

**HACHILEY POLLY DE CASTRO SANTOS**

**Redução do consumo específico de energia elétrica total no  
processo de fusão em um forno elétrico a arco**

**Hachiley Polly de Castro Santos**

**Redução do consumo específico de energia elétrica total no  
processo de fusão em um forno elétrico a arco**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia, Linha de Pesquisa Gestão Ambiental e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

S237r	<p>Santos, Hachiley Polly de Castro</p> <p>Redução do consumo específico de energia elétrica total no processo de fusão em um forno elétrico a arco / Hachiley Polly de Castro Santos – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>76 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 70-73</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho</p> <p>1. Aço - Indústria 2. Fornos Elétricos 3. Energia elétrica - Conservação. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 669.14(043)</p>
-------	--

Ana Cristina Figueiredo Loureiro  
Bibliotecária CRB 8/7094

*HACHILEY POLLY DE CASTRO SANTOS*

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"


PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Ivonete Ávila  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO  
Orientador / UNESP-FEG

  
Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. NESTOR PROENZA PEREZ  
CEFET/RJ

## **DADOS CURRICULARES**

### **HACHILEY POLLY DE CASTRO SANTOS**

<b>NASCIMENTO</b>	18-09-1985 – Aparecida/SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Paulo Roberto dos Santos Rosilene Aparecida de Castro Santos
<b>2001/2003</b>	Técnico em Eletrônica Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá - UNESP
<b>2006/2012</b>	Graduação em Engenharia de Produção Elétrica Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa Raquel de Oliveira, pelo seu amor, companheirismo, paciência e apoio durante o período de dedicação a este trabalho.

A minha filha, Alice de Oliveira Santos, por ser minha maior inspiração para seguir lutando por meus objetivos. Agradeço pelo carinho, atenção e paciência durante essa jornada.

Aos meus pais, Paulo e Rosilene, por sempre me incentivarem a seguir estudando e batalhando.

A meu orientador, Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho, pela grande dedicação, ensinamentos e paciência comigo ao longo de todo o trabalho.

Ao amigo que fiz ao longo do curso, Fábio Henrique, que sempre esteve presente em momentos difíceis, dando uma palavra de incentivo.

Aos meus amigos do Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá, pelo carinho e apoio em todos os 18 anos de amizade.

Aos professores Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pelos ensinamentos transmitidos durante o período do mestrado.

Agradecimento especial a Gerdau S.A., pela parceria neste trabalho, aos colaboradores Roberto Pereira Junior, Juliano Graziel Serra, Tiago Favareto, Renan Borges Marques, Cristiano Mendes, Fabricio Vieira Silva e Marcio Irani de M. Sancheta, por toda a ajuda, atenção, orientações e ensinamentos durante o planejamento e a execução deste trabalho.

“Se você diz que quer a melhoria contínua, você deve literalmente querer dizer “contínuo”, todo o tempo, sob todas as condições, sem considerar o mérito, a complexidade ou a relevância. Nenhuma melhoria é pequena demais, e a hora certa é sempre agora.” (Jeffrey K. Liker)

## RESUMO

O aço é um dos materiais mais utilizados em todo o mundo, é possível ser 100% reciclado, obtendo novo aço sem perda de qualidade e quantas vezes for necessário. O setor siderúrgico é o maior consumidor de energia final destinado a indústria. Para produção do aço existem diversas alternativas possíveis. Neste trabalho é destacada a do forno elétrico a arco, a mais eficiente em termos de energia consumida e a única a qual pode-se utilizar como matéria-prima até 100% de material reciclado. Sendo o aço uma *commodity*, uma mercadoria básica facilmente intercambiável e utilizada como insumo para produção de outros produtos, tem seu preço regulado pelo mercado e trabalhos em eficiência energética são essenciais para a competitividade das empresas. O presente trabalho visa elaborar sugestões de métodos e tecnologias que possibilitem a redução do consumo específico de energia elétrica em kWh/t (quilowatt hora por tonelada de aço) para o processo de fusão do aço de um forno elétrico a arco, localizado na região do Vale do Paraíba. A metodologia empregada foi a pesquisa-ação, tendo um forno elétrico a arco real, disponível para estudos e captura de dados. As soluções encontradas estão desde técnicas operacionais de produção, até tecnologias em reaproveitamento de gases de exaustão, utilizados para o pré-aquecimento de sucata. Como resultado da pesquisa, obteve-se um conjunto de possibilidades tecnológicas com ganhos de até 143 kWh/t, o que representa cerca de 34% de redução no consumo específico de energia elétrica, levando em conta o consumo médio de forno estudado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço. Consumo Específico de Energia. Eficiência Energética. Forno Elétrico a Arco.

## **ABSTRACT**

Steel is one of the most widely used materials worldwide, and it is possible to recycle 100% of it so as to generate new steels without quality loss and as many times as needed, however, the steel sector is the largest final energy consumer. There are several possible routes for steel production, but the Electric Arc Furnace has been selected for the present work due to being the most efficient in terms of energy consumption and it is the only one that can use up to 100% of recycled matter as raw material. As steel is a commodity, a basic goods easily interchangeable and used as input for the production of other products, its price is set by the market and energy efficiency studies are essential for the competitiveness of companies. The present work aims to elaborate suggestions of methods and technologies that allow the reduction of the specific electric energy consumption in kWh/t (kilowatt hour per ton of steel) by the steel melting process of an electric arc furnace located in the region of the Paraíba Valley. The methodology used was the action research, having an electric arc furnace, available for studies and data capture. The identified solutions range from operational production techniques to exhaust gas recovery technologies for scrap preheating. As a result, a set of technological possibilities with savings of up to 143 kWh/t have been obtained, which represents about 34% reduction in specific electric energy consumption by taking into account an average consumption of studied furnace.

**KEYWORDS:** Electric arc furnace. Energy efficiency. Specific consumption. Steel melting.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rotas de produção do aço .....	16
Figura 2 - Vista simplificada de secção e superior do FEA .....	18
Figura 3 - Exemplo de carregamento do FEA.....	19
Figura 4 - Conceito da planta secundária de cogeração .....	25
Figura 5 - Exemplo de pré-aquecimento do tipo cesto de carregamento .....	27
Figura 6 - Exemplo de pré-aquecimento Darnarc Plus M2 .....	28
Figura 7 - Forno com sistema do tipo Twin-shell .....	29
Figura 8 - Exemplo de sistema Consteel .....	30
Figura 9 - Visão geral do sistema Consteel .....	31
Figura 10 - Sistema Fuchs Finger Shaft .....	32
Figura 11 - Sistema Fuchs Coss .....	33
Figura 12 - Visão lateral do sistema Ecoarc .....	34
Figura 13 - Etapas da pesquisa .....	37
Figura 14 - Diagrama de entradas e saídas FEA .....	43
Figura 15 - Desempenho dos turnos em consumo específico de energia elétrica .....	48
Figura 16 - Entrada de ar falso pela porta de escória. ....	49
Figura 17 - Gráfico de abertura da porta de escória x consumo.....	51
Figura 18 - Índice de C/O <sub>2</sub> por semana .....	53
Figura 19 - Índice de C/O <sub>2</sub> por dia. ....	53
Figura 20 - Gráfico gusa x consumo específico de energia elétrica.....	56
Figura 21 - Gráfico de dispersão da receita química B .....	57
Figura 22 - Gráfico de dispersão das receitas químicas A, C e D .....	58
Figura 23 - Curva de distribuição normal de % gusa por receita química .....	58
Figura 24 - Curva de distribuição normal de consumo específico de energia elétrica por receita química.....	59
Figura 25 - Diferença de lastro x consumo específico .....	60
Figura 26 - Gráfico de dispersão do lastro x consumo específico de energia elétrica ...	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Energia liberada nas reações .....	22
Tabela 2 - Exemplo da tela com os parâmetros das notas da corrida.....	45
Tabela 3 - Notas máximas por critério .....	46
Tabela 4 - Critérios e equações das notas.....	46
Tabela 5 - Faixa de notas x consumos.....	47
Tabela 6 - Mix de sucata selecionado.....	50
Tabela 7 - Resultados das simulações .....	50
Tabela 8 - Dados da simulação da variação de potência. ....	54
Tabela 9 - Percentuais de gusa adotados .....	55
Tabela 10 - Resultados das simulações .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEA	Forno Elétrico a Arco
SOS	<i>Scrap Optimizer System</i> – Sistema Otimizador de Sucata
PIMS	<i>Plant Information Management System</i> – Sistema de Gerenciamento de Informações da Planta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	15
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	16
2.1	PRODUÇÃO DO AÇO.....	16
2.2	O FORNO ELÉTRICO A ARCO .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Carregamento</b> .....	18
<b>2.2.2</b>	<b>Fusão</b> .....	19
<b>2.2.3</b>	<b>Refino</b> .....	20
<b>2.2.4</b>	<b>Vazamento</b> .....	20
2.3	ENERGIA QUÍMICA NO FEA.....	21
2.4	TECNOLOGIAS EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA FEA .....	23
<b>2.4.1</b>	<b>Tecnologias de Pré-Aquecimento de Sucata</b> .....	26
2.4.1.1	Tipo de Cesto de Carregamento .....	26
2.4.1.2	Tipo Twin-Shell.....	28
2.4.1.3	Tipo Consteel.....	29
2.4.1.4	Tipo Finger Shaft.....	31
2.4.1.5	Tipo Coss.....	32
2.4.1.6	Tipo Ecoarc.....	34
<b>3</b>	<b>MÉTODO E MATERIAL</b> .....	36
3.1	MÉTODO.....	36
<b>3.1.1</b>	<b>Etapas da Pesquisa</b> .....	37
3.1.1.1	Planejamento da pesquisa-ação .....	37
3.1.1.2	A coleta de dados.....	38
3.1.1.3	Análise dos dados e planejamento das ações.....	38
3.1.1.4	Execução das ações e elaboração de sugestão de melhorias .....	39
3.1.1.5	Monitoramento .....	40
3.1.1.6	Avaliação preliminar .....	40
3.2	MATERIAL .....	40
<b>3.2.1</b>	<b>O Forno Elétrico a Arco</b> .....	40
<b>3.2.2</b>	<b>O Scrap Optimizer System</b> .....	42
<b>3.2.3</b>	<b>Planilhas de gestão do FEA</b> .....	43

3.3	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	44
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS</b> .....	<b>45</b>
4.1	SISTEMA DE NOTAS DA CORRIDA .....	45
4.2	ENTRADA DE AR FALSO PELA PORTA DE ESCÓRIA.....	48
4.3	INDICADOR DA RELAÇÃO ENTRE O CARBONO E O OXIGÊNIO.....	51
4.4	VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA DO FORNO.....	53
4.5	VARIAÇÃO DE GUSA NA CARGA.....	54
4.6	VARIAÇÃO DO LASTRO.....	59
4.7	SISTEMAS DE REAPROVEITAMENTO DE CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO .....	62
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>64</b>
5.1	SISTEMA DE NOTAS .....	64
5.2	ENTRADA DE AR FALSO PELA PORTA DE ESCÓRIA.....	65
5.3	INDICADOR DA RELAÇÃO ENTRE CARBONO E OXIGÊNIO .....	66
5.4	VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA DO FORNO.....	66
5.5	VARIAÇÃO DE GUSA NA CARGA.....	67
5.6	VARIAÇÃO DO LASTRO.....	67
5.7	SISTEMAS DE REAPROVEITAMENTO DO CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO .....	68
5.8	RESUMO DAS SUGESTÕES DE MELHORIAS .....	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS</b> .....	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>
	<b>ANEXO 1 – PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	<b>76</b>
	<b>ANEXO 2 – RESUMO DAS PRINCIPAIS EQUAÇÕES DO SCRAP OPTIMIZER SYSTEM</b> .....	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos principais constituintes de uma sociedade moderna, sendo necessária na criação de bens com base em recursos naturais, ela é mais bem escrita pelo que pode ser feito com ela (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2011). O aço é um desses bens criados com recursos naturais e faz-se o uso abundante da energia para sua obtenção, sendo encontrado em quase todos os objetos e equipamentos que utilizamos no nosso cotidiano.

O aço é o material associado ao conceito de economia circular, pode-se dizer que é o material mais reciclável e reciclado do mundo. Quando equipamentos e objetos chegam ao fim de sua vida útil, o aço presente neles retorna às aciarias produzindo aço de qualidade novamente, podendo ser reciclado continuamente. No Brasil atualmente cerca de 30% de todo aço produzido é proveniente de reciclagem (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

Esse processo cíclico do aço, podendo ser reaproveitado após o fim da vida útil do equipamento que estava inserido, é de extrema importância pela ótica ambiental, o lixo que produzimos é um problema ambiental cada vez mais sério, principalmente na questão de seu descarte, pois em média cada família descarta mais de uma tonelada de lixo por ano, estamos ficando sem locais adequados para enterrar tanto lixo (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2011).

Apesar de estar ligado ao conceito de economia circular, o processo de produção de aço e ferro necessita de uma quantidade muito grande de energia. Em 2015 o setor foi responsável por cerca de 18% do consumo mundial de energia final destinado às indústrias (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015).

Para a produção do aço, existem diferentes rotas ou caminhos possíveis, mas na linha de reaproveitamento do aço, a U.S. Environmental Protection Agency (2010) diz que, para a produção de aço através de sucata, é utilizado predominantemente o Forno Elétrico a Arco (FEA), o qual sua principal fonte de energia é a elétrica.

O FEA faz a fusão do aço sólido via arcos elétricos entre catodo e anodos, sendo o catodo a sucata ferrosa e o anodo o eletrodo de carbono, podendo este ser um ou três de acordo com a corrente utilizada, um para contínua ou três para alternada. Os eletrodos são feitos de carbono e consumidos durante as operações de fusão. Silva e Mei (2011) apresentam que o FEA é claramente o instrumento mais versátil de produção de aço, o qual permite a obtenção de praticamente qualquer tipo de aço em função do controle do aquecimento, é um aparelho que possibilita ser operado com 100% de carga sólida e permite operações intermitente com mudanças rápidas de produção, de dezenas até centenas de toneladas.

O aço é uma commodity, ou seja, um bem em estado bruto, de origem de extração mineral destinado ao comércio externo, cujo preço é ditado pelo mercado, sendo assim, cabe as empresas reduzir o máximo seus custos produtivos para obterem maiores lucros. Se tratando de custos, a *Worldsteel Association* (2016) afirma que a energia constitui cerca de 20% a 40% do custo para a produção do aço, um melhor aproveitamento dos recursos energéticos, acaba por reduzir o custo final do produto e também o impacto no meio ambiente, pois seria necessário menos energia por tonelada de aço, quando se analisa a produção em larga escala de grandes empresas, o montante de energia economizada com pequenas melhorias, se torna significativo.

Por ser um setor de consumo energético intensivo, existem inúmeras oportunidade melhoria de redução desse consumo, visando uma melhor eficiência energética especialmente nos países emergentes, os quais a intensidade energética está aumentando, isto é, a relação de energia final consumida e a produção de bens está aumentando, refletindo assim em uma pior eficiência energética (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

Em sua obra Miller Jr. (2007) informa que cientistas estimam que somente 16% da energia utilizada nos EUA são efetivamente transformadas em trabalho útil, 41% são desperdiçados devido a segunda lei da termodinâmica (onde sempre que uma energia muda de forma para outra, terminamos com menos energia utilizável que antes) e 43% são gastos desnecessariamente.

Fazendo um paralelo para o objeto de pesquisa, o FEA (Forno Elétrico a Arco), existe o uso intenso e conversões de energia para a fusão do aço. Logo existe oportunidade de melhoria no âmbito da redução do consumo energético e identificação dos desperdícios. Nesta linha de raciocínio Da Silva (2014) cita em sua obra, que a energia teórica para a fusão e sobreaquecimento até 1650 °C de uma tonelada de aço é 385 kWh. Na prática os FEAs apresentam eficiência entre 55% a 65%, ou seja, tem-se até 45% de perdas em energia, reflexo de uma eficiência térmica e energética baixa, possibilitando muito trabalho de melhoria a ser realizado.

A maior justificativa desse trabalho, dá-se em aplicar técnicas que visam uma melhor eficiência energética nos processos para fusão do aço utilizando sucata. A produção de aço de qualidade, com menor consumo de energia elétrica possível, é o principal e mais crítico desafio de qualquer empresa da indústria do aço (CHEN et al., 2018). Melhorar a eficiência deste processo, torna o aço mais competitivo, mais barato para produzir, o que pode resultar em um aumento de demanda. Esses trabalhos de melhoria também trazem ganhos ambientais significativos tanto na questão energética, quanto no maior reaproveitamento do que é descartado por todos, principalmente e que contém algum tipo de aço.

Um crescimento sustentável da economia, junto com a melhoria da qualidade de vida de todos na terra, somente é possível com uso bem planejado e eficiente dos limitados recursos energéticos e o desenvolvimento de novas tecnologias de energia (HINRICHS; KLEINBACH; DOS REIS, 2011).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Estudar os fatores que influenciam no consumo de energia específica de um forno elétrico a arco (FEA) utilizado para fusão de sucata de aço, estratificá-los, visando detectar oportunidades de melhoria na eficiência energética do processo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

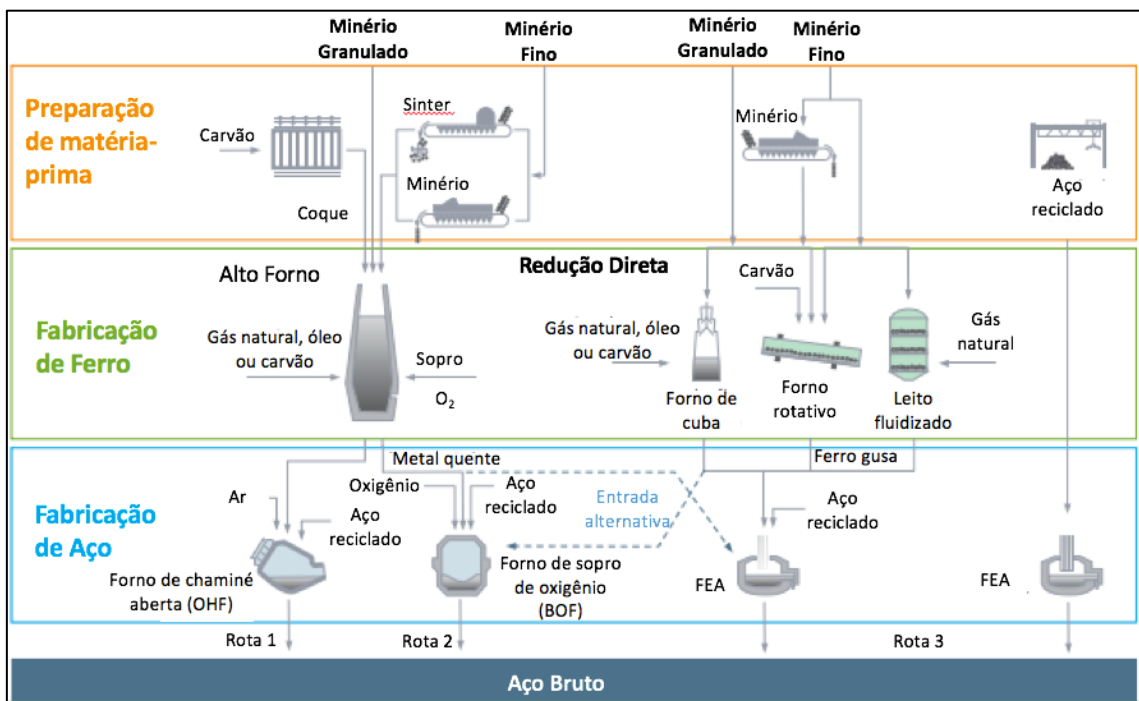
- 1- Conhecer os principais elementos que influenciam no consumo de energia elétrica específica total do Forno Elétrico a Arco estudado;
- 2- Determinar os padrões de processo que interferem na eficiência energética do forno;
- 3- Propor alterações de processo, projeto e procedimentos visando reduzir o consumo específico de energia no processo.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 PRODUÇÃO DO AÇO

O aço pode ser produzido de diferentes maneiras, que são chamadas de rotas, a Figura 1, exemplifica essas rotas. Na produção do aço existem três tipos diferentes: A Rota 1 utiliza o metal quente junto a aço reciclado no forno de chaminé aberta, conhecido como OHF (*open hearth furnace*), para a produção do aço, é uma rota pouco utilizada atualmente, devido a sua baixa eficiência energética e alto custo de produção. A Rota 2 utiliza ferro gusa ou metal quente, com aço reciclado no forno de sopro de oxigênio, conhecido como BOF (*blast oxygen furnace*), utilizando o alto forno (na produção do metal quente), essa se torna a rota mais utilizada para a produção do aço, produzindo sempre grandes lotes de aço. A Rota 3 é a produção de aço com a utilização do forno elétrico a arco (FEA), o qual é um instrumento versátil tanto em relação ao tamanho do lote como o tipo de matéria prima utilizado, podendo ser até 100% de aço reciclado (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015; WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2015).

Figura 1 - Rotas de produção do aço



Fonte: Adaptado de Worldsteel Association (2015).

As usinas de produção de aço, são divididas em dois tipos de operação, as integradas e as semi-integradas. As integradas abrangem as operações desde a redução do minério de ferro

até a fabricação do aço em si, podem ser representadas pelas Rotas 1 e 2. As semi-integradas operam somente na fabricação do aço. São também chamadas de *mini-mills*, por ser um processo completo de fabricação do aço, compacto em relação ao alto forno e extremamente versátil, podendo produzir aços de diferentes especificações de um lote para o outro (SILVA; MEI, 2011).

Atualmente, o FEA é responsável pela produção de um terço de todo o aço no mundo, a produção do aço em FEA é influenciada por muitos fatores, sendo os principais consumo energético, preço da sucata, consumo de eletrodos (CHEN et al., 2018).

## 2.2 O FORNO ELÉTRICO A ARCO

O FEA atualmente, é a rota de produção de aço que mais cresce em utilização no mundo. Fornos elétricos a arcos produzem aços de diversas especificações, utilizando primariamente a sucata de ferro como insumo, onde é fundido e convertido em aço de alta qualidade através de arcos elétricos formados entre o catodo e o anodo (podendo ser 1 ou 3 dependendo do tipo de forno) (WORRELL et al., 2010).

Além de utilizar sucata ferrosa como matéria prima, as instalações de FEA são mais econômicas e viáveis que outras rotas de produção, pois exigem um período de investimento mais curto, e esse tipo de forno comparado as rotas integradas, é altamente flexível quanto ao tamanho do lote produzido e ao tipo de aço produzido (EKMEKÇI; YETISKEN; ÇAMDALI, 2007).

Em geral o FEA é carregado através de cestos com sucata ferrosa em conjunto com calcário para auxiliar na formação da escória espumante, os eletrodos de grafite formam o arco voltaico com a sucata metálica, realizando assim a fusão do aço através do calor emitido. Para realizar a fusão do aço é necessária uma energia mínima teórica de 300 kWh/t, mas é necessária uma energia adicional para fornecer superaquecimento acima do ponto de fusão, fazendo com que a energia teórica total necessária se estabeleça na faixa de 350 a 370 kWh/t. Esta energia pode ser fornecida a partir do arco elétrico (maior parcela), por injeção de combustível fóssil ou oxidação da sucata. Como a eficiência do forno em geral é próximo a 55%, a energia total utilizada em uma corrida é de aproximadamente 670 kWh/t. O maior objetivo de FEA, é entregar o aço no estado líquido o mais rápido e com menor consumo energético possível (HE; WANG, 2017; INSTITUTE OF INDUSTRIAL PRODUCTIVITY, 2011; WORRELL et al., 2010).

A Figura 2 representa a vista em secção e superior de um forno elétrico a arco, na vista de secção é possível observar os eletrodos de carbono que geram o arco elétrico, a carcaça protetora e o sistema de inclinação, que permite o aço ser vazado conforme necessidade. Na vista superior é possível observar a conexão do sistema de potência através dos cabos resfriados até o braço condutor de energia, levando corrente elétrica até os eletrodos, também é possível observar a abóboda e o seu sistema de suspensão, que permite sua abertura, para que o carregamento de sucata possa ser realizado.

Figura 2 - Vista simplificada de secção e superior do FEA



Fonte: Adaptado Institute of Industrial Productivity (2011)

Todo o processamento realizado pelo forno elétrico a arco pode ser dividido em quatro etapas, o carregamento, a fusão, o refino e o vazamento.

### 2.2.1 Carregamento

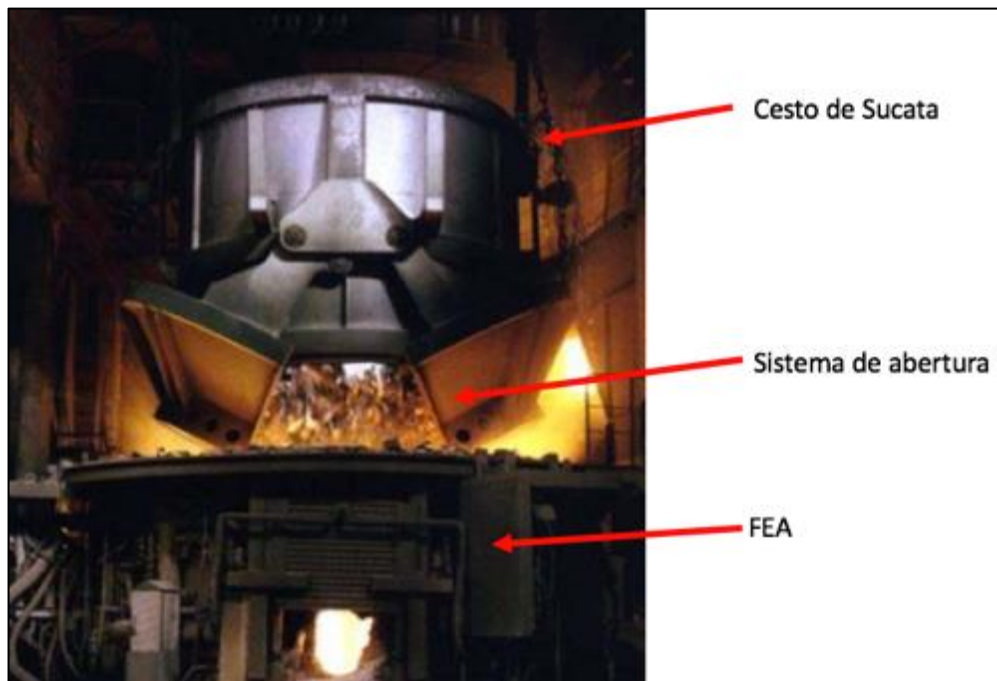
Nos FEAs as matérias primas básicas são sucatas ferrosas e ligas de ferro. Os materiais são separados por família de composição, cortados e limpos nos pátios de sucatas. Para evitar que o banho líquido tenha elementos indesejados, é necessário um controle especial da carga metálica no pátio de sucatas, evitando terra e outros resíduos (SILVA; MEI, 2011).

Nos pátios de sucatas são montadas as cargas para o FEA, realizadas em grandes cestos com dispositivo de abertura na sola. Buscando preservar a integridade dos refratários na soleira, são montados “colchões” ou camadas de sucatas com diferentes densidades. A primeira camada é composta com materiais de menor densidade, para que possam amortecer o impacto da segunda camada, formada pelas sucatas mais densas. A última camada é formada por material de baixa e média densidade, para facilitar a penetração dos eletrodos, evitando quebras prematuras do mesmo (VIEIRA, 2014).

Se não for o primeiro carregamento do dia, em geral o FEA terá um volume residual de aço líquido, chamado de lastro. O lastro auxilia na fusão inicial da sucata menos densa e na proteção da soleira. Para iniciar o carregamento, é necessário desligar o forno, erguer os eletrodos (para evitar algum dano), e deslocar a abóboda. Após, o conteúdo do primeiro cesto é inserido, a abóboda fechada novamente e os eletrodos abaixados novamente. Dependendo do forno podem existir de 2 a 4 carregamentos.

A Figura 3 representa o carregamento de FEA, o qual o forno está com a abóboda aberta, e o cesto está sendo descarregado através da abertura de sua parte inferior.

Figura 3 - Exemplo de carregamento do FEA



Fonte: Adaptado de Remus et al. (2013)

### 2.2.2 Fusão

A etapa seguinte é fusão em si, a mais longa das três, nesta etapa os eletrodos de carbono descem e são ativados, formando um arco voltaico com a carga. No início a potência utilizada é baixa, para uma penetração mais segura na carga. Após esse período inicial, a potência é elevada, para que complete a fusão do material. O forno é desligado e a abóboda é levantada para que possa ser realizado outro carregamento. Para auxiliar a fusão e diminuir consumo energético, são utilizados queimadores a gás natural. Nesta etapa os outros cestos são carregados no forno (DA SILVA, 2014).

Em geral, para acelerar o processo de fusão, são ligados queimadores a gás natural ou outro combustível, localizados nas paredes dos FEA, e se faz o uso intensivo de energia química. A energia química é obtida através da injeção carbono e principalmente oxigênio no banho, causando reações de oxidação que liberam energia para o banho. As injeções desses elementos, podem ser realizadas manualmente através de lanças ou sistemas de injeção automático, instalados no FEA. Os Injetores e queimadores são inseridos nas paredes, no espaçamento entre os eletrodos de carbono, nas zonas mais frias do forno (RIZZO, 2005; VIEIRA, 2014).

Segundo Da Silva (2014), a fusão é a etapa em que se inicia a formação da escória, a qual é formada pela oxidação das impurezas e de aditivos inseridos na carga ou injetados no banho. A escória tem um papel ativo na fase de refino do forno.

### **2.2.3 Refino**

A última etapa de processamento é o refino, inicia-se após a fusão do último cesto carregado no FEA, esta fase tem o objetivo de deixar o aço líquido com as características desejadas para o próximo processo. Injeta-se oxigênio no aço líquido, para oxidar alguns elementos, principalmente o fósforo. Os elementos são transformados em óxidos e absorvidos pela escória, o fósforo deve ser retirado mais cedo possível, pois em altas temperaturas tende a ser revertido para o banho (DA SILVA, 2014; VIEIRA, 2017).

A remoção das impurezas é feita sempre através da remoção da escória, que acontece com a abertura da porta de escória e uma pequena inclinação do forno. O processo deve ser bem controlado, pois a relação de peso escória e aço líquido deve ser baixa, buscando um melhor rendimento da corrida, com uma menor perda de ferro para a escória.

Na fase de refino, a porta de escória tende a ficar sempre aberta, pois além da remoção da escória, é necessário realizar diversas medições de temperatura e retirar amostras para análise química. O resultado da análise química e a da temperatura de vazamento, são os indicadores que irão definir o término da fase do refino.

### **2.2.4 Vazamento**

Essa é a última etapa do processo em fornos elétricos a arco. Após a composição química e a temperatura do aço líquido atingirem os valores especificados, o sistema de

potência do FEA é desligado, o furo na “bica” é aberto e o forno inclinado, através do sistema de basculamento, possibilitando o escoamento do aço.

O aço é escoado para uma panela, que após completada, é transportada para o próximo processo, o Forno Panela (FP). Durante o vazamento do FEA, são adicionados manualmente ligas metálicas de acordo com a especificação de cada aço. Juntamente com as ligas são adicionados desoxidantes, com o intuito de diminuir o teor de oxigênio antes do FP. Os desoxidantes mais comuns são sílicas e o alumínio. A adição desses elementos, faz com que uma camada nova de escória se forme na superfície da banho, protegendo da incorporação de gases e reduzindo a perda de calor para o ambiente (JONES, 2018; STRAGLIOTTO et al., 2017).

### 2.3 ENERGIA QUÍMICA NO FEA

A energia química dispersada no forno, através de reações químicas dos elementos, principalmente carbono e oxigênio, têm um papel muito importante para a produção de aço de qualidade com melhor rendimento e menor consumo energético possível.

Na Tabela 1, estão representadas as principais reações que acontecem dentro do FEA nas fases de fusão e na formação dos gases, e nas colunas seguintes estão presentes as energias liberadas nas reações.

Como resultado dessas reações químicas, e de materiais inseridos no forno, tem-se a formação da escória. Para o produto final, aço líquido vazado, a escória é descartada, mas nos processos de fusão e refino, ela é vital para uma melhor eficiência energética e para uma melhora qualidade do aço.

A escória em sua forma espumante, possui um papel importante na produção do aço, pois cria uma camada isolante, contribuindo para uma maior retenção do calor, reduzindo a vibração, som e consumo dos eletrodos e refratários do FEA. O arco elétrico quando coberto pela escória espumosa, fica mais estável, reduzindo problemas de qualidade de energia como desbalanceamento de corrente, distúrbios elétricos e geração de harmônicas (DEHKORDI; MOALLEM; PARSAPOUR, 2011).

Segundo Vieira (2014), o processo de formação da escória espumante pode ser dividido em três etapas

Tabela 1 -Energia liberada nas reações

<b>Reações na Fusão</b>		
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	8,94 kWh/kg Si	11,2 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{Mn} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{MnO}$	1,93 kWh/kg Mn	9,48 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$2\text{Cr} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$	3,05 kWh/kg Cr	9,42 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$2\text{Fe} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	2,05 kWh/kg Fe	6,80 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{Fe} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	1,32 kWh/kg Fe	6,58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{C} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	2,55 kWh/kg C	2,73 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$2\text{Al} + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	5,29 kWh/kg Al	13,84 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{Mo} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MoO}_2$	1,70 kWh/kg Mo	7,29 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	2,75 kWh/kg S	3,94 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$2\text{P} + 2,5\text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$	5,54 kWh/kg P	8,58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
<b>Reações na fase de gás</b>		
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	9,10 kWh/kg C	4,88 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$		7,01 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$		5,99 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>

Fonte: Adaptado de Goulart et al. (2016)

Primeiro, existe a formação das bolhas de CO formada geralmente com a utilização do carbono já existente na carga e com injeções de oxigênio no banho líquido, inicialmente no banho e depois subindo para a escória.

O segundo passo é a formação do FeO. Após a diminuição do teor de carbono na carga, o oxigênio excedente reage com o ferro no banho líquido, transferindo o ferro para a escória, porém um excesso de FeO reduz a viscosidade da escória, inibindo a formação de espuma. Para controlar isso, é injetado carbono diretamente no banho, causando a reação com o oxigênio do FeO, o que resulta na formação do CO e liberação de ferro para o banho líquido, aumentando o rendimento metálico da corrida (razão entre aço vazado e carga metálica carregada no forno). Um baixo índice de FeO resulta em escória viscosa de difícil espumação.

O terceiro passo é a injeção simultânea de oxigênio e carbono no metal fundido, para aumentar a quantidade de CO no banho, buscando a máxima espumação. O controle da espumação é sensível, um bom desempenho geralmente depende da experiência dos operadores do forno.

A prática do uso e controle da escória espumante, traz ganhos relevantes na produção do aço, como por exemplo melhor transferência térmica e proteção dos refratários da radiação direta do arco elétrico. O processo de escória espumante pode gerar oportunidades de ganhos no consumo de energia elétrica em até 30 kWh/t e redução no consumo dos refratários de 25% até 63% (LUZ et al., 2011).

## 2.4 TECNOLOGIAS EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA FEA

Grande parte dos estudos em tecnologias de eficiência energética para fornos elétricos a arco, não estão relacionados diretamente ao FEA e sim a cadeia de produção do aço inteira, utilizando uma visão macro dos processos. Outros estudos tratam de simulações e trabalhos com mineração de dados (*data mining*) para encontrar soluções ou pontos de perdas em eficiência energética.

O estudo realizado por Azevedo, Cabreraserrenho e Allwood (2018), está relacionado ao pó nas aciarias, onde os autores retratam as perdas de energia em cada parte da cadeia, desde a produção do aço até o produto final, sempre considerando a produção e dispersão do pó nos processos.

Com visão macro dos processos, Gonzalez Hernandez, Paoli e Cullen (2018) fazem uma comparação entre as diferentes rotas de produção de aço com o foco na eficiência energética e na eficiência do material, que está relacionado a energia de produção, emissão de carbono e quanto reciclável é o material. O diferencial do estudo é um comparativo exergético entre as rotas de produção do aço, no foco do estudo. Uma das conclusões é que em eficiência de material a rota do FEA é duas vezes melhor que a rota do BOF.

Simulando em vários cenários o impacto de diferentes qualidades de sucata nos indicadores de performance chave ou KPIs (*key performance indicators*), focando principalmente em meio ambiente e consumo energético, Matino, Colla e Baragiola (2017a, 2017b) apresentam resultados numéricos para a cadeia inteira de produção, não apenas para FEA, concluindo que a sucata ruim tem um maior consumo energético, porém seu uso é interessante principalmente em países que não possuem tarifas energéticas caras.

Utilizando mineração de dados (*data mining*), Chen et al. (2018) cita uma solução para prever o consumo de energia, o trabalho consiste em propor uma ferramenta com pequena margem de erro, mesmo com toda a complexidade das diferentes variáveis de um FEA, prever o consumo energético do dia produtivo, utilizando dos grandes volumes de dados reais captados na produção do aço. Também utilizando mineração de dados, Amado et al. (2015), com ajuda do algoritmo SVM-RFE, identifica no processo de fusão do aço a variável que mais influência no consumo de energia. Cinco variáveis foram pré-selecionadas com o algoritmo e a mais impactante no consumo de energia foi a relação C/O<sub>2</sub> na fase de aquecimento, essa é uma importante etapa onde são obtidas especificações metalúrgicas como ppm de O<sub>2</sub> e também com a injeção de C e O<sub>2</sub> é essencial para a formação de escória, os resultados obtidos estão na redução de consumo em 15 kWh/t.

O estudo de Hu e Zhang (2017), faz uma modelagem para solução energética e diminuição de emissão de carbono na produção de ferro e aço na China, com uma visão macro e estratégica. Como resultado ele traz 3 diferentes estratégias:

1. Substituir BOF/BF por DR/EAF, porém de forma gradual, atentando a oferta de sucata;
2. Criar um centro de produção de coque em larga escala, retirando essa tarefa das metalúrgicas, inserir próximo as indústrias para minimizar logística;
3. Diminuir a taxa de ferro no aço.

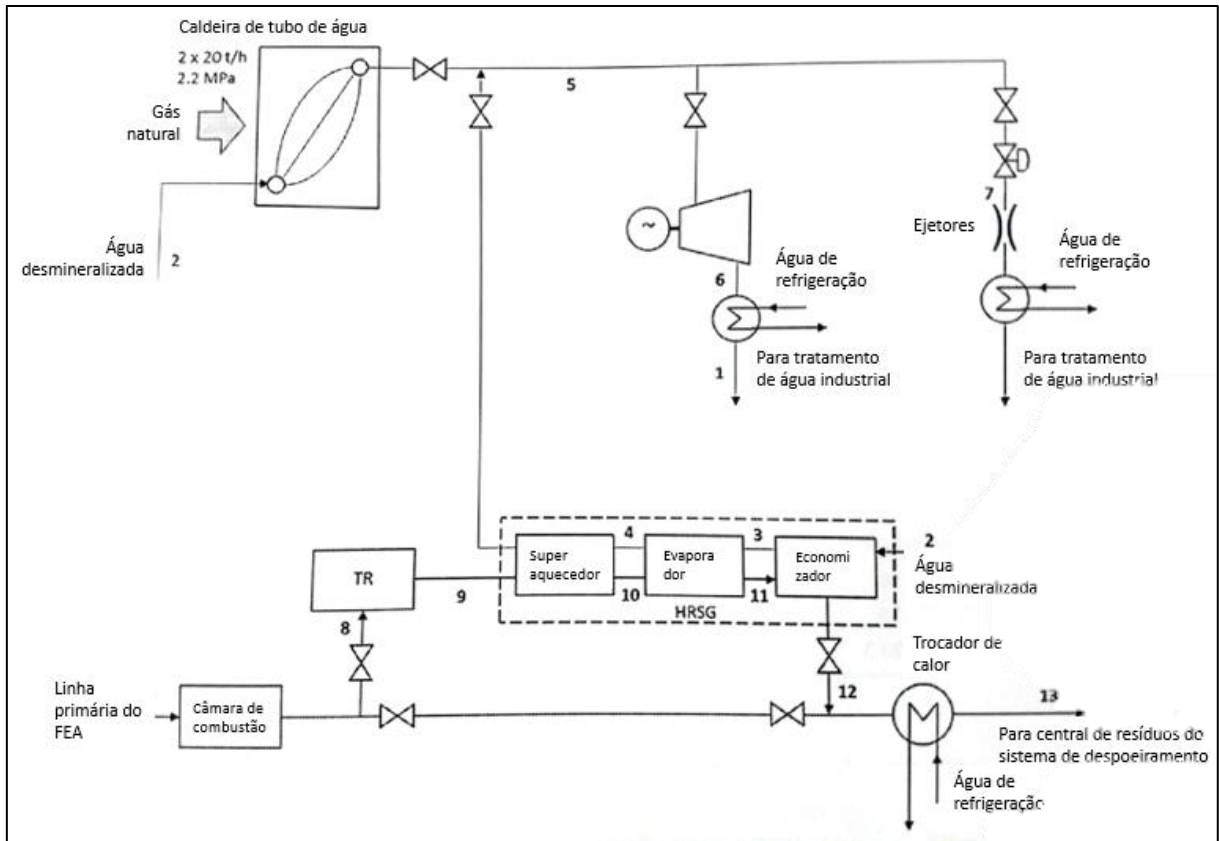
He e Wang (2017), apresentam de forma objetiva algumas tecnologias de eficiência energética ao longo das diferentes rotas de produção de ferro e aço, os autores identificam de forma interessante os ganhos energéticos em kWh/t para cada ponto da cadeia, porém como se trata de toda a cadeia, o processo específico do FEA são apresentadas algumas soluções coletadas de outros autores, sem detalhamento. Na mesma linha, olhando a cadeia toda de produção, o trabalho de Zhang et al. (2017), se trata de um levantamento de diferentes tecnologias para economizar energia, apresentam também qual o progresso da aplicação da tecnologia China. Para FEA foram apresentadas 4 soluções: Pré-aquecimento de sucata, otimização do fornecimento de energia, recuperação do calor residual de gases de combustão e práticas de escória espumante.

Olhando mais para o processo do FEA, existem diversas soluções propostas de reaproveitamento de calor do processo ou de resíduos, sendo as mais impactantes no pré-aquecimento de sucatas. Em geral, as diferentes tecnologias de pré-aquecimento têm um princípio de funcionamento similar, utilizam os gases de escape, que estão sempre em temperaturas elevadas, para aquecer a sucata que será inserida no FEA, em média pode gerar uma redução de consumo de 50 kWh/t, podendo chegar a mais de 100 kWh/t, dependendo do tipo de tecnologia e do tipo de forno utilizado (JOUHARA et al., 2018; LEE; SOHN, 2014; WORRELL et al., 2010).

Segundo Silva e Matelli (2018) outra forma de recuperação dos gases de escape do sistema de despoeiramento é através do conceito de uma planta secundária de cogeração. O conceito de planta de cogeração é recuperar o calor do sistema de despoeiramento para gerar vapor superaquecido para acionar uma turbina de condensação e alimentar os ejetores do sistema de desgaseificação. Para manter a operação da *mini-mill* flexível, a usina de cogeração deve operar em paralelo com as caldeiras a gás natural existentes. No estudo em questão os resultados potenciais da planta proposta são a geração de 45,4% do vapor requerido pelos ejetores, de redução de 29,3% do uso de água de refrigeração e redução de até 2,4% da energia elétrica necessária para o FEA, o que representa 8,76 kWh/t. O retorno para o investimento no

caso estudado foi aproximadamente de 4 anos. A Figura 4 representa o conceito de uma planta secundária de cogeração.

Figura 4 - Conceito da planta secundária de cogeração



Fonte: Adaptado de Silva e Matelli (2018)

O transformador de entrada de um FEA pode ter perdas que chegam a 7%, isso depende principalmente do tamanho e da idade do equipamento. Ao substituir o transformador, é possível converter a operação do forno para ultra alta potência de operação, reduzindo as perdas e aumentando a produtividade. Na questão da redução do consumo específico de energia elétrica, a estimativa é 1 kWh/t de aço para cada MW de aumento da potência (WORRELL; MARTIN; PRICE, 1999).

O gerenciamento da escória espumante é considerado um dos mais eficientes meios de redução do consumo de energia elétrica de um forno, as oportunidades de redução podem dar um retorno de até 30 kWh/t de aço. Além de ganhos em energia elétrica, a escória espumante traz outro ganho significativo, a redução do consumo de eletrodos, a qual pode chegar em até 30%. Os ganhos são possíveis na produção do aço, devido a uma melhor transferência térmica no processo e com isso, uma diminuição do tempo de fusão do aço. A escória espumante é um dos principais meios de proteção dos refratários do FEA, por meio da cobertura do arco voltaico

entre o eletrodo e a carga. Apesar dos grandes benefícios e teoricamente baixo investimento, o trabalho de formação e controle da escória espumante é muito difícil, porque o controle não está só no metal líquido, a sucata adicionada ao forno afeta a composição do metal líquido, necessitando de um sistema dinâmico para manter a escória espumante contínua e estável. (LUZ et al., 2018; MATSUURA et al., 2008; VIEIRA et al., 2016).

#### **2.4.1 Tecnologias de Pré-Aquecimento de Sucata**

A energia desperdiçada com a sucção dos gases, no sistema de exaustão ou “despoieramento”, é um dos principais pontos de ganhos em eficiência energética para fornos elétricos a arco.

Ao longo dos últimos anos, cada vez mais novos FEAs e outros em operação, são equipados com um sistema para o pré-aquecimento, através da recuperação de energia dos gases de exaustão. Em países com altos custos de eletricidade, os sistemas de pré-aquecimento de sucata são adotados com sucesso há mais de 40 anos. O uso dessa tecnologia pode reduzir o consumo de energia dos fornos elétricos a arco, através do uso do calor residual do forno para pré-aquecer a carga de sucata (REMUS et al., 2013; WORRELL et al., 2010).

Para o pré-aquecimento da sucata, existem diversas tecnologias aplicadas, as quais realizam o pré-aquecimento tanto diretamente nos cestos de carga de sucata, como em um eixo de carregamento adicionado ao forno. Em alguns casos, até mesmo energia fóssil adicional é inserida no processo de pré-aquecimento (REMUS et al., 2013).

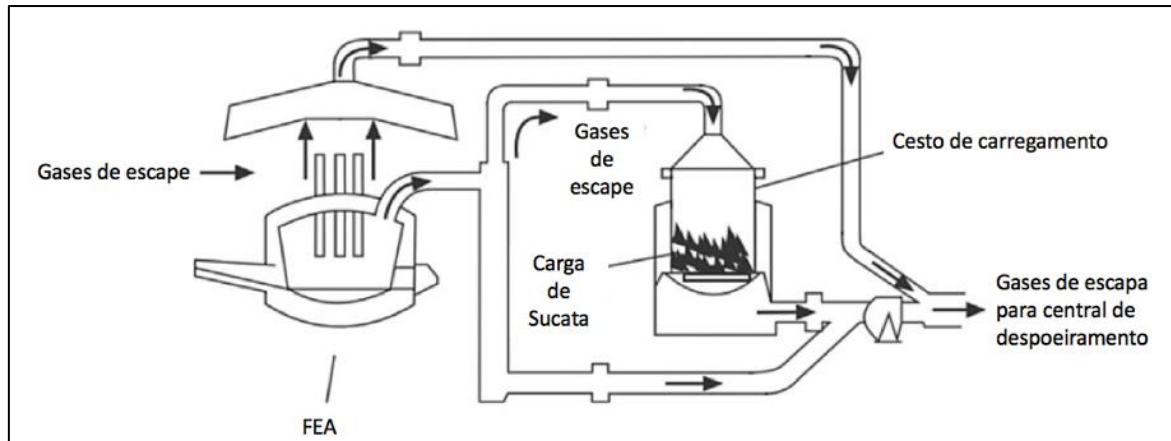
##### **2.4.1.1 Tipo de Cesto de Carregamento**

Essa tecnologia foi a pioneira em termos de pré-aquecimento de sucata utilizando gases de exaustão do forno. É um sistema simples, não requer soluções complexas para a alimentação do forno, utiliza o próprio cesto de carga de sucata. Como ponto negativo, a tecnologia tem uma baixa eficiência de transferência de calor dentro do cesto, pois a temperaturas devem ser limitadas no caso, para que o manuseio seguro no transporte com as pontes rolantes. A temperatura da sucata pré-aquecida está entre 300 °C e 450 °C, o potencial de economia de energia elétrica é em média 50 kWh/t, e a redução do tempo *tap-to-tap* (tempo total da corrida) está entre 6 a 8 minutos (LEE; SOHN, 2014; WORRELL; PRICE; MARTIN, 2001).

O funcionamento do sistema de pré-aquecimento do tipo cesto de carregamento, pode ser observado na Figura 5, o qual o próprio cesto de carregamento é utilizado para realizar o

pré-aquecimento da sucata metálica reaproveitando uma parcela dos gases de escape providos do FEA (SCHMITT, 1997).

Figura 5 - Exemplo de pré-aquecimento do tipo cesto de carregamento



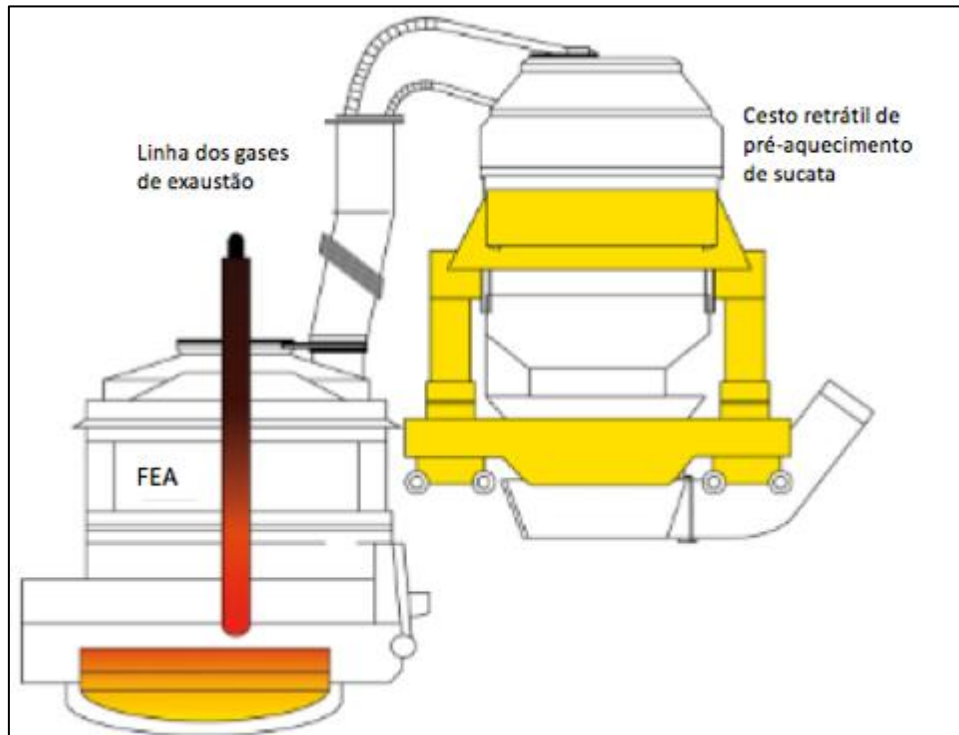
Fonte: Adaptado de Schmitt (1997)

Nos primeiros modelos de pré-aquecimento de cestos de carregamento, houve aumento prematuro de falhas no carregamento do cesto de sucata e deformação não uniforme no cesto. Isso levou um tempo maior de transferência de calor, aumentando o tempo *tap-to-tap* acima dos FEAs convencionais, no longo prazo se tornou inviável economicamente (WORRELL; PRICE; MARTIN, 2001).

Uma evolução do modelo é do tipo Danarc Plus M2 da fabricante Danielli, a Figura 6 representa o modelo, que consiste em um carro retrátil, com um cesto de sucata acoplado, para pré-aquecimento da sucata e carregamento do FEA. O carregamento é realizado em uma única carga de lote, reduzindo o tempo *power off* (tempo do forno desligado durante a corrida). Quando o forno está pronto para carregar, os cilindros do carro são acionados, encaixando-se nos assentos cônicos e levantando o teto, o carro de pré-aquecimento se posiciona, trazendo o cesto de sucata, acima do forno, então o cesto se abre e acontece o descarregamento da sucata no forno (FIOR, 1999).

O sistema de pré-aquecimento do tipo Danarc Plus M2, apresenta uma de redução média do consumo específico de energia elétrica de 57 kWh/t, a temperatura média de pré-aquecimento é de 450 °C, redução de 4 minutos no tempo *tap-to-tap*, e a transferência de calor é considerada moderada, pois existem relatos de transferência não uniforme de calor para a sucata (LEE; SOHN, 2014).

Figura 6 - Exemplo de pré-aquecimento Darnarc Plus M2



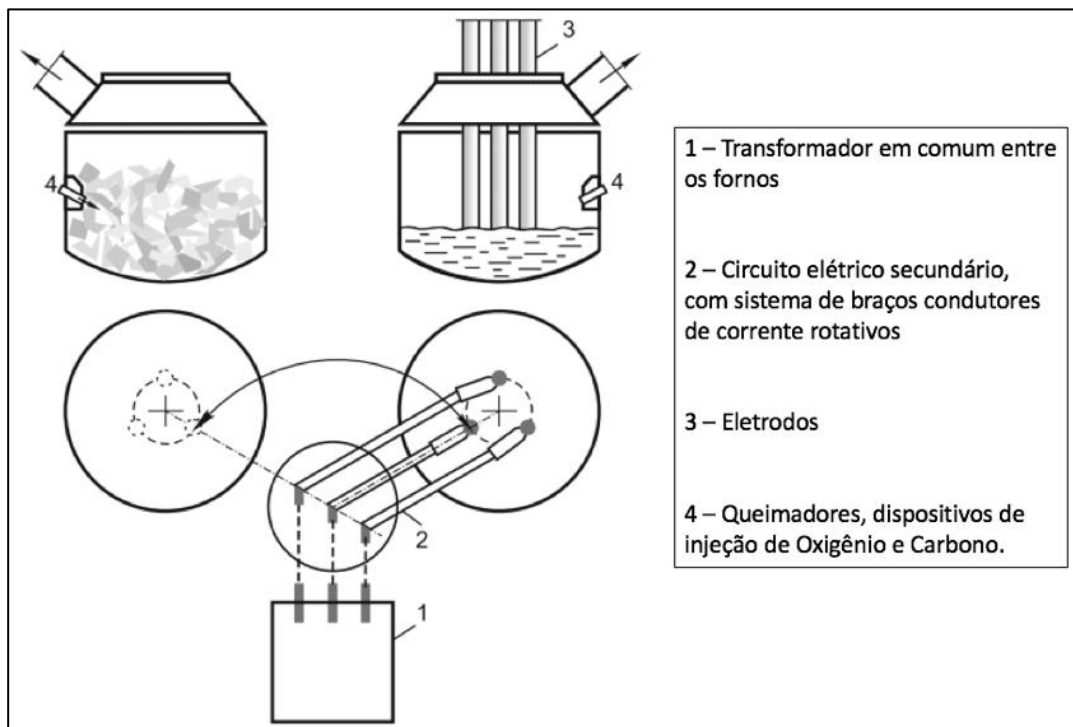
Fonte: Adaptado de Fior (1999).

#### 2.4.1.2 Tipo Twin-Shell

Uma evolução do sistema de pré-aquecimento do tipo cesto de carregamento é o sistema do tipo Twin-Shell, um projeto desenvolvido em conjunto pelos fabricantes NSC, NKK, SMS-Demag e Clecim. Consiste em dois fornos idênticos, posicionados próximos um do outro e são atendidos por um único conjunto de braços de eletrodos, ou seja, pelo mesmo sistema de potência. (REMUS et al., 2013; LEE; SOHN, 2014).

A Figura 7 representa o funcionamento do sistema de pré-aquecimento do tipo Twin-shell, é possível observar os dois fornos com um transformador em comum, conectado por um circuito elétrico secundário, com um sistema de braços condutores de corrente rotativos e eletrodos. Ambos os fornos são equipados com queimadores para aquecimento da sucata e dispositivos de injeção de oxigênio e carbono. Este sistema permite alternar o funcionamento entre os fornos. Enquanto um faz a fusão do aço, o outro realiza pré-aquecimento da sucata carregada, através dos queimadores e dos gases de exaustão provindos do FEA ligado (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

Figura 7 - Forno com sistema do tipo Twin-shell



Fonte: adaptado de Toulouevski e Zinurov (2017).

A temperatura média alcançada neste sistema é de 200 °C, o ganho médio em consumo específico de energia elétrica é de 17 kWh/t, a transferência de calor dos gases de exaustão para a sucata é considerada baixa. Uma das grandes vantagens desse sistema é a não necessidade de sistemas complexos para alimentação de sucata, porém o alto custo e complexidade do projeto, um novo EAF, bem como um aumento nos custos de manutenção, interferiram diretamente na baixa disseminação dessa tecnologia nas aciarias (LEE; SOHN, 2014; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

#### 2.4.1.3 Tipo Consteel

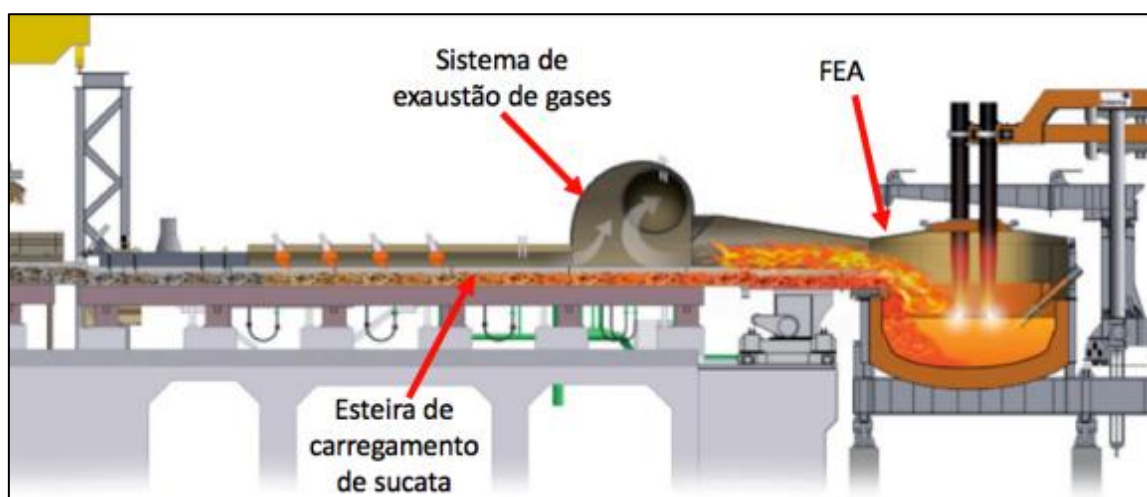
O sistema de pré-aquecimento Consteel é patenteado pela fabricante Tenova, pode ser dividido em duas partes, normalmente com mais de 100 m de comprimento no total. Uma parte é a esteira de transporte oscilante horizontal, alimentando continuamente o FEA com sucata pré-selecionada, a outra parte está dentro de um túnel revestido de refratário adjacente ao forno. O comprimento do túnel é de cerca de 30 m, através dele os gases de escape que saem do forno são removidos (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015; LEE; SOHN, 2014).

A alimentação contínua da sucata horizontalmente e a ausência da abertura da abóboda para carregamento de sucata no FEA, geram o aumento da estabilidade operacional da atmosfera de gás dentro do forno, devido a uma menor captação de nitrogênio e diminuição da oscilação da energia elétrica. O gás de escape durante as operações passa pela parte superior do eixo horizontal de transporte de sucata, enquanto o refugo é oscilado para trás e para a frente na parte inferior. Uma quantidade contínua de metal líquido é mantida no forno para ajudar na fusão da nova sucata inserida, isso faz com que o arco trabalhe para manter a sucata derretida, em um banho (metal líquido) plano, como uma fase de refino constante (LEE; SOHN, 2014; SCHMITT, 1997; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015).

O sistema Consteel está representado na Figura 8, com uma visão lateral do sistema em funcionamento, focando no túnel de carregamento, e na Figura 9 com a visão completa do sistema.

Em relação ao desempenho do sistema Consteel, tem-se uma redução média de consumo específico de energia elétrica de 40 kWh/t, a temperatura média de pré-aquecimento é de 300 °C, a redução média no tempo de *tap-to-tap* é de 6 minutos, e a transferência de calor para a sucata é considerada moderada, devido a limitação de transferência entre os gases e a sucata (WORRELL; MARTIN; PRICE, 1999; LEE; SOHN, 2014).

Figura 8 - Exemplo de sistema Consteel

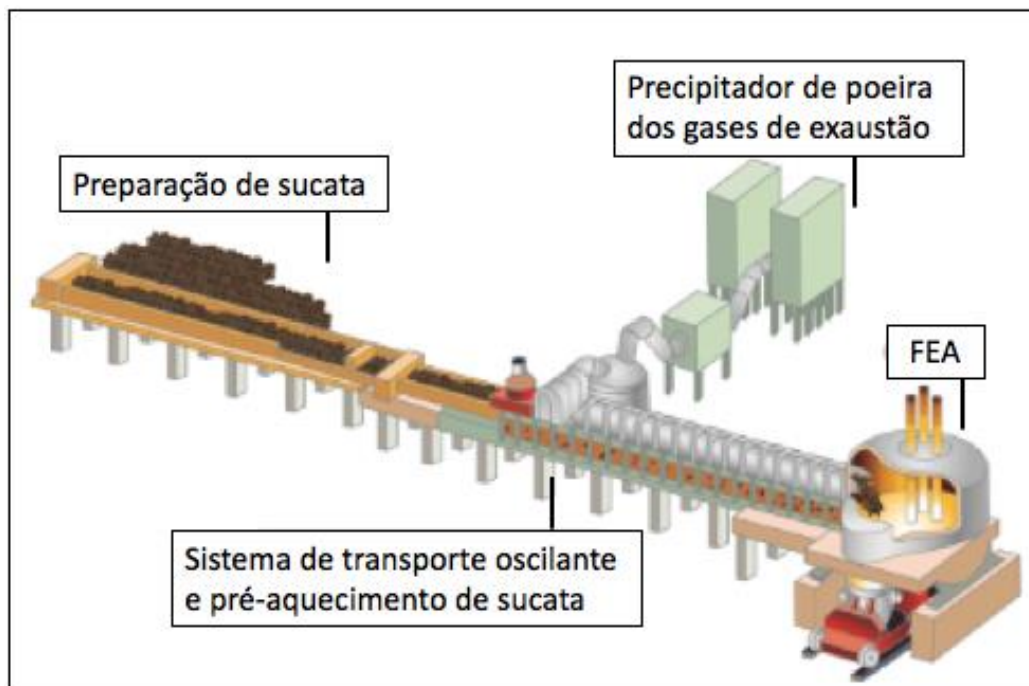


Fonte: Adaptado de Barella et al. (2014)

O sistema Consteel reduz o consumo de eletrodos, pois não há penetração da alta camada de sucata no forno em relação ao FEA convencional. O rendimento metálico aumenta, pois, a taxa oxidação no banho líquido diminui assim como a redução de Fe na escória, partículas grandes em forma de poeira contendo Fe nos gases de escape precipitam na sucata

sobre a esteira do sistema e retornam para o banho líquido. A principal desvantagem em relação ao sistema convencional é a baixa produtividade, os arcos elétricos estão constantemente submersos na escória espumante, o que diminui a taxa de transferência de calor para a sucata, fazendo com que a fase da fusão seja o gargalo do processo (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

Figura 9 - Visão geral do sistema Consteel



Fonte: Adaptado de Lee; Sohn (2014)

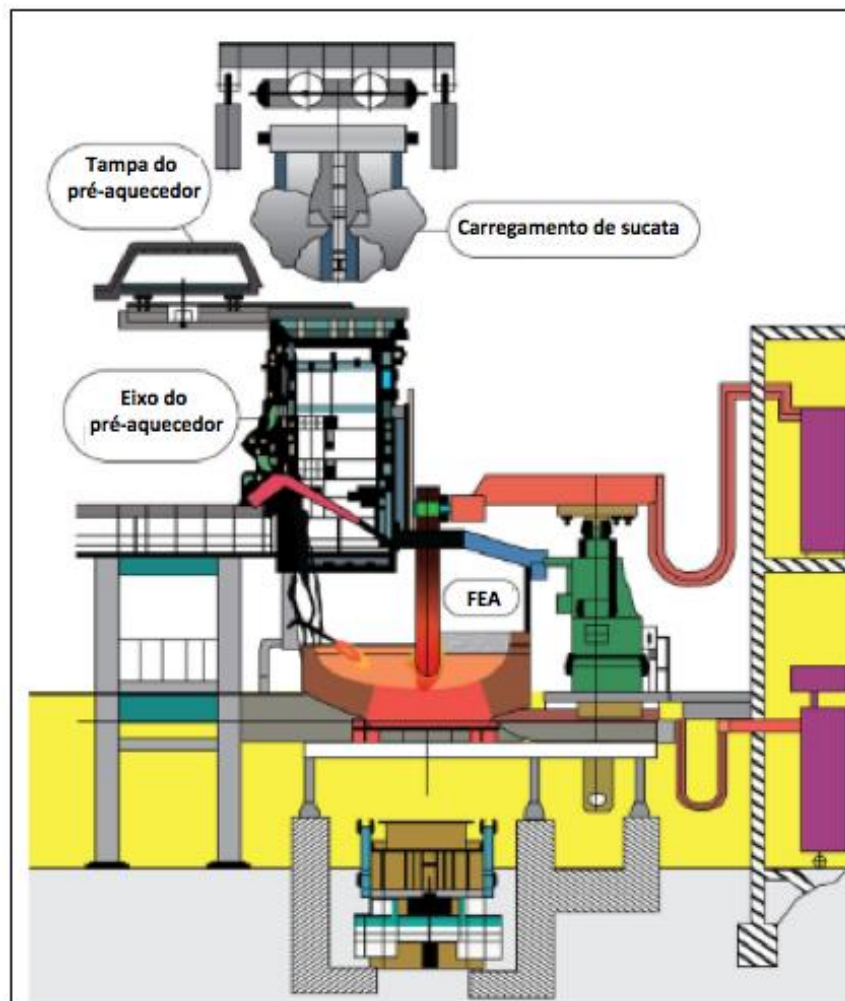
#### 2.4.1.4 Tipo Finger Shaft

A tecnologia de pré-aquecimento Finger Shaft, desenvolvida pela Fuchs, é um projeto muito eficiente. O exclusivo sistema de retenção de sucata Finger Shaft, permite o pré-aquecimento de 100% da carga de sucata com o aproveitamento do calor dos gases de escape. O primeiro cesto é pré-aquecido com o calor da fase de refino da corrida anterior e o segundo cesto durante a fusão do primeiro cesto. A sucata pode ser pré-aquecida a uma temperatura de aproximadamente 700°C antes de ser adicionada para a fusão no forno. Isso acarreta em uma significativa redução de consumo energético e no tempo *tap to tap* (REMUS et al., 2013).

A Figura 10 é uma representação do sistema de pré-aquecimento Fuchs Finger Shaft. É possível observar um eixo acoplado na parte superior do FEA, é o eixo do pré-aquecedor, o sistema será carregado de sucata de forma não contínua, através de cestos de sucatas içados por pontes rolantes.

De acordo com Lee e Sohn (2014), o potencial de economia em consumo específico de energia elétrica, pode chegar a 100 kWh/t em condições ideais de funcionamento, porém o ganho médio é de 60 kWh/t, a temperatura média de pré-aquecimento é de 500 °C, e a transferência de calor para a sucata é considerada moderadamente alta (LEE; SOHN, 2014; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015; WORRELL et al., 2010).

Figura 10 - Sistema Fuchs Finger Shaft



Fonte: Adaptado de Lee; Sohn (2014)

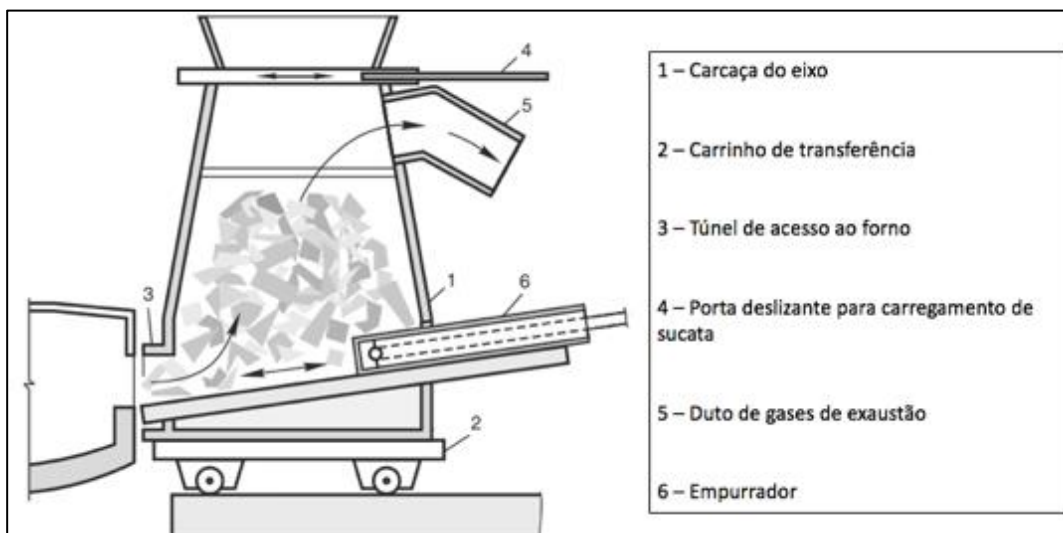
#### 2.4.1.5 Tipo Coss

A eficiência de calor dos gases de escape ao aquecer sucata em um eixo é maior em aproximadamente três vezes do que quando a sucata é aquecida em um sistema transportador de Consteel. Por outro lado, a operação contínua do forno com o banho plano é uma vantagem do processo Consteel. Para combinar essas duas vantagens, G. Fuchs desenvolveu e

implementou fornos de pás com a carga praticamente contínua de sucata no banho líquido (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015).

O sistema de pré-aquecimento tipo Fuchs Coss está representado na Figura 11, se trata de um eixo vertical instalado sobre um carrinho móvel, a conexão com o FEA é feita através de um pequeno túnel, onde se encontra a saída dos gases de escape. O carregamento é realizado na parte superior do eixo, com a abertura de uma porta deslizante, e a sucata é inserida no forno aos poucos com a ajuda de um empurrador, sem necessidade de desligar o forno e mantendo o banho líquido plano, não há muitas restrições quanto a dimensão e densidade da sucata. O pré-aquecimento é realizado pela passagem dos gases de exaustão pelo eixo vertical até a saída para o duto dos gases de exaustão. Os principais problemas são a entrada de ar no FEA, causada pela abertura entre forno e sistema, o que gera uma queda de temperatura aumentando a captura de nitrogênio, e o aumento da taxa de oxidação da sucata devido à alta temperatura de pré-aquecimento em conjunto com um aumento parcial na pressão de oxigênio (LEE; SOHN, 2014; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015, 2017).

Figura 11 - Sistema Fuchs Coss



Fonte: Adaptado de Toulouevski; Zinurov (2015, 2017)

A transferência de calor no sistema Fuchs Coss é considerada moderadamente alta, a temperatura de pré-aquecimento média da sucata é 500°C, e o ganho médio em consumo específico de energia elétrica é de 60 kWh/t (LEE; SOHN, 2014; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015).

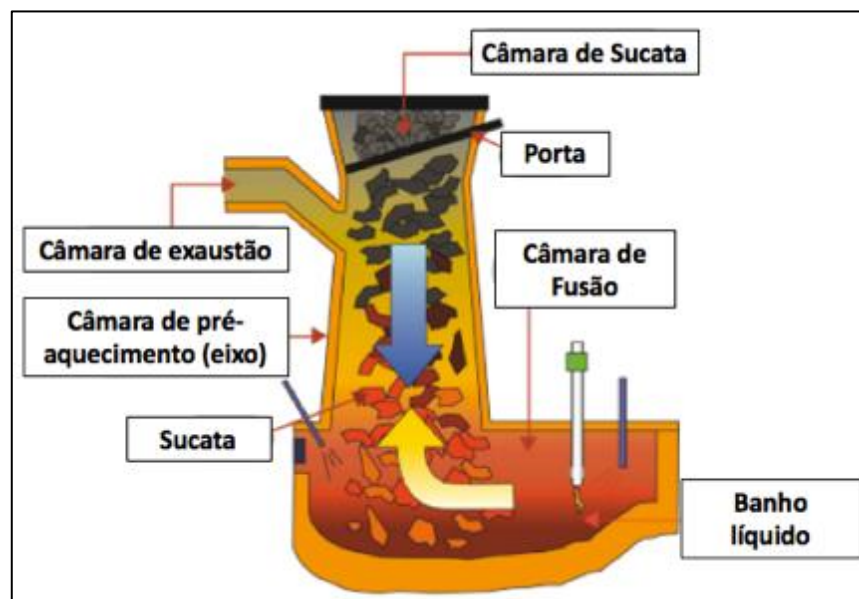
#### 2.4.1.6 Tipo Ecoarc

O sistema de pré-aquecimento Ecoarc, desenvolvido pela JP Steel Plantech Co, conecta diretamente um eixo vertical de pré-aquecimento à câmara de fusão do FEA, o esquema estrutural é similar ao tipo Coss a diferença está no eixo fixado ao forno, formando uma única estrutura. Neste caso, a janela de descarga de sucata do eixo é alinhada com a janela da parede lateral do forno sem folga. Nos fornos do tipo Coss, uma grande quantidade de ar é infiltrada no forno através de uma lacuna entre ele e a janela de descarga de sucata do eixo. A eliminação desta infiltração, juntamente com outras vantagens, permitiu reduzir o consumo de energia elétrica dos fornos Ecoarc em comparação com os fornos Coss (LEE; SOHN, 2014; TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

Na tecnologia Ecoarc, a sucata é continuamente alimentada para o eixo de pré-aquecimento e está em contato constante com o aço fundido na câmara de fusão. Durante a fase de fusão, o forno, incluindo o eixo, é inclinado para trás (DAL MAGRO et al., 2015).

A Figura 12, representa um desenho com visão lateral do funcionamento do forno com o sistema de pré-aquecimento Ecoarc, a seta grande azul representa o fluxo de sucata, a seta grande amarela representa o fluxo dos gases de exaustão. É possível observar que o FEA e o Ecoarc são uma peça só, um sistema único completo.

Figura 12 - Visão lateral do sistema Ecoarc



Fonte: Adaptado de Lee; Sohn (2014)

O sistema Ecoarc tem a transferência de calor considerada alta, a temperatura média de pré-aquecimento de sucata é de 650°C, e a redução média no consumo de energia elétrica específica é de 90 kWh/t, os processos de alimentação contínua como o Ecoarc, trazem uma grande redução no tempo *tap-to-tap*, de 5% a 15% (DAL MAGRO et al., 2015; LEE; SOHN, 2014).

Alguns dos problemas desse sistema são a necessidade de um controle mais rigoroso do suprimento de sucata e o aumento da taxa de oxidação da sucata. O tamanho e dimensão de sucata otimizado para este sistema, promove um bom controle do fluxo de gases e minimiza a aderência de sucata no eixo de pré-aquecimento, devido as altas temperaturas dos gases de exaustão. Para combater o aumento da taxa de oxidação da sucata que leva a um aumento do pós-combustão nas reações de fusão, limitando a pós-combustão no refino, diminuindo a eficiência térmica dos gases de escape sendo necessário um forte trabalho no controle da escória espumante (LEE; SOHN, 2014).

A principal desvantagem dos sistemas com eixo de carregamento (Finger Shaft, Coss e Ecoarc) é a redução da produtividade, em toneladas por hora, pela diminuição da taxa de transferência de calor dos arcos elétricos aumentando o tempo de fusão do aço, problema semelhante ao sistema Consteel. Esse problema em conjunto com o curto *tap-to-tap* dos sistemas de eixo de carregamento, podem levar a uma limitação no aumento adicional da temperatura de pré-aquecimento, pois a potência térmica específica nos gases de exaustão diminuirá, sendo necessário uma outra fonte de energia de pré-aquecimento (como a queima de gás natural) para manter a redução do consumo de energia elétrica e aumentar a produtividade do forno (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2015, 2017)

### 3 MÉTODO E MATERIAL

#### 3.1 MÉTODO

O procedimento adotado no presente trabalho é denominado pesquisa-ação, segundo Miguel (2011), é um procedimento o qual o pesquisador é participante ativo no meio, interfere de forma cooperativa com outros, com o objetivo de solucionar algum problema.

A pesquisa tem caráter exploratório e de abordagem qualitativa, tem como objetivo aumentar a familiaridade com o problema a fim de torna-lo mais explícito e formular hipóteses, traça uma relação direta entre o ambiente de pesquisa e o mundo real, tendo o processo como foco (GIL, 2017; MIGUEL, 2011).

No FEA existem diversas entradas e saídas de energia, podem ser exemplificadas pela equação (1), a qual apresenta o balanço de energia de um forno elétrico a arco (KIRSCHEN; RISONARTA E PFEIFER, 2009). O “ETotal”, é a energia total utilizada na corrida, sendo a soma da energia elétrica consumida na corrida (P elétrica), a energia de entalpia do oxigênio injetado reagindo com os outros elementos dentro do banho ( $\Delta H$  oxigênio injetado), e a energia de entalpia provida da queima do gás natural ( $\Delta H$  gn). A energia total também pode ser representada pela soma das energias dos produtos do processo, sendo elas a energia de entalpia contida no aço líquido ( $\Delta H$  aço), a energia de entalpia contida na escória ( $\Delta H$  esc), a energia perdida pelos gases de combustão durante a corrida ( $\Delta \dot{H}$  pós combustão), a energia perdida no sistema de resfriamento de proteção da carcaça e abóboda do FEA durante a corrida ( $\Delta \dot{Q}$  resfriamento) e a energia perdida por radiação e outras pequenas perdas durante a corrida ( $\Delta \dot{Q}$  radiação e outras perdas).

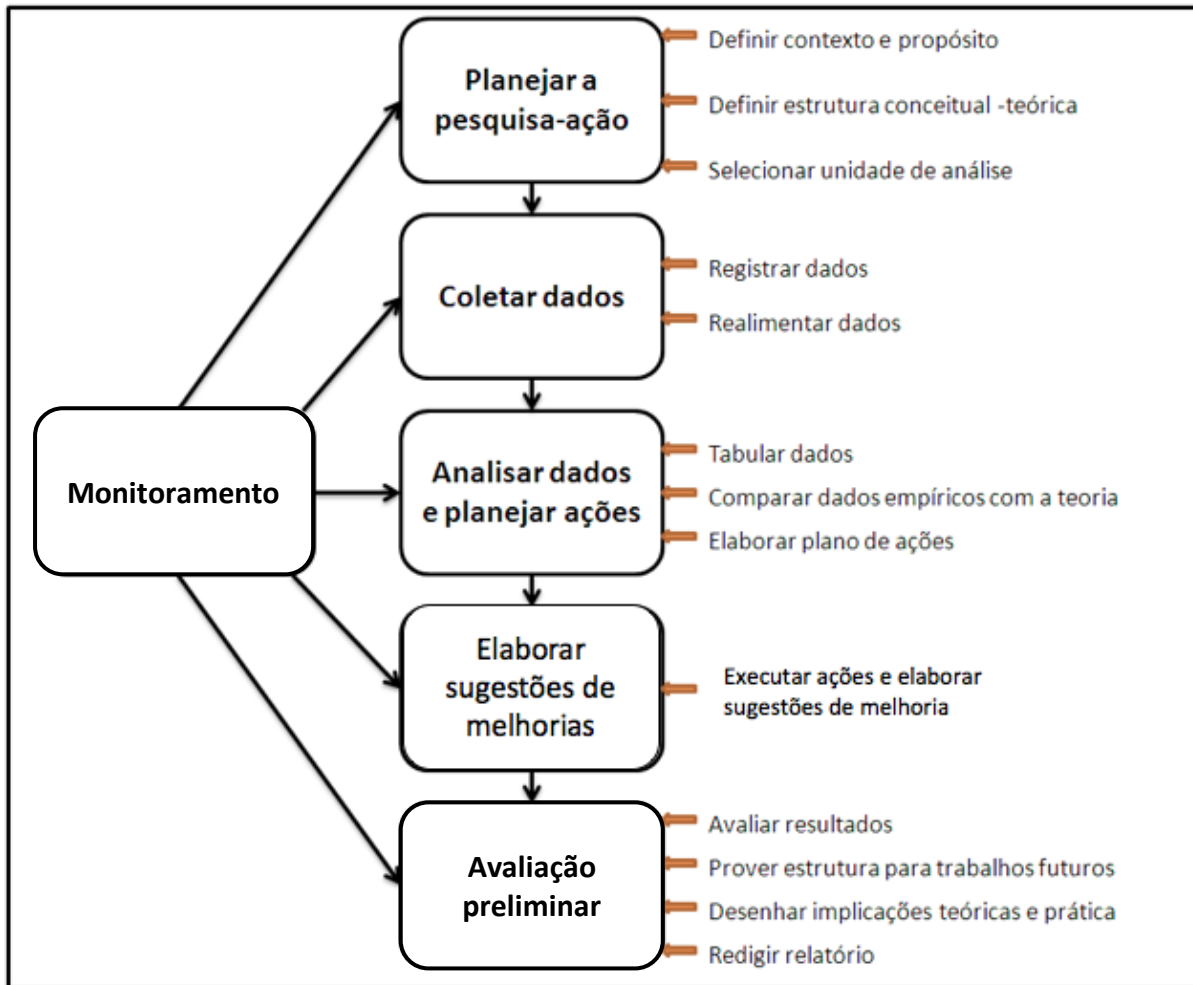
$$\begin{aligned}
 E_{\text{Total}} &= \int_{\text{Carregamento}}^{\text{Vazamento}} P_{\text{elétrica}} dt + \Delta H_{\text{oxigênio injetado}} + \Delta H_{\text{gn}} \\
 &= \Delta H_{\text{aço}} + \Delta H_{\text{esc}} + \int \Delta \dot{H}_{\text{pós combustão}} dt + \\
 &\int \Delta \dot{Q}_{\text{resfriamento}} dt + \int \Delta \dot{Q}_{\text{radiação e outras perdas}} dt
 \end{aligned} \tag{1}$$

O método base, para encontrar oportunidades de redução do consumo específico de energia elétrica, foi utilizar a equação (1), buscando reduzir as perdas nos produtos do processo e reduzindo assim, a quantidade de energia necessária na entrada do processo.

### 3.1.1 Etapas da Pesquisa

A pesquisa foi realizada seguindo as etapas da Figura 13, é possível verificar o monitoramento constante das etapas, característica da pesquisa-ação.

Figura 13 - Etapas da pesquisa



Fonte: Adaptado de Miguel (2011)

#### 3.1.1.1 Planejamento da pesquisa-ação

O planejamento da pesquisa-ação engloba três ações, a definição do contexto e propósito, seleção da unidade de análise e definição da estrutura conceitual-teórica.

A definição do contexto e propósito foi a escolha do tema de pesquisa, dos objetivos e dos critérios de análise.

A seleção da unidade de análise foi a fase em que a unidade fabril a qual foi desenvolvido o estudo foi selecionada. A empresa está situada na região do Vale do Paraíba,

interior do estado de São Paulo. O seu segmento produtivo, é a siderurgia, mais especificamente produção de aço, sendo considerada de grande porte.

A definição da estrutura conceitual-teórica, foi a etapa na qual se realizou a primeira pesquisa exploratória em base de dados bibliográfica para a construção da fundamentação teórica, sendo que à medida que surgiam lacunas na prática, mais pesquisa bibliográfica era realizada.

#### 3.1.1.2 A coleta de dados

Para a coleta de dados foram utilizados quatro métodos distintos, a pesquisa exploratória em base de dados bibliográficas, as observações participantes do pesquisador, análise de documentos da empresa e o questionamento dos participantes.

A pesquisa exploratória em base de dados bibliográficas foi realizada com o intuito de entender o problema de pesquisa, buscar compreender os aspectos que influenciam no problema e buscar soluções já existentes na bibliografia, para a realidade da empresa.

A observação participante do pesquisador, ocorreu durante toda a captação e análise de dados, principalmente no início da pesquisa, pois favorece uma melhor compreensão sobre a realidade do problema de pesquisa.

A análise de documentos da empresa, foi utilizado durante todo o projeto, principalmente no início, para entender o comportamento do objeto de pesquisa e possíveis lacunas de melhorias.

O questionamento dos participantes, foi um método utilizado durante todo o processo de coleta e análise de dados. Foram feitas diversas reuniões com os envolvidos nos projetos, apresentando as análises realizadas, com o objetivo de conhecer os pontos críticos que os métodos anteriores não forneciam, e para direcionamento de novas oportunidades de estudos.

Os registros dos dados foram realizados sempre em forma de anotações ou documentos eletrônicos.

#### 3.1.1.3 Análise dos dados e planejamento das ações

A partir da coleta de dados, iniciou-se a fase de análise dos dados, primeiramente através de planilhas eletrônicas e reuniões com a equipe.

As planilhas, gráficos e documentos eletrônicos foram utilizados para obter um melhor entendimento do problema e trazer possíveis oportunidades de melhoria. Esses documentos foram a base das primeiras discussões em grupo do trabalho.

As discussões com os envolvidos geraram novas oportunidades de redução do consumo de energia específica, criação e direcionamento dos estudos.

Após as análises dos dados iniciais, foi construído um plano de ação focado em possíveis soluções previamente discutidas, o intuito desse plano era testar as hipóteses no simulador da empresa e propor as alterações pertinentes. O Quadro 1 representa esse plano de ação, em vermelho estão as ações canceladas, em verde as cumpridas. As ações de testes foram canceladas, pois as aplicações das sugestões de melhorias ficaram a critério da empresa.

Quadro 1 - Plano de ação para estudo de soluções discutidas

PLANO DE AÇÃO PROJETO MISTRADO FEA - UNESP/GERDAU						
ITEM	ATIVIDADE	RESPONSÁVEL	DATA DE ENTREGA	% CONCLUÍDO	FEITO	OBSERVAÇÕES
<b>1</b>	<b>Estudo Relação Gusa na Carga x Energia Elétrica</b>			100%		
1.1	Realizar simulações no SOS da variação do Gusa na carga	Hachiley		100%	✓	Estudo pronto e apresentado
1.2	Fornecer banco de dados atualizado, Gestão FEA e banco de dados Sucatas	Tiago Favaretto	16/05/2018	100%	✓	
1.3	Estudar comportamento das corridas reais em relação ao consumo de energia elétrica, observando o % de gusa da corrida	Hachiley	29/05/2018	100%	✓	Feito com dados. De 2017 e 2018
1.4	Comparar as simulações do item 1.1 com o estudo do item 1.3	Hachiley	05/06/2018	100%	✓	
1.4.1	Apresentação rápida do desenvolvimento para o Juliano e Feedback do trabalho	Hachiley/Juliano	05/06/2018	100%	✓	Conversa no início do dia, 15 minutos.
1.5	Criar modelo para a escolha do melhor índice de Gusa na carga ou melhor receita elétrica e química a ser utilizada para o Gusa na carga.	Hachiley	19/06/2018	100%	✓	Item em Stand by
1.5.1	Apresentar modelo para Juliano e Roberto e Feedback do trabalho	Hachiley/Juliano/Roberto	19/06/2018	100%	✓	Stand By
<b>2</b>	<b>Estudo Relação Fundo Úmido x Energia Elétrica x Gusa na Carga</b>			100%		
2.1	Fornecer banco de dados atualizado Gestão FEA	Tiago Favaretto	26/06/2018	100%	✓	Possivelmente será necessária uma atualização do banco de dados posteriormente
2.2	Analisar planilha Gestão FEA, visando relação Fundo Úmido x Energia Elétrica	Hachiley	03/07/2018	100%	✓	Mas ainda precisa ser melhorado, pois tem um volume de dados pequeno
2.3	Analisar impacto do % Gusa no item 2.2	Hachiley	10/07/2018	100%	✓	Falta mais volume de dados para iniciar
2.4	Realizar simulações no SOS da variação do fundo úmido e % Gusa na carga, observando comportamento da energia	Hachiley	31/07/2018	100%	✓	Em andamento
2.4.1	Apresentação rápida do desenvolvimento para o Juliano e Feedback do trabalho	Hachiley/Juliano	31/07/2018	100%	✓	Foi conversado informalmente, falta fazer uma apresentação
2.5	Estudar padrão de trabalho atual e e criar sugestão para melhor gerenciamento do fundo úmido, visando um menor consumo de energia e menor desperdício de aço na	Hachiley	14/08/2018	100%	✓	Não há nada referente a fundo úmido nos padrões
<b>3</b>	<b>Testes</b>			0%		<b>CANCELADO</b>
3.1	Compilar todos os estudos já realizados e propostas de melhoria	Hachiley	21/08/2018	0%	●	Levantar as sugestões e definir o que especificamente será testado.
3.2	Realizar testes porta de escória	Tiago Favaretto/Hachiley	04/09/2018	0%	●	Exige acompanhamento contínuo
3.3	Realizar testes % Gusa	Tiago Favaretto/Hachiley	18/09/2018	0%	●	Tem que ser preparado no carregamento antes de entrar em prática.
3.4	Realizar testes Fundo úmido	Tiago Favaretto/Hachiley	02/10/2018	0%	●	Exige acompanhamento contínuo
<b>4</b>	<b>Observações Finais</b>			100%		
4.1	Reunir estudos e resultados dos testes realizados	Hachiley	09/10/2018	100%	✓	
4.2	Apresentar análises, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros	Hachiley	16/10/2018	100%	✓	Reunião final do trabalho com as partes interessadas

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

### 3.1.1.4 Execução das ações e elaboração de sugestão de melhorias

Nesta etapa foi executada as ações propostas do plano de ação do Quadro 1. Após cada grupo de ação cumprida, era gerado um novo volume de dados, que demandava novas análises e novas discussões com a equipe. Por fim, com as novas análises, foram elaboradas sugestões de melhoria para o problema de pesquisa.

#### 3.1.1.5 Monitoramento

O monitoramento está presente durante todas as etapas do trabalho, faz com que o projeto seja cíclico, com o objetivo de gerar o aprendizado contínuo. É utilizada até que a pesquisa tenha seus objetivos alcançados, abandonados ou revistos (MIGUEL, 2011). Tendo em mão as sugestões de melhorias provindas tanto das análises, quanto das pesquisas bibliográficas.

#### 3.1.1.6 Avaliação preliminar

Tendo em mão as sugestões de melhorias provindas tanto das análises, quanto das pesquisas bibliográficas, foi possível realizar uma discussão sobre cada item de melhoria e gerou-se uma conclusão final sobre os objetivos propostos pelo trabalho.

### 3.2 MATERIAL

Como materiais de estudo para a realização do presente trabalho, tem-se o objeto principal do estudo, o Forno Elétrico a Arco, estudando o processo desde o carregamento de sucata até o vazamento do aço líquido, o simulador de FEA chamado *Scrap Optimizer System* (SOS), e as planilhas de gestão do forno.

#### 3.2.1 O Forno Elétrico a Arco

A aciaria da empresa estudada neste trabalho, possui dois fornos elétricos a arco semelhantes, porém não utiliza os dois fornos em paralelo, somente um é ligado por vez. Os fornos são DEMAG® com 40 MW de potência, tipo AC (corrente alternada) de três eletrodos de carbono, capacidade acima 100 t de aço vazado, utilizado para realizar a fusão da carga metálica, transformando em aço líquido de acordo com as especificações requisitadas. Suas

paredes internas são revestidas com tijolos refratários e sua carcaça é refrigerada a água. A abóboda e o sistema de potência são retráteis, sendo deslocadas para fora do forno nos carregamentos de sucata. O FEA possui duas saídas em lados opostos, uma é de escória, bloqueada por uma porta refrigerada retrátil e a outra a “bica”, bloqueada por uma camada de massa, inserida manualmente antes de cada corrida.

O forno possui sistema injeção de oxigênio supersônico através de jatos coerentes - Cojet®, sistema de injeção de coque/carbono, queimadores auxiliares com gás natural, acionados automaticamente de acordo com a receita química escolhida pelo operador, ou manualmente em caso de ajustes.

O recolhimento de amostras e a medição de elementos como temperatura e percentual de carbono, são realizados por um robô e acionados de dentro da cabine de comando. O carregamento e descarregamento do cilindro de prova do robô, é realizado manualmente.

O sistema basculante do FEA, possibilita uma inclinação do forno sobre um eixo para ambos os lados, um lado para realizar a retirada da escória e o outro o vazamento do aço líquido.

O tempo médio de processamento do lote ou corrida (como é conhecido no ambiente de aciarias), engloba desde o carregamento do forno com sucata metálica, até o vazamento do aço líquido, é chamado *tap-to-tap*, sendo em média de 90 minutos. O tempo médio de eletrodo ativo sobre a carga metálica, chamado de *power on*, é de 60 minutos, e o tempo de forno inativo, chamado de *power off*, é de 30 minutos.

O FEA trabalha com pressão interna negativa, isto é, pressão interna menor que a externa, isso se dá ao fato do funcionamento do sistema de “despoeiramento”, que tem como objetivo realizar a sucção dos gases emitidos no processo, fica localizado anexo ao forno, próximo a abóboda.

Para a alimentação do forno, utiliza-se como matéria prima, predominantemente sucata ferrosa e gusa. O processo de abastecimento conta com uma ponte rolante de capacidade 60 toneladas. Um lote de produção do FEA com aproximadamente 110 t de sucata ferrosa e gusa, são necessários de 2 a 4 carregamentos em cestos. Historicamente, a quantidade de carregamentos mais utilizadas são 3 cestos, feitos em momentos distintos da corrida.

Para o vazamento do aço líquido, é posicionado em frente a bica, por uma ponte rolante de 150 toneladas de capacidade, uma panela pré-aquecida e revestida com refratários. O furo na “bica” do forno é aberto, e o sistema basculante inclina o equipamento para facilitar o vazamento do aço.

Após vazado o aço, o forno retorna a sua posição inicial e a bica é vedada novamente com uma massa especial. O aço líquido então é transportado para o próximo processo dentro da aciaria, o Forno Panela.

O FEA trabalha em três turnos, turno “A” das 0h até as 8h, turno “B” das 8h às 16h, turno “C” das 16h às 0h.

Os dados de desempenho de cada corrida, são registrados em um banco de dados através do sistema supervisorio, o PIMS (*Plant Information Management System*). O banco de dados é compilado e atualizado em planilhas em tempo real, podendo ser extraído em qualquer momento. A alimentação do banco de dados é feita de forma automática para a maior parte dos indicadores e manual para alguns indicadores, logo após o término da corrida.

Os dados históricos de desempenho do FEA nas corridas, apontam para um consumo médio de 382 kWh/t de aço enornado, considerando 2740 amostras, do período de janeiro a agosto de 2017.

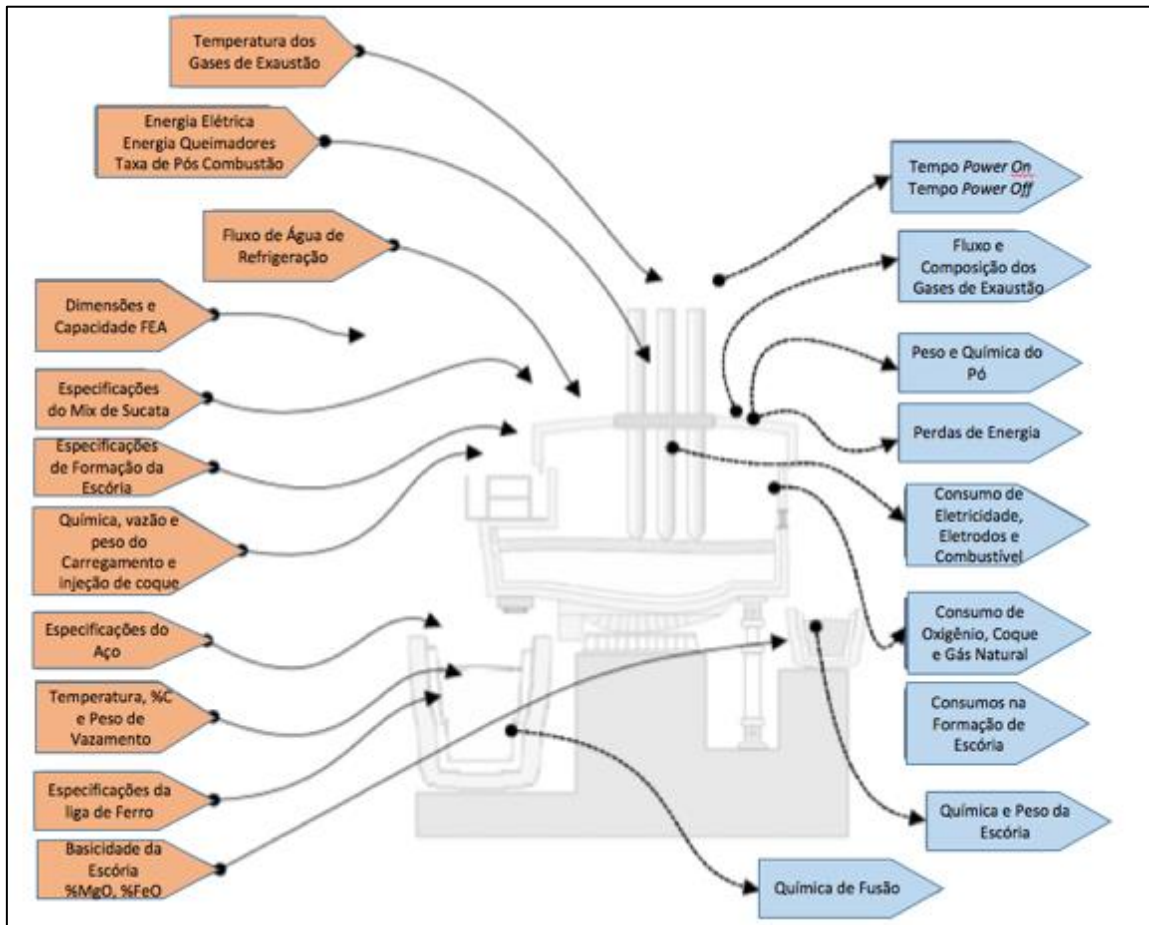
### **3.2.2 O Scrap Optimizer System**

O simulador utilizado neste trabalho se chama *Scrap Optimizer System* (SOS), é um software desenvolvido pela empresa proprietária do forno estudado. Existem diversos módulos, o que será utilizado é o módulo FEA, nele existe uma modelagem matemática de todas as entradas e saídas do forno, resumidas no Anexo 2, e todos os parâmetros de entradas e saídas podem ser ajustados ou fixados como: potência, número de cestos, mix de sucata, tempo de ativação dos queimadores, abertura da abóboda, abertura da porta de escória, peso de aço vazado e rendimento (relação entre peso de aço vazado e peso de aço enornado), resumidos no Anexo 1. A Figura 14 representa as entradas em laranja e as saídas em azul, todos são parâmetros que podem ser fixados ou simulados. O simulador faz uso intensivo das equações presentes na Tabela 1.

No Anexo 1 estão todos os parâmetros do forno ajustáveis dentro do simulador. Os valores dos parâmetros descritos, foram ajustados para que o simulador possa representar o mais fielmente possível, o forno elétrico a arco estudado.

No Anexo 2 estão resumidas as principais equações utilizadas no simulador.

Figura 14 - Diagrama de entradas e saídas FEA



Fonte: Adaptado de Fortes e Costa (2011)

### 3.2.3 Planilhas de gestão do FEA

O sistema PIMS armazena as informações em forma de banco de dados, o qual é atualizado instantaneamente, assim que a informação é inserida ou enviado ao sistema. Quando necessário, é possível exportar as informações em formato de tabela de Microsoft Excel®, com os dados atualizados até o momento da exportação, é possível escolher um período de dados, um ou mais anos anteriores.

No presente trabalho, duas tabelas foram utilizadas, a “Gestão FEA” e a “Gestão de Sucatas”. O histórico dos dados utilizados foi em geral de 2 anos.

A planilha “Gestão FEA”, apresenta todas as informações referentes a corrida do FEA, dados de consumos diversos, tempos, paradas, justificativas de paradas e notas, referentes ao desempenho em determinados indicadores na corrida.

A planilha “Gestão Sucatas”, apresenta informações referentes a montagem de carga de sucata em cada corrida. A planilha apresenta diversas abas com informações distintas, desde a

composição de sucatas da corrida até o custo efetivo de cada sucata e de cada carregamento para corrida. A planilha traz notas desempenho do carregamento de sucata, referentes somente a montagem da carga de acordo com padrão proposto.

### 3.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Em relação aos limites deste trabalho proposto, apesar de focar na produção do aço utilizando a rota do forno elétrico a arco, o trabalho aborda apenas os processos inerentes ao FEA e seus parâmetros, como o carregamento do forno, fusão da sucata metálica, refino e vazamento do aço.

Os processos posteriores, como o refino no Forno Panela e Lingotamento, não fazem parte do estudo.

No processo anterior, o pátio de sucatas, o trabalho se limita à especificação de alguns itens da carga de sucata e seu impacto no consumo de energia, levando em conta quantidades de carbono e ferro gusa. O trabalho não engloba análise e melhorias no processo operacional de estratificação e formação da carga metálica.

As propostas resultantes das análises do presente trabalho não foram testadas no FEA, os testes e a implementação estão a critério da empresa.

## 4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

As primeiras reuniões do projeto foram realizadas junto ao corpo técnico do FEA, contando com representantes da operação à manutenção. Nas reuniões, as ideias de melhorias eram abertas a qualquer integrante, assim surgiram as primeiras oportunidades do trabalho.

A análise do sistema de notas da corrida foi um dos resultados das reuniões iniciais, ela permitiu ter um diagnóstico de qual era a real situação do FEA estudo. O resultado das análises era sempre apresentado para a equipe, a qual discutia criticamente, e gerava novas demandas.

### 4.1 SISTEMA DE NOTAS DA CORRIDA

O sistema de notas da corrida foi desenvolvido pela a equipe da aciaria, para se obter um melhor gerenciamento da performance da equipe nos postos-chave de cada corrida. O sistema também é uma referência e motivação para os operadores do FEA, os quais buscam a nota meta traçada pela liderança.

As notas das corridas são definidas através de 10 critérios baseados em indicadores gerenciais, cada um com peso diferente do outro. As notas variam de 0 a 10 para cada critério, os quais possuem pesos diferentes e quando somados representam a nota final da corrida, a meta é 7. Cada indicador possui sua curva específica, todos são através de uma equação linear a qual penaliza o não atingimento do objetivo, caso atinja a nota terá valor máximo do critério. A Tabela 2 é uma representação da tela que os operadores têm acesso, é possível observar os critérios e suas unidades de medida na coluna “PARÂMETROS”, na coluna da direita é representado o parâmetro de comparação (igual, menor ou igual, maior ou igual, OK e NOK) entre as duas próximas colunas “OBJETIVO” e “REALIZADO”, sendo o primeiro, a meta a ser alcançada, e o segundo, o resultado atingido na corrida.

A Tabela 3 representa as notas máximas possíveis por critério de avaliação, na coluna “Item”, estão apresentados todos os critérios de notas, e na coluna “Nota Máxima Possível”, estão as notas máximas ou peso de cada item.

Os critérios e equações utilizados para a formação das notas estão representados na Tabela 4, onde a coluna "Item" é referente aos parâmetros de avaliação, a coluna “Critério 1” é o requisito para se obter nota máxima (representada na Tabela 2 ou coluna “Nota”), a coluna “Critério 2” representa o ponto de partida a qual se inicia o desconto da nota obtida, e a coluna “Equação da nota” representa como é feito o desconto da nota, sendo “x” o valor obtido na corrida obedecendo o Critério 2.

Tabela 2 - Exemplo da tela com os parâmetros das notas da corrida

PARÂMETROS	MEDIDA	OBJETIVO	REALIZADO
1.Grafite (kg)	<=	500	266
2.Oxigênio (Nm <sup>3</sup> )	<=	3000	3051
3.Gás Natural (Nm <sup>3</sup> )	<=	600	527
4.Energia Elétrica (kWh/t)	<=	360	451,9
5.Temperatura de Vazamento (°C)	>=	1640	1651
6.Power Off Oper.+ Desoxidação (min)	>=	91	95
7.Rendimento (%)	<=	14	21,5
8.Power On (min)	<=	60	62
9.Retralho P	OK	OK	OK
10.FeO (%)	<=	25	30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 3 - Notas máximas por critério

Item	Nota Máxima Possível
Grafite	0,7
Oxigênio	0,7
Gás Natural	0,7
Energia Elétrica	1,5
Temperatura de Vazamento	0,7
Power Off	1,5
Rendimento	1,5
Power On	1
Retralho	1
FeO	0,7
<b>TOTAL</b>	<b>10</b>

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 4 - Critérios e equações das notas

Item	Critério 1	Nota	Critério 2	Equação da nota
Grafite	< 500 kg	0,7	> 500kg	Nota = $0,7 - 0,007(x - 500)$
Oxigênio	< 3000 N.m3	0,7	> 3000 N.m3	Nota = $0,7 - 0,0014(x - 3000)$
Gás Natural	< 600 N.m3	0,7	> 600 N.m3	Nota = $0,7 - 0,0058(x - 600)$
Energia Elétrica	< 360 kWh/t	1,5	> 360 kWh/t	Nota = $1,5 - 0,05(x - 360)$
Temperatura de Vazamento	1640 °C	0,7	< 1640 °C	Nota = $0,7 - 0,035(x - 1640)$
			> 1640 °C	Nota = $0,7 - 0,07(1640 - x)$
Power off op.	< 14	1,5	> 14	Nota = $0,9 - 0,15(x - 14)$
Power on	< 60	1	> 60	Nota = $1 - 0,2(x - 60)$
Rendimento	> 91%	1,5	< 91	Nota = $1,5 - 0,75(91 - x)$
Retralho	Não	1	Sim	0
%FeO	< 25%	0,7	> 25%	Nota = $0,7 - 0,14(x - 25)$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os valores obtidos em cada corrida, são inseridos automaticamente nas suas respectivas equações obtendo os resultados e apresentando a nota final por meio de um somatório de todas

as notas obtidas. A nota obtida através das equações, nunca será menor do que zero, caso o valor fique negativo, a planilha automaticamente insere zero como valor da nota no item.

Como resultado da compilação de dados, foi possível realizar o levantamento das faixas de notas atingidas e seus respectivos consumos, estão representadas na Tabela 5. É possível notar que somente na faixa de notas destacadas e acima, é que se efetivamente atingiu a meta com o consumo específico médio de 370 kWh/t de aço enornado.

Tabela 5 - Faixas de notas x consumos

Notas	Nº Corridas	% de corridas período	Cons. Esp. Médio (kWh/t)	Cons. Médio (kWh)	Rendimento Metálico Médio (%)	Média Sucata(kg)
≥ 9	175	7,20%	362,7	37.622	92,65	103.790
< 9 a ≥ 8,5	304	12,50%	369,87	38.486	92,31	104.139
< 8,5 a ≥ 8	368	15,10%	376,11	38.964	92,77	103.718
< 8 a ≥ 7,5	413	16,90%	378,84	39.089	92,13	103.651
< 7,5 a ≥ 7	357	14,60%	382,87	39.451	92,02	103.218
≥ 5 a < 7	681	27,90%	390,83	40.545	91,06	103.807
< 5	139	5,70%	408,68	42.760	89,57	104.678

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O estudo apresenta um resultado que cerca de 65% das corridas atingem a nota meta de 7, mas apenas cerca de 20% do total de corridas, efetivamente atingem a meta em energia elétrica.

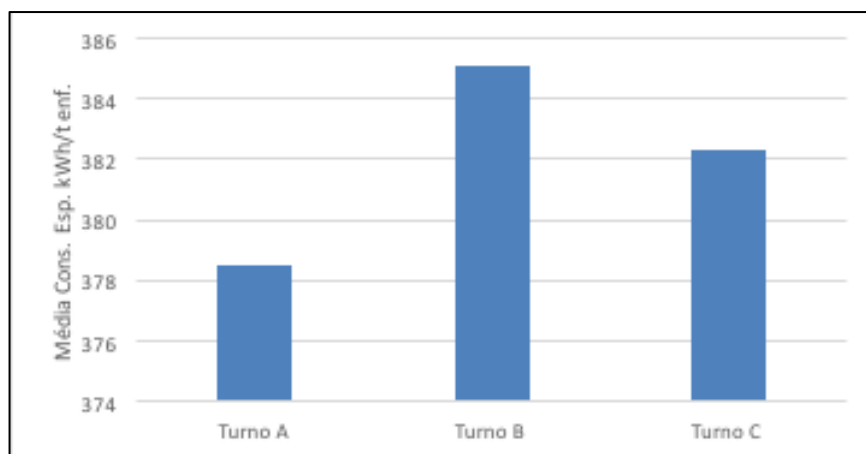
Outro ponto interessante que o estudo das notas revelou, foi a diferença de desempenho entre turnos. A Figura 15, representa o desempenho geral dos turnos em consumo específico de energia elétrica, é visível o desempenho superior do turno “A”.

No estudo realizado, aponta que o turno “A”, foi responsável por 50% das ocorrências de consumos abaixo de 364 kWh/t de aço enornado (média menos 1 desvio padrão), enquanto o turno “B”, foi responsável por 48% das ocorrências de consumos acima 400 kWh/t de aço enornado (média mais 1 desvio padrão), o turno “C” foi responsável por 26% e 28% de cada análise respectivamente.

Durante o desenvolvimento do estudo, este resultado foi obtido, foi discutido com a equipe de gerenciamento de energia da empresa, levantou-se a mais provável causa da queda de desempenho acentuada no turno B, a qualidade da energia elétrica. O turno “B”, das 8h às 16h, está todo dentro do horário comercial comum da região onde está situada a empresa. A tendência é que a rede elétrica da região esteja mais carregada no horário comercial, o que gera

mais “ruídos” e a deixa indutiva, com menor fator de potência. Como resultado a potência entregue para o FEA é menor do que quando a rede elétrica está “limpa”.

Figura 15 - Desempenho dos turnos em consumo específico de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.2 ENTRADA DE AR FALSO PELA PORTA DE ESCÓRIA

Através das observações das corridas, foi possível identificar uma constante entrada de “ar falso”, isto é, como o FEA possui pressão negativa, qualquer abertura vai resultar em um fluxo de ar frio para dentro do FEA, resultando em perda de energia térmica, o que conseqüentemente gera maior necessidade de energia elétrica. A Figura 16 representa exatamente essa entrada de ar falso, a porta de escória do FEA está na posição fechada, mesmo que se tenha sucata na porta, não irá bloquear a entrada de ar.

Para encontrar o valor potencial da perda de energia elétrica com essa abertura da porta de escória, foi utilizado o SOS, alterando apenas os parâmetros de abertura da porta de escória

A primeira etapa realizada é observação de um histórico de corridas, buscando um *mix* de sucata que acontece com frequência. A Tabela 6, representa o *mix* de sucata selecionado para todas as corridas simuladas, a primeira coluna é referente ao tipo de sucata, a segunda coluna ao percentual da sucata na carga total e a última coluna ao peso bruto do tipo de sucata na corrida.

Na Tabela 7, estão descritos os valores obtidos nas simulações, cada linha representa uma simulação realizada. A coluna 2 representa a abertura da porta para a determinada simulação. Na coluna 3 estão os dados de consumo de energia elétrica, o qual cresce conforme a abertura da porta aumenta, o consumo de energia química é praticamente constante

representado na coluna 4 e a coluna 5 representa o potencial de redução de consumo de energia elétrica em relação a simulação padrão.

Figura 16 - Entrada de ar falso pela porta de escória.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A segunda etapa é fixar os parâmetros do FEA previamente ajustados do mês de março de 2018. O único parâmetro a ser modificado será a abertura da porta de sucata, isso garante entender o seu impacto diretamente no consumo de energia.

O parâmetro de abertura da porta tem como unidade  $\text{m}^2$  médio / tempo (corrida) e o valor mínimo possível a ser fixado é  $0,1 \text{ m}^2$ . O valor não pode ser zero, pois considera a corrida inteira, e na fase de refino a porta deve ficar maior parte do tempo aberta para medições ou retirada da escória. O orifício destacado na Figura 15 não é considerado pelo SOS, em teoria a porta lacraria o forno.

Os valores escolhidos para cada simulação foram de  $0,1 \text{ m}^2$  até  $0,3 \text{ m}^2$  com espaçamento de  $0,05 \text{ m}^2$ , houve também mais duas simulações com valores intermediários de  $0,1625 \text{ m}^2$  e  $0,225 \text{ m}^2$ , os quais são aproximadamente a abertura padrão acrescido de uma e duas folhas A4 respectivamente, apenas uma forma mais lúdica para entender o tamanho da passagem de ar durante a fase de refino.

A corrida referência é com a utilização da menor abertura possível da porta ( $0,1 \text{ m}^2$ ), os outros parâmetros da simulação são fixados para todas as corridas e estão representados no Anexo 1.

Tabela 6 - Mix de sucata selecionado

Sucata	%	t / Corrida [toneladas]
PINESPGROUND	8,40	8,99
PINF BAGROUND	3,10	3,32
PINGR56GROUND	1,90	2,03
PINGR57GROUND	0,30	0,32
PINGR58GROUND	8,40	8,99
PINGR60GROUND	6,90	7,38
PINGRFORCILGROUND	0,70	0,75
PINGr95GROUND	0,60	0,64
PINGUSGROUND	17,30	18,51
PINPEPGROUND	5,20	5,56
PINSARPGROUND	1,90	2,03
PINSCAVGROUND	6,70	7,17
PINSFORJGROUND	2,30	2,46
PINSHRGROUND	11,80	12,63
PINSMSTGROUND	7,80	8,35
PINSOXIGROUND	2,80	3,00
PINSOXTGROUND	4,90	5,24
PINSRECGROUND	1,80	1,93
PINSRECEXTGROUND	0,20	0,21
PINSUCGGROUND	7,00	7,49
<b>SUB-TOTAL</b>	<b>100,00</b>	<b>107,00</b>

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 7 - Resultados das simulações

Observação	Abertura (m <sup>2</sup> )/corrida	Consumo	Consumo	Potencial % de
		Energia Elétrica (MWh)	Energia Química (MWh)	Redução de consumo Energia Elétrica
Padrão	0,1	41,2	14,9	-
	0,15	41,7	15	1,21%
	0,2	42,3	15	2,67%
	0,25	42,9	15	4,13%
	0,3	43,5	15	5,58%
Padrão + 1A4	0,1625	41,9	15	1,70%
Padrão + 2A4	0,225	42,6	15	3,40%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

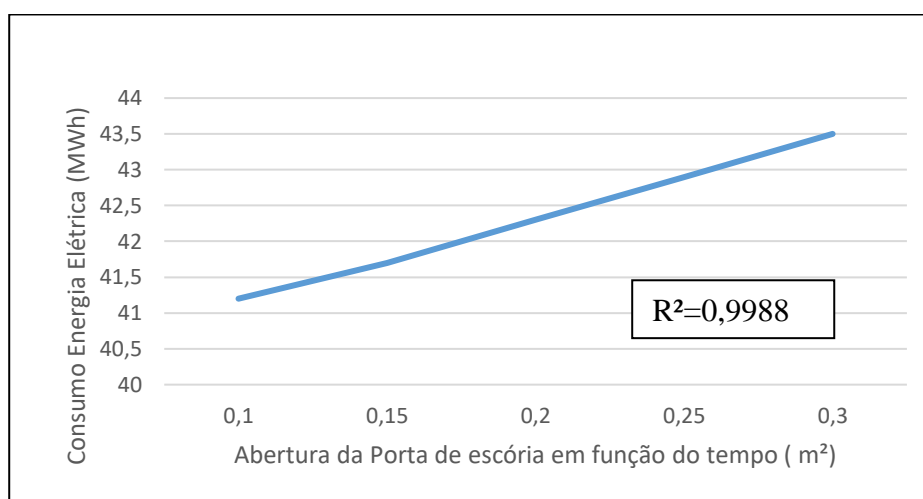
Para uma abertura média do tamanho de 1 folha A4, 0,0625 m<sup>2</sup>, o consumo de energia elétrica aumenta 1,7% ou 700 kWh por corrida, em consumo específico de energia elétrica corresponde aproximadamente a 6,5 kWh/t de aço enfiado, ou 7,35 kWh/t de aço, o qual é

bem significativo levando em conta 4.400 corridas por ano. Os resultados das simulações estão compilados na Tabela 7.

Para uma abertura média do tamanho de 2 folhas A4, 0,125 m<sup>2</sup>, o consumo de energia elétrica aumentaria 3,4% ou 1,4 MWh por corrida, em consumo específico de energia elétrica corresponde a aproximadamente 13 kWh/t de aço enornado, ou 14,7 kWh/t aço.

A Figura 17, representa um gráfico construído com os dados da primeira e segunda coluna da Tabela 7, com o objetivo de representar o comportamento do consumo de energia elétrica de uma corrida, de acordo com a variação de apenas um parâmetro, a abertura da porta de escória.

Figura 17 - Gráfico de abertura da porta de escória x consumo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.3 INDICADOR DA RELAÇÃO ENTRE O CARBONO E O OXIGÊNIO

O controle do indicador da relação carbono e oxigênio (C/O<sub>2</sub>) é de extrema importância para as aciarias, pois busca um método de minimizar as perdas de ferro (Fe) para a escória, o que acarretaria em menor rendimento da corrida, ou um excesso de oxigênio no banho líquido, que além de ser um desperdício, pode atrapalhar na formação da escória espumante, que por consequência, tende a gerar um maior consumo de energia elétrica.

O indicador de C/O<sub>2</sub> sofre grande influência do conjunto de reações químicas dentro de um FEA. O controle dessas reações, além de ser essencial para uma maior liberação de energia química, impacta diretamente na formação da escória espumante.

Quanto maior o índice, menor será a perda de Fe para a escória, porém um índice alto, prejudica a “desfosforização”, que é a retirada do fósforo presente no banho líquido, o qual

prejudica a qualidade do aço. Um índice baixo representa uma abundância de oxigênio no banho, o que causa a formação de óxido de ferro (FeO), retirando ferro do banho (aço líquido) e se não for corrigido, sairá na escória, ocasionando em perda de rendimento da corrida.

Para encontrar o índice de C/O<sub>2</sub>, foram utilizados dados reais inseridos das planilhas “Gestão FEA” e “Gestão de Sucatas”.

Na planilha “Gestão de Sucatas”, foram retiradas as quantidades de carbono em cada corrida, de acordo com o percentual médio de carbono contido em cada tipo de sucata, esse item é feito por análise de amostras e atualiza a planilha com os resultados.

A planilha “Gestão FEA”, fornece a quantidade de gás natural (GN) e a quantidade de O<sub>2</sub> total utilizada na corrida. Por meio da equação (2), é possível encontrar a quantidade de O<sub>2</sub> utilizada para queima, na combustão do gás natural. Com o resultado é possível utilizar a equação (3) e encontrar a quantidade de O<sub>2</sub> injetado no tipo lança, específica para a realização das reações químicas e formação da escória espumante. Por fim, o resultado da equação (3), alimentará a equação (4), junto com a quantidade de carbono retirada da planilha “Gestão Sucatas”, obtendo assim o índice de C/O<sub>2</sub>.

$$O_2 \text{ Queima} = GN \times 2 + (O_2 \text{ Total} - GN \times 2) \times 3,85\% \quad (2)$$

$$O_2 \text{ Lança} = O_2 \text{ Total} - O_2 \text{ Queima} \quad (3)$$

$$\text{Índice } C/O_2 = \frac{C \text{ (kg)}}{O_2 \text{ Lança (Nm}^3\text{)}} \quad (4)$$

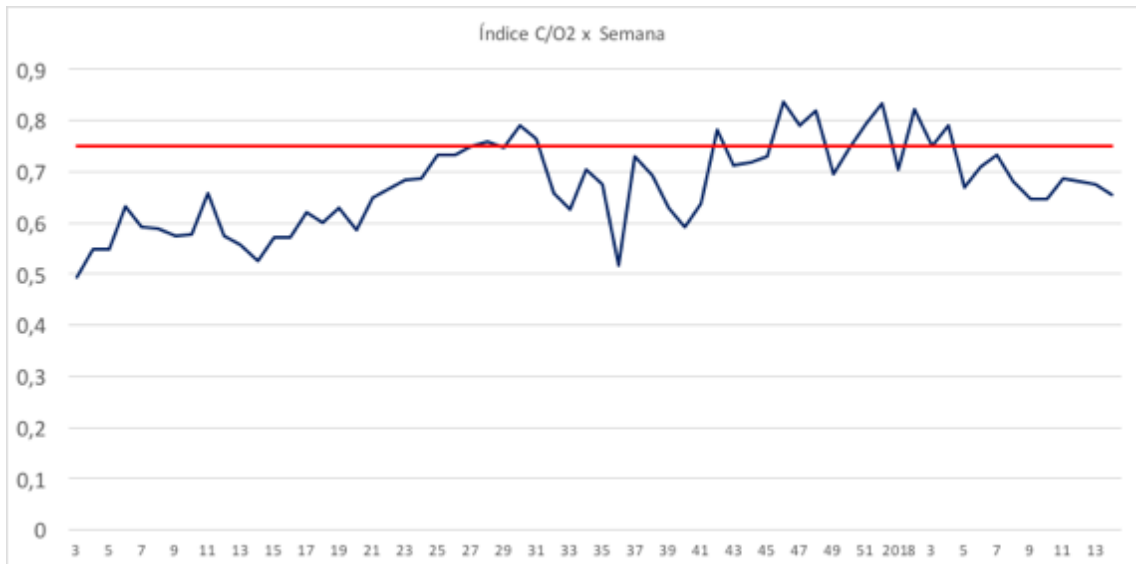
A Figura 18 representa a compilação do índice em média por semana, demonstrada através da linha azul, a linha vermelha representa o valor teórico ótimo de 0,75. As equações (2), (3), (4) e o valor teórico ótimo são obtidos de acordo com Conejo e López (1997). Esse indicador semanal tem fim gerencial e estratégico no curto prazo.

A Figura 19 representa a compilação do índice em média por dia, demonstrada com a linha azul, e a linha vermelha representa o mesmo valor teórico ótimo de 0,75. O indicador diário foi construído para fins operacionais, ou seja, tomada de decisão e ajuste da operação diária do forno elétrico a arco.

Quando há um valor médio acima de 0,75 (linha vermelha), significa que em média as corridas apresentaram uma quantidade de oxigênio menor que a ideal, reduzindo a quantidade de FeO no banho líquido, dificultando a formação de escória espumante. Índices muito altos prejudicam a retirada de fósforo do banho, comprometendo a qualidade do aço, gerando retrabalho na fase de refino e aumento do consumo energético na corrida.

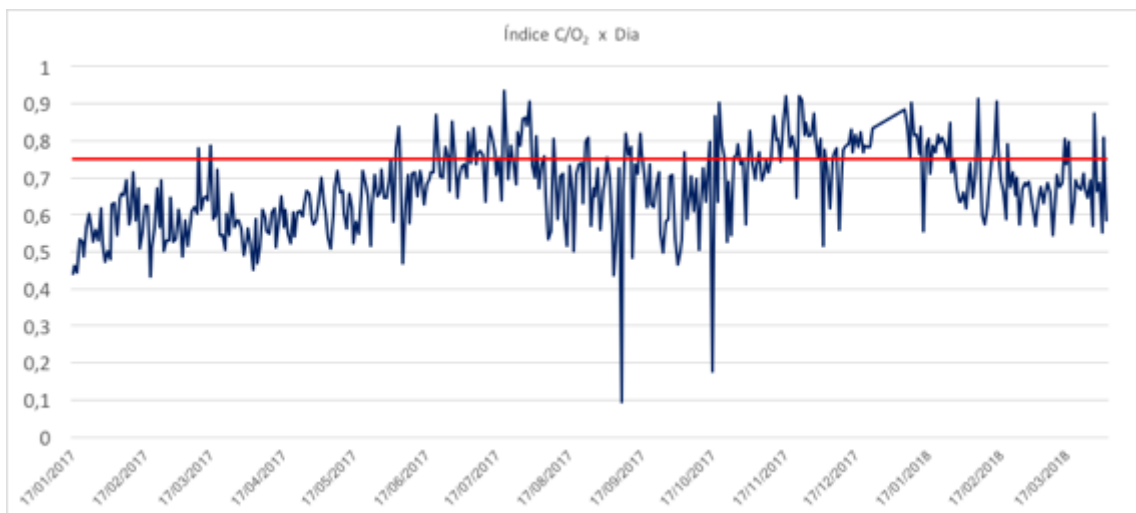
Caso os valores médios estejam abaixo da linha teórica, significa que tem abundância em oxigênio na corrida, impactando diretamente no rendimento metálico da corrida, visto que o oxigênio reage com o ferro formando óxido de ferro, tende a sair junto com a escória, a deixando menos viscosa e prejudicando a espumação ideal.

Figura 18 - Índice de C/O<sub>2</sub> por semana



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 19 - Índice de C/O<sub>2</sub> por dia.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.4 VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA DO FORNO

A variação de potência foi simulada no SOS, utilizando a corrida padrão como base. Os parâmetros variados foram as potências do forno nos itens “Melting” e “Refining”,

correspondem a etapa de fusão e refino do aço, as potências padrão para cada item são respectivamente 38,1MW e 40,0MW. A Tabela 8 representa um resumo das simulações e seus resultados.

A primeira simulação foi adicionando 4 MW em cada item, em relação ao padrão, resultando em 42,1MW para o “Melting” e 44,0MW para o “Refining”. Como resultado obteve-se uma redução de 0,44MWh por corrida, aproximadamente 5 kWh/t de aço.

A segunda simulação foi subtraído 4 MW em cada item, em relação ao padrão, resultando em 34,1MW para o “Melting” e 36,0MW para o “Refining”. Como resultado obteve-se um acréscimo de 0,57MWh por corrida, ou 6 kWh/t de aço.

Tabela 8 - Dados da simulação da variação de potência.

Descrição	Energia elétrica (MWh)	Energia específica (kWh/t)	Eletrodos (kg)	Oxigênio -Lança (m <sup>3</sup> )	Oxigênio - Queimadores (m <sup>3</sup> )	Oxigênio Total (m <sup>3</sup> )	Gás Natural (m <sup>3</sup> )
Padrão	40,52	426,52	250,43	2628,78	1197,00	3825,78	570,00
+ 4 MW Potência	40,08	421,89	247,72	2674,47	1197,00	3871,47	570,00
- 4 MW Potência	41,09	432,52	253,93	2570,97	1197,00	3767,97	570,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Um outro ponto importante apresentado na tabela de resultados foi a redução de 1% do consumo de eletrodos, esse que é um dos principais custos na produção de aço através da utilização do FEA.

Para 4400 corridas, valor aproximado de um ano de produção, o aumento de potência pode gerar uma economia de 1.950MWh.

#### 4.5 VARIAÇÃO DE GUSA NA CARGA

O percentual de gusa na carga é um desafio para toda aciaria. Gusa, ou ferro gusa, é considerado uma liga de ferro e carbono, é obtido através da redução do minério de ferro em um alto forno. Geralmente se encontra em forma de lingotes, mais densos que sucata convencional. Apesar de gusa demorar mais tempo para fundir, libera uma grande quantidade de energia química, graças ao carbono contido.

O desafio se dá em encontrar a melhor faixa de trabalho, pois, uma grande quantidade pode fazer com que o forno gaste mais tempo para fundir, consumindo mais energia elétrica, e quando gusa fundir, a grande quantidade de carbono no banho, pode atrapalhar no controle de

qualidade e também prolongar a corrida para ajustes. Com pouco gusa, a energia química disponível fica menor, forçando ajustes com lança de coque e oxigênio.

O estudo iniciou-se com simulações no SOS, variando o percentual de gusa na carga, e distribuindo ou retirando proporcionalmente dos outros tipos de sucata, mantendo sempre a mesma quantidade final de carga em cada corrida. A Tabela 9 apresenta as quantidades de gusa simuladas e gusa padrão, valor referência nas corridas reais.

Tabela 9 - Percentuais de gusa adotados

<b>Variação do Gusa</b>	<b>Peso em toneladas</b>
0 = Gusa Padrão (24% da carga)	26
- 30%	18,2
- 20%	20,8
- 15%	22,1
- 10%	23,4
+ 10%	28,6
+ 15%	29,6
+ 20%	31,2
+ 30%	33,8

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 20, é o resultado em forma de gráfico das simulações, comparando a variação de gusa na carga metálica com o consumo específico de energia elétrica em kWh/t aço. A

No simulador, o resultado obtido foi dentro do esperado, mas ele não leva em conta o tempo de fusão do ferro gusa e suas dificuldades, quanto a geometria, densidade e tamanho. Na prática o ferro gusa demanda um tempo maior de fusão que as sucatas convencionais.

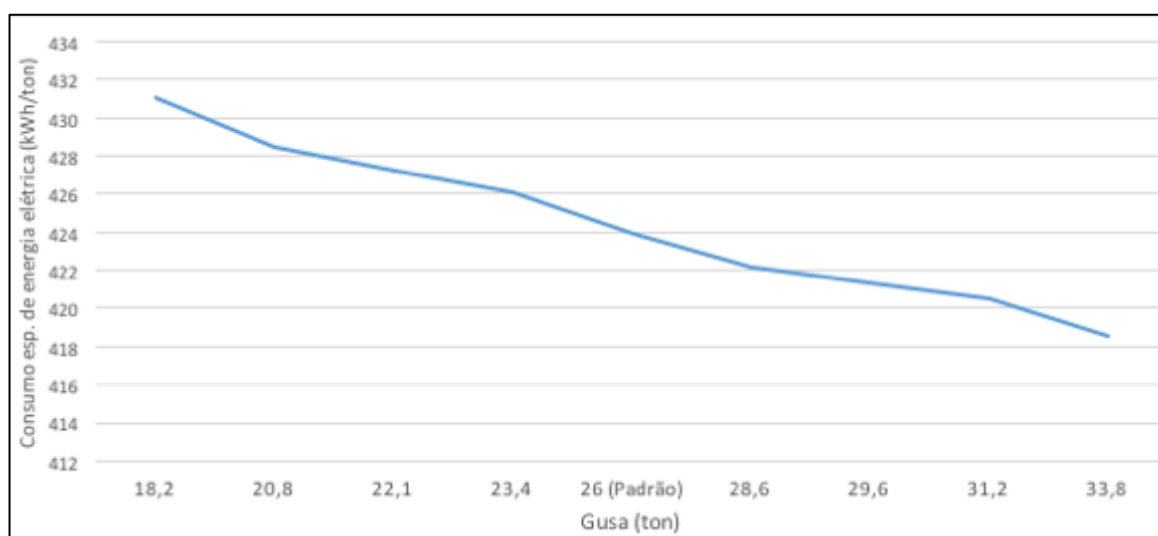
A Tabela 10, apresenta os resultados das simulações, com o foco nos consumos totais das diferentes energias presentes dentro de um FEA. É possível observar que as variações mais significativas estão na energia elétrica e na energia de reação C (carbono). Nas simulações a energia de reação C, é a energia química liberada reação do carbono, provindo do ferro gusa após a fusão, com o oxigênio, presente no banho ou injetado. Quanto mais gusa, maior será a liberação de energia química e menor a necessidade de energia elétrica.

Para aprofundar os estudos, foram utilizados dados reais de corridas. Inicialmente o estudo não foi conclusivo, pois, o FEA apresenta variação grande de características e desempenho de uma corrida para outra. Logo, optou-se por realização de filtros com o intuito de separar corridas com de características semelhantes e excluir corridas consideradas problemáticas.

Os principais filtros realizados foram:

- Retiradas amostras com problemas declarados;
- Retiradas amostras com retrabalho;
- Retiradas amostras com rotas dos Forjados;
- Foram escolhidas amostras somente com 3 cestos de carregamento;
- Foram separadas as amostras por tipo de receita química;
- Foram separadas por faixa de nota dada a corrida.

Figura 20 - Gráfico gusa x consumo específico de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 10 - Resultados das simulações

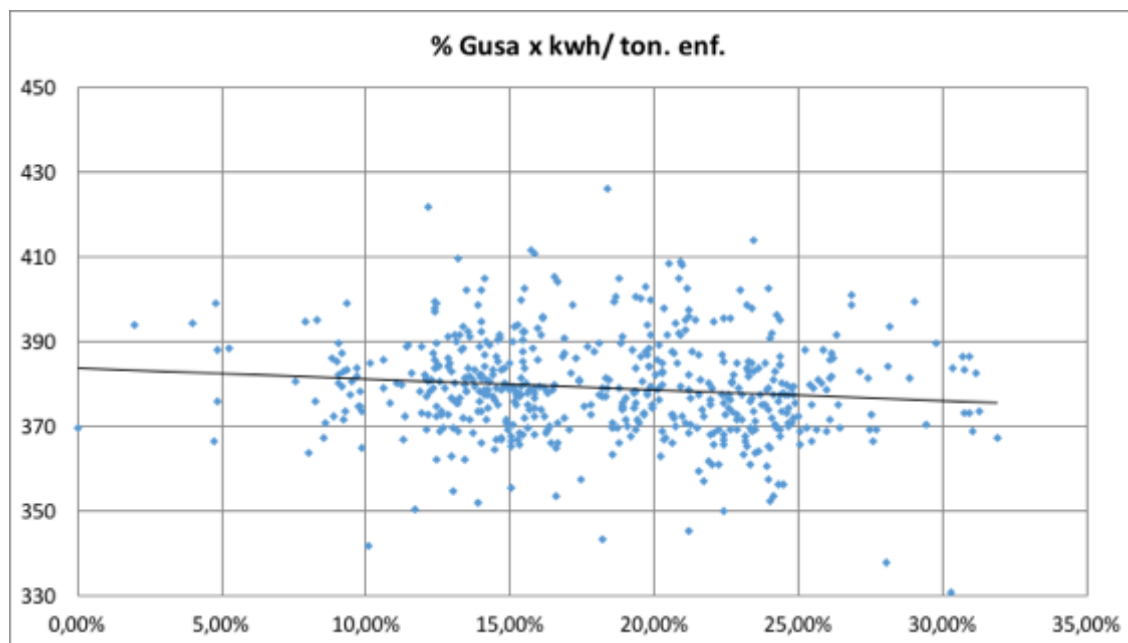
Gusa (ton)	Energia Elétrica (MWh)	Reação C (MWh)	Queimadores (MWh)	Reação Fe (MWh)	Reação outros (MWh)	Reação Si (MWh)
18,2	41,2	6,2	5,7	2,8	2,6	2
20,8	41	6,7	5,7	2,8	2,5	2,1
22,1	40,8	6,9	5,7	2,8	2,5	2,1
23,4	40,7	7,2	5,7	2,8	2,5	2,1
26 (Padrão)	40,5	7,7	5,7	2,8	2,5	2,1
28,6	40,3	8,2	5,7	2,8	2,4	2,2
29,6	40,3	8,4	5,7	2,8	2,5	2,2
31,2	40,2	8,7	5,7	2,8	2,4	2,2
33,8	40	9,2	5,7	2,8	2,3	2,3

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A receita química é uma programação pré-definida da injeção de oxigênio no FEA, em cada receita o oxigênio é injetado em quantidade e momento diferente. As receitas são classificadas de "A" até "D", sendo "A" a receita com menor injeção de oxigênio e "D" com maior injeção de oxigênio. Em geral definidas de acordo com o carbono contido na carga.

A receita “B” foi a única a qual apresentou um comportamento semelhante ao simulado, pode ser observado na Figura 21, a qual apresenta uma tendência de queda no consumo específico de energia elétrica, quando há um aumento do percentual de gusa na carga.

Figura 21 - Gráfico de dispersão da receita química B



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As receitas “A”, “C” e “D”, possuem um comportamento similar, e inverso ao da receita “B”, pode ser observado na Figura 22, em que o consumo específico de energia elétrica aumenta, mesmo que em baixa intensidade, conforme o percentual de gusa na carga aumenta.

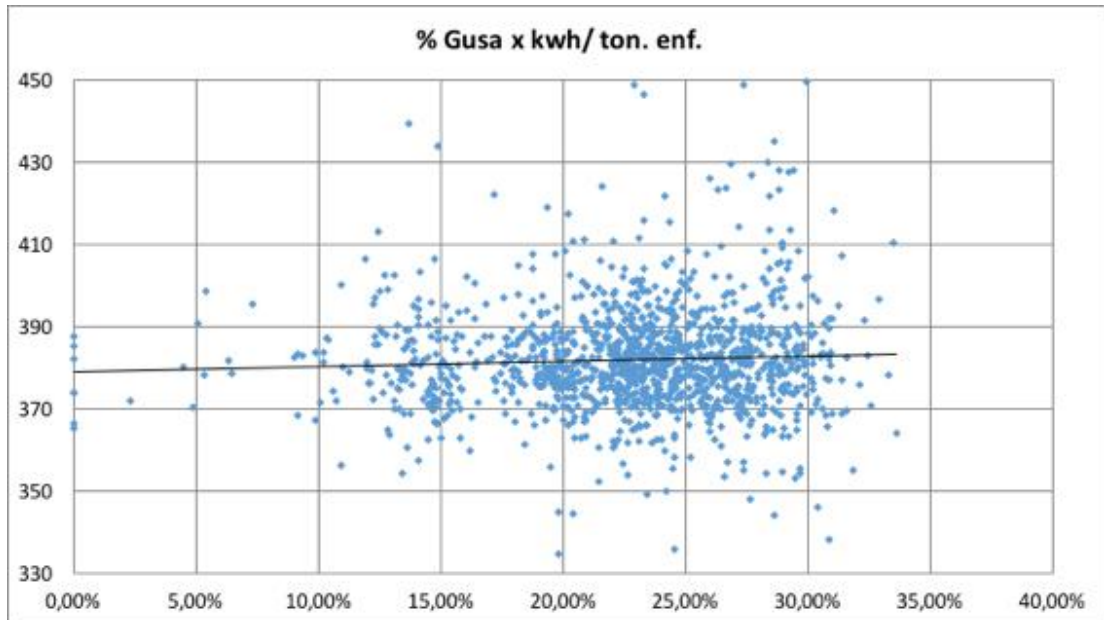
Refinando o estudo com dados reais, foram construídas curvas de distribuição normal de cada receita para percentual de gusa e para o consumo de energia elétrica.

A Figura 23 é referente a distribuição normal das receitas químicas de acordo com seu percentual de gusa na carga. É possível observar que a receita “A” é mais abrangente, englobando uma grande faixa de percentual de gusa, mas sua média fica próxima a 14%. As curvas das receitas “B” e “C” apresentam um comportamento semelhante, sendo a média de 18% e 21% respectivamente. A curva da receita “D” é a que apresenta dados mais condensados nas faixas de alto percentual de gusa, a média está em 24%.

A Figura 24 é referente a distribuição normal das receitas químicas de acordo com seus consumos de energia elétrica específica. A curva da Receita “A” é a que possui maior consumo de energia, tendo uma média de 384 kWh/t de aço enornado. As curvas “C” e “D” apresentam um comportamento bem semelhante, sendo suas médias próximas a 381 kWh/t de aço

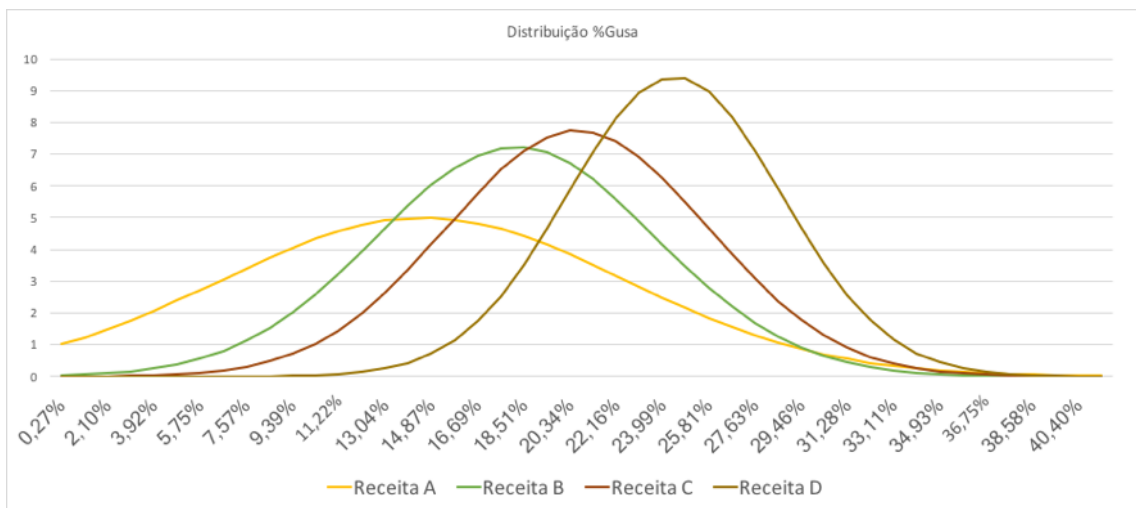
enfundado. A curva “B” apresenta o melhor resultado em termos de consumo de energia elétrica específica, possui uma média de 378 kWh/t de aço enfundado.

Figura 22 - Gráfico de dispersão das receitas químicas A, C e D



Fonte: Produção do próprio autor.

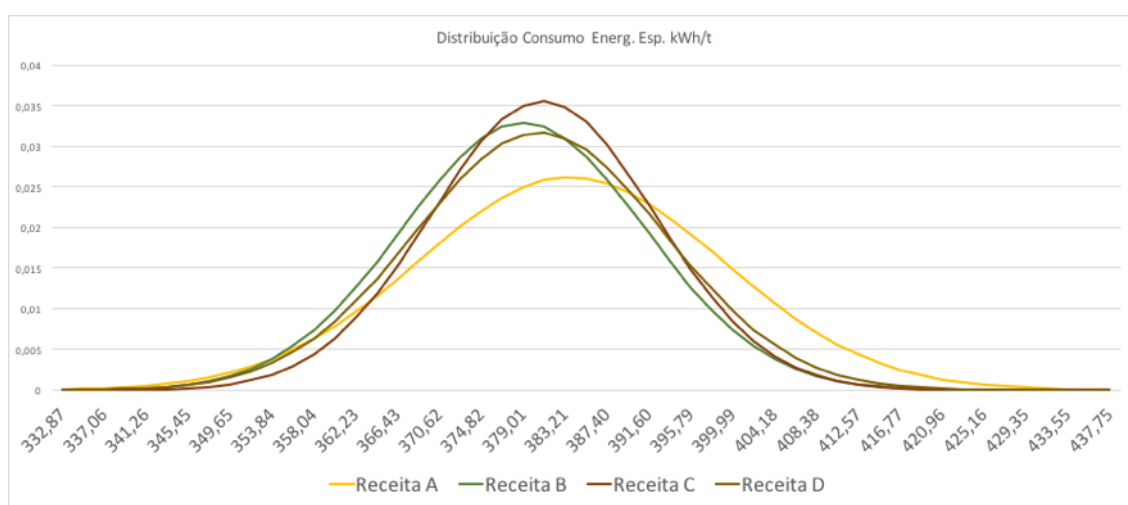
Figura 23 - Curva de distribuição normal de % gusa por receita química



Fonte: Produção do próprio autor.

As corridas realizadas em 2018 tinham como meta a utilização de gusa entre 21% e 25%, a média obtida foi de 22%. Em consumo de energia, a média geral foi de 381 kWh/t de aço enfiado sendo assim, a receita química “B” apresenta um consumo médio 1% menor. Porém esse ganho foi obtido através de medições de valores de consumo de energia elétrica específica em corridas realizadas, considerando a margem de erro nas medições dos equipamentos o ganho de 1% não pode ser considerado.

Figura 24 - Curva de distribuição normal de consumo específico de energia elétrica por receita química



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 4.6 VARIAÇÃO DO LASTRO

O banho líquido residual ou lastro, é um importante fator para economia de energia elétrica, pois, auxilia no aquecimento da sucata no início da fusão. O trabalho realizado foi buscar através de simulação e histórico de dados, um ponto ótimo de quantidade de lastro, para que se tenha uma melhor eficiência energética.

A primeira etapa, foi utilizado o *Scrap Optimizer System*, a corrida padrão foi a referência e o parâmetro variado foi apenas a quantidade de lastro. No simulador esse parâmetro se refere a quantidade de aço líquido que fica no forno após a corrida.

Como o simulador não abrange o lastro do início da corrida, não foi possível concluir qual a melhor faixa de lastro para trabalho no início da corrida. Nas simulações, quanto maior o valor do lastro deixado, maior era o consumo de energia, e quando o valor do lastro era reduzido, o valor de energia de consumo de energia também reduzia. Isso ocorre ao fato de quanto mais lastro for necessário no final da corrida, maior o tempo de fusão necessário.

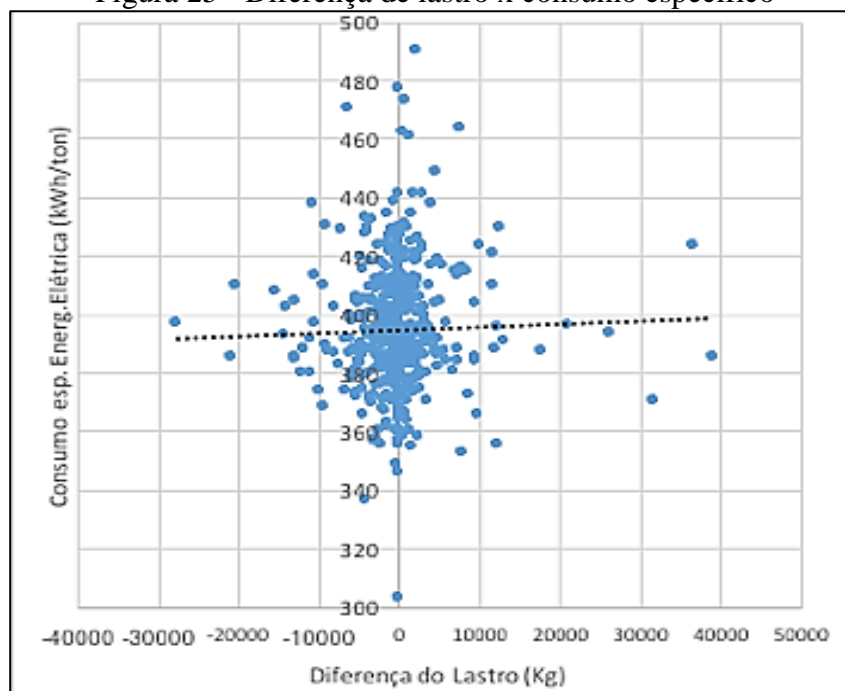
A segunda etapa, foram utilizados os dados reais da planilha FEA, disponibilizada pela empresa. A planilha apresenta o valor do lastro deixado pela corrida, mas como as corridas são sequenciais, é possível obter o lastro do início da corrida. O valor não é medido para toda corrida, e sim calculado, através do rendimento médio das últimas 20 corridas, quantidade de metal carregado, quantidade de aço líquido vazado e peso da escória retirada. O cálculo não é preciso, porém o valor é próximo ao real, cerca de 5% a 10% de diferença, a cada semana é feito um vazamento de todo o aço líquido remanescente e comparado com o calculado.

O procedimento na planilha é relativamente novo, o que nos dá “apenas” cerca de 500 amostras. Foram feitas duas análises, a primeira considerando a diferença de lastro entre uma corrida e outra, e a outra considerando o valor de lastro no início da corrida.

Os resultados da primeira análise são apresentados na Figura 25, nela é possível observar no eixo X a diferença de lastro em kg, se positiva, significa ganho de lastro, se negativa, significa perda de lastro. No eixo Y, está o consumo específico de energia elétrica em kWh/t de aço enforcado.

Como resultado obteve-se que, ao existir perda de lastro, a média de consumo específico foi 393 kWh/t, e quando a diferença de lastro aumentava, a média de consumo específico foi 396 kWh/t, uma diferença de 1%, porém os dados se apresentam dispersos inviabilizando a utilização do valor médio como comparativo.

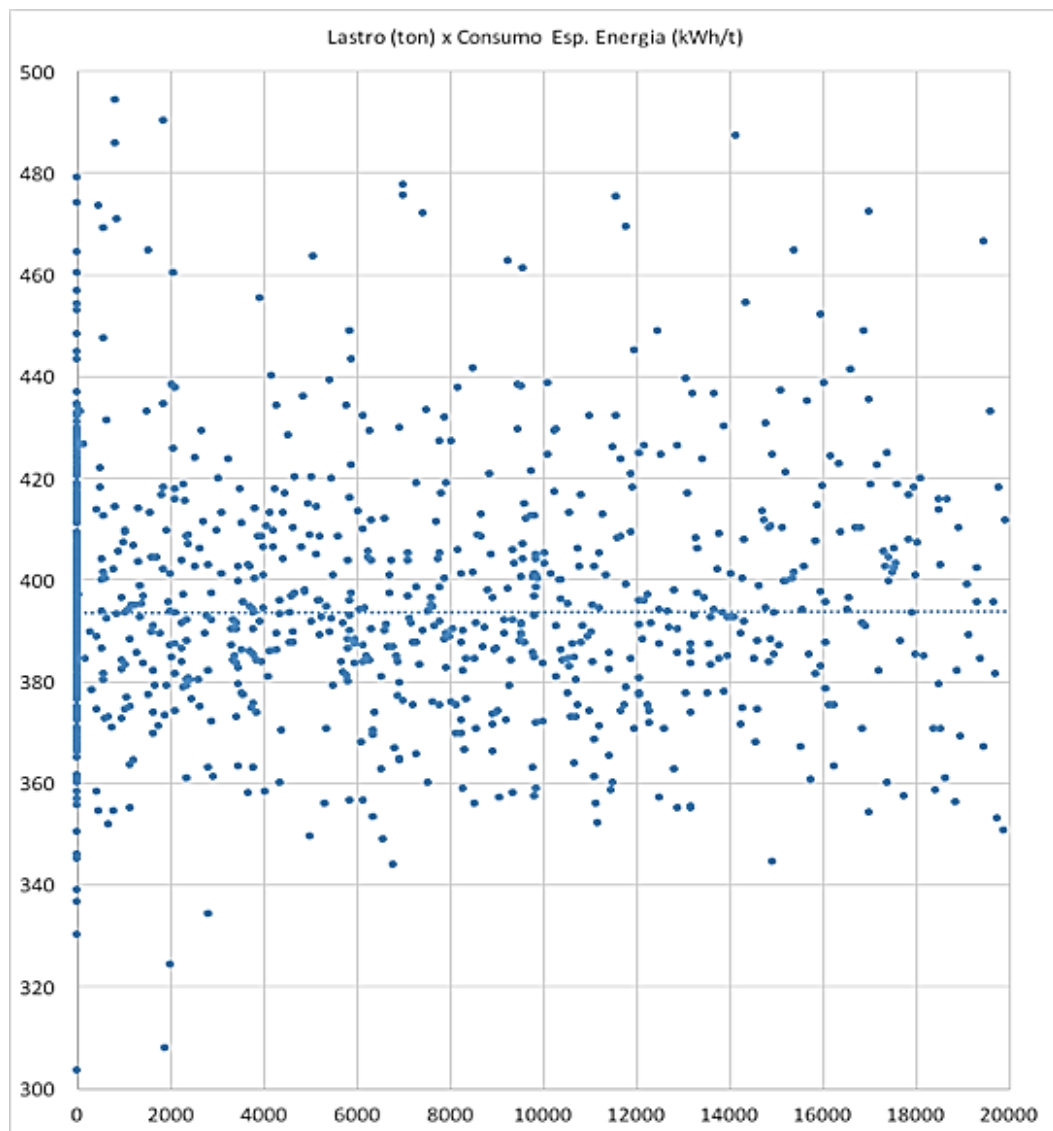
Figura 25 - Diferença de lastro x consumo específico



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os resultados da segunda análise estão na Figura 26, a qual o eixo X é a quantidade de lastro que se iniciou na corrida em toneladas, e o eixo Y é o consumo específico de energia elétrica em kWh/t de aço enfundado, a intenção do estudo era obter o impacto do lastro no forno no consumo específico de energia elétrica. É possível observar na figura que os dados ficaram dispersos, sem uma tendência ou faixa ótima de lastro para um melhor consumo de energia.

Figura 26 - Gráfico de dispersão do lastro x consumo específico de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O principal motivo dos dados dispersos nas duas análises é impossibilidade de isolar o impacto do lastro no consumo de energia elétrica, pois o número de amostra não foi suficiente para separar corridas similares em carregamento e desempenho.

#### 4.7 SISTEMAS DE REAPROVEITAMENTO DE CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO

As tecnologias de reaproveitamento dos gases de exaustão, foram pesquisadas na literatura. Não foram inseridas todas tecnologias disponíveis, pois existem muitas derivações de cada tipo, o foco foi colocar as principais ideias.

O Quadro 2, representa um resumo das tecnologias de pré-aquecimento de sucata pesquisadas. No quadro estão contidas as informações sobre redução média do consumo específico de energia elétrica, temperatura média de pré-aquecimento da sucata, pontos a favor e pontos contra para cada tipo de tecnologia listada.

Quadro 2 – Resumo das tecnologias de pré-aquecimento de sucata

(continua)

Tipo de Tecnologia	Redução média de cons. esp. de ene. elétrica (kWh/t)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Alimentação	Prós	Contras
Cesto de Carregamento	50	375	Descontínua	Utiliza o próprio cesto de carga de sucata para o pré-aquecimento	Baixa transferência de calor, devido a limitações por segurança. Problemas de deformação nos cestos e falhas no carregamento
Danarc Plus M2	57	450	Descontínua	Utiliza o próprio cesto, com um carrinho retrátil de forma segura	Transferência de calor não uniforme, considerada moderada
Twin-Shell	17	200	Descontínua	O sistema de pré-aquecimento é relativamente simples. Não necessidade de soluções complexos de alimentação, sendo realizada do mesmo modo que um FEA convencional	Viabilidade econômica do projeto, deve ser instalado um segundo FEA, o custo de manutenção aumenta, transferência de calor muito baixa e pequena economia de energia elétrica.
Consteel	40	300	Contínua	Melhor estabilidade operacional da atmosfera de gás dentro do forno, estabilidade do banho líquido, redução drástica no <i>power off</i> . Redução do consumo do eletrodo e taxa de oxidação da sucata.	A alimentação de sucata tem que ser controlada, em relação a tamanho e homogeneidade. Transferência de calor não é alta, e custos de manutenção sobem. Baixa produtividade t/h.
Finger Shaft	60	500	Descontínua	Transferência de calor alta e homogênea, redução grande no tempo <i>tap-to-tap</i> , sem limitações de carregamento sucata.	Exige uma estrutura alta e pesada, a perda de calor no retentor de sucata limita a temperatura máxima de pré-aquecimento. Baixa produtividade t/h.

Quadro 2 – Resumo das tecnologias de pré-aquecimento de sucata

(conclusão)

Tipo de Tecnologia	Redução média de cons. esp. de ene. elétrica (kWh/t)	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Alimentação	Prós	Contras
Coss	60	500	Contínua	Estabilidade do banho líquido, menor custo de manutenção, sem limitações no carregamento de sucata, maior velocidade para homogeneidade do banho líquido, grande redução no tempo <i>tap-to-tap</i> , transferência de calor alta	Entrada de ar pelo buraco entre o sistema e forno, causando queda de temperatura e captura de nitrogênio no banho, problemas relatados na manutenção do empurrador. Baixa produtividade em t/h e aumento da taxa de oxidação da sucata.
Ecoarc	90	650	Contínua	Sistema de pré-aquecimento e forno formam uma unidade só, transferência de calor muito alta, estabilidade do banho líquido, grande redução no tempo <i>tap-to-tap</i> .	Seleção rigorosa da sucata, possibilidade da sucata se fundir na parede do pré-aquecedor, tamanho do eixo limitado, alto custo de manutenção. Baixa produtividade em t/h e aumento da taxa de oxidação da sucata.
Conceito de planta secundária de cogeração	9	Não há pré-aquecimento	Não há alteração física	Geração de cerca de 45% do vapor necessário para os injetores do sistema de desgaseificação e 30% o uso de água para refrigeração. Viabilidade econômica do projeto, retorno do investimento em aproximadamente 4 anos em um cenário comum. Não exige grandes mudanças estruturais na planta.	Baixo retorno em economia de energia elétrica. Alto investimento inicial com o equipamento requerido.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5 DISCUSSÃO

Para cada etapa do desenvolvimento do presente trabalho, elaborou-se pelo menos uma proposta ou sugestão de melhoria para a empresa, a fim de gerar uma melhor eficiência energética para o FEA estudado.

Para fins comparativos, é importante ressaltar a diferença entre kWh/t de aço, geralmente utilizado na literatura e no simulador, e o kWh/t aço enornado, utilizado nos dados da aciaria estudada. O aço enornado, leva em consideração o total de sucata inserida na carga do forno, na média é 103,8 toneladas. O aço vazado, mais utilizado, leva em consideração a quantidade de aço vazado na corrida, na média é 95 toneladas. Para facilitar a comparação dos potenciais de redução do consumo específico de energia elétrica, todos os valores em kWh/t aço enornado foram convertidos em kWh/t de aço.

### 5.1 SISTEMA DE NOTAS

O sistema de notas é apenas uma avaliação do desempenho alcançado na corrida, mas na prática, observado durante muitas corridas, é um verdadeiro fator motivador para os operadores, a nota boa é comemorada e a nota ruim busca-se encontrar a causa do problema.

Apesar da energia elétrica ter um peso de 15% e ser o item no qual se perde mais pontos, a nota média ainda está dentro da meta estabelecida.

Como solução para o problema, foram feitas duas sugestões.

A primeira sugestão é aumentar a meta da nota de 7 para 8,5. Isso faria com que somente as corridas que realmente têm desempenho médio, dentro do esperado, de consumo específico de energia elétrica atinjam a nota meta. Contra essa sugestão, está o fato de um aumento grande na meta, pode tornar o sistema de nota desmotivador e perder o seu sentido atual.

A segunda sugestão é alterar alguns pesos de parâmetros:

- Aumentar o peso do consumo específico de energia elétrica, de 15% para 25%;
- Reduzir o peso dos itens grafite, oxigênio e gás natural de 7% para 5%;
- Reduzir o peso do item retrabalho de 10% para 6%.

Outra sugestão é criar ou modificar o atual sistema de notas para um que considere apenas a eficiência energética da corrida, inserindo apenas parâmetro relevantes a esse indicador.

Essas alterações visam um melhor cuidado operacional com o consumo de energia elétrica na corrida, isso leva a uma série de cuidados operacionais maiores.

O ganho potencial de consumo de energia elétrica, com melhorias no sistema de notas não pode ser definido sem estar em prática, pois é subjetivo, ele irá nortear os operadores do FEA a trabalharem visando minimizar o consumo de energia elétrica.

Outra melhoria possível, a qual o estudo das notas possibilitou, é melhoria na qualidade da energia, principalmente para o turno B, o qual trabalha quase todo em horário comercial. A sugestão seria realizar um projeto para aumentar a disponibilidade de potência elétrica final para o FEA, buscando equalizar a potência disponível para os três turnos. Essa melhoria tem o potencial de redução no consumo específico de energia elétrica de 7,4 kWh/t para o turno B e 5,4 kWh/t para o turno C, esses valores são as diferenças de consumo médio junto ao turno A.

## 5.2 ENTRADA DE AR FALSO PELA PORTA DE ESCÓRIA

Como visto nas simulações, a entrada de ar falso, presente no FEA estudado, é uma boa oportunidade na busca pela redução do consumo de energia elétrica.

Para este problema tem-se duas sugestões, uma é lacrar a porta com uma massa especial nas fases de fusão e refino, e a outra trocar/alterar o projeto da porta de escória para vedação total do buraco.

A solução da massa, tem um custo adicional do insumo e mudança nos procedimentos operacionais atuais, inserindo mais atividades na rotina dos operadores do FEA, como preparar a massa, selar o buraco antes do carregamento e abrir o buraco antes do refino. Em relação ao custo, o uso da massa é viável, pois de acordo com o estudo realizado pela empresa, o retorno com a economia de energia elétrica menos o custo da massa é aproximadamente R\$250.000,00 por ano, considerando a abertura de 0,225 m<sup>2</sup>.

A opção da alteração da porta, parece ser a mais interessante, a porta tem acionamento automático de dentro da cabine de operação, o que não acarretaria mudanças nos procedimentos operacionais. O problema da solução, seria o custo para projeto e implementação de uma nova porta de escória.

Para uma abertura média durante a corrida de 0,125 m<sup>2</sup>, tem-se uma oportunidade de redução do consumo específico de energia elétrica de 14,7 kWh/t por corrida.

### 5.3 INDICADOR DA RELAÇÃO ENTRE CARBONO E OXIGÊNIO

O indicador da relação carbono e oxigênio, possui um peso grande no controle da energia química da corrida, impactando diretamente no controle e formação da escória espumante. Como visto, o bom uso da energia química é essencial para um menor consumo de energia elétrica.

Os indicadores apresentados neste trabalho, foram de uso gerencial, tiveram como foco o desempenho médio nas corridas. Para o uso operacional, a fim de auxiliar a busca pela redução do consumo de energia elétrica, a sugestão é criar um indicador em tempo real, mostrando para os operadores o valor do índice a qualquer momento na corrida. Os dados para criar o indicador, são todos provindos do sistema e extraídos para planilhas, logo a criação do indicador teria custo baixo e complexidade baixa.

O indicador auxiliaria no controle da escória espumante, mas não é o único fator que impacta, esse controle envolve muitas variáveis e até mesmo habilidade e experiência operacional. A teoria indica que o controle da escória espumante pode trazer ganhos de até 30 kWh/t e a inserção do indicador da relação C/O<sub>2</sub> em tempo real pode contribuir diretamente para esse ganho.

Atualmente o procedimento de padrão de trabalho da empresa estudada, tem apenas um ponto citando a formação da escória espumante, ficando a cargo da experiência dos operadores. Visto a importância deste item, seria interessante criar um procedimento único para formação e controle da escória espumante, citando e ilustrando as ações a serem tomadas e o que deve ser controlado para se obter uma boa espumação da escória.

### 5.4 VARIAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA DO FORNO

O estudo da variação de potência, nos parâmetros utilizados, foi um pedido da gerência da aciaria da empresa estudada. O resultado mostrou-se bastante promissor, sendo a sugestão, realizar um projeto para o aumento da potência em 4 MW (10%), gerando 4,4 kWh/t de economia em consumo específico de energia elétrica por corrida.

A simulação ajuda a explicar a situação observada na análise de desempenho dos turnos, o qual pela qualidade da energia elétrica nos diferentes horários do dia, de acordo com o carregamento da rede elétrica, tem-se quedas na potência disponível ao FEA.

## 5.5 VARIAÇÃO DE GUSA NA CARGA

A quantidade de gusa na carga, gera impacto no consumo de energia, no fornecimento de energia química na corrida e no custo final do carregamento do FEA, sendo um dos itens mais caros inseridos dentro do cesto.

A oportunidade de redução do consumo específico de energia elétrica com a sugestão elaborada é de 3 kWh/t por corrida, porém não pode ser considerada devido a margem de erro dos instrumentos de medição do forno.

Mesmo não confirmando a redução do consumo, os estudos apontam para uma sugestão de uso da gusa na faixa de 18,5 % do total da carga enfundada, cerca de 19 toneladas por corrida, reduzindo o custo do carregamento. Outro ponto importante, é a utilização do programa de receita química “B”, que demonstra uma curva com desempenho em consumo de energia melhor. É necessário criar um procedimento para a construção do carregamento de sucata com a quantidade proposta de gusa e um procedimento para a utilização da receita química “B”.

Atualmente utiliza-se cerca de 26 toneladas de gusa por corrida e a receita química mais utilizada a D. A sugestão secundária, é quando houver necessidade de uma carga maior de gusa, não ultrapassar as 22 toneladas, ou 21% da carga total, utilizando a receita química “C”. Essa configuração, apresenta desempenho semelhante a configuração utilizada, porém com menor quantidade de gusa.

## 5.6 VARIAÇÃO DO LASTRO

O estudo do lastro não se mostrou conclusivo, em relação ao objetivo dele, encontrar uma faixa de lastro para as corridas, a fim de se obter um menor consumo energético possível. Por limitação do simulador, e pela dispersão grande dos dados reais, não se obteve a faixa ideal de lastro.

A sugestão é adicionar a opção de alteração do lastro inicial da corrida no simulador e aumentar a base de dados reais do lastro, a qual ainda era relativamente pequena. Essas sugestões não apresentam ganhos, apenas viabilizam um próximo estudo.

## 5.7 SISTEMAS DE REAPROVEITAMENTO DO CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO

No estudo foram levantados possíveis sistemas de reaproveitamento dos gases de exaustão que trazem retorno quanto a eficiência energética do FEA. Os sistemas são de pré-aquecimento de sucata e o conceito de uma planta secundária de cogeração.

A utilização dos gases de exaustão para o pré-aquecimento de sucata, é a solução com o maior impacto no consumo de energia elétrica, visto que a empresa não possui nenhuma tecnologia empregada atualmente.

As tecnologias disponíveis para pré-aquecimento da sucata, apresentam ganhos em consumo específico de energia elétrica entre 17 kWh/t a 90 kWh/t.

O sistema de cogeração reaproveitando o calor dos gases de exaustão também não é aplicado na empresa atualmente. A redução possível em consumo de energia elétrica é de 8,76 kWh/t, menor que o potencial apresentado pelos pré-aquecedores de sucata. Como principais vantagens tem o fato de não necessitar de grandes alterações no layout do processo produtivo do FEA e apresentar ganhos significativos em vapor e água para refrigeração.

No estudo foram levantados pontos a favor e contra de cada uma das soluções, a fim de ajudar na escolha, caso a empresa opte por empregar a tecnologia. Todas as soluções exigem um investimento significativo e a maioria uma grande mudança estrutural na aciaria.

Como sugestão, a tecnologia de pré-aquecimento Finger Shaft, aparenta ser mais promissora para a empresa estudada, visto sua estrutura física atual e a economia gerada em energia elétrica, apesar de diminuir a produtividade em toneladas de aço por hora.

## 5.8 RESUMO DAS SUGESTÕES DE MELHORIAS

O Quadro 3 representa o resumo dos principais pontos abordados no capítulo 6 deste trabalho, na primeira coluna se encontram as principais sugestões de cada tema, e na segunda coluna o potencial ganho em kWh/t de cada sugestão.

O potencial de redução total das melhorias é de aproximadamente 143,3 kWh/t. Esse valor é a soma dos ganhos de cada item no Quadro 3, sendo que no item “Melhoria da qualidade da energia nos turnos B e C”, o resultado utilizado para a soma total foi 4,2 kWh/t, o que é a média de ganho por corrida, considerando os três turnos.

O consumo específico médio histórico do forno estudado é de 382 kWh/t aço enformado, transformando em aço vazado, o consumo específico médio é de aproximadamente 416,6 kWh/t.

Quadro 3 – Sugestões de melhorias e ganhos.

<b>Sugestão</b>	<b>Ganho (kWh/t) por corrida</b>
Melhoria no sistema de notas	Não definido
Melhoria da qualidade da energia nos turnos B e C	7,4 turno B 5,4 turno C
Vedação da porta de escória	14,7
Indicador C/O <sub>2</sub> em tempo real	Até 30
Aumento da potência do forno em 4 MW	4,4
Ajuste no % de gusa na carga	Não considerado
Ajuste do lastro no forno	Não definido
Reutilização dos gases de exaustão	de 9 a 90

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Em relação aos objetivos propostos no presente trabalho, os estudos estratificaram os principais fatores que influenciam o consumo de energia específica no forno, por exemplo a entrada de ar falso pela porta de escória e não formação da escória espumante ideal. Foram levantadas oportunidades de melhoria em eficiência energética para o objeto de estudo, resultando em propostas de criação ou alterações de procedimentos de trabalho como no caso do controle do índice  $C/O_2$  e vedação da porta de escória com massa. Outras oportunidades estão na implementação de projetos de melhorias como a inserção de um sistema de pré-aquecimento e o aumento da potência elétrica total do forno.

Para a implementação de todas as sugestões, é necessário investimento e mudanças significativas no parque fabril, especialmente para os sistemas de pré-aquecimento de sucata, os quais apresentam os maiores ganhos. O aumento de potência do FEA é uma solução que também exige investimento, mas consideravelmente mais baixo que o sistema de pré-aquecimento da sucata. O investimento necessário é na aquisição de um novo transformador e na adaptação do sistema de condução da potência até o forno.

Para as sugestões de melhorias de vedação da porta de escória com massa e criação do indicador de  $C/O_2$ , o investimento é baixo ou até mesmo nulo. Para a vedação da porta de escória com massa é necessária alteração nos procedimentos de trabalho padrão da empresa e aquisição de massa para fechamento do canal da escória. A solução de vedação da porta de escória através de um novo projeto de porta é mais segura e não exige mudança nos procedimentos, porém existe investimento no projeto e aquisição da nova porta. A sugestão do indicador em tempo real da relação de carbono e oxigênio exige automação da planilha criada junto ao sistema PIMS da empresa, neste caso também exige adequação do procedimento de trabalho padrão para como reagir quando o indicador não estiver na faixa ideal.

Duas das soluções de melhorias sugeridas, não apresentam ganhos diretos que possam ser medidos ou estipulados, o sistema de notas e o ajuste do percentual de gusa na carga, porém, têm impacto direto na melhoria das condições para a obtenção de menor consumo de energia elétrica possível e menor custo para obtenção do aço.

O FEA objeto do estudo deste trabalho, é um equipamento com longo tempo de uso, com várias melhorias de segurança instaladas e algumas de processo como sistema Cojet® de queimadores. Após os estudos realizados, foi possível encontrar um conjunto de soluções que podem chegar a uma redução de aproximadamente 143 kWh/t de aço, isso representa 34% do

consumo médio atual. As oportunidades de reduções se mostram significativas, especialmente quando se trata de FEA defasado tecnologicamente.

Para trabalhos futuros, abordar com mais profundidade o estudo do lastro, encontrando a melhor faixa de utilização com para obter um menor consumo de energia elétrica específica na corrida. Outra frente de estudo está na realização de estudo de viabilidade e retorno econômico para as tecnologias de reaproveitamento do calor dos gases de exaustão existente, considerando os impactos e custos na mudança do layout fabril.

## REFERÊNCIAS

- AMADO, S. *et al.* Energy efficiency of an electric arc furnace with SVM-RFE. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS (CONIELECOMP)*, 1, 2015, Cholula. **Anais [...]** Cholula: IEEE, 2015. p. 161-167.
- AZEVEDO, J. M. C.; CABRERASERRENHO, A.; ALLWOOD, J. M. Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. **Powder Technology**, v. 328, p. 329–336, 2018.
- BARELLA, S. *et al.* New perspective in steelmaking activity to increase competitiveness and reduce enviromental impact. **Metallurgia Italiana**, Milão, v. 106, n. 11–12, p. 31–39, 2014.
- CHEN, C. *et al.* Energy consumption modelling using deep learning technique - a case study of EAF. **Procedia CIRP**, Cambridge, v. 72, p. 1063–1068, 2018.
- CONEJO, A. N.; LÓPEZ, F. Análisis del grado de oxidación de la escoria, balanceando los insumos de carbón y oxígeno al horno eléctrico de arco. *In: ENCUESTRO NACIONAL DE SIDERÚRGICOS*, 14, 1997, Ixtapa. **Anais [...]** Cidade do México: 1997
- DAL MAGRO, F. *et al.* Enhancing energy recovery in the steel industry: matching continuous charge with off-gas variability smoothing. **Energy Conversion and Management**, v. 104, p. 78–89, 2015.
- DEHKORDI, B.; MOALLEM, M.; PARSAPOUR, A. Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and fuzzy method. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 12, p. 3845–3852, 2011.
- EKMEKÇI, I.; YETISKEN, Y.; ÇAMDALI, Ü. Mass balance modeling for electric arc furnace and ladle furnace system in steelmaking facility in Turkey. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 14, n. 5, p. 1–6, 2007.
- FIOR, A. A. **The Danieli Danarc Plus M furnace at abs meltshop**. Buttrio: Danieli Centro Met, 1999. 6 p.
- FORTES, R.; COSTA, R. **Scrap optimizer system: manual do usuário**. Simulador modelo M1, 2011. v.1.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 192 p.
- GONZALEZ HERNANDEZ, A.; PAOLI, L.; CULLEN, J. M. How resource-efficient is the global steel industry? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 132–145, 2018.
- GOULART, L. L. DE O. *et al.* Avaliação da eficiência energética e da formação de FeO do fea da vsbm. *In: SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL*, 47, 2016, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos [...]** Rio de Janeiro: ABM Week, 2016. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/event/47th-steelmaking-seminar-international>. Acesso em: 20 maio. 2018.

HE, K.; WANG, L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1022–1039, 2017.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. B. **Energia e meio ambiente**. 4. ed. São Paulo: Cengage, 2011. 708 p.

HU, R.; ZHANG, C. Discussion on energy conservation strategies for steel industry: based on a chinese firm. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 66–80, 2017.

INSTITUTE of industrial productivity. **Electric arc furnace**. Disponível em: <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>. Acesso em: 7 out. 2018.

INSTITUTO aço brasil. **Processo siderurgico**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acesso em: 23 mar. 2018.

INSTITUTO aço brasil. **A siderurgia em números 2016**: Pocket yearbook. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/publicacoes.asp>. Acesso em: 5 abr. 2018.

INTERNATIONAL energy agency. **Energy balance flows**. Disponível em: <https://www.iea.org/Sankey/index.html#?c=World&s=Balance>. Acesso em: 15 jun. 2018.

INTERNATIONAL energy agency. **Energy efficiency 2017**: market report series. França, 2017. IEA publications. Disponível em: [www.iea.org/t&c](http://www.iea.org/t&c). Acesso em: 15 jun. 2018.

JONES, J. A. T. **Electric arc furnace steelmaking**. American Iron and Steel Institute. Disponível em: <https://www.steel.org/steel-technology/collaborative-research-and-development/past-projects/electric-arc-furnace-steelmaking>. Acesso em: 12 ago. 2018.

JOUHARA, H. *et al.* Waste heat recovery technologies and applications. **Thermal science and engineering progress**, v. 6, p. 268–289, 2018.

KIRSCHEN, M.; RISONARTA, V.; PFEIFER, H. Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry. **Energy**, v. 34, n. 9, p. 1065–1072, 2009.

LEE, B.; SOHN, I. Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace. **JOM**, v. 66, n. 9, p. 1581–1594, 2014.

LUZ, A. P. *et al.* Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry. **Refractories World Forum**, v. 3, n. 2, p. 91–98, 2011.

LUZ, A. P. *et al.* Slag foaming practice in the steelmaking process. **Ceramics International**, v. 44, n. 8, p. 8727–8741, 2018.

MATINO, I.; COLLA, V.; BARAGIOLA, S. Quantification of energy and environmental impacts in uncommon electric steelmaking scenarios to improve process sustainability. **Applied Energy**, v. 207, p. 543–552, 2017a.

MATINO, I.; COLLA, V.; BARAGIOLA, S. Electric energy consumption and environmental

impact in unconventional EAF steelmaking scenarios. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3636–3641, 2017b.

MATSUURA, H. *et al.* Development of a decarburization and slag formation model for the electric arc furnace. **ISIJ International**, v. 48, n. 9, p. 1197–1205, 2008.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier - Campos, 2011. 280 p.

MILLER JR., G. T. **Ciência ambiental**. 11. ed. São Paulo: Cengage, 2007. 592 p.

REMUS, R. *et al.* **Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production**. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU BREF-IS, 2013. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports>. Acesso em: 5 maio. 2018

RIZZO, E. **Introdução aos processos siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 150 p.

SCHMITT, R. J. **Electric arc furnace scrap preheating**: technical commentary. Pittsburgh: EPRI, 1997. 4 p.

SILVA, A. L. V. DA C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 664 p.

SILVA, C. A. A.; MATELLI, J. A. Heat recovery of dedusting systems in electric arc furnaces: concept of a bottoming cogeneration plant and techno-economic analysis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 1, p. 5, 2018.

SILVA, J. N. A. da. **Estudo teórico e experimental do efeito do ciclo térmico no painel refrigerado de forno elétrico a arco**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/36974>. Acesso em: 24 jul. 2018.

STRAGLIOTTO, B. V. *et al.* Modelo de previsão de temperatura de chegada no forno-panela do aço líquido em aciaria elétrica. *In: SEMINÁRIO DE ACIARIA, FUNDIÇÃO E METALURGIA DE NÃO-FERROSOS*, 48, 2017. **Anais [...]** São Paulo: ABM Week, 2017. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/event/48-seminario-de-aciaria-fundicao-e-metalurgia-de-nao-ferrosos>. Acesso em: 20 maio. 2018.

TOULOUEVSKI, Y. N.; ZINUROV, I. Y. **Electric arc furnace with flat bath**: achievements and prospects. Singapore: Springer Singapore, 2015. 132 p.

TOULOUEVSKI, Y. N.; ZINUROV, I. Y. **Fuel arc furnace (FAF) for effective scrap melting**: from EAF to FAF. Singapore: Springer Singapore, 2017. 94 p.

U.S. environmental protection agency. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the U.S. iron and steel industry**. Disponível em: [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron\\_Steel\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron_Steel_Guide.pdf). Acesso em: 8 maio. 2017.

VIEIRA, D. **Estudo de escórias de refino primário visando reduzir o consumo energético do forno elétrico a arco**. 2014. 72 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/lasid/trabalho-diplomacaoconclusao>. Acesso em: 03 mar. 2018.

VIEIRA, D. *et al.* Slag evaluation to reduce energy consumption and EAF electrical Instability. **Materials Research**, v. 19, n. 5, p. 1127–1131, 2016.

VIEIRA, D. **Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um fea entre parâmetros de carregamento e injeções distintos**. 2017. 158 f. Dissertação (Mestrado em Minas Metalúrgica e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br>. Acesso em: 25 fev. 2018.

WORLDSTEEL association. **Fact sheet: energy use in the steel industry**. Disponível em: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f1c3abf4c/fact\\_energy\\_2014.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f07b864c-908e-4229-9f92-669f1c3abf4c/fact_energy_2014.pdf) . Acesso em: 7 ago. 2018.

WORLDSTEEL association. **Steel in the circular economy: a life cycle perspective**. Disponível em: [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org). Acesso em: 10 jun. 2018.

WORRELL, E. *et al.* **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the u.s. iron and steel industry**. Berkley, Energy Star guide for energy and plant managers, 2010. Patrocinado por U.S. Environmental Protection Agency. Disponível em: [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron\\_Steel\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Iron_Steel_Guide.pdf). Acesso em: 12 jun. 2018.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector. **Energy**, v. 26, n. 5, p. 513–536, 2001.

ZHANG, Q. *et al.* Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry. **Applied Energy**, v. 191, p. 502–520, 2017.

## ANEXO 1 – PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

Este anexo foi adaptado do *Scrap Optimizer System* pelo autor deste trabalho.

### Anexo 1 – Parâmetros das simulações

Vazamento FEA	Valor	Fusão FEA	Valor
Carbono contido no fim da fusão	0,09	Peso vazado	95,58
Carbono contido no fim do Refino	0,06	Lastro	20
Temperatura de Vazamento	1659	Temperatura de Fusão	1490
Temperatura da escória	1700	Tempos de trabalho	Valor
Refratário	0,3	Power Off – Carregamento de Cestos	5,2
Basicidade da escória (B2)	2,2	Power Off - Vazamento	4,6
Parâmetro K para distribuição P	0,27	Power Off – Nivelamento de sucata	0,2
Percentual de MgO na escória	5,2	Power Off – Atrasos na preparação dos cestos	0
KC = [C]x[O]	40,69	Power Off – Medição de temperatura	0
KFeO = [FeO]x[C]	1,5	Power Off – outros atrasos	28
Rede Elétrica	Valor	Tempo de trabalho disponível por mês	672
Consumo de eletrodo por MWH	6,18	Queimadores	Valor
Potência de Fusão (Melting)	38,1	Número de Queimadores	3
Potência de Refino (Refining)	40	Utilização dos queimadores	3
Eficiência Elétrica Fusão	97	Tempo dos queimadores	38
Eficiência Elétrica Refino	99	Eficiência dos queimadores e lanças	Valor
Dados Físicos	Valor	Eficiência do oxigênio do ar	25
Volume FEA	100	Eficiência da lança de oxigênio	90
Capacidade da ponte	110	Eficiência dos queimadores de gás natural	83
Diâmetro da Carcaça	6,2	Perdas	Valor
Diâmetro dos painéis refrigerados a água	5,72	Painéis Refrigerados a água – Fluxo de água	250
Altura dos painéis refrigerados a água	2,27	Painéis Refrigerados a água – Delta de Temperatura na fusão	4,2
Fresta da abóboda	0,01	Painéis Refrigerados a água – Delta de Temperatura no refino	4,1
Diâmetro do passo	1,25	Abóboda resfriada a água - Fluxo de água	150
Diâmetro dos eletrodos	0,559	Abóboda resfriada a água - Delta de Temperatura na fusão	3,9
Profundidade do banho	1	Abóboda resfriada a água - Delta de Temperatura no refino	5
Altura da abóboda	0,63	Temperatura de exaustão dos gases na fusão	716
Superfície de abertura da porta de escória	0,1	Temperatura de exaustão dos gases no refino	1199
Altura do refratário	1,2	Perdas do forno pela porta de escória	2,5
Volume dos Cestos	50	Perdas do forno vazamento da porta de escória	4
Coque injetado	Valor	Perdas da panela	22,3
Taxa de fluxo de injeção de coque na fusão	0	Gás de exaustão	Valor
Tempo de injeção de coque na fusão	0	Taxa de pós-combustão na fusão	0,33
Fluxo de injeção de coque no refino	20	Taxa de pós-combustão no refino	0,3
Coque carregado	Valor	Oxigênio minio na exaustão	0
Coque total carregado por tonelada de aço	0	Pressão no orifício do eletrodo na fusão	1
Cal	Valor	Pressão no orifício do eletrodo no refino	1
Cal mínimo por tonelada	0		

Fonte: Produção do próprio autor

## ANEXO 2 – RESUMO DAS PRINCIPAIS EQUAÇÕES DO SCRAP OPTIMIZER SYSTEM

Este anexo foi retirado e adaptado do Manual do Usuário do *Scrap Optimizer System* -Volume 1 de Fortes e Costa (2011).

### a) Equação global de balanço de energia:

$$(E^{Elétrica} + E^{Química}) - (E^{Aço} + E^{Escória} + E^{Gases\ exaustão} + E^{Poeira} + E^{Perdas}) = 0$$

Onde:

Entradas de energia

$E^{Elétrica}$	Energia Elétrica
$E^{Química}$	Energia Química

Saídas de Energia

$E^{Aço}$	Calor sensível contido no aço vazado
$E^{Escória}$	Calor sensível contido na escória
$E^{Gases\ de\ exaustão}$	Calor sensível dos gases de exaustão (despoiramento)
$E^{Poeira}$	Calor sensível do pó de exaustão
$E^{Aço}$	Perdas das partes refrigeradas e estruturais

### b) Energia química

$$E^{Química} = E_{MeO-Oxi}^{Química} - E_{MeO-Red}^{Química} + E_{Queimadores}^{Química} - E_{Calcinação}^{Química} \pm E_{Solução}^{Química}$$

Onde:

$E^{Química}$	Energia química em kWh
$E_{MeO-Oxi}^{Química}$	Energia de oxidação kWh
$E_{MeO-Red}^{Química}$	Energia da redução do Óxido de ferro em kWh
$E_{Queimadores}^{Química}$	Energia produzida pelos queimadores em kWh
$E_{Calcinação}^{Química}$	Energia de calcinação dos formadores de escória em kWh
$E_{Solução}^{Química}$	Energia de dissolução em kWh

### c) Equilíbrio carbono-oxigênio

$$K_C = [C] \cdot [O]$$

Onde:

$K_C$	Entrada de dados do usuário
C	Carbono inserido na fusão em % inserido pelo usuário
O	Oxigênio em ppm

### d) Equilíbrio carbono-FeO

$$K_{FeO} = [C] \cdot [FeO]$$

Onde:

$K_{FeO}$	Entrada de dados do usuário
C	Carbono dissolvido no aço em % inserido pelo usuário
FeO	% de FeO na escória

**e) Tempos de trabalho**

$$t_{TTT} = t_{POn} + t_{POff}$$

Onde:

$t_{TTT}$	Tempo <i>tap-to-tap</i> em minutos
$t_{POn}$	Tempo <i>power on</i> , forno ligado em minutos
$t_{POff}$	Tempo <i>power off</i> , forno desligado em minutos

$$t_{TPOn} = \left( \frac{EE_{Fusão}}{Pot_{Fusão}} + \frac{EE_{Refino}}{Pot_{Refino}} \right) \cdot \frac{60}{1000}$$

Onde:

$EE_i$	Consumo de energia elétrica em kWh/corrida
$Pot_i$	Potência elétrica em MW

$$t_{POff} = t_{Carregamento} + t_{Vazamento} + t_{parada\ por\ nivelamento\ da\ carga\ alta} \\ + t_{Atraso\ na\ preparação\ do\ cesto} + t_{Medições\ de\ temperatura} + t_{Outros\ atrasos}$$

Onde:

$t_i$	Tempos em minutos
-------	-------------------

**f) Razão de Consumo de Eletrodos**

$$W_C^{Eletrodos} = K_{Eletrodos} \cdot E^{Elétrica}$$

Onde:

$W_C^{Eletrodos}$	Consumo de eletrodos em kg
$K_{Eletrodos}$	Razão do consumo de eletrodos inserido pelo usuário em kg/MWh
$E^{Elétrica}$	Energia elétrica consumida na corrida em MWh

**g) Queimadores**

$$E_{Queimadores}^{Química} = (K_{Queimadores} \cdot t_{Queimadores}) \cdot n_{Queimadores} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{60}$$

Onde:

$E_{Queimadores}^{Química}$	Energia produzida pelos queimadores em kWh
$K_{Queimadores}$	Potência dos queimadores em MW
$t_{Queimadores}$	Tempo de operação dos queimadores em minutos
$n_{Queimadores}$	Número de queimadores