JOÃO MONLEVADE

Julho, 2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção



THIAGO GERALDO DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO
IMPACTO CAUSADO PELA ALTERAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO DE
UMA ACIARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica do Amaral.

João Monlevade

Julho, 2018



ATA DE DEFESA

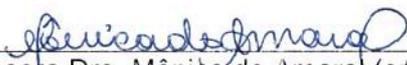
Às cinco dias do mês de julho de 2018, às 21 horas, na sala C204 deste Instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pelo (a) aluno (a) Thiago Geraldo dos Santos, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Mônica do Amaral, Alexandre Xavier Martins e Thiago Augusto de Oliveira Silva.

O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: Utilização da simulação computacional para análise do impacto causado pela alteração no processo produtivo de uma aciaria. A comissão examinadora deliberou, pela:

- Aprovação
- Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções: 30 dias
- Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca: _____
- Reprovação

O (a) aluno(a), com a nota 9,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP 04/2017 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno(a).

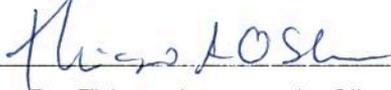
João Monlevade, 05 de julho de 2018.



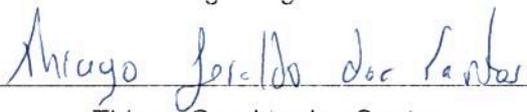
Professora Dra. Mônica do Amaral (orientadora)



Professor Dr. Alexandre Xavier Martins



Professor Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva



Thiago Geraldo dos Santos



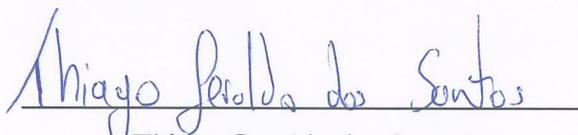
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO IMPACTO CAUSADO PELA ALTERAÇÃO NO PROCESSO PRODUTIVO DE UMA ACIARIA” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 5 de Julho de 2018


Thiago Geraldo dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me guiou e foi meu suporte, principalmente por ter me sustentado nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Maria e Sérgio por sempre me incentivarem e não medirem esforços durante esta longa caminhada. Obrigado por todo amor, confiança e carinho. Ao meu irmão William que sempre foi um motivador para que alcançasse meus objetivos. Aos meus familiares que mesmo distantes sempre apoiaram os meus estudos.

À minha namorada Rosiane, que com o seu amor e compreensão sempre esteve ao meu lado me auxiliando e apoiando de maneira incondicional durante esta trajetória.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto por ter me proporcionado experiências inesquecíveis durante a minha formação acadêmica, que contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Agradeço à minha orientadora Mônica do Amaral por ter me aceitado neste último semestre para a execução deste trabalho, obrigado por todos os conselhos dados durante nossas reuniões, e por ter entendido pacientemente a minha forma de desenvolver os trabalhos.

À todos aqueles que fizeram parte das minhas trajetórias na Inova Consultoria Jr. e no Núcleo de Desenvolvimento de Robótica da UFOP, pois as experiências vivenciadas foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional.

Agradeço aos meus amigos Dalila Baesso, Leonardo Siqueira, Marina Silva e Viviane Serafim por terem me acompanhado durante toda esta caminhada, durante este tempo aprendemos uns com os outros, dividimos momentos difíceis, mas também tivemos momentos de muita alegria. Muito obrigado a vocês por terem tornado esta caminhada mais leve.

Agradeço aos profissionais que me proporcionaram a oportunidade de realizar o meu período de estágio, onde o aprendizado foi enorme. Meu muito obrigado principalmente aos meus coordenadores Edgard Ribeiro e Geraldo de Souza, aos colegas Helton Costa e Wanderlei Gonçalves, por terem sido verdadeiros professores e conselheiros durante todo o tempo, me proporcionando um enorme aprendizado profissional e pessoal pois sempre estiveram dispostos a me ensinar.

RESUMO

A mudança da perspectiva do setor siderúrgico vem indicando um crescimento do volume de produção, influenciado pelo aquecimento econômico. Para se adequar a este cenário as indústrias necessitam de um planejamento que possibilite a retomada da sua capacidade produtiva disponível, ou tomar medidas para aumentar as capacidades já existentes. Neste panorama, a utilização da simulação se mostra uma alternativa interessante para auxiliar a análise de cenários que possibilitem este aumento desejado, principalmente por ser um setor onde alterações de processo demandam altos investimentos. Dessa forma, este trabalho faz o uso do *software Arena*, uma tecnologia de simulação computacional, para realizar a simulação do processo produtivo do aço em uma aciaria convencional de uma empresa inexistente. A simulação foi realizada em dois cenários produtivos distintos, onde o produto final é o mesmo. Através do estudo foi possível concluir que a inserção do cenário alternativo, que contempla a inserção dos processos de dessulfuração e desfosforação em panela, além de proporcionar os ganhos já esperados em tempo de processamento nos convertedores da unidade, tais alterações trazem um ganho de números de corridas realizadas na aciaria para um mesmo período.

Palavras-chave: Simulação Computacional, Usina Siderúrgica, Simulação de Processos, *Arena*.

ABSTRACT

The change in the perspective of the steel sector has been indicating an increase in production volume, influenced by economic warming. In order to adapt to this scenario, the industries need a planning which allows the resumption of its available productive capacity, or take measures to increase existing capacities. In this scenario, the use of the simulation shows an interesting alternative to help the analysis of scenarios which make possible this desired increase, mainly because it is a sector where changes of process demand high investments. Thus, this work makes use of *Arena software*, a computer simulation technology, to simulate the steel production process in a conventional steel mill of a company that doesn't exist. The simulation was performed in two distinct production scenarios, where the final product is the same. The study concluded that the insertion of the alternative scenario, which includes the insertion of the desulphurization and desphosphorization processes in ladle furnace, besides providing the expected gains in processing time in the unit converters, these changes bring a gain of numbers of races held at the steelworks for the same period.

Keywords: Computer Simulation, Steel Mill, Process Simulation, Arena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo simplificado de Produção	19
Figura 2 - Etapas de atividades feitas no Convertedor	21
Figura 3 - Equipamentos Auxiliares.....	22
Figura 4 - Metodologia de Simulação	26
Figura 5 - Etapas de execução do estudo.....	30
Figura 6- <i>Layout</i> base do processo	31
Figura 7 - Representação gráfica do <i>Boxplot</i>	34
Figura 8 - Modelo Conceitual.....	41
Figura 9 - Fluxograma do Processo.....	42
Figura 10 - Entrada de entidades e processo de dessulfuração e falhas.	60
Figura 11 - Processamento e movimentação de entidade.....	60
Figura 12 - Critérios de decisão.....	61
Figura 13 - Processamento nos convertedores e demais parametrizações	61
Figura 14 - Modelo de Animação.....	62
Figura 15 - Mudança no fluxo de entrada	63
Figura 16 - Implementação do processo de dessulfuração e desfosforação	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos dados	38
Tabela 2 - Principais medidas estatísticas	39
Tabela 3 - Critérios utilizados para se classificar o p-valor	40
Tabela 4 - Informações de Ajuste.....	40
Tabela 5 - Funções de ajuste do modelo computacional.....	43
Tabela 6- Funções adicionais de restrições.	44
Tabela 7 - Tempo de Espera.	46
Tabela 8 - Tempo de Processamento.....	46
Tabela 9 - Quantidade Processada.....	47
Tabela 10 - Tempos Gerais.....	47
Tabela 11 - Taxas de Utilização.	48
Tabela 12 - Equações do cenário secundário.....	49
Tabela 13 - Tempo de espera do cenário de mudança.....	49
Tabela 14 - Tempo de Processamento.....	49
Tabela 15 - Quantidade Processada.....	50
Tabela 16 - Tempos Gerais.....	50
Tabela 17 - Taxas de Utilização	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - <i>Boxplot</i> do intervalo de chegada dos carros-torpedo	35
Gráfico 2 - <i>Boxplot</i> dos tempos de processamento na estação de dessulfuração.	36
Gráfico 3 - <i>Boxplot</i> do tempo necessário para limpeza da bocados carros-torpedos.....	36
Gráfico 4 - <i>Boxplot</i> do tempo de basculamento na EBG.....	37
Gráfico 5 - <i>Boxplot</i> do tempo necessário para realização da raspagem de escória	37
Gráfico 6 - <i>Boxplot</i> do tempo de processamento nos convertedores.....	38
Gráfico 7 - Comparativo do tempo de processamento do BOF 1.	51
Gráfico 8 - Comparativo do tempo de processamento do BOF 2.	52
Gráfico 9 – Comparativo da quantidade de Corridas no BOF 1.	52
Gráfico 10 - Comparativo da quantidade de Corridas no BOF 2.....	53
Gráfico 11 – Comparativo da taxa de utilização	53

LISTA DE ABREVIATURAS

IABr – Instituto Aço Brasil

BOF – *Basic Oxygen Furnace*

ELT – Estação de Limpeza de Torpedo

EBG – Estação de Basculamento de Gusa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	Justificativa e relevância do trabalho.....	16
1.3	Estrutura do trabalho.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Descrição geral do sistema.....	18
2.1.1	Mineração.....	19
2.1.2	Sinterização.....	19
2.1.3	Redução.....	20
2.1.4	Refino.....	20
2.1.5	Laminação.....	23
2.2	Simulação.....	23
2.2.1	Terminologias básicas utilizadas na simulação.....	25
2.2.2	Metodologia de simulação.....	26
2.3	<i>Softwares</i> utilizados para simulação.....	27
2.4	Simulação de processos siderúrgicos.....	27
3	METODOLOGIA.....	29
4	DESENVOLVIMENTO.....	31
4.1	Objeto de estudo.....	31
4.2	Modelagem dos dados de entrada.....	32
4.2.1	Coleta de dados.....	33

4.2.2	Tratamento dos dados.....	33
4.3	Modelo conceitual.....	40
4.4	Modelo computacional	43
4.4.1	Restrições adicionais	44
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	45
5.1	Testes Computacionais	45
5.2	Cenário Base	45
5.2.1	Verificação e Validação.....	45
5.2.2	Análise do Cenário Base.....	46
5.3	Cenário de mudança.....	48
5.3.1	Análise do cenário de mudança	49
5.4	Comparativo de cenários	51
6	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A – Modelo Computacional do Cenário Base	60
	APÊNDICE B – Modelo Computacional do Cenário de Mudança.....	63

1 INTRODUÇÃO

O panorama do setor siderúrgico mundial tem se apresentado extremamente positivo, influenciado principalmente pelo aquecimento da economia mundial. Após passar por oscilações de mercado na última década, podem-se destacar alguns acontecimentos relevantes que ocorreram durante este período, como a queda considerável no ano de 2009 com uma retomada do crescimento logo em seguida, até passar por uma nova queda de produção no ano de 2015. Apesar da oscilação descrita o mercado vem se recuperando e as projeções para os próximos anos mostram um crescimento para o setor (WORLDSTELL, 2017).

Observa-se no Brasil que durante o mesmo período descrito acima houve maior instabilidade do setor conforme dados do Instituto Aço Brasil, uma vez que este período foi caracterizado por oscilações de produção, não apresentando nenhuma tendência seja ela positiva ou negativa. Entretanto existem indícios de recuperação, que levam alguns executivos do setor a terem uma perspectiva melhor para o setor a partir de 2018, principalmente devido a retomada do setor automotivo e a fatores ligados a exportação (IABr, 2017).

Para minimizar os impactos ocasionados pela desaceleração do mercado, as siderúrgicas viram a necessidade de buscarem estratégias para reagir, desse modo algumas reduziram a produção devido ao desligamento de equipamentos, já outras tomaram a decisão de implementar projetos de melhorias visando a retomada futura que provavelmente viria. Essas empresas com o objetivo de possuir a capacidade de atender maiores parcelas do mercado quando o setor tivesse um reaquecimento, iniciaram melhorias em seus processos, a fim de reduzir custos e entregar um produto melhor.

Segundo Lima e Pessoti (2011), o setor é caracterizado por um oligopólio e não apresenta uma rivalidade entre as empresas que compõem o mercado, todavia o padrão de concorrência vem sofrendo grandes alterações, influenciado principalmente pelas transformações do mercado internacional, o que tem feito que as empresas brasileiras busquem a competitividade em vantagens sobre o custo e atendimento das especificações individuais dos clientes.

O esforço considerável dispendido pelas empresas do setor para reduzir seus custos de produção e melhorar constantemente a qualidade dos seus produtos, buscando atender as

requisições de seus clientes, se torna uma exigência para aquelas que queiram atender ao mercado que se mostra promissor (MARINS, 2011).

Deste modo, a necessidade das empresas do setor adotarem medidas que buscam o ganho da competitividade pela perspectiva citada acima, leva as mesmas a realizarem mudanças que causam impactos em seus processos produtivos. O estudo que será desenvolvido neste trabalho tem por finalidade mensurar os impactos gerados pela inserção de etapas no processo produtivo de uma aciaria, onde no caso estudado trata-se de uma mudança de local e método para realização de dessulfuração do ferro gusa líquido e inserção de processos para melhoria do produto final.

Nesta situação, a utilização de novas tecnologias é uma alternativa viável para analisar os impactos gerados pelas mudanças do processo, possibilitando um planejamento de ações que visam minimizar tais impactos no decorrer da cadeia produtiva. A simulação computacional é um exemplo de tecnologia existente no ramo da engenharia, que permite visualizar impactos causados por um problema sem a necessidade que o mesmo seja operacionalizado. O que possibilita em uma flexibilização de análise do sistema real, e principalmente a eliminação de qualquer intervenção real na operação de uma aciaria que já se encontra em funcionamento.

Portanto, o presente trabalho utiliza a tecnologia da simulação computacional por meio do *software* ARENA para simular e analisar o fluxo operacional para o refino primário em uma aciaria de uma usina siderúrgica, e os impactos que serão causados pela alteração de métodos para obtenção do aço.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar metodologicamente os impactos que a inclusão do processo de dessulfuração de ferro gusa em panela, e a implementação da desfosforação em panela irão trazer para a etapa de Refino Primário do Aço em uma Aciaria de uma usina siderúrgica.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Fazer a definição do problema a ser estudado;
- ✓ Coletar e analisar dados referentes a chegada de insumos utilizados para produção de aço, além dos dados referentes a movimentação e tempo de processamento dos recursos necessários;
- ✓ Criar um modelo conceitual estabelecendo as relações entre todas as entidades, parâmetros necessários e demais características que são essenciais para a construção do modelo computacional, de maneira que o mesmo descreva de maneira mais exata o processo real;
- ✓ Realizar o desenvolvimento do modelo computacional com base no modelo conceitual já criado;
- ✓ Desenvolver o modelo computacional do cenário secundário;
- ✓ Finalizar a pesquisa por meio da comparação dos cenários que foram simulados.

1.2 Justificativa e relevância do trabalho

Analisar os impactos provenientes de alterações no fluxo produtivo é fundamental para o planejamento de qualquer organização, principalmente para aquelas que estão sujeitas a um alto investimento de capital.

O trabalho se justifica pela necessidade de se observar quais serão os impactos que a inclusão do processo de dessulfuração de gusa e a implementação do processo de desfosforação em panela, irão causar nas demais atividades rotineiras da Aciaria, principalmente aquelas que estão diretamente relacionadas com o processo de refino primário nos Convertedores, uma vez que o planejamento e sincronismo de tais atividades é fator preponderante para o bom funcionamento do fluxo contínuo de produção e indispensável para se atingir as metas de produção diárias

Em termos de processos contínuos de produção são encontrados diversos estudos de simulação computacional. Porém quando se trata do setor de siderurgia tais estudos são mais restritos, onde muitas das vezes fazem referência a mecanismos de transportes utilizados em sistemas deste tipo, e não ao processo produtivo em si. Deste modo, o desenvolvimento deste estudo terá como foco as etapas referentes ao processo de refino primário para produção de

aço e as atividades ligadas ao mesmo. Portanto este trabalho é justificado pela oportunidade de se utilizar ferramentas da Engenharia de Produção capazes de ajudar na tomada de decisões, alinhando-as com conhecimento teórico, para realizar um trabalho científico que mostra a utilização da simulação aplicada a um problema real.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis seções. A primeira seção tem como objetivo realizar a caracterização do setor siderúrgico, introduzir o problema a ser tratado e o método utilizado para tratá-lo. É exposto os objetivos esperados com a realização do estudo, e a relevância que o mesmo possui. A segunda seção apresenta o direcionamento do assunto, introduzindo os temas e ferramentas utilizadas durante o trabalho, contextualizando e fundamentando os conhecimentos sob a ótica da literatura. Na terceira seção apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. A quarta seção apresenta o desenvolvimento da pesquisa, onde é abordado o objeto de estudo, os métodos de tratamento de dados utilizados, os modelos adotados e a sua variação. A quinta seção apresenta as análises e os resultados obtidos. Por fim, na sexta seção é feita uma conclusão do trabalho apresentando os impactos causados pela alteração no processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos que serviram de direcionamento para o desenvolvimento do trabalho. Uma revisão bibliográfica foi realizada contendo temas referentes ao amplo processo siderúrgico e as suas possíveis variações, abordando conceitos e definições sobre as etapas existentes no processo, e destacando o subsistema principal que será enfoque deste estudo.

Será apresentada uma contextualização sobre simulação e as metodologias utilizadas. Um pequeno histórico sobre o uso de simulação para processos siderúrgicos e a utilização do *software* ARENA.

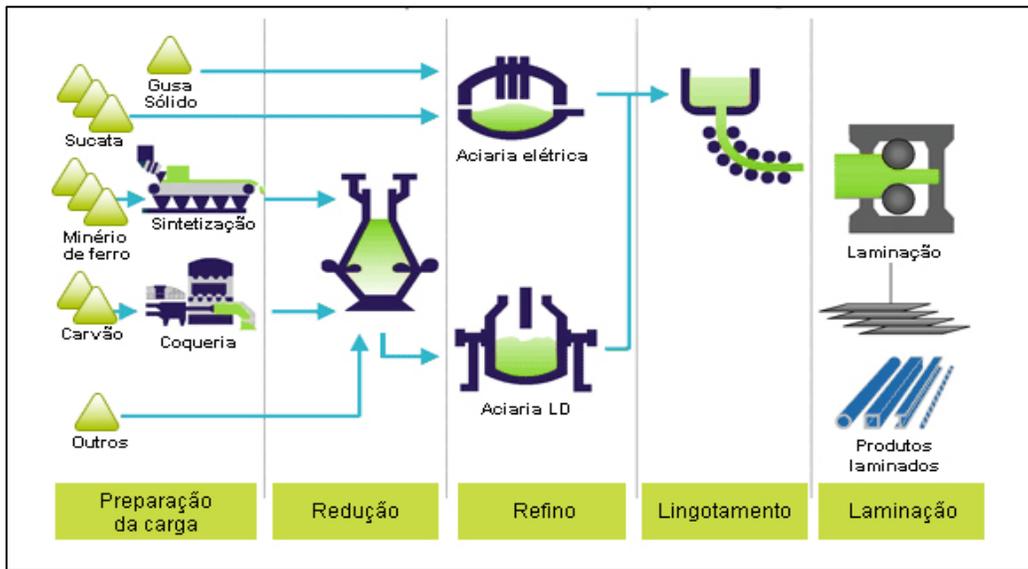
2.1 Descrição geral do sistema

O aço consiste basicamente na liga de ferro e carbono, onde estes dois elementos podem ser encontrados em abundância na natureza (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015). Para Lobato (2014) o aço se trata de uma liga metálica de ferro carbono que pode ser produzida por processos que podem seguir duas rotas distintas. Estas duas rotas são as usinas que utilizam alto-forno para obtenção do aço denominadas de usinas integradas, e as que possuem aciaria elétrica são chamadas de usinas semi-integradas (LOBATO, 2014).

Segundo o IABr (2015) as usinas siderúrgicas que operam em duas fases básicas, sendo elas refino e laminação, partindo de aquisição de matérias-primas (ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica) para transformá-los em aço nas aciarias elétricas e depois realizar a laminação são chamadas de semi-integradas. Porém aquelas usinas que operam em três fases de produção (redução, refino e laminação), participando de todo o processo produtivo do aço, são denominadas integradas. Como o desenvolvimento do trabalho será realizado em uma usina integrada, a descrição do processo produtivo levará em conta a produção de aço para este tipo de organização, cujo o mesmo pode ser visualizado na Figura 1.

Em termos de etapas do processo produtivo do aço existem algumas divisões em macroprocessos, embora alguns autores entrem em divergência no momento de realizar esta divisão, grande parte apresentam a descrição do processo compreendendo todas as etapas necessárias.

Figura 1 - Fluxo simplificado de Produção



Fonte: Instituto Aço Brasil (2015)

Ribeiro (2010) realiza essa divisão em cinco etapas (mineração, preparação de minérios, redução do minério, refino do aço e laminação). Todavia para o IABr (2015) o processo produtivo é dividido em preparação da carga, redução, refino e laminação.

2.1.1 Mineração

A mineração consiste na extração do minério da natureza, ocorrendo em minas a céu aberto com a utilização de material apropriado para a realização da retirada (RIBEIRO, 2010).

2.1.2 Sinterização

Segundo Sato (2007) o processo de sinterização é realizado aglomerando o minério de ferro fino e obtendo como resultado final a sinter, material que serve como componente da carga metálica para alimentar o alto-forno. Para Mourão (2007) essa aglomeração aumenta o aproveitamento do material e melhora o seu manuseio.

Esse processo consiste na mistura e homogeneização de materiais finos, de maneira que através da união destas partículas haja a formação de um material que apresenta resistência e porosidade denominado sinter (MACHADO *et al.* 2003).

2.1.3 Redução

O processo de redução ocorre nos altos-fornos, e é responsável pela geração do ferro gusa, por meio da redução do minério de ferro e a separação do metal das impurezas (RIBEIRO, 2010). O alto-forno é um reator tubular que realiza a redução de maneira contínua, utilizando o carbono como agente redutor (SATO, 2007).

Para que o ferro gusa gerado no alto-forno apresente a composição ideal para seu refino na aciaria, é necessário que o mesmo passe por um processo intermediário denominado dessulfuração. Esse processo é realizado entre a redução e o refino, por ser este o momento mais adequado, uma vez que, realizado em outro momento implicará em maior custo e perda de qualidade (BARÃO, 2014).

2.1.4 Refino

Dentro do macroprocesso de refino podemos dizer que o mesmo é dividido em outros três subprocessos, que serão descritos nos subtópicos posteriores.

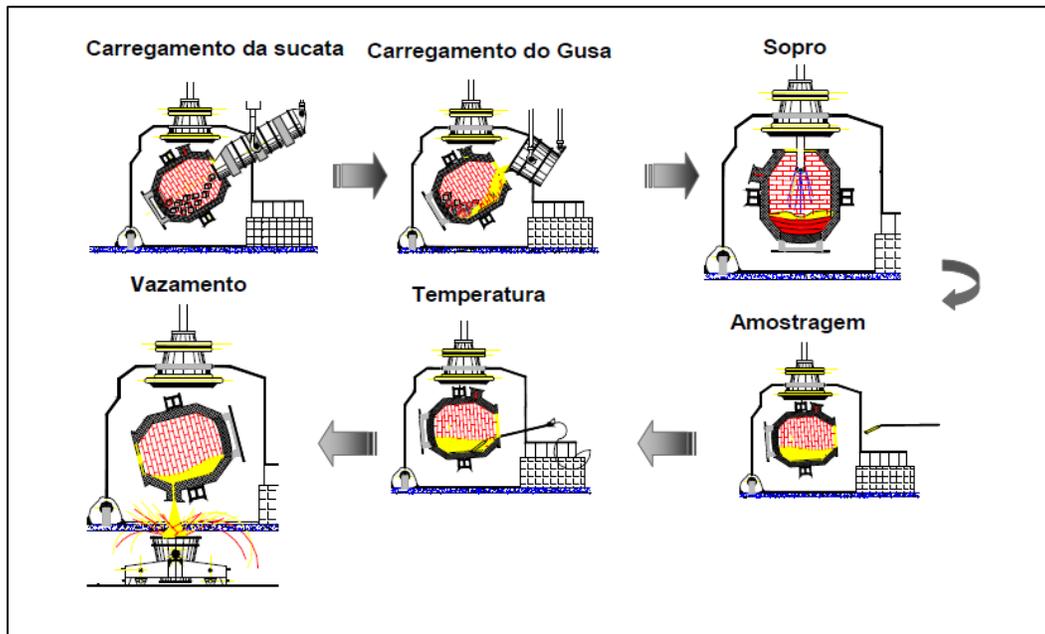
2.1.4.1 Refino primário

O processo de refino primário é o ponto de partida para obtenção do aço líquido. Em termos de volume de produção existem apenas dois processos capazes de realizar este refino inicial, que são os processos BOF (*Basic Oxygen Furnace*) e o forno elétrico, diferenciando-se pelo tipo de carga e quantidade de energia utilizado (GONÇALVES, 2010).

Nessa etapa do processo produtivo é que ocorre a transformação da carga metálica composta por ferro gusa e sucata em aço líquido, através da injeção de oxigênio na superfície do banho metálico dentro do convertedor (BARÃO, 2014).

O convertedor se trata de um equipamento de aço, que possui um revestimento refratário, fechado na parte inferior e aberto na parte superior, além disso o mesmo possui um mecanismo capaz de realizar o seu basculamento em 360°, e colocá-lo em diferentes posições, conforme ilustrado na Figura 2 (JÚNIOR, 2013).

Figura 2 - Etapas de atividades feitas no Convertedor



Fonte: Júnior (2013)

2.1.4.2 Refino secundário

O refino secundário pode ser definido, como a etapa do processo de fabricação do aço onde ocorre o trabalho metalúrgico de refino ou ajuste da composição química e da temperatura em uma estação secundária (MACHADO *et al.* 2003).

No sistema em estudo a estação de refino secundário é composto por um equipamento denominado forno-painel. Este equipamento é um forno trifásico, onde os três eletrodos que o compõem formam arcos voltaicos na superfície do aço contido na panela (BARÃO, 2014).

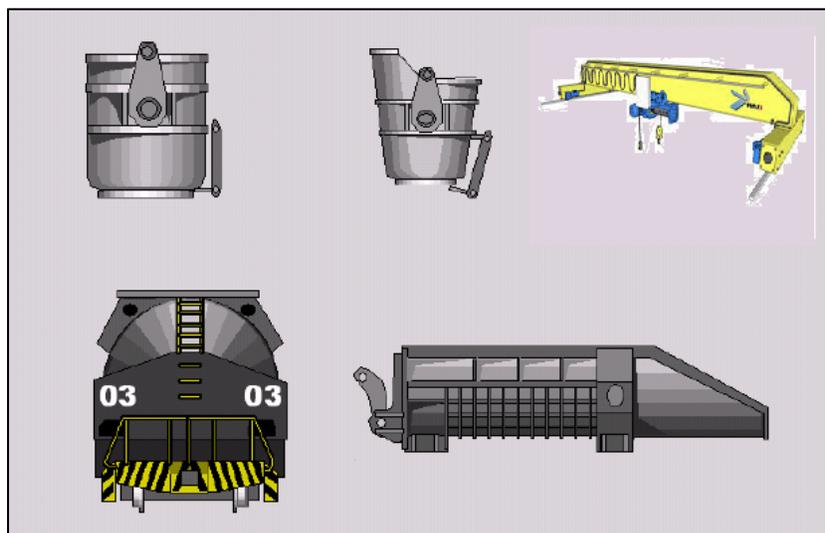
2.1.4.3 Lingotamento contínuo

Após o acerto realizado durante o refino secundário a panela de aço é levada para máquina de lingotamento contínuo. A máquina é um equipamento que realiza o processo de solidificação por intermédio do vazamento do aço líquido em moldes refrigerados por água, formando barras de aço que são chamadas de tarugos (SATO, 2007).

2.1.4.4 Equipamentos auxiliares

Para que o funcionamento da aciaria ocorra de maneira segura e eficiente, se faz necessária a utilização de alguns equipamentos auxiliares que permitem o deslocamento dos insumos de elevadas temperaturas durante o processo (BARÃO, 2014). A Figura 3 mostra esquematicamente estes equipamentos.

Figura 3 - Equipamentos Auxiliares



Fonte: Adaptado de Barão (2014)

Barão (2014) ainda descreve as características e funcionalidades de cada um deles:

- ✓ Carro-torpedo: são responsáveis pelo deslocamento do ferro gusa do alto-forno até a aciaria;
- ✓ Panela de Gusa: também feita de aço e revestida de refratário, tem a função de receber o ferro gusa basculado pelo carro-torpedo quando o mesmo chega na aciaria advindo do alto-forno, e carregá-lo até os convertedores;
- ✓ Caixa de Sucata: Feita de aço, seu tamanho deve ser compatível com a abertura superior do convertedor, e realiza o deslocamento da carga metálica sólida (sucatas) para serem carregadas nos convertedores;
- ✓ Panela de Aço: é feita de aço e revestida de material refratário, possui inferiormente uma válvula para controle de abertura para escoamento do aço durante o

lingotamento. Recipiente responsável por deslocar com o aço desde o fim do refino primário até o lingotamento contínuo;

- ✓ Ponte Rolante: é o equipamento de içamento responsável pelo deslocamento da panela de gusa e caixa de sucata para serem carregadas no convertedor, tem a função de movimentar a panela de aço da estação de refino secundário até a máquina de lingotamento.

2.1.5 Laminação

A laminação é um processo que pode ser realizado a quente ou a frio, que tem por finalidade fazer a conformação mecânica do material, forçando-o a passar por dois cilindros giratórios por mais de uma vez. É nesse processo que os produtos semiacabados (tarugos), são transformados em produtos acabados que devem atender as especificações dos clientes (MACHADO *et al.* 2003).

2.2 Simulação

A necessidade das empresas em aperfeiçoar seus processos e solucionar problemas, tem gerado um aumento na demanda pelo uso de ferramentas que sejam capazes de auxiliar decisões. A utilização de testes empíricos normalmente apresenta um elevado grau de complexidade, dessa forma a simulação apresenta-se como uma técnica viável para estudar sistemas, modelando-os de maneira lógica e matemática passíveis de serem testados em computadores.

Segundo Aragão (2011), modelagem de sistemas de simulação computacional vem se tornando cada vez mais usual, por ser uma grande aliada dos especialistas para a tomada de decisões referentes a melhoria de qualidade e gerenciamento da produção. Tal usualidade pode ser atribuída a este método porque os aplicativos permitem a construção de modelos de processo, juntamente com a atribuição gráfica que demonstra visualmente o comportamento da simulação (COSHTHEK, 2008).

O termo simulação pode ser classificado em duas perspectivas, a simulação computacional e a simulação não computacional. A primeira pode ser considerada o método que há a

necessidade da utilização dos computadores para ser desenvolvida, já a segunda exclui-se o uso de tal ferramenta (CHWIF e MEDINA, 2010).

Kelton et al. (2002) faz referência a classificação de modelos de simulação por três perspectivas distintas que estão relacionadas ao comportamento dos mesmos, e os classificam e apresentam as suas distinções:

- ✓ Estático versus dinâmico: no modelo estático as mudanças de estado não envolvem tempos, já em modelos dinâmicos o decorrer do tempo é fator relevante para que ocorram mudanças e estado no processo;
- ✓ Determinístico versus estocástico: estes modelos se diferenciam pelo comportamento das variáveis existentes, enquanto modelos determinísticos possuem variáveis não aleatórias, os modelos estocásticos possuem variáveis que apresentam flutuações de valores, ou seja, são aleatórias;
- ✓ Contínuos versus discreto: sistemas contínuos são aqueles em que as variáveis existentes e o estado do sistema podem sofrer variações ao longo do tempo, os modelos discretos apresentam mudanças em espaços temporais distintos, e este trabalho faz o uso deste tipo de modelo.

Alguns conceitos são essenciais para se compreender tecnicamente a simulação computacional, sendo eles sistema e modelo. De acordo com Kelton et. al (2002) um mecanismo ou processo que apresenta as mais variadas características, seja ele real ou projetado, pode ser definido como um sistema. Qualquer ambiente no qual seja possível identificar uma ação em que os envolvidos contribuam de maneira direta ou indireta para se obter um resultado final pode ser denominado de sistema (ARAGÃO, 2011).

Brito e Feliz (2001), define o modelo como uma representação de um objeto passível de análise, que apresenta em seus resultados incertezas por se tratar de uma “aproximação” do sistema real. Para Aragão (2011) um modelo deve conter informações claras e objetivas, de maneira que o mesmo seja suficiente para realização da análise, por isso as informações irrelevantes devem ser omitidas.

2.2.1 Terminologias básicas utilizadas na simulação

Apesar de apresentar em seu trabalho terminologias referentes a simulação, Pereira (2006) enfatiza a falta de padronização na utilização de tais terminologias. Freitas (2001), Carson (2004), Pereira (2006) e Kelton *et al.* (2010), apresentam e conceituam estas terminologias:

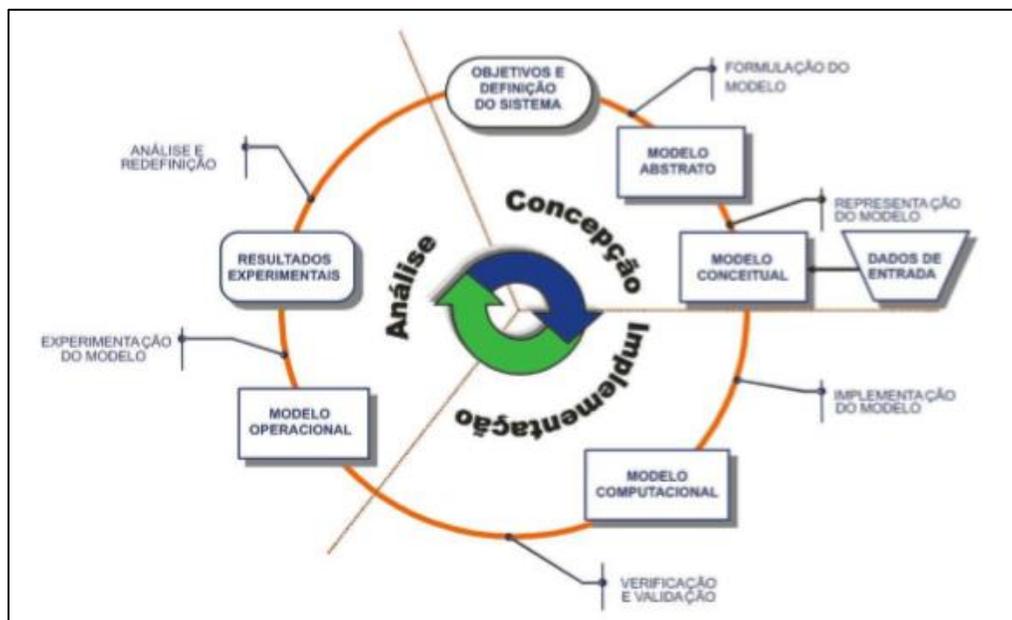
- ✓ Entidade: é objeto do modelo. O sistema é formado por um conjunto de entidades definidas, que pode se mover pelo sistema ou permanecer estáticas. Afeta e pode ser afetada por outra entidade, fator este que a torna uma influenciadora do sistema;
- ✓ Atributo: são dados que atribuem características as entidades, por serem parte das variáveis do sistema;
- ✓ Variáveis de Estado: constituem o conjunto de variáveis necessárias para compreensão do sistema num determinado instante;
- ✓ Eventos: são ações que podem ser programadas, ou não, que quando ocorrem acarretam em alterações de estado do sistema, por exemplo, a chegada de clientes e o término do atendimento;
- ✓ Recursos: são entidades estáticas que se relaciona com as entidades dinâmicas por meio da realização de atividades. São também locais alocadores temporais de entidades enquanto estas se movimentam no sistema.
- ✓ Filas de Recursos: locais no modelo onde as entidades aguardam para utilizar um recurso que esteja ocupado. O fluxo das entidades após a entrarem na fila podem ser gerenciadas de diferentes modos, de acordo com os critérios de operação. A forma mais comum é a FIFO (*First In First Out*), porém existe LIFO (*Last In First Out*);
- ✓ Contadores: são acumuladores de valores no tempo, programáveis, que permitem a medição estatística do sistema;
- ✓ Atividades: são intervalos de tempos predeterminados antes da sua operação, que possui finais que podem ser programados. O seu início e fim sempre estão associados a algum evento.

2.2.2 Metodologia de simulação

A simulação não está restrita somente ao modelo computacional elaborado, existem outras atividades para o estudo da simulação classificadas por Medina e Chwif (2007) em três grandes etapas apresentadas esquematicamente na Figura 4, e descritas abaixo:

- ✓ **Concepção ou formulação do modelo:** nesta etapa há a busca de entendimento por meio de análises do sistema a ser simulado e a sua finalidade, inicia-se a criação do escopo do modelo, e seus detalhes. A coleta dos dados é efetuada, e então o modelo conceitual é criado para facilitar o entendimento do todo.
- ✓ **Implementação do Modelo:** nessa etapa ocorre a conversão do modelo conceitual em modelo computacional, utilizando alguma linguagem capaz de ser simulada. Após essa conversão deve ser realizada a comparação entre os modelos, buscando a validação e verificação do mesmo, sendo que a validação só ocorre quando o modelo reflete a realidade.
- ✓ **Análise dos resultados do modelo:** Neste momento o modelo já se encontra finalizado e apto para ser testado, portanto é inicializada a experimentação e o modelo passa a ser denominado operacional. Se os resultados obtidos não transparecerem análises satisfatórias, o modelo pode ser alterado, iniciando assim o ciclo de desenvolvimento.

Figura 4 - Metodologia de Simulação



Fonte: Medina e Chwif (2007)

2.3 Softwares utilizados para simulação

A popularização dos *softwares* de simulação entre grandes empresas tem aumentado, pois diversos *softwares* de simulação são comercializados no mercado, e os mesmos abrangem diversas áreas de aplicações.

Segundo levantamento realizado *Institute for Operations Research and Management Sciences* – INFORMS, publicado na revista *OR/MS* (2017), há 44 produtos no mercado que são executados em computadores pessoais para a simulação de eventos discretos, sendo eles de 26 fornecedores distintos. Vale ressaltar que para este levantamento foram desconsiderados produtos que possuem como capacidade principal a simulação de eventos contínuos. Entre os simuladores de eventos discretos destacam-se o *Arena* e o *ProModel*, como sendo os mais utilizados para aplicações empresariais e acadêmicas.

O *software Arena* desenvolvido pela *Rockwell Automation* e comercializado pela *Paragon Decision Science*, é baseado na linguagem de simulação SIMAN e permite a modelagem e simulação para diversos setores, uma vez que, através do mesmo é possível projetar e analisar mudanças significativas e complexas associadas a fabricação, logística, processos e serviços (*Rockwell Automation*, 2010).

O *ProModel* é desenvolvido pela *ProModel Corporation*, sendo utilizado para planejar e projetar sistemas de manufatura, transportes e sistemas operacionais existentes ou criados, permitindo a representação precisa do sistema, incluindo sua variabilidade e interdependência (*ProModel Guide's*, 2015).

2.4 Simulação de processos siderúrgicos

A simulação de processos voltados para a siderurgia vem ganhando bastante relevância, uma vez que, os processos envolvidos nesse setor possuem equipamentos de grande porte, elevado custo e complexidade, portanto simular tais processos trazem vantagens significativas para as empresas do setor.

Estudos nesta área, em suma maioria envolve alterações de processos, implementação de equipamentos, expansões de unidade que visam aumentar a produção, ou seja, são alterações potenciais para exercer forte impacto nas atividades operacionais das indústrias do setor.

Silva (2007) utiliza a simulação computacional no *Arena* para avaliar a capacidade do sistema de transporte de ferro gusa instalado, relacionando-o com a produtividade atual da empresa, visando a redução de desperdícios inerentes ao processo.

A utilização de diversos *softwares* para aplicação em processos siderúrgicos é levantada em um estudo realizado por Costhek (2008), onde há a busca pelo mais adequado para a simulação da produção da aciaria de uma empresa existente, que possibilite a análise dos impactos causados pelo aumento da produção no alto-forno, onde o autor seleciona o *ProModel* como o mais indicado.

Seguindo a mesma abordagem levantada acima, onde se busca realizar a simulação dos processos de uma aciaria, Maia (2008) realiza a simulação do macroprocesso (refino primário, refino secundário e lingotamento contínuo), levantando variáveis de composição química do ferro gusa para se chegar a valores de aço produzidos.

3 METODOLOGIA

O estudo desenvolvido busca compreender os impactos causados pela integração do processo de dessulfuração do ferro gusa líquido à aciaria de uma usina siderúrgica integrada, mais especificamente no processo de refino primário do aço que ocorre nos convertedores. Ou seja, há a intenção de obter dados referentes a este impacto na utilização de equipamentos, transportadores e tempos de processamento.

Por se tratar de uma aplicação prática de métodos em que os resultados se tratam de conhecimentos que serão utilizados para análise e resolução de situações reais e específicas, esse tipo de pesquisa segundo Turrioni e Melo (2012) e Silva (2005) pode ser classificada quanto a sua natureza como uma pesquisa aplicada.

A pesquisa tem como objetivo buscar um maior entendimento do objeto alvo, através de um estudo preliminar feito pelo levantamento realizado pelo investigador para tornar o problema explícito, e tornar possível descrever as características e relações existentes no ambiente estudado por meio de coleta e análise de um número amplo de informações. Segundo Silva e Menezes (2000) a pesquisa descritiva busca descrever as características de uma determinada população ou fenômeno, e as relações estabelecidas entre as variáveis do sistema. Para Turrioni e Melo (2012) a pesquisa descritiva tem por objetivo descrever de forma concisa o problema tratado e as características de determinada população ou fenômeno, e as relações existentes utilizando-se de técnicas padronizadas de coletas de dados.

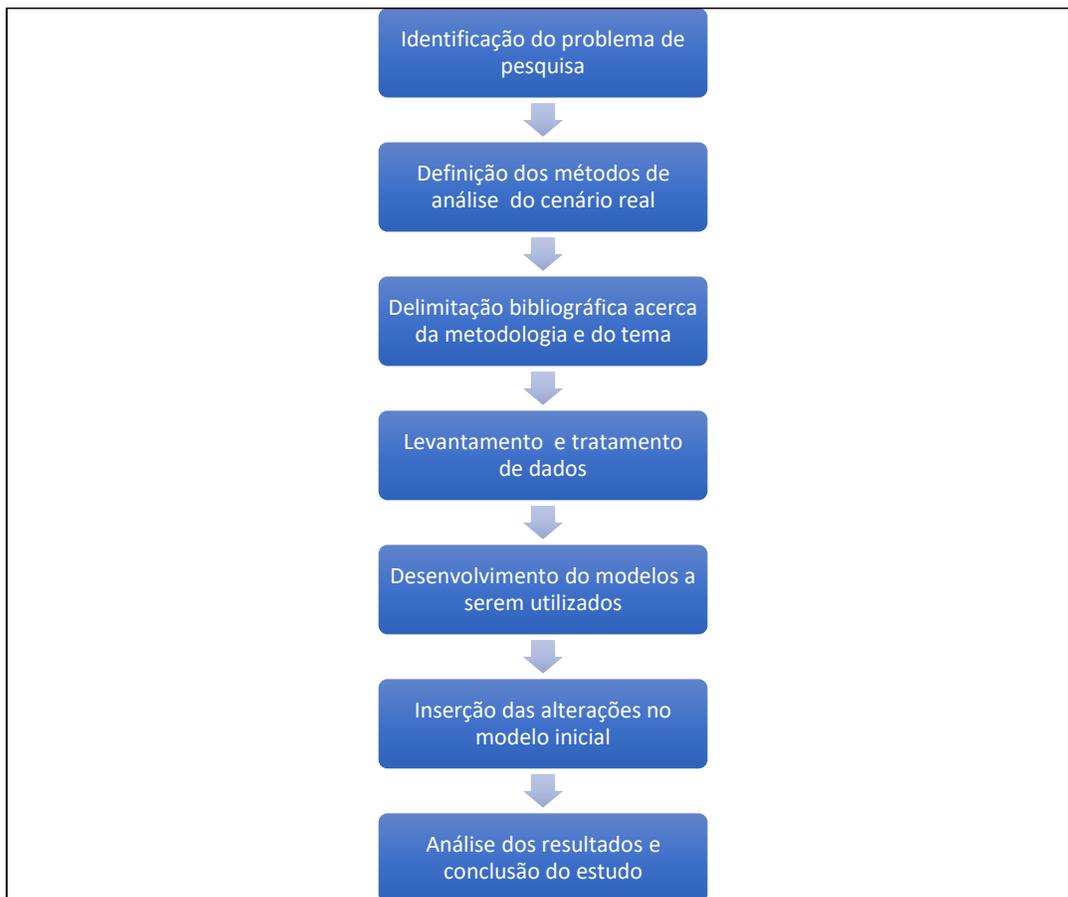
Quanto a sua abordagem, a pesquisa será tratada de forma quantitativa, sendo utilizado métodos para obtenção de resultados que possam ser quantificados e tenham aspectos mensuráveis. Turrioni e Melo (2012) afirmam que a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, ou seja, é possível traduzir informações e opiniões em números para classificá-las e analisá-las, onde para isso se faz necessário o uso de recursos e técnicas estatísticas. Este tipo de abordagem faz o uso de uma linguagem matemática para descrever as causas que levam a um determinado fenômeno, analisar as causas e efeitos existentes entre as variáveis, eliminar o subjetivismo na interpretação dos dados.

Do ponto de vista dos métodos a serem utilizados a pesquisa será feita através da modelagem e simulação, uma vez que busca simular computacionalmente um problema real da indústria

siderúrgica. Para Turrioni e Melo (2012) este tipo de pesquisa é utilizado quando se deseja realizar testes em um sistema real, através de um modelo, efetuando alterações e observando como o mesmo irá responder.

Para a execução do trabalho seguindo as classificações determinadas acima, foi elaborado um plano contendo os passos essenciais para o desenvolvimento do mesmo como pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Etapas de execução do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para a produção do aço, produto final da aciaria, os insumos devem passar por processamentos em recursos ao longo do processo. O ferro gusa é proveniente do alto-forno, e passa pelo processo de dessulfuração para a redução do percentual de fósforo antes de ser encaminhado para a aciaria. Por medidas de segurança, para ser recebido na aciaria a boca do carro-torpedo deve passar por uma limpeza na estação de limpeza de torpedo (ELT). Após ser recebido na aciaria o carro-torpedo será basculado na estação de recebimento de gusa (EBG), este é o local onde se realiza a transferência do material do carro-torpedo para a panela de gusa. Após o carregamento da panela de gusa a mesma segue para o raspador, onde será retirada a escória em excesso do material, tornando assim o ferro gusa apto para ser carregado e processado no convertedor.

Paralelo ao processamento do ferro gusa, temos um processo menos complexo que é o processamento da sucata. A sucata está alocada em um espaço denominado Pátio de Sucata, neste local é feito o carregamento das caixas de sucata, tais caixas são as responsáveis por deslocar este insumo até o seu carregamento no convertedor.

Com a disponibilidade dos dois insumos inicia-se o carregamento do convertedor, todavia os dois convertedores existentes não operam de maneira simultânea seguindo diretrizes estratégicas, uma vez que, por limitações existentes nos recursos e capacidade de recebimento de gusa, não é viável a operação simultânea. Desta forma o fluxo do processo segue caminhos distintos, conforme a disponibilidade de material e convertedor.

4.2 Modelagem dos dados de entrada

Nesta seção, o objetivo é realizar a modelagem dos dados do processo, a fim de se obter modelos estatísticos que possibilitem a inferir acerca da aleatoriedade do sistema em estudo. No sistema analisado há diversos fenômenos que sofrem aleatoriedade, uma vez que, os processos da cadeia produtiva não ocorrem em intervalos constantes de tempo. Dessa forma, a modelagem dos dados do sistema pode ser dividida em três macro etapas, coleta, tratamento e descrição dos dados.

4.2.1 Coleta de dados

Os dados coletados para se realizar a simulação foram baseados em um processo produtivo de uma usina siderúrgica, onde foi utilizado um fator multiplicador comum que não exerce influência significativa nas análises realizadas. A aleatoriedade dos dados para cada processo do fluxo produtivo obedece a funções que buscam descrever os tempos revelados pela literatura para boa execução do processo, alinhando-os com valores reais das indústrias.

A coleta dos dados obedeceu a escolha das variáveis de entrada do sistema descritas abaixo:

- ✓ Tempo entre liberações sucessivas de carros-torpedo por parte do alto-forno;
- ✓ Tempo de limpeza gasto na ELT;
- ✓ Tempo gasto para esvaziar um torpedo e encher uma panela de gusa na EBG;
- ✓ Tempo de carregamento das caixas de sucatas no pátio de sucata;
- ✓ Tempo de ciclo de liberação de sucata;
- ✓ Tempo gasto para o processo de raspagem de escória;
- ✓ Tempo de processamento de insumos em cada convertedor;
- ✓ Quantidade de corridas que determinam o intervalo de trocas recomendados para cada convertedor;
- ✓ Quantidade de corridas que definem a troca de furo de corrida.

Por se tratar de um fluxo produtivo contínuo, onde os requisitos técnicos e a padronização são características predominantes para a produção, fatores como horário e colaboradores envolvidos não possuem influencia capaz de alterar tais variáveis de maneira significativa, portanto as funções estatísticas tratarão o sistema de maneira única.

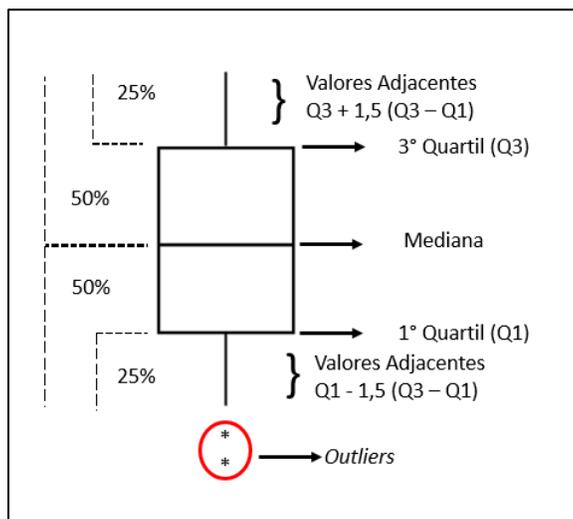
4.2.2 Tratamento dos dados

Esta etapa da modelagem busca compreender melhor o sistema por meio de uma descrição estatística dos dados. O *software* estatístico utilizado para fazer o tratamento dos dados foi o *Minitab* 18, com o auxílio do mesmo foi possível identificar os valores que podem significar erros de operações ou aumento na variabilidade do processo, ou seja, os *outliers* do processo. A escolha pela retirada dos dados considerados *outliers*, é justificada pela interferência direta de operadores e sensores na coleta dos dados que são enviados para o sistema de controle,

onde a falha impacta diretamente em dados fora da conformidade do processo. O software foi utilizado também para identificar as medidas de posição e dispersão de cada conjunto de dados observados.

Para detectar os *outliers* a ferramenta utilizada foi o modelo gráfico *boxplot*, que permite também visualizar a medida de tendência central, dispersão, simetria ou assimetria. A construção do método gráfico realiza a distribuição ordenada dos dados em quatro partes iguais. Graficamente o *boxplot* é constituído por uma caixa atravessada por uma linha, com representações que apresentam visualmente as características dos dados, conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Representação gráfica do *Boxplot*



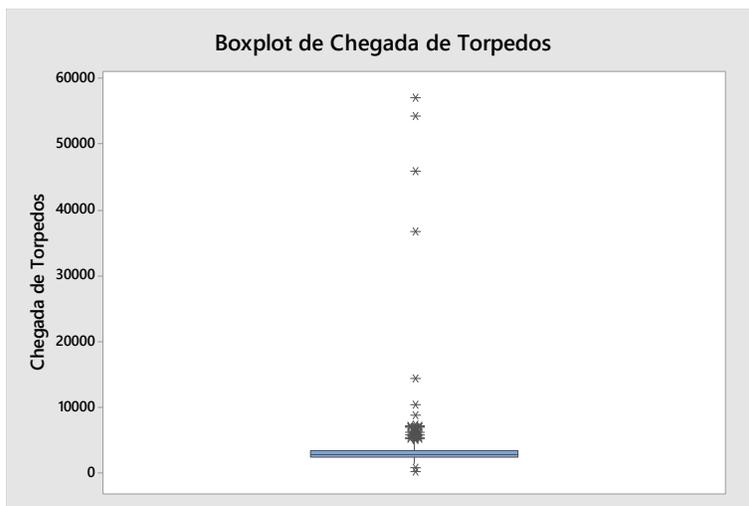
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Com o *software Minitab 18*, foi gerado gráfico boxplot para cada conjunto de dados do processo estudado como pode-se observar nos gráficos 1 a 6, a fim de se observar a existência de outliers existentes. Observa-se que a quantidade de valores considerados *outliers* representam uma parcela pequena da amostra, portanto torna-se viável desprezá-los, pois apresentam uma assimetria com os demais dados de cada conjunto.

No Gráfico 1 é apresentado a distribuição dos tempos referentes a liberação de carros-torpedos carregados no alto-forno que são enviados para processamento antes de chegar à aciaria. Os tempos apresentam uma variabilidade pequena, onde os dados que são

considerados *outliers* são advindos de paradas corretivas ou preventivas realizadas no alto-forno.

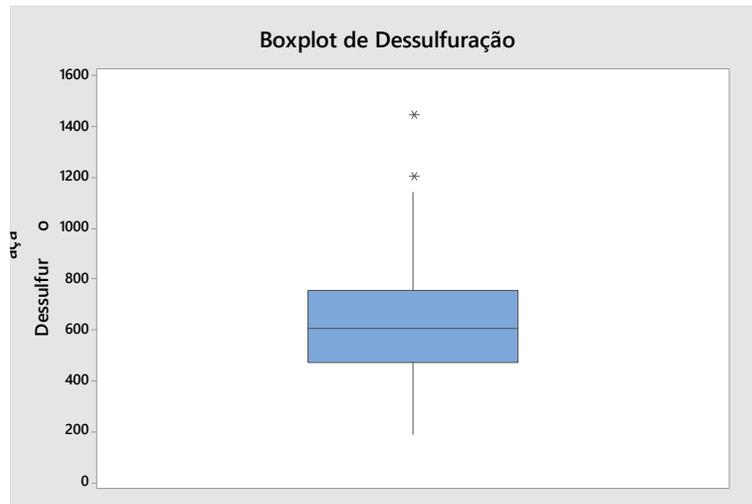
Gráfico 1- *Bloxplot* do intervalo de chegada dos carros-torpedo



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

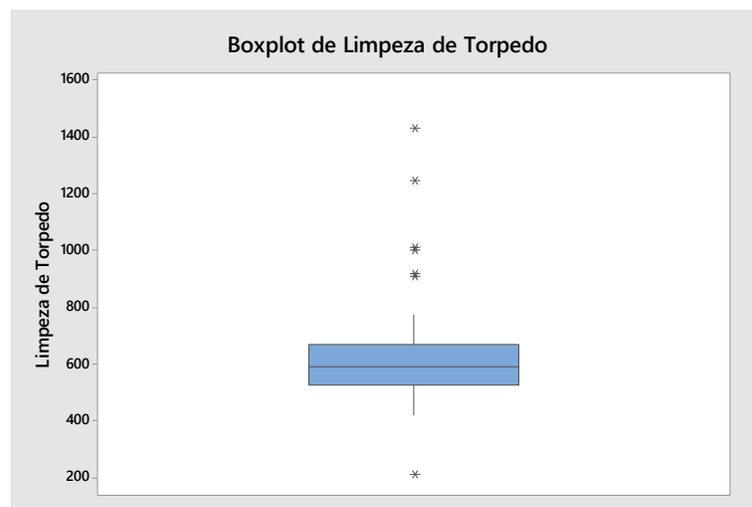
Os Gráficos 2 e 3, representam a distribuição de tempos referentes ao processo de dessulfuração e limpeza de boca nos carros-torpedos respectivamente, onde o objetivo principal da primeira é realizar a retirada do enxofre do ferro gusa, e a segunda representa a limpeza da boca para facilitar o basculamento na EBG. Ambos processos apresentam baixa variabilidade, uma vez que, os procedimentos realizados em cada operação são padronizados e o volume processado é semelhante. Os pontos de anomalia para este processo normalmente são advindos da variação da composição química do material processado, o que impacta diretamente nos procedimentos operacionais em tais estações de operação.

Gráfico 2 - *Boxplot* dos tempos de processamento na estação de dessulfuração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

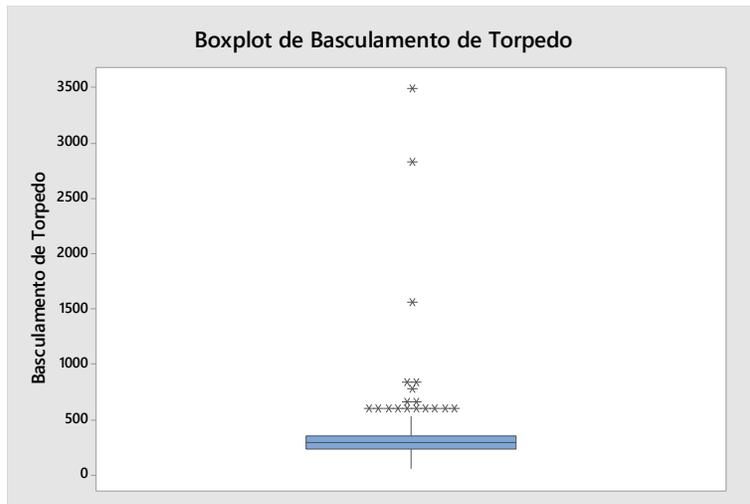
Gráfico 3 - *Boxplot* do tempo necessário para limpeza da bocados carros-torpedos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tempos de basculamento dos carros-torpedo representados no Gráfico 4, é um procedimento altamente padronizado devido ao risco que o mesmo oferece para os operadores e a quantidade de material que é descarregado na panela, portanto há uma baixa variabilidade no processo, e os outliers encontrados são provenientes em sua maioria de atrasos de operação, ou má qualidade na operação anterior.

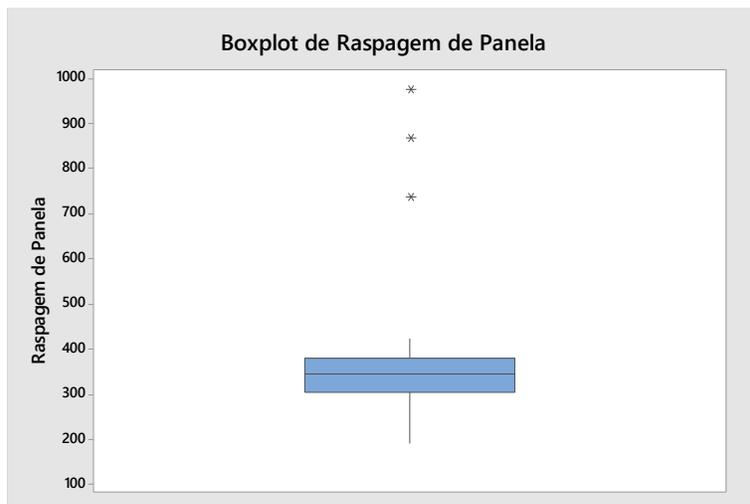
Gráfico 4 - *Boxplot* do tempo de basculamento na EBG.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Como os demais procedimentos da produção de aço a raspagem de escória na panela possui uma margem de tempo de processamento estável, e as anomalias encontradas conforme pode ser observado no Gráfico 5 advém de atrasos na operação da aciaria.

Gráfico 5 - *Boxplot* do tempo necessário para realização da raspagem de escória

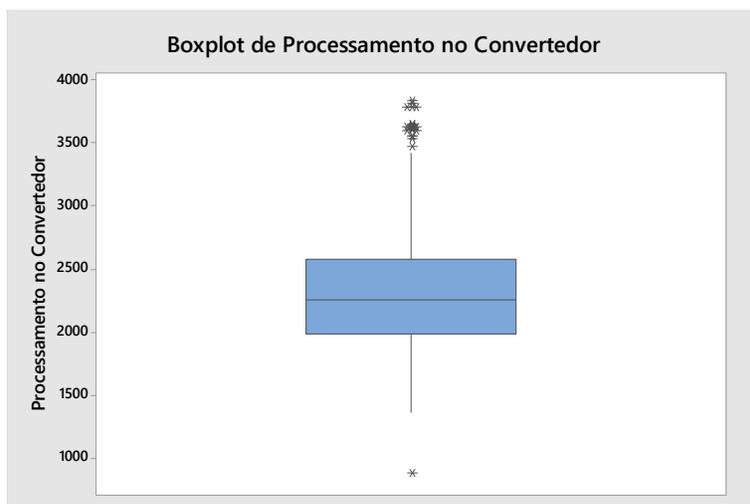


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O principal processo de transformação na produção do aço que ocorre no convertidor é altamente padronizado, o que faz com que a variação existente no mesmo seja a menor possível. A instabilidade encontrada nesse processo pode ser proveniente da falta de

experiência do operador, ou da composição química dos insumos de entrada. Entretanto os dados coletados possuem uma baixa variabilidade, onde essa margem é proveniente dos tipos de aço processados, e podem ser visualizados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - *Boxplot* do tempo de processamento nos convertedores



Conforme citado acima, a análise *boxplot* possibilitou a retirada dos *outliers* encontrados, e os limites extremos, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos dados

	Quantidade de valores	Quantidade de <i>Outliers</i>	<i>Outliers</i> retirados
Liberção de Torpedos	700	43	768; 240; 5760; 6432; 5280; 5712; 54192; 5184; 6960; 6576; 14400; 5664; 5424; 5424; 8832; 6096; 5184; 5328; 5088; 7200; 5616; 10416; 36720; 6768; 6096; 6144; 6912; 6000; 6912; 45840; 5904; 5136; 7200; 5472; 6960; 6048; 5952; 7056; 7488; 56928; 6288; 5712; 5376
Dessulfuração	700	4	1200; 1443; 1145; 1043
Limpeza de Torpedos	700	7	230; 917; 908; 1013; 1002; 1247; 1431
Basculamento na EBG	700	19	60; 600; 66 ; 840; 840 ; 600; 1560; 600; 660; 600; 600; 3480; 600; 2820; 600; 780; 600; 600; 600
Raspagem de Escória	700	3	973; 865 ;734
Refino Primário	700	23	3589; 3574; 3457; 3338; 3618; 3547; 3612; 3731; 3895; 3854; 3597; 4532; 3891; 3515; 3729 3698; 3572 ;3599; 3603 ;3809 ;883

A Tabela 2 mostra as principais medidas de posição e dispersão dos conjuntos de dados referentes a cada etapa do processo apresentada acima.

Tabela 2 - Principais medidas estatísticas

	Medidas de Posição				Medidas de Dispersão			
	Média	Mediana	Limite Inferior	Limite Superior	Desvio Padrão	Variância	Assimetria	Coefficiente de Variação
Liberação de Torpedos	2999,7	2880	1488	5040	739,34	546629	0,568	24,65%
Dessulfuração	612,37	605,849	187	989	168,99	28556,8	0,0056	27,60%
Limpeza de Torpedos na ELT	597,28	592,083	421,292	775,805	86,001	7396,2	0,0845	14,40%
Basculamento na EBG	308,55	300	180	540	78,944	6232,15	1,052	25,59%
Raspagem de Escória	341,47	343,411	190	423,816	44,688	1997	-0,055	13,09%
Refino Primário	2276,3	2244	1362	3525	407,87	166356	0,256	17,92%

Analisando os dados de medidas apresentados temos uma variabilidade nos dados no que tange as medidas de posição, resultado esse já esperado, uma vez que, estamos realizando o tratamento e análise de dados referentes a processos distintos. A mesma característica se estende para as medidas de dispersão pelo mesmo motivo apresentado acima. O coeficiente de variação descreve uma homogeneidade dos dados, o que mostra que os processos possuem alta padronização de execução.

Após a retirada dos dados indesejáveis para a simulação do processo, foi realizada a identificação da distribuição de probabilidade que mais se adequa a representação do modelo para a produção de aço em uma aciaria. Para o cenário base, foi utilizada a ferramenta *Input Analyser* que está integrada ao *software Arena*, sendo que por meio da mesma foi possível obter histograma de cada amostra para se identificar quais são as duas distribuições de probabilidade que mais se ajusta ao sistema.

O teste de aderência nessa etapa é necessário para verificar se as distribuições encontradas são adequadas estatisticamente para representar os dados de coleta. A ferramenta *Input Analyser* que está integrada ao *software Arena*, faz o uso de dois testes de aderência, o teste

do qui-quadrado e o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, onde ambos fornecem um valor (p-valor) para ser utilizado como parâmetro de decisão. Segundo Chwif e Medina (2010, p. 42) esse parâmetro representa o nível de significância que pode-se assumir para rejeitar a hipótese nula, onde os graus de evidências e seus critérios são categorizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios utilizados para se classificar o p-valor

Valor	Critério
p-valor < 0,01	Evidência forte contra a hipótese de aderência
0,01 ≤ p-valor < 0,05	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
0,05 ≤ p-valor < 0,10	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
0,10 ≤ p-valor	Evidência fraca contra a hipótese de aderência

Fonte: Chwif e Medina (2010)

Na Tabela 4 são apresentadas as informações de ajuste de distribuição extraídos da ferramenta *Input Analyser* referente a cada processo analisado. O tipo de distribuição, erro quadrático e o p-valor correspondente ao teste qui-quadrado estão contidos nestas informações.

Tabela 4 - Informações de Ajuste

	Distribuição	Erro quadrático	p-valor
Liberção de Torpedos	Weibull	0.003113	< 0.005
Dessulfuração	Beta	0.002850	< 0.005
Limpeza de Torpedos na ELT	Beta	0.002083	= 0.0385
Basculamento na EBG	Normal	0.204329	< 0.005
Raspagem de Escória	Weibull	0.005491	< 0.005
Refino Primário	Beta	0.007566	< 0.005

4.3 Modelo conceitual

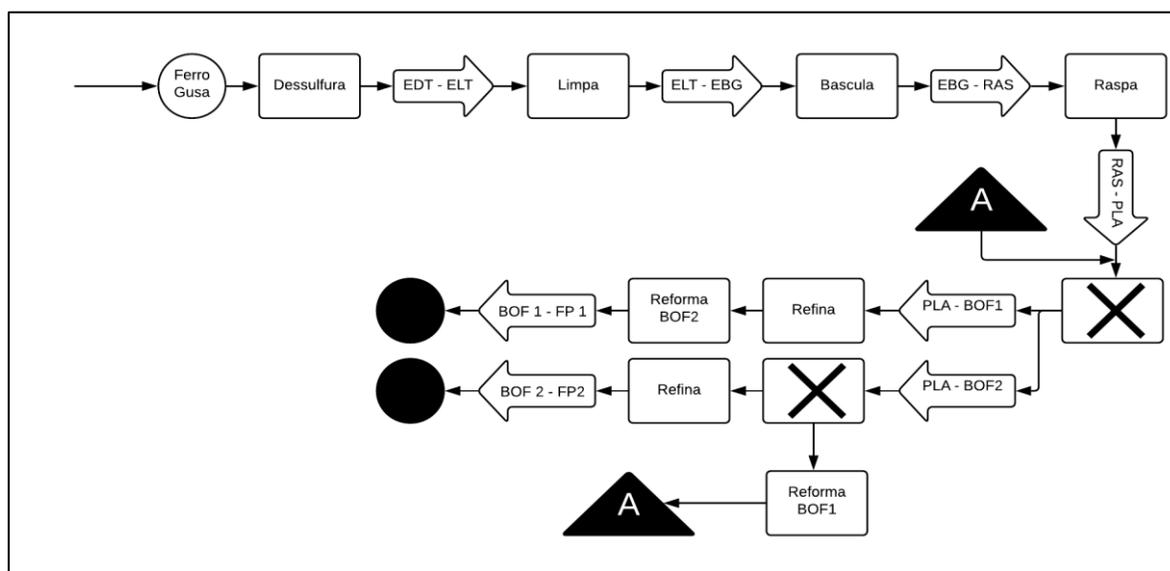
A modelagem do sistema conceitual por meio de representação se faz necessária devido a complexidade do sistema em estudo que ainda se encontra de maneira abstrata na mente de quem o desenvolve. A utilização de tal representação minimiza os erros referentes a descrição

do cenário real, isso possibilita a criação de maneira correta do modelo computacional posteriormente.

O modelo conceitual apresentado na figura 8 foi elaborado de acordo com a metodologia IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods - Simulation*), descrita por Leal *et al.* (2008) como uma técnica que mantém a lógica do modelo e possui foco na simulação de sistemas.

A representação dos trajetos que cada entidade percorre são representadas pelo modelo conceitual, e a saída de uma entidade pode ser diferente de uma outra. Apesar do fluxo ser semelhante para a entidade ao longo do processo, existem pontos de decisões durante o processamento, onde no modelo conceitual determina qual convertedor irá ser utilizado para refinar o ferro gusa, e se o mesmo deve aguardar a realização da troca do furo de corrida para iniciar o refino primário. É válido ressaltar que durante a confecção do modelo conceitual foi verificado que a inserção da entrada de do recurso sucata e os processamento que o mesmo ocorre não iria influenciar as demais operações, uma vez que, este tipo de indústria trata como inaceitável a falta deste recurso ao longo do processo. Portanto o processamento de tal recurso foi retirado do modelo, visando reduzir a complexidade do mesmo.

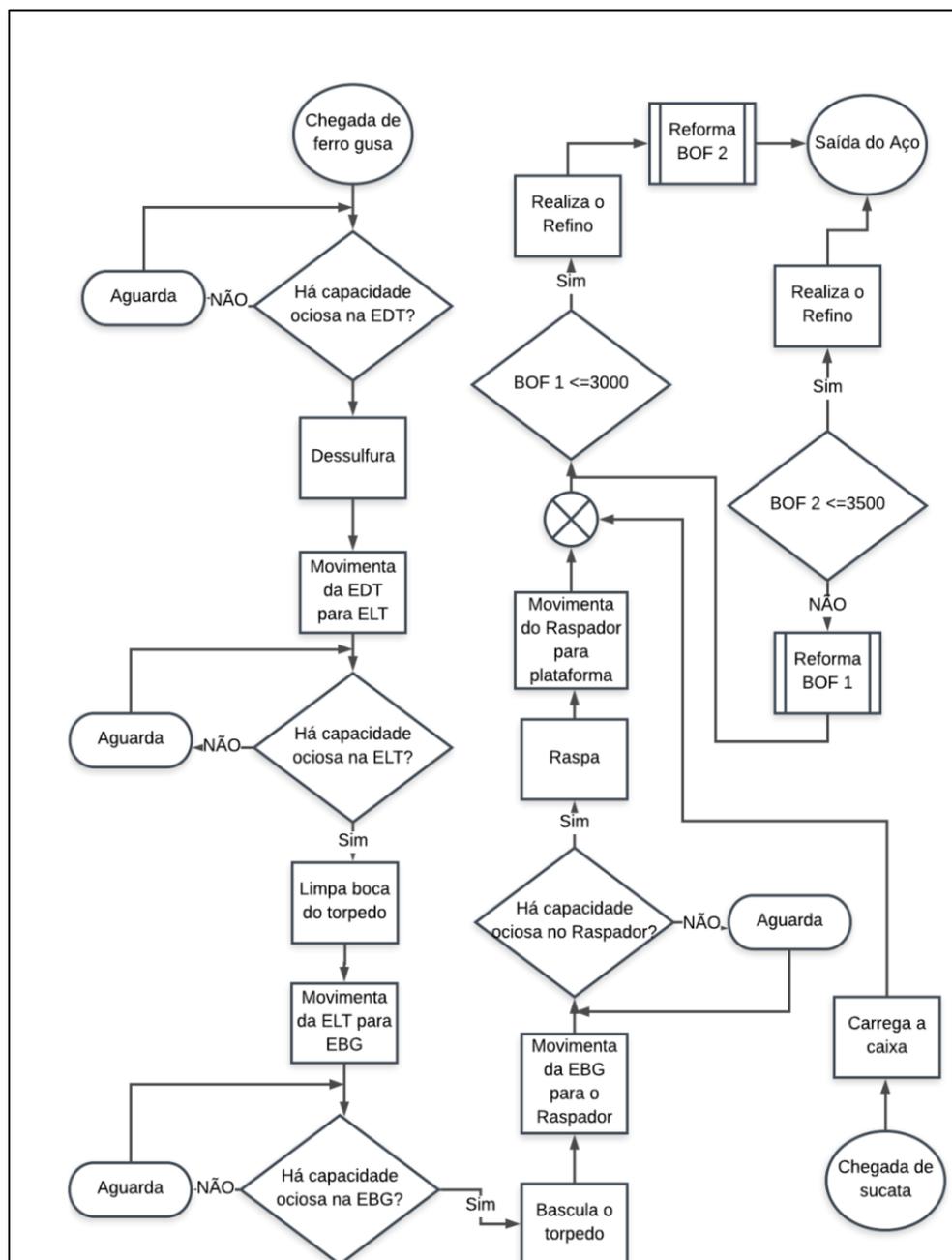
Figura 8 - Modelo Conceitual



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para facilitar a compreensão do fluxo do processo foi feito um fluxograma, como pode ser visualizado na Figura 9, buscando descrever os fluxos possíveis para as entidades entrantes no processo de produção, as decisões tomadas e alguns parâmetros inerentes ao fluxo produtivo analisado.

Figura 9 - Fluxograma do Processo



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

4.4 Modelo computacional

Com a construção do modelo conceitual foi possível entender o comportamento do sistema, o que possibilitou a construção do modelo computacional. O modelo foi desenvolvido e implementado no *software Arena*, e abrange o funcionamento de todas etapas do processo produtivo do aço, e o fluxo seguido pelas entidades ao longo de suas transformações.

Para a execução do modelo o mesmo foi parametrizado com as equações ajustadas na etapa de tratamento dos dados e que se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Funções de ajuste do modelo computacional.

	Equação
Liberação de Torpedos	$1.49e+003 + WEIB(1.69e+003, 2.1)$
Dessulfuração	$187 + 802 * BETA(2.41, 2.13)$
Limpeza de Torpedos na ELT	$421 + 355 * BETA(1.62, 1.64)$
Basculamento na EBG	$NORM(309, 78.9)$
Raspagem de Escória	$190 + WEIB(166, 3.72)$
Refino Primário	$1.36e+003 + 2.16e+003 * BETA(2.48, 3.38)$

A lógica elaborada para o sistema representada no modelo computacional e o modelo de animação, englobam o fluxo do ferro gusa e estão contidas no Apêndice A. O modelo gera a entrada das entidades no sistema pelo módulo *CREATE*. Durante o fluxo as entidades percorrem trechos de uma etapa de processamento a outra, estes deslocamentos das entidades são feitos pelos módulos *STATION* e *ROUTE*.

O modelo possui algumas restrições que influenciam no direcionamento das entidades ao longo do seu processamento, para isso o módulo *DECIDE* é utilizado, direcionando as entidades para serem processadas. Outra função desse módulo é realizar o direcionamento da entidade “ferro gusa”, para representar a parada no alto-forno que implica na parada total da aciaria.

Registros de informações são necessárias para que tais restrições sejam atendidas, portanto o módulo *ASSIGN* foi utilizado para fazer o registro das corridas realizadas nos dois convertedores e a contagem da vida do furo de corrida, bem como as reformas realizadas que

implicam em zeros a quantidade de tais itens. Este mesmo módulo foi utilizado para fazer a alteração na imagem de animação das entidades a medida que era processada nos recursos.

4.4.1 Restrições adicionais

Para melhor descrição do modelo algumas restrições adicionais foram necessárias. Estas restrições exercem influência considerável nos recursos, e conseqüentemente na capacidade de entidades processadas. A Tabela 6 expõe tais restrições, e as funções que lhes descrevem melhor.

Tabela 6- Funções adicionais de restrições.

	Equação
Parada do alto forno (intervalo)	NORM(30, 5)
Parada do alto-forno (duração)	NORM(10, 3)
Vida do BOF_1	NORM(3000, 100)
Vida do BOF_2	NORM(3500, 200)
Vida do Furo BOF_1	NORM(200, 20)
Vida do Furo BOF_2	NORM(250, 20)

As paradas do alto forno foram inseridas no modelo para representar as paradas para manutenção programada, uma vez que, tal parada se faz necessária para abrir uma margem de tempo suficiente para realizar manutenções para operação correta dos equipamentos do processo.

A vida dos convertedores, bem como, a vida dos furos representam a capacidade máxima de corridas que este equipamento pode realizar antes de se fazer uma parada obrigatória, seja esta parada para mudança do conversor de operação, ou parada para a troca do furo de corrida, onde para a última há a parada total do refino primário de aço na aciaria até que o mesmo esteja finalizado.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Testes Computacionais

Após o desenvolvimento do modelo computacional, os testes foram iniciados utilizando o *software Arena* na versão 15.00.00. Para a execução do modelo foi utilizado um Notebook com processador *Intel® Core™ i3 –M380 @ 2.53 GHz*, memória RAM instalada de 4GB, e sistema operacional *Windows 10 Home Insider Preview 64-bit*. Foram feitas 10 replicações, com um período de aquecimento de 180 dias, cada replicação com tempo de 1 ano além do aquecimento, e a unidade base de tempo em minutos.

5.2 Cenário Base

5.2.1 Verificação e Validação

A verificação busca fazer a relação entre o modelo computacional simulado no *software*, elaborado com base no modelo conceitual adotado, e as condições encontradas em situações reais. Portanto com a verificação foi possível visualizar que o comportamento do modelo e os resultados obtidos, estão muito próximos das condições reais, o que implica em uma verificação positiva do modelo.

Por ser um modelo de uma usina siderúrgica que apresenta muitas variáveis e características específicas, optou-se por fazer a validação com base em quantidades de corridas registradas. Desta forma foi utilizado a Equação 1, para se realizar o cálculo, a fim de se encontrar o erro relativo total do modelo, uma vez a quantidade de corridas feitas implica no ganho de produção esperado pelas indústrias.

$$\% \text{ Erro} = \frac{\text{Número médio de Corridas Reais} - \text{Número Médio de Corridas Simulado}}{\text{Número Médio de Corridas Simulado}} \quad (1)$$

$$\% \text{ Erro} = \frac{10879 - 10435}{10879} = 0,0425 \times 100 = 4,25\%$$

Analisando o erro relativo obtido, observa-se que para o cenário base a simulação realizada apresentou um erro de 4,25%, portanto para um nível de confiança de 95%, o modelo pode ser validado.

5.2.2 Análise do Cenário Base

Nesta etapa foi realizada a análise dos resultados obtidos pela simulação do cenário base, nas perspectivas de tempo de espera mostrado na Tabela 7, tempo de processamento apresentado na Tabela 8, quantidade processada e taxa de utilização nos recursos descrito nas Tabelas 9 e 10 respectivamente, sendo que para isto foi utilizado tempo mínimo, médio e máximo.

Tabela 7 - Tempo de Espera.

Tempo de Espera			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
Dessulfuração	-	-	-
ELT	-	-	-
EBG	-	-	-
Raspador	-	-	-
BOF 1	2,64	2,76	2,85
BOF 2	2,53	2,64	2,77

A Tabela 7 demonstra que há filas que ocasionam em esperas dos recursos apenas nos convertedores, com uma média de 2,7 minutos. Esse fator já era esperado, uma vez que, são nestes recursos que ocorrem o maior tempo do processamento.

Tabela 8 - Tempo de Processamento.

Tempo de Processamento			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
Dessulfuração	10,212	10,222	10,247
ELT	9,949	9,956	9,964
EBG	5,136	5,162	5,186
Raspador	5,647	5,662	5,671
BOF 1	37,867	37,921	38,029
BOF 2	37,82	37,955	38,055

O tempo de processamento dos recursos descritos na Tabela 8 seguem os padrões observados nos dados de entrada, sendo que a EBG possui o menor tempo médio (5,162 minutos), enquanto o BOF 2 apresenta um tempo médio de processamento de (37,955 minutos).

Tabela 9 - Quantidade Processada.

Quantidade Processada			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
Dessulfuração	10421	10435	10451
ELT	10421	10435	10451
EBG	10421	10435	10451
Raspador	10421	10435	10451
BOF 1	5569	5577	5588
BOF 2	4854	4860	4868

A Tabela 9 apresenta as quantidades de entidades processadas são iguais para os processos de Dessulfuração, ELT, EBG e no Raspador com o volume de 10435. Os outros processamentos que acontecem nos convertedores apresentam volume de 5569 e 4854 para o BOF 1 e BOF 2 respectivamente. Essa diferença é ocasionada pelo período simulado e as restrições de vida dos convertedores e furo de corrida, que possuem valores característicos para cada um.

Tabela 10 - Tempos Gerais.

Tempos Gerais			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
Tempo em Atividade	67,94	68	68,04
Tempo de Espera	6,63	6,76	6,99
Tempo de Transferência	13,37	13,39	13,41

Com relação aos tempos de processo apresentados na Tabela 10, o ferro gusa que é transformado em aço ao fim do processo possui um tempo total médio de ciclo de 68 minutos, porém dentro deste intervalo a entidade fica 6,76 minutos em espera, e um tempo de transferência médio de 13,39 minutos, ou seja, o tempo em processamento da entidade é de 47,85 minutos.

Tabela 11 - Taxas de Utilização.

Atividade	Utilização
Dessulfuração	20,30%
ELT	19,77%
EBG	10,25%
Raspador	11,24%
BOF 1	40,24%
BOF 2	35,10%

A taxa de utilização dos recursos que faz referência à ponderação do tempo que o recurso está sendo utilizado e o tempo que passou ocioso é apresentada na Tabela 11, onde temos a estação de basculamento de gusa como a de menor taxa de utilização (10,25%), e o BOF 1 com a maior taxa de utilização (40,24%).

5.3 Cenário de mudança

Nesta etapa será descrita a mudança realizada no processo, explorando os impactos gerados pela mesma na execução da produção como um todo. O cenário consiste na inclusão dos processos de dessulfuração e desfosforação em panela, para obter resultados de análise química de ferro gusa mais precisa e em uma faixa de especificação mais restrita.

A implementação de tais processos implica na retirada de alguns ao longo da cadeia produtiva. A dessulfuração em panela obrigatoriamente descarta a inicial que ocorria em carro-torpedo, por se tratar de processos semelhantes que possuem o mesmo objetivo. Outro processo impactado por tal alteração é a limpeza que ocorre na ELT, uma vez que o principal responsável pela sujeira acumulada na boca do carro-torpedo é a dessulfuração, como a mesma não vai mais ocorrer a limpeza deixará de ser necessária.

A desfosforação em panela também implicará em alterações na produção, uma vez que, a raspagem será realizada no procedimento operacional de desfosforação, não será mais utilizado o equipamento de raspagem individual que já existia.

Para a implementação do novo cenário foi realizado a análise dos dados referentes aos novos processos, de forma similar as tratativas realizadas no cenário base. A descrição dos dados obtidos pode ser observada na Tabela 12, as alterações implementadas no modelo computacional para a simulação no cenário de mudança se encontram no APÊNDICE B.

Tabela 12 - Equações do cenário secundário.

	Equação
Dessulfuração em Painela	$303 + 263 * \text{BETA}(1.43, 1.37)$
Desfosforação em Painela	$903 + 325 * \text{BETA}(1.18, 1.23)$
Refino Primário	$1.09\text{e}+003 + 1.73\text{e}+003 * \text{BETA}(2.48, 3.38)$

5.3.1 Análise do cenário de mudança

Os resultados do cenário de mudança são apresentados neste tópico, e os dados seguem os mesmos padrões utilizados no cenário base. Tais informações são descritas nas Tabelas 13 a 16.

Tabela 13 - Tempo de espera do cenário de mudança.

Tempo de Espera			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
EBG	-	-	-
Dessulfuração	-	-	-
Desfosforação	0	0,0063	2,62
BOF 1	0	1,34	40,10
BOF 2	0	1,36	44,52

A Tabela 13 apresenta filas de espera com valores significantes apenas nos convertedores, com um tempo médio de 1,35 minutos.

Tabela 14 - Tempo de Processamento.

Tempo de Processamento			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
EBG	10,212	10,222	10,247
Dessulfuração	5,052	7,208	9,432
Desfosforação	15,054	17,725	20,466
BOF 1	22,851	30,423	44,639
BOF 2	22,997	30,282	45,553

O processamento dos recursos apresentado na Tabela 14 demonstrou que a etapa do processo com o menor tempo médio de processamento é a dessulfuração (7,208 minutos), e o BOF 1

apresenta o maior tempo médio de processamento com cerca de 30,423 minutos. Essa redução no tempo médio de processamento já era esperada, pois por características de composição química do ferro gusa, há comportamentos diferentes para a formação de escória durante o refino do aço, o que influencia no tempo de processamento. Tais características se enquadram no intervalo de composição química do ferro gusa que será liberado pela estação de desfosforação em panela.

Tabela 15 - Quantidade Processada.

Quantidade Processada			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
EBG	12324	12336	12352
Dessulfuração	12324	12336	12352
Desfosforação	12324	12336	12352
BOF 1	6329	6338	6342
BOF 2	5995	6002	6011

A EBG, dessulfuração e desfosforação processam a mesma quantidade de unidades para o período analisado com um valor médio de 12336. Os demais processamentos que acontecem nos convertedores possuem volume médio de 6338 e 6002 para o BOF 1 e BOF 2 respectivamente (Tabela 15).

Tabela 16 - Tempos Gerais.

Tempos Gerais			
Atividade	Mínimo	Médio	Máximo
Tempo em Atividade	55,86	59,72	63,12
Tempo de Espera	5,78	5,95	6,54
Tempo de Transferência	7,27	9,70	17,14

Relacionado aos tempos gerais de processamento apresentado na Tabela 16, a transformação do ferro gusa que é transformado em aço possui um tempo total médio de ciclo de 59,72 minutos, sendo que deste tempo a entidade fica 5,95 minutos aguardando, e se movimentando por um tempo médio de 9,70 minutos, portanto o tempo em processamento da entidade é de 44,07 minutos.

Tabela 17 - Taxas de Utilização

Atividade	Utilização
EBG	12,09%
Dessulfuração	17,14%
Desfosforação	41,06%
BOF 1	36,52%
BOF 2	34,74%

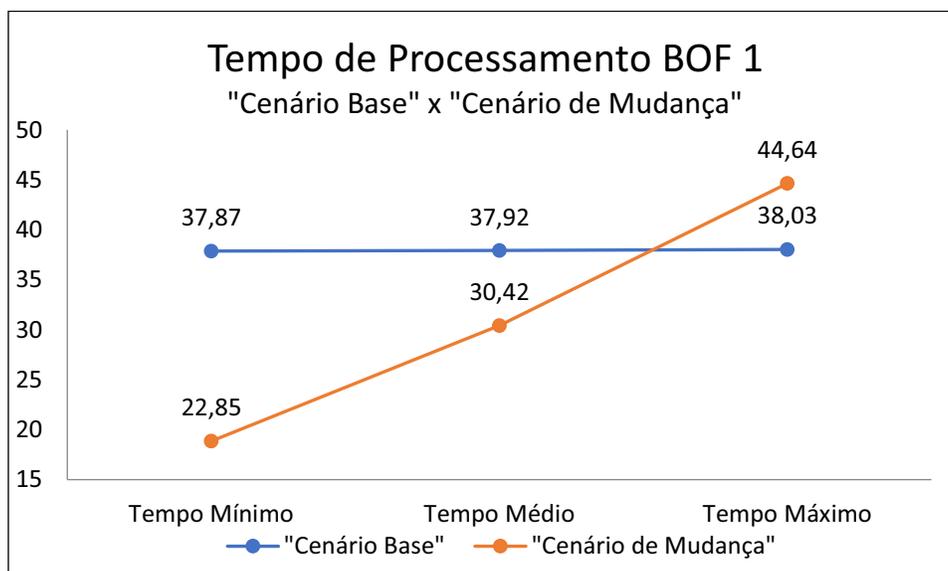
A taxa de utilização dos recursos é apresentada na Tabela 17, onde a estação de basculamento de gusa apresenta a menor taxa de utilização (12,09%), e o BOF 1 com a maior taxa de utilização (36,52%).

5.4 Comparativo de cenários

O comparativo entre os dois cenários abordados neste trabalho se faz necessário, uma vez que, a partir do mesmo será possível avaliar os impactos no processo produtivo, e se foi ocasionado ganhos ou perdas através das mudanças propostas.

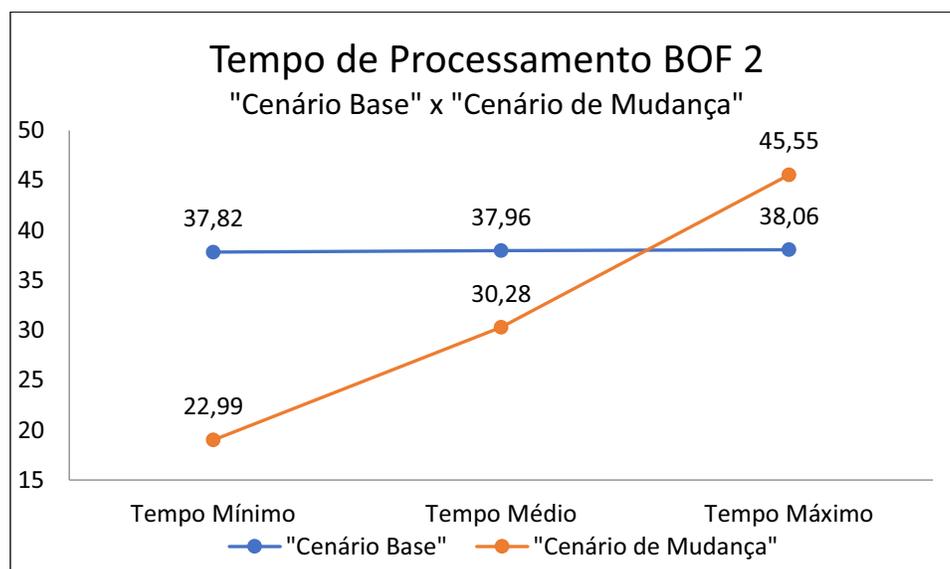
Para isso foi definido como fatores de análise a quantidade de corridas realizadas para os dois cenários, o tempo de processamento e a taxa de utilização nos convertedores, por serem estes dados comuns para ambos os cenários.

Gráfico 7 - Comparativo do tempo de processamento do BOF 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

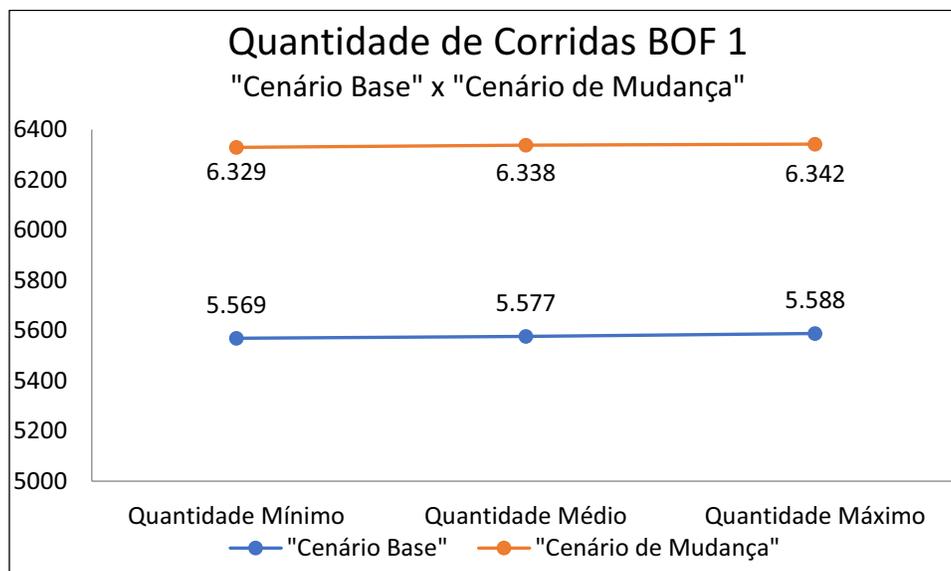
Gráfico 8 - Comparativo do tempo de processamento do BOF 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

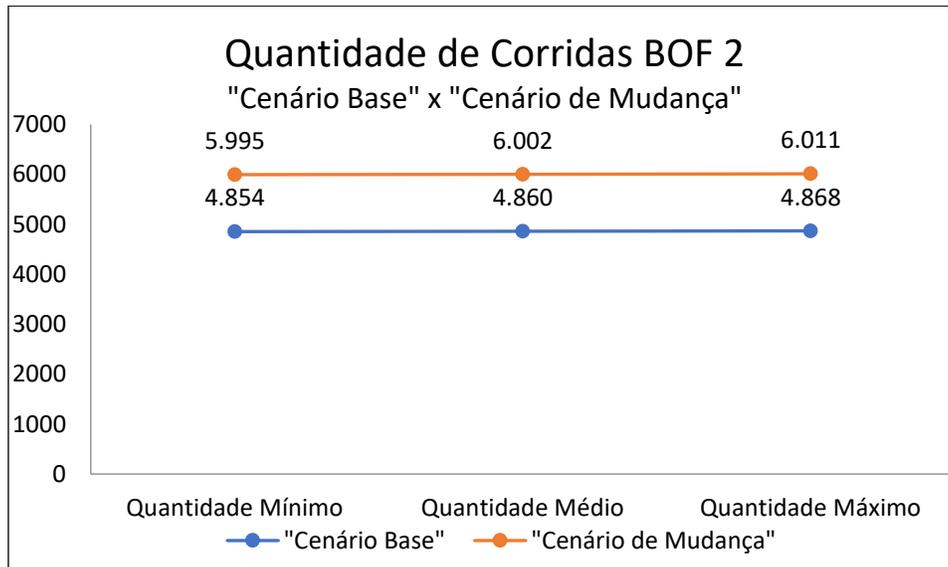
Os Gráficos 7 e 8 apresentam o comparativo entre os tempos de processamento, onde podemos observar que apesar da diminuição da duração do processo no cenário de mudança ele se apresenta mais instável do que o cenário base. Vale ressaltar que a menor estabilidade já era esperada, devido ao processo de formação de escória que impacta diretamente no tempo de refino e caracteriza o maior intervalo de duração de processamento no cenário secundário.

Gráfico 9 – Comparativo da quantidade de Corridas no BOF 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

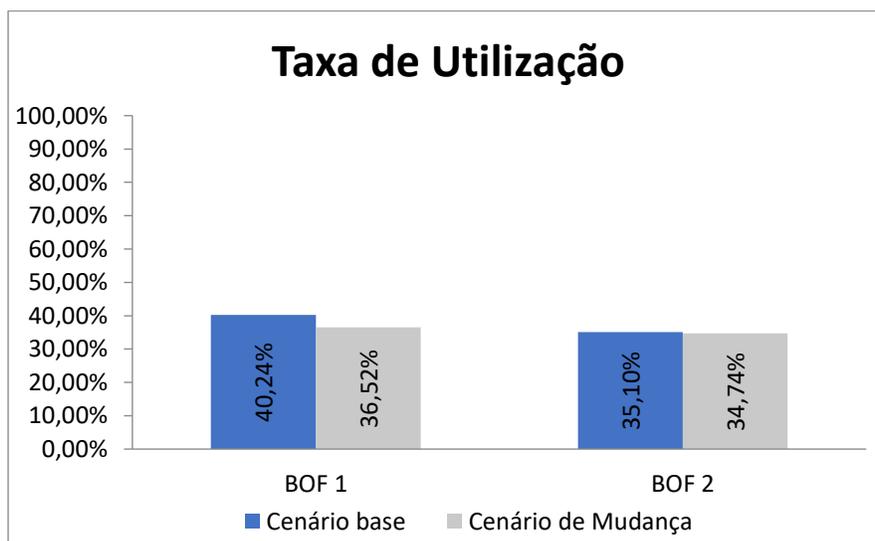
Gráfico 10 - Comparativo da quantidade de Corridas no BOF 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A quantidade de corridas realizadas nos dois convertedores são apresentada nos Gráficos 9 e 10. A simulação mostrou que a quantidade de corridas é superior no segundo cenário, isso ocorre devido à redução no tempo de processamento nestes dois recursos, fator este que permite que tal redução de tempo, destine esta diferença para o processamento de uma maior quantidade de corridas. Este ganho indica que caso a implantação fosse realizada haveria um ganho de capacidade produtiva.

Gráfico 11 – Comparativo da taxa de utilização



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O Gráfico 11 mostra a comparação das taxas de utilização nos dois convertedores em ambos os cenários simulados, onde temos uma redução de 9,24% na taxa de utilização do BOF 1 no cenário de mudança, enquanto para o BOF 2 a taxa de utilização apresentou redução mínima. O que mostra que mesmo com o aumento do volume produtivo no cenário secundário, há uma margem para maior aumento do volume, pois o recurso principal do sistema apresenta uma baixa taxa de utilização.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi implementado um modelo de simulação computacional para análise da alteração das etapas do processo produtivo de uma indústria siderúrgica, em que se buscou entender os impactos que tais alterações gerariam para o processo em termos de capacidade produtiva. Por ser um ramo que demanda altos investimentos, a utilização de ferramentas de simulação é adequada para realização deste tipo de análise de ganho potencial.

O modelo apresenta o fluxo convencional em uma aciaria, com processos de limpeza de boca de torpedo, dessulfuração em torpedo, basculamento, raspagem e refino. Outras características inerentes ao processo produtivo foram abordadas no trabalho, como vida dos convertedores, vida de furo e falhas de processo.

Dois cenários foram modelados e simulados buscando resultados mais próximos do cenário real, e após foi feita uma comparação com os resultados obtidos e este cenário, sendo o modelo aceito por apresentar um erro relativo inferior a 5%.

As alterações realizadas no processo trariam ganhos significativos para o volume de unidades produzidas, com um aumento aproximado de 18%, além de reduzir a taxa de utilização no BOF 1, um dos recursos principais para o processo de refino primário. É válido ressaltar que tal ganho só seria possível devido à implantação da unidade de desfosforação que possibilitou na redução dos tempos no processo de refino primário. Em termos de ganho de mercado as implementações possibilitariam a indústria atingir mercados onde a qualidade e faixas de especificações do produto são mais restritas.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, A. P. **Modelagem e simulação computacional de processos produtivos: o caso da cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes, RJ.** 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, 2011.

BARÃO, C. D. **Siderurgia para não siderurgistas**, ABM, São Paulo, SP, 2014.

BRITO, A. E. S. C., Feliz, J. M. T., **Simulação por Computador**, Publindústria Editor, 2001.

CARSON II, John S. **Introduction to Modeling and Simulation. In: Winter Simulation Conference**, 2004, Washington DC. Disponível em: <www.informs-sim.org/wsc03papers/002.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018

CHWIF, Leonardo & MEDINA, Afonso C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 3. Ed. rev. São Paulo: Ed. do Autor, 2010.

CORPORATION, ProModel (2015), **ProModel User Guide's**. <https://jrvargas.files.wordpress.com/2015/04/guc3ada-de-usuario-de-promodel.pdf>. Disponível em: <jrvargas.files.wordpress.com/2015/04/guc3ada-de-usuario-de-promodel.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018

COSTHEK, B. P. **Estudo de métodos para comparar softwares de simulação discreta disponíveis no mercado para um sistema metalúrgico**. 2008. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2008.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução à modelagem e simulação de Sistemas – com Aplicações em Arena**. Florianópolis, 2001.

GONÇALVES, W. M. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício.** 2005. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2005.

IABr, Instituto Aço Brasil, **Projeção Revista.** 2015. Disponível em: <www.acobrasil.org.br/site2015/noticia_interna.asp?id=13669>. Acesso em: 19 mai. 2018.

IABr, Instituto Aço Brasil, **Processo de Produção.** 2015. Disponível em: <www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acesso em: 20 mai. 2018.

JÚNIOR, E. C. F. **Desenvolvimento do sopro dinâmico e bloqueios de segurança usando a análise do gás on-line dos convertedores da AM Monlevade.** 2013. 80 p. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2013.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. & SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena.** 2. ed., New York: McGraw-Hill, 2002.

KELTON, W.D.; SADOWSKI, R.P.; SWETS, N.B. **Simulation with Arena.** 5. ed., New York: McGraw-Hill, 2010.

LIMA, A. S.; PESSOTI, G. C. Análise do padrão de concorrência na indústria siderúrgica brasileira. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, v. 13, n. 23, p. 53-64, jul. 2011.

LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica.** 2014. p. 156 Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2014.

MACHADO, M. L. P. et al, **Siderurgia para não siderurgistas**, ABM, Vitória, ES, 2003.

MAIA, D. F. **Modelagem e simulação computacional de uma aciaria.** 2008. 57 p. Dissertação (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Juiz de Fora - UFMG, Juiz de Fora, 2008.

MARINS, A. M. F. **Modelagem física e computacional do fluxo de aço em panela com agitação por gás inerte, com ênfase na separação de inclusões.** 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2011.

MEDINA, A.C.; CHWIF, L. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Bravarte, 2007.

MOURÃO, M. B., et al. **Introdução à Siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p.428, 2007.

OR/MS Today. Institute for Operations Research and Management Sciences. 2017. Disponível em: <www.orms-today.org>. Acesso em: 05 jun. 2018.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha.** 2010. 163 p. Tese (Doutor em Engenharia e ciências dos materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, 2010.

SATO, C. T. **Simulação do comportamento escória/aço durante o esgotamento da panela através da modelagem física.** 2007. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, E. L. e MENEZES, E. M. **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** Florianópolis: UFSC,PPGEP,LED, 2000.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis, 2005.

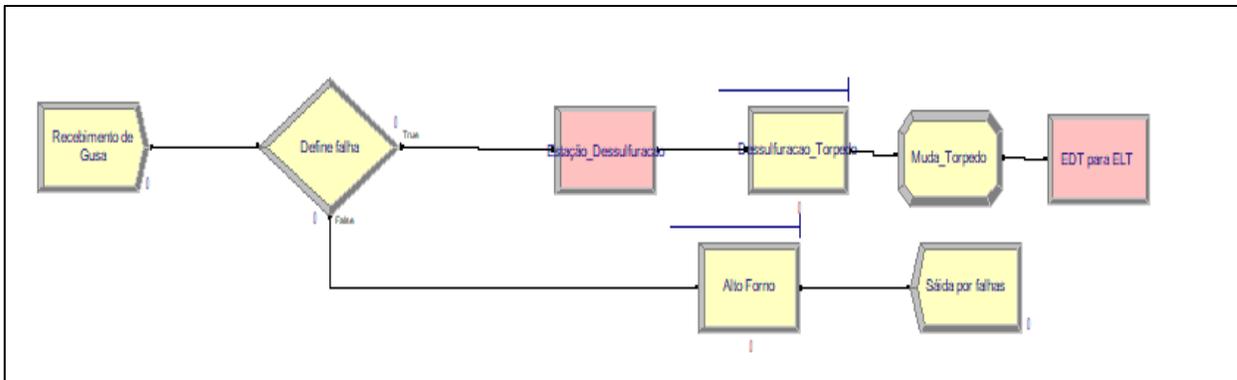
SOFTWARE, Rockwell (2010), **Arena Basic User's Guide**, ARENAB-UM001-EN-P

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. 2012. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

WORDSTEEL, **Association. Steel Statical Yearbooks**, 2017. Disponível em: <www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html>. Acesso em: 25 mai. 2018

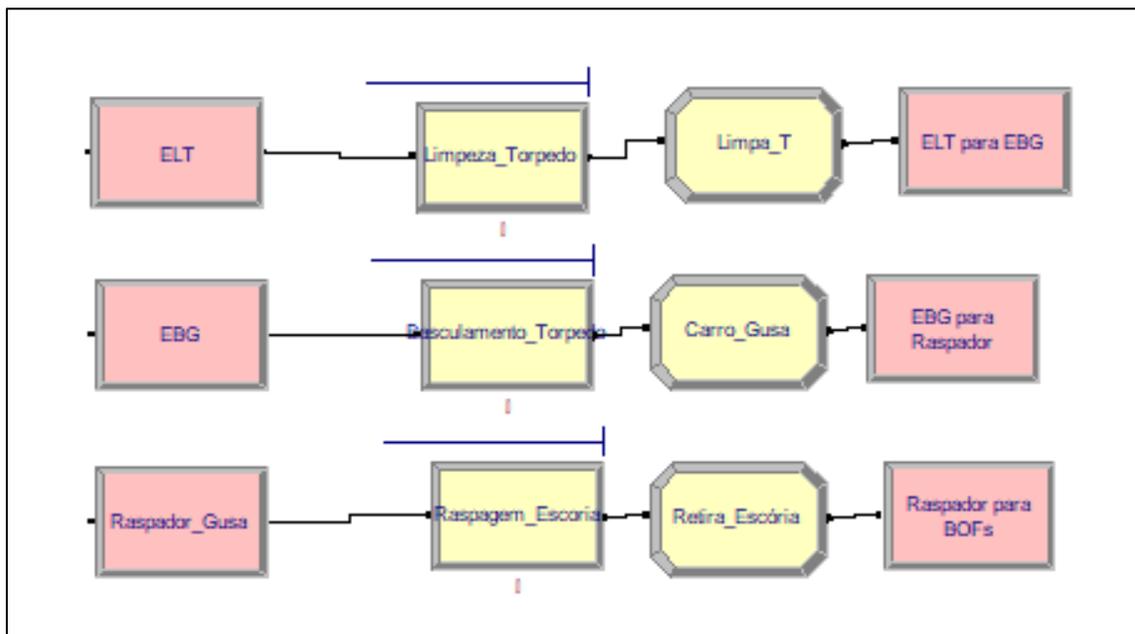
APÊNDICE A – Modelo Computacional do Cenário Base

Figura 10 - Entrada de entidades e processo de dessulfuração e falhas.



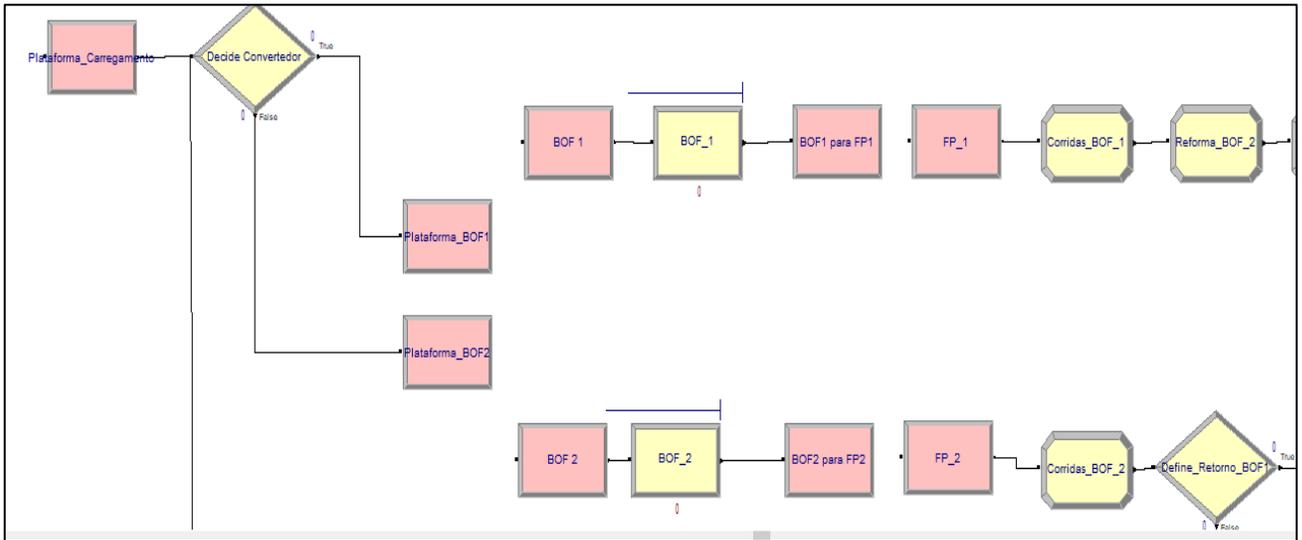
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 11 - Processamento e movimentação de entidade



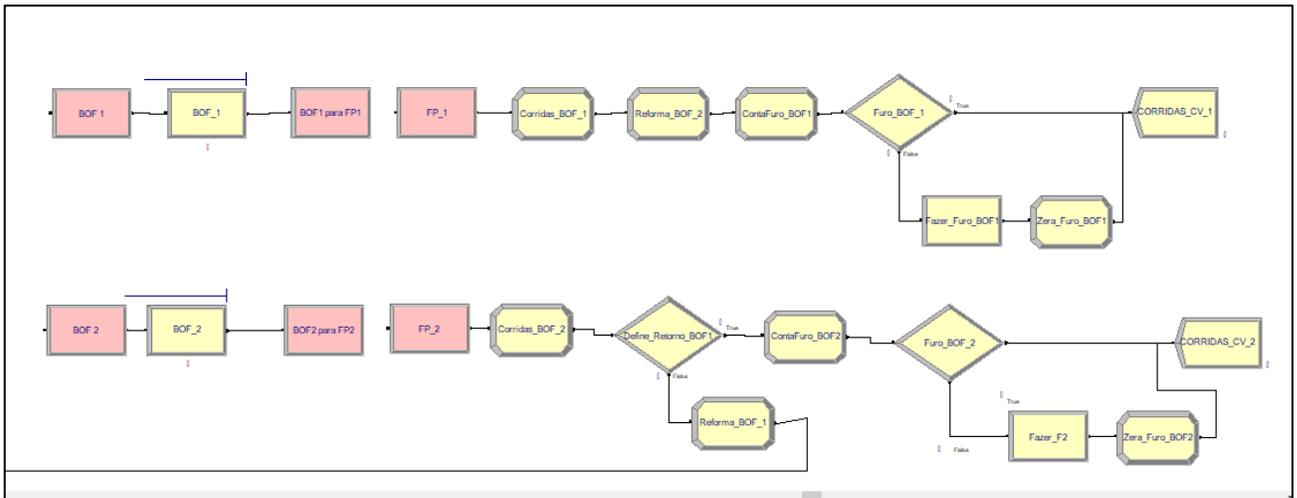
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 12 - Critérios de decisão



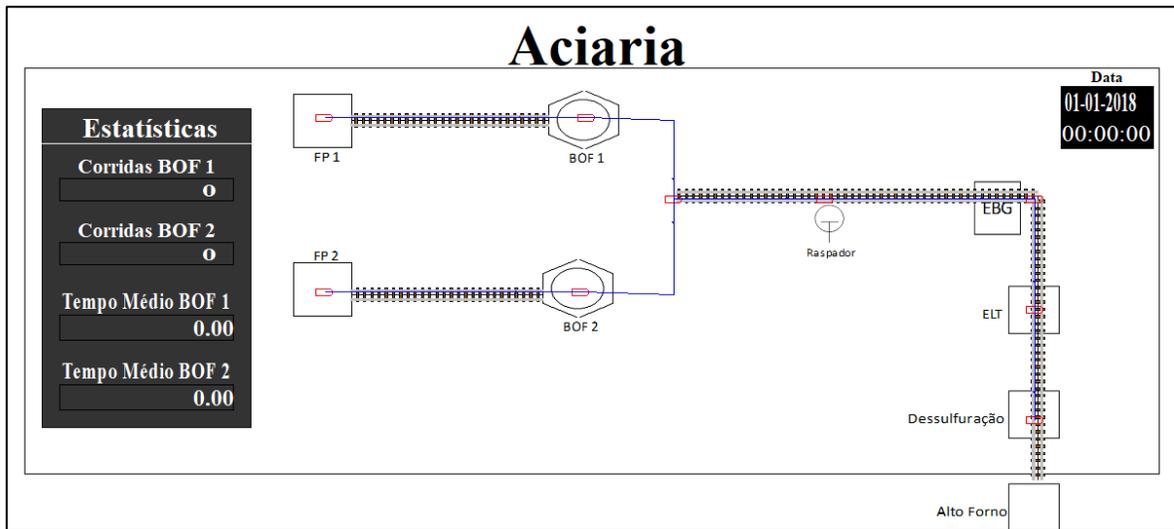
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 13 - Processamento nos convertedores e demais parametrizações



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

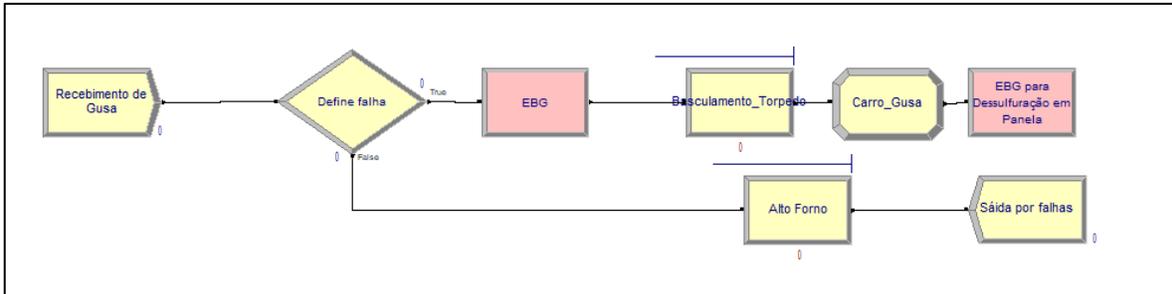
Figura 14 - Modelo de Animação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

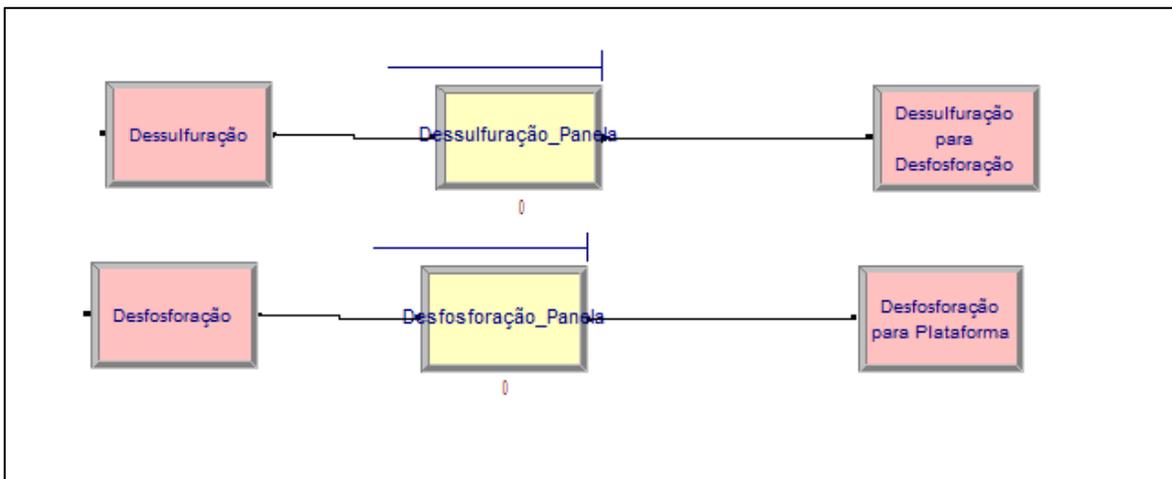
APÊNDICE B – Modelo Computacional do Cenário de Mudança

Figura 15 - Mudança no fluxo de entrada



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 16 - Implementação do processo de dessulfuração e desfosforação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)