

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA  
DA USP**

Henrique José Bortolotti Martins

**Eficiência energética na aciaria através do off gás do forno elétrico**

Monografia apresentada ao Programa de Educação continuada da Escola Politécnica de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

**São Paulo  
2018**

*“A educação é a arma mais  
poderosa que você pode usar  
para mudar o mundo”*

Nelson Mandela

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus colegas do PECE pela parceria e amizade, aos professores pelos ensinamentos compartilhados e à organização do curso pela estrutura oferecida.

Aos meus amigos que estão sempre torcendo pelo meu sucesso.

Aos amigos Paulo Afonso Kafer, Luiz Phelipe Cecato e Rodolfo Batalha pela ajuda e orientação no tema.

Ao Professor Msc. Ronaldo Andreos pela orientação ao longo do trabalho.

Aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional e incentivo aos estudos e em especial a Juliana e Miguel minha nova família que foi formada durante esta incrível jornada.

## RESUMO

A aciaria é o local onde é realizada a transformação de sucata ferrosa em um aço novo. Dentro da aciaria existem vários processos para chegar até o produto final. O Forno Elétrico a Arco é um reator metalúrgico onde ocorre a fusão da sucata metálica, através de energia elétrica e química, obtendo metal líquido como produto. A fusão se dá por meio de um arco eletrodo formado entre eletrodos de grafite em um sistema trifásico. Neste processo além do produto, que é o aço líquido, forma-se alguns coprodutos como: escória, pó de aciaria e gases, que são resultados desta fusão.

Os Fornos Elétricos a arco possuem uma eficiência energética de aproximadamente 33%, ou seja, dentro de sua função que é de fornecer energia ao aço líquido, tem-se grandes perdas. A perda energética se dá muito pelas interfaces que são tijolos refratários, painéis refrigerados e sistema de exaustão.

No Brasil a geração de energia é tema de grandes discussões, seja ela política ou em empresas privadas todos tem a mesma visão de que é necessário aumentar nosso leque de opções com as chamadas energias renováveis, afim de diminuir custos, adquirir mais autonomia na geração não dependendo de período de chuvas, contribuir para o quesito ambiental e etc.

A cogeração é uma das alternativas para a redução dos gastos com energia, realizando o aproveitamento dos desperdícios nos processos com o fim de aumentar a eficiência e diminuir os consumos.

O presente trabalho trata da cogeração pelo aproveitamento dos gases da exaustão de um Forno Elétrico a Arco, para a geração de energia elétrica a ser reutilizada no processo.

O projeto estudado visa gerar energia aproveitando os gases perdidos no forno elétrico e no sistema de exaustão aumentando a eficiência do sistema. Foi proposto uma turbina para trabalho em sistema de Rankine orgânico sem grandes alterações do projeto da aciaria.

**Palavras chave:** Forno elétrico, FEA, aciaria, cogeração, energia elétrica

## ABSTRACT

The meltshop is the place where the transformation of ferrous scrap into a new steel is performed. Inside to the meltshop there are several processes to get to the final product. The Electric arc Furnace (EAF) is the metallurgical vessel where liquid metal is obtained by melting the scrap is melted applying electrical and chemical energy. The metallic scrap is melted by an electric-arc produced with graphite electrodes in a three-phase system. In the process, besides the product, which is the liquid steel, some co-products are formed: slag, dust and gases, which are the results of the fusion.

The EAF's have an energy efficiency of 33%, approximately. Therefore, it is a process with a reasonably high inefficiency. The energy loss is mainly due to interfaces as refractory bricks, cooled panels and exhaust system.

The generation of energy in Brazil is the subject of great discussions, be it political or in private companies all have the same vision that it is necessary to increase our range of options with the so-called renewable energies, in order to reduce costs, to acquire more autonomy in the non-generation depending on the rainy season, contribute to the environmental issue and so on.

Cogeneration is one of the alternatives for reducing energy expenditures, making use of the losses in the processes in order to increase efficiency and reduce consumption.

In the process of EAF the project is to use the cogeneration to take advantage of the exhaust gases of the furnace, for the generation of electric energy returning it for use.

The project studied aims to generate energy by taking advantage of the gases lost in the electric furnace and in the exhaust system, increasing the efficiency of the system. A turbine was proposed to work in an organic Rankine system without major changes in the steelworks project.

**Keywords:** Electric furnace, EAF, meltshop, cogeneration, electric energy

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Emissões mundiais de GEE por setor .....	13
Tabela 2 - Emissão de GEE a partir do tipo de energia gerado .....	14
Tabela 3 – Relação da taxa de fusão das sucatas e tempo de FEA ligado.....	27
Tabela 4 – Parâmetros de processo de um sistema de despoeiramento .....	39
Tabela 5 - Dados do sistema de despoeiramento.....	39
Tabela 6 – Qualificação do projeto .....	42
Tabela 7 – Dados do projeto para a qualificação em kwh/h.....	42
Tabela 8 - Fluidos comuns em instalações comerciais de ORC.....	44
Tabela 9 - Dados de recuperação do sistema instalado.....	47
Tabela 10 - Dados do investimento.....	48
Tabela 11 - Cálculos financeiros do projeto .....	48

## **LISTA DE SIGLAS E UNIDADES**

GEE – Gases do efeito estufa  
FEA – Forno elétrico à arco  
iNDC – Contribuição Nacional Determinada (sigla em inglês)  
ORC – Organic Cycle Rankine  
FEA – Forno elétrico a arco  
EAF – Eletric arc furnace  
C – Carbono  
Si – Silício  
EBT - eccentric botton tapping  
LC – Lingotamento Contínuo  
HQT - Hot Quenching Tower  
FUE – Fator de utilização de energia  
ANEEL – Agência Nacional de energia elétrica  
VPL – Valor presente líquido  
TIR – Taxa de retorno interno  
Pon – Power On (tempo de forno ligado)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da geração de energias renováveis .....	11
Figura 2 – Matriz energética Mundo vs Brasil.....	12
Figura 3 - Evolução da matriz energética Brasileira .....	13
Figura 4- Sistema de abastecimento de sucata no FEA consteel .....	15
Figura 5 - Esquema de produção da aciaria elétrica .....	16
Figura 6- Balanço energético de um FEA .....	17
Figura 7 - Perfil de vazão no off-gás durante o ciclo de FEA .....	17
Figura 8 - Rota de fabricação do aço .....	18
Figura 9 - Representação do FEA .....	22
Figura 10 – Temperatura do off gás durante uma corrida.....	23
Figura 11 - Desenho do Forno panela .....	24
Figura 12- Lingotamento Convencional .....	25
Figura 13 - Desenho do Lingotamento contínuo.....	26
Figura 14 - Consumo médio de energia elétrica por tonelada de aço produzido relacionado...	27
Figura 15 - Diagrama do balanço de energia e perdas no FEA.....	29
Figura 16 - Sistema de geração de energia elétrica com cogeração.....	30
Figura 17 – Cogeração topping cycle .....	32
Figura 18 - Cogeração bottoming cycle.....	33
Figura 19 – Planta de cogeração com TV de condensação .....	34
Figura 20 – Planta de cogeração com TV de contrapressão .....	34
Figura 21 - Planta de cogeração com TG.....	35
Figura 22 - Planta de cogeração com ciclo combinado .....	35
Figura 23 - Sistema de despoeiramento típico de um FEA .....	37
Figura 24 - Sistema secundário e visão geral do sistema de despoeiramento .....	38
Figura 25 - Exemplo de simulação do software Meltdown, com previsibilidade de energia em função do tempo .....	40
Figura 26 - Balanço de massa do FEA.....	41
Figura 27 - Desenho do projeto para geração de energia escolhido .....	43
Figura 28 - Funcionamento do ciclo de Rankine orgânico .....	44
Figura 29 - Esquemático do funcionamento do sistema de acordo com as temperaturas do gás obtidas.....	45
Figura 30 - Sistema ORC .....	46
Figura 31 - Projeto para obtenção de energia .....	46
Figura 32 - Planta completa com adição do sistema para gerar energia .....	47



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>10</b>
1.2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO .....	10
1.2.2 ASPECTOS AMBIENTAIS.....	13
1.2.3 COGERAÇÃO.....	14
1.2.4 COGERAÇÃO NA SIDERURGIA .....	15
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 ACIARIA ELÉTRICA .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Pátio de sucatas .....	20
2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA).....	21
2.2.3 Forno Panela.....	23
2.2.4 Lingotamento.....	25
<b>2.3 BALANÇO ENERGÉTICO NO FORNO ELÉTRICO A ARCO .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 COGERAÇÃO .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 Dimensionamento da Cogeração .....	32
2.4.2 Esquemas Básicos de Cogeração.....	33
2.4.3 Tecnologias Disponíveis para Cogeração.....	36
<b>3. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO .....</b>	<b>40</b>
.....	45
<b>3.4 CÁLCULO DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA .....</b>	<b>48</b>
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>52</b>

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 OBJETIVO**

O objetivo do trabalho é realizar um estudo sobre o reaproveitamento dos gases gerados no processo de produção do aço dentro de uma aciaria elétrica para gerar energia através da cogeração.

## **1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS**

### **1.2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO**

O mundo moderno cada vez mais requer energia para às mais variadas aplicações. A matriz energética global, desde a segunda revolução industrial, é baseada em recursos não-renováveis, mais especificamente, o carvão, petróleo e seus derivados.

Como todos sabemos tais recursos naturais são escassos, além de gerarem efeitos colaterais nada desejáveis ao meio ambiente, causando o aquecimento global pela emissão de gases de efeito estufa e pelo próprio impacto negativo na saúde da população.

Com a evolução tecnológica, soluções foram surgindo nas mais variadas áreas. A própria geração de energia elétrica de forma hídrica representou um grande passo nessa evolução, principalmente nos países em que os recursos naturais favoreceram tal alternativa.

Apesar dos mais variados e intensos esforços para mudar o cenário atual por meio de energias renováveis, a matriz energética mundial ainda é bastante dependente de fontes não renováveis (petróleo, gás e carvão).

Este cenário começa a esboçar alguma mudança à partir dos anos 1980, com uma participação cada vez mais importante de fontes renováveis de energia, tais como, reduzindo gradualmente a participação percentual de fontes

baseadas em combustíveis fósseis, apesar do aumento significativo da demanda de energia mundial, como se observa na Figura 1.

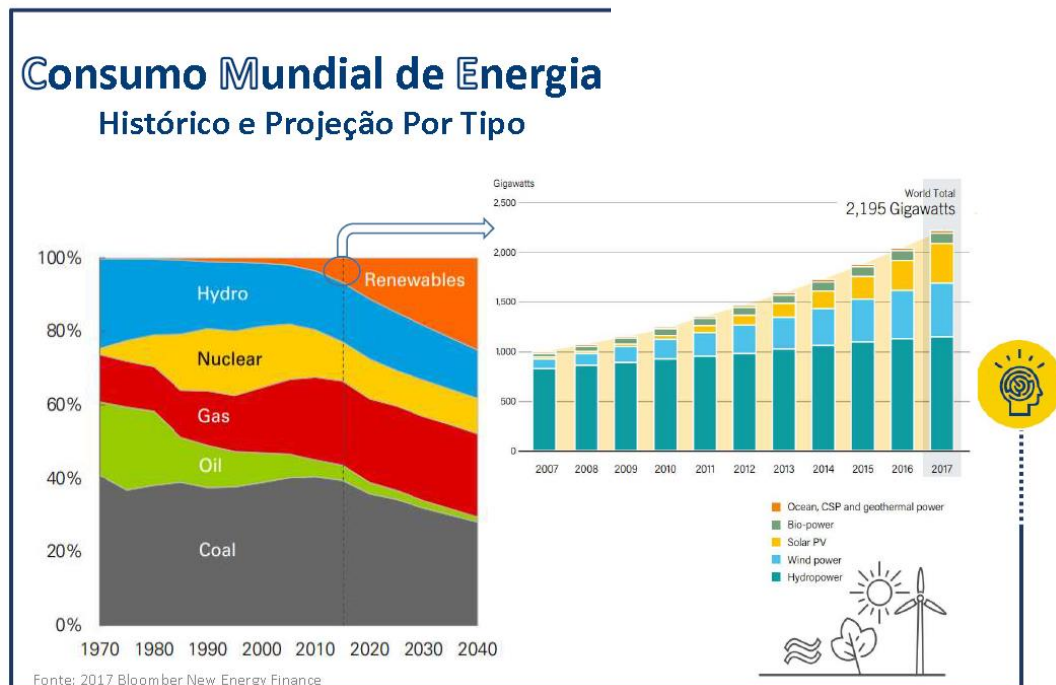


Figura 1 - Evolução da geração de energias renováveis

FONTE: ADAPTADO DE 2017 BLOOMBER NEW ENERGY FINANCE

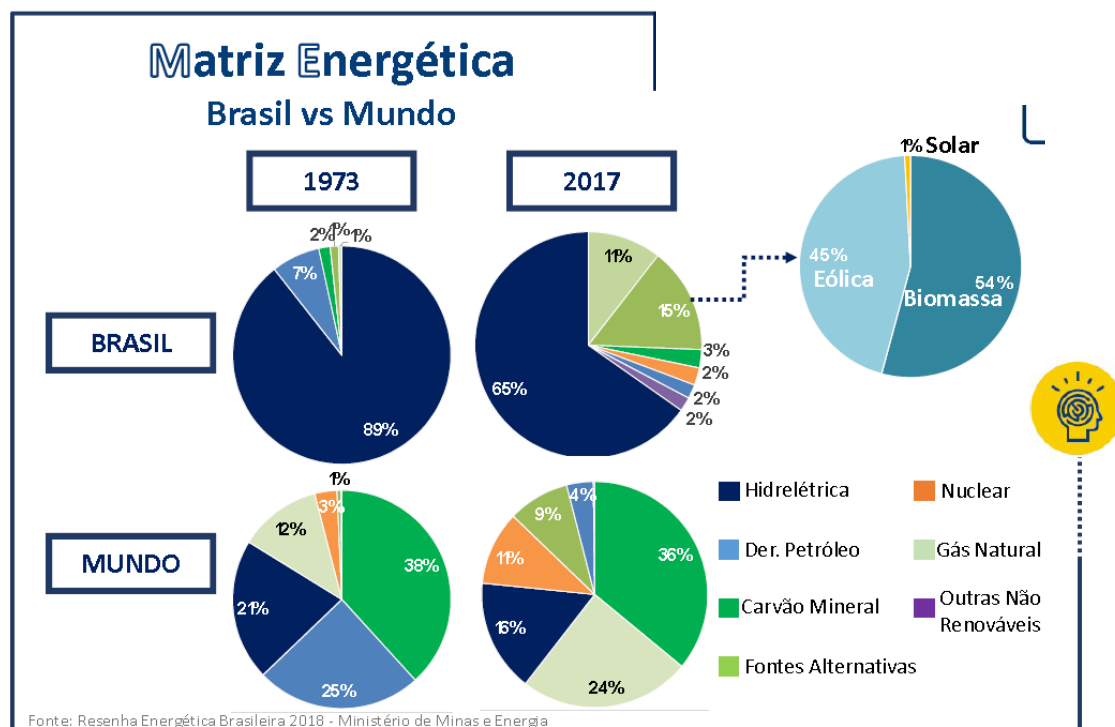


Figura 2 – Matriz energética Mundo vs Brasil

FONTE: ADAPTADO DE MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

De acordo com a Figura 2, observa-se que o Brasil é extremamente dependente da geração de energia nas usinas hidrelétricas, que apesar de ser uma energia limpa, apresenta vulnerabilidades por depender de condições meteorológicas, isto é, chuva para abastecimento das barragens utilizadas pelas hidrelétricas.

Recentemente, o país passou por muitas dificuldades devido à seca e o baixo nível das represas, levando ao racionamento de energia em certas regiões. Isso se dá por não ter uma matriz energética diversificada.

O Brasil, diferentemente de outras regiões e países, tem um enorme potencial energético, principalmente nas áreas de eólica e solar. Dados sugerem um crescimento nestes dois setores com os avanços das tecnologias e a diminuição dos custos de equipamentos (Figura 3).

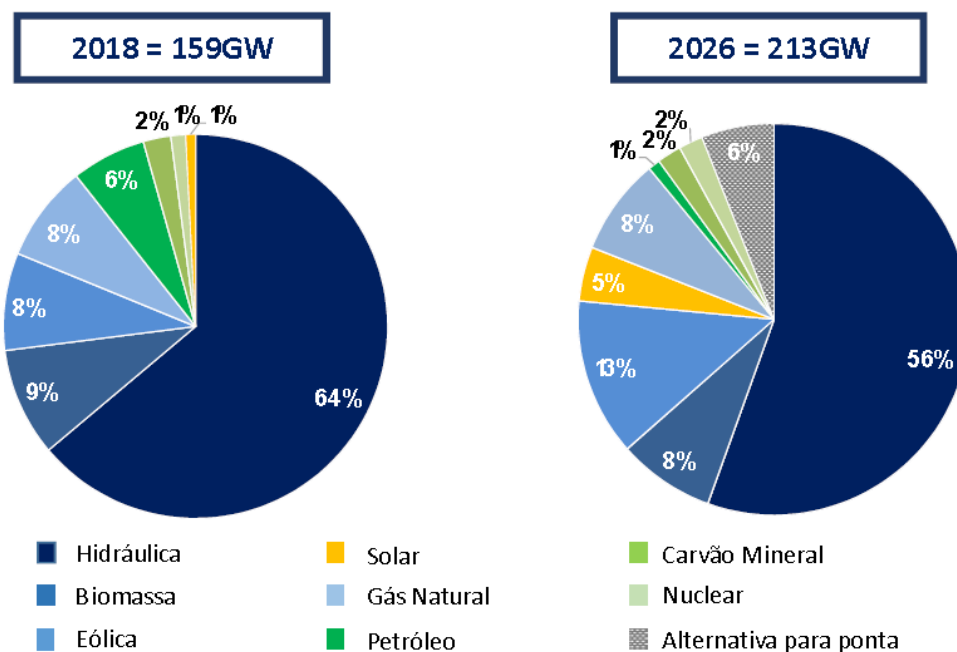


Figura 3 - Evolução da matriz energética Brasileira

FONTE: APADTADO DE PDE2026; ANEEL

### 1.2.2 ASPECTOS AMBIENTAIS

A revolução industrial, o crescimento da economia e o aumento da população mundial fizeram com que a escassez de recursos naturais, poluição, conscientização ambiental e temas relacionados viessem à tona. Uma preocupação constante dos líderes dos países se refere a emissão de gases do efeito estufa (GEE). Uma análise realizada mostra que setor de energia é o que mais contribui para a emissão de GEE (Tabela 1).

Setor	Emissões de GEE
Energia	66%
Agricultura	14%
Mudanças do uso do solo e florestas	13%
Processos industriais	4%
Resíduos	3%

Tabela 1- Emissões mundiais de GEE por setor

Ao expandir esta análise, o estudo mostra que a emissão é variada por tipo de energia, ou seja, as energias renováveis têm comparativamente um papel muito importante na diminuição da emissão de GEE (Tabela 2).

Produção de Eletricidade no Mundo		
Fonte	Geração	Emissões de GGE por unidade de energia
Carvão mineral	40%	878 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Gás natural	21%	530 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Hidrelétrica	17%	6 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Nuclear	14%	15 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Óleo	5%	638 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Eólica	2%	13 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Solar FV		45 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Solar Concentrada		135 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh
Biomassa	1%	31 kg de CO <sub>2</sub> e/MWh

Tabela 2 - Emissão de GEE a partir do tipo de energia gerado

FONTE: FIESP – VIA UNIÃO EUROPÉIA (2008) E IEA (2009)

Pelo Tratado de Paris, comprometendo-se a baixar as emissões de GEE. Ao se analisar os dados da Tabela 1, o setor de energia pode contribuir muito para isso.

O Brasil se comprometeu a promover uma redução das suas emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025. Além disso, indicou uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, em 2030, segundo o INDC.

### 1.2.3 COGERAÇÃO

A cogeração é definida como a geração simultânea e sequencial de duas ou mais formas de energia, elétrica ou mecânica mais térmica. Isso nos dá um aumento de eficiência das energias utilizadas no processo, pois segundo a 2ª de lei da termodinâmica, não é possível a construção de uma máquina que operando em ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho (ANDREOS 2017).

#### 1.2.4 COGERAÇÃO NA SIDERURGIA

A cogeração na siderurgia ainda está em um estágio inicial, com poucos estudos sobre o tema. Nas usinas integradas, ou seja, usinas em que a produção do aço se inicia do minério de ferro, ocorre um reaproveitamento dos gases gerados, devido ao seu grande volume. O alto forno é um dos grandes geradores desses gases, que podem ser reaproveitados no processo seguinte em fornos de tratamentos térmicos, retorna ao próprio alto forno, em fornos de reaquecimento, etc.

Nas aciarias, esse conceito é muito pouco utilizado, poucas unidades trabalham com o reaproveitamento e cogeração de energia. No entanto, pode-se citar como exemplo a tecnologia *consteel*, na qual gases de exaustão do Forno Elétrico a Arco são utilizados para um pré-aquecimento prévio da sucata a ser abastecida para posterior fusão pelo arco elétrico (figura 4).

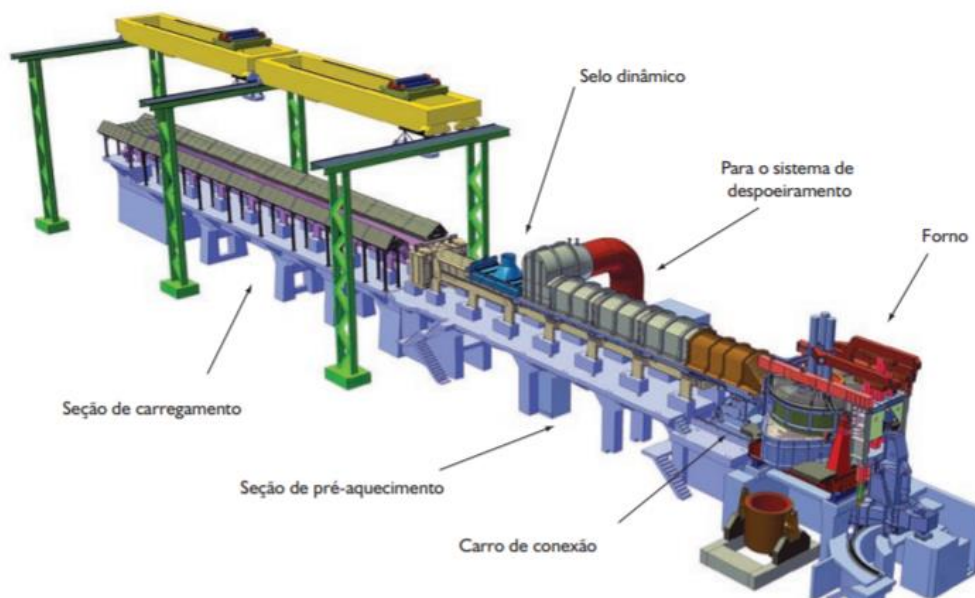


Figura 4- Sistema de abastecimento de sucata no FEA consteel

FONTE: MEMOLI, Francesco – aumento das plantas consteel no mundo

A aciaria elétrica contempla os processos mostrados na figura 5, e analisando o balanço de massa para verificar o quão eficiente é o processo do FEA podemos ver na figura 6, que temos muitas oportunidades para estudarmos a cogeração em uma aciaria elétrica.

Ao se fazer um balanço de energia do reator de fusão da sucata, o Forno Elétrico a Arco, observa-se uma vasta gama de oportunidades de aplicação de cogeração em uma aciaria elétrica. A energia empregada em um FEA tem eficiência em torno de 50-60% variando conforme o perfil de cada forno.

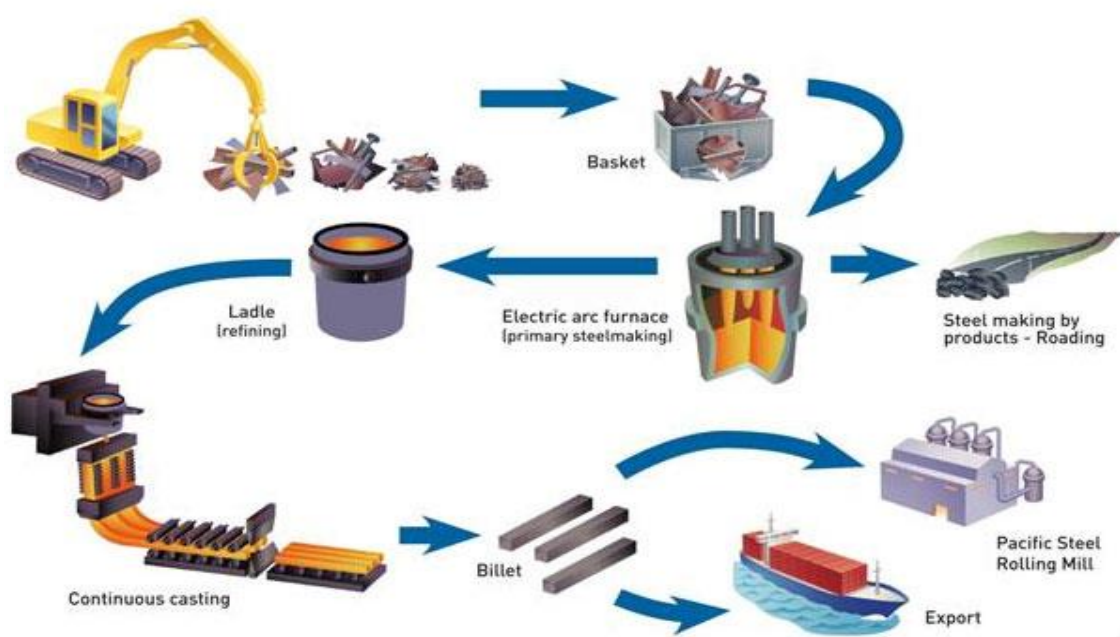


Figura 5 - Esquema de produção da aciaria elétrica

FONTE: [WWW.AMERICANSUSTAINABLERECYCLING.COM](http://WWW.AMERICANSUSTAINABLERECYCLING.COM)

Os gases de exaustão ou *off-gas* contém 20-30% da perda energética no FEA. Devido a elevadas temperaturas desses gases, pode-se considerar um elevado potencial para cogeração de energia. Entretanto, um dos principais desafios é manter uma continuidade desta geração, uma vez que o FEA opera em ciclos e com perfis de vazão do *off-gas* que varia ao longo desse ciclo (Figura 7), além da variação de temperatura.



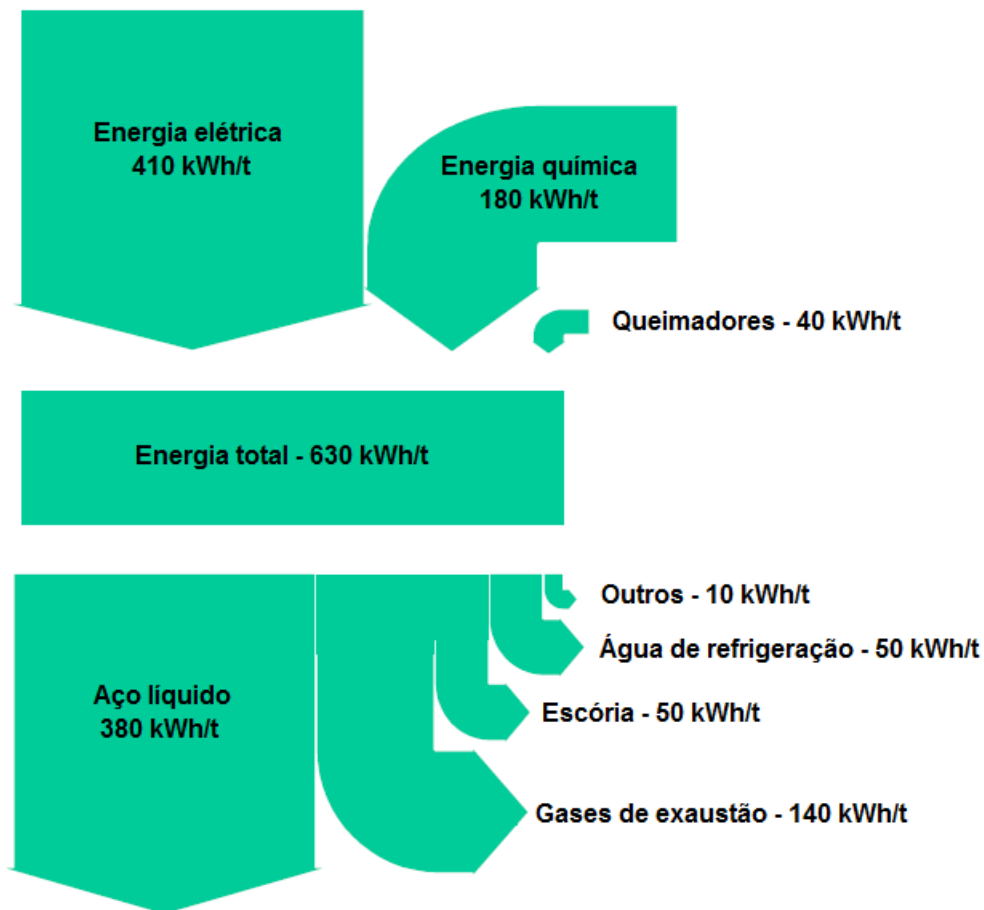


Figura 6- Balanço energético de um FEA

Fonte: ADAPTADO DE SANDBERG (2005)

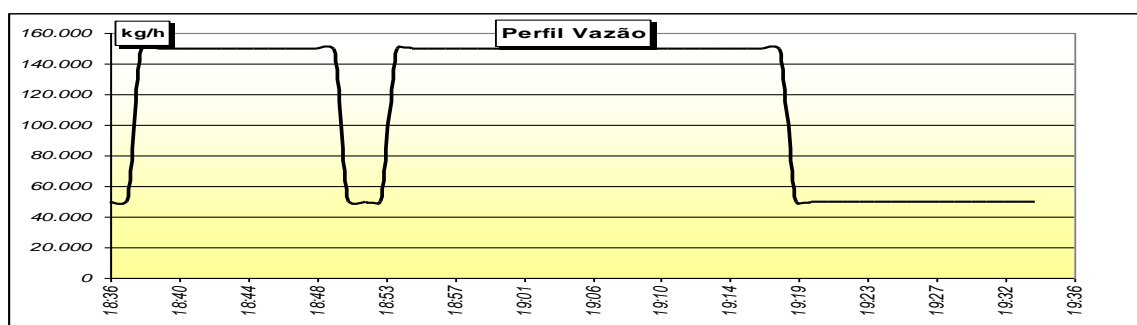


Figura 7 - Perfil de vazão no off-gás durante o ciclo de FEA

FONTE: GERDAU

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO

O processo de fabricação do aço inicia com a matéria prima, pela qual se definem basicamente duas rotas de fabricação, classificando as usinas siderúrgicas em integradas e semi-integradas.

As usinas integradas utilizam como matéria prima o minério de ferro e tem como principal processo o alto forno, enquanto que as usinas semi-integradas utilizam sucata e ferro gusa (este é o produto do alto forno) e fazem esta fusão a partir de um forno elétrico a arco, a rota de fabricação está descrito na figura 8.



Figura 8 - Rota de fabricação do aço

FONTE: Institucional Gerdau (2014)

O processo de fabricação por usina integrada é viável para produção em grande escala, visto os custos de fabricação são altos e os equipamentos utilizados necessitam de uma operação contínua (BADIA 2012).

O processo se inicia no alto-forno, um reator metalúrgico de contracorrente onde a carga (minério de ferro, fundentes, coque ou carvão vegetal) é carregada pela extremidade superior do equipamento e, ao descer, reage com os gases ascendentes oriundos da injeção de ar em altas temperaturas por ventaneiras na região inferior do alto-forno (ROSSI 2014).

O produto do alto-forno é o ferro-gusa, que é utilizado como matéria prima nas usinas semi-integradas na forma sólida e também abastece os convertedores para seguir a produção nas usinas integradas na forma líquida.

A produção de aço através das usinas semi-integrada ou *mini-mill*, geralmente tem duas principais áreas que são aciaria e laminação. O início do processo acontece no pátio de sucatas, onde as matérias primas como sucata, ferro gusa e cales são selecionadas e carregadas no forno elétrico a arco (FEA). No FEA, é realizada a fusão da matéria prima, através de energia elétrica e química, resultando em um aço líquido à aproximadamente 1600°C como produto. Os processos seguintes geralmente são forno panela e lingotamento. Na laminação, cada unidade com sua característica de acordo com o produto final a ser entregue para o cliente, o produto é conformado em sua forma final, a depender da aplicação a que se destina o aço.

## **2.2 ACIARIA ELÉTRICA**

O maior custo dentro da rota de produção do aço em uma *mini-mill* se encontra na aciaria elétrica, chegando a ser 70%. A aciaria abrange as seguintes etapas: Pátio de sucata, FEA, Forno panela e lingotamento contínuo. Pode ter variação de processo de uma aciaria para outra, mas geralmente estas são as áreas produtivas.

### 2.2.1 Pátio de sucatas

O processo de fabricação do aço inicia no pátio de sucatas, que tem como finalidade receber, processar, e entregar a sucata para o forno elétrico dentro das especificações de limpidez, densidade e composição química.

O processo de pátio corresponde a 70% do custo da aciaria, uma vez que a sucata metálica apresenta um alto valor em mercado de grandes movimentações financeiras, principalmente devido a concorrência por sucata com mercados externos e ao aumento da produção mundial de aço em aciarias elétricas.

Em locais como o Brasil, por exemplo, onde a capacidade das empresas de fornecer sucatas processadas para as usinas é baixa, o papel do pátio de sucatas é fundamental na transformação e adequação do material recebido para o uso no forno elétrico (ROSSI 2014).

O trabalho dentro do pátio de sucata é realizar a separação, classificação e processamento de acordo com tamanho, densidade, procedência e composição química. Materiais não ferrosos e impurezas são segregados, pois não são utilizados no processo e tem um mercado a parte que gera lucro para esta operação quando vendido.

As sucatas são provenientes de diversos locais e tem classificações quanto ao seu grau de impureza, sendo impureza todo material que não é ferro que venha misturado a ela como: madeira, borracha, terra e etc., sua densidade e seu tamanho.

Os principais tipos de sucatas são:

- Sucata de indústria: É gerada a partir da perda na produção industrial, como sobras de estamparia, forjaria, parafusos e são exemplos de indústrias que fornecem estas sucatas a automobilísticas, ferramentas, linha branca e outras. Normalmente estão prontas para utilização nos FEAs.

- Sucata de retorno interno: Esta sucata é proveniente de toda a perda no próprio processo, ou seja, dentro da *mini-mill* toda a perda que tiver na aciaria e laminação deve voltar para o pátio como retorno interno, exemplos são carretéis, vergalhões, perfis e tarugos entre outros produtos.

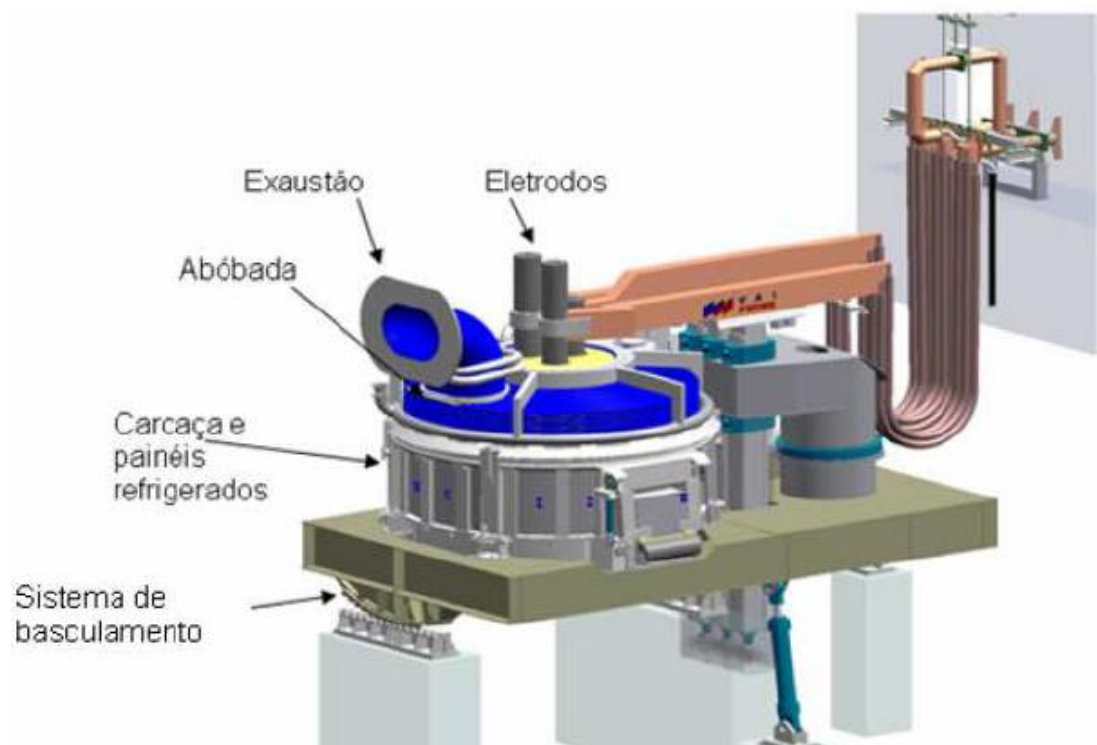
- Sucata de obsolescência: É todo o descarte realizado pela população, que se junta em ferro velho, sucateiros que tem como composição produtos como fogão, bicicletas, carros, chapas. Estas sucatas normalmente possuem 30-40% de impureza e necessitam processamento.

Após os processamentos as sucatas são entregues para carregamento no FEA, cada carregamento de matéria prima no reator segue uma determinada receita, elaborada de acordo com as especificidades do aço a ser produzido e características do reator metalúrgico utilizado para fusão.

Utiliza-se também gusa sólido na carga do forno elétrico. O gusa tem em sua composição química uma maior concentração de carbono (em torno de 4% em peso). Dessa forma, sua utilização requer a elaboração de um balanço de massa, de modo que a quantidade de gusa é precisamente calculada. Um dos parâmetros considerados nesse balanço é o aporte de oxigênio durante a fusão no FEA, sendo a relação entre a concentração de carbono e o aporte de oxigênio durante o processo estritamente controlada de forma a garantir a segurança operacional do forno elétrico a arco.

### 2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

O FEA opera realizando a fusão da carga metálica por meio de um arco elétrico gerado em os eletrodos de grafita (Figura 9). A corrente elétrica é conduzida através dos eletrodos e transmitida para a sucata através de arco elétrico, o qual transfere grande quantidade de energia para a carga metálica (BADIA, 2012).



*Figura 9 - Representação do FEA*

*FONTE: Curso de aciaria elétrica ABM (2007)*

Segundo JOHN (2009), o FEA tem as seguintes etapas de operação:

- Carregamento: O forno abre a abóboda para ser abastecido com a carga metálica. Cada forno dependendo de sua capacidade e tipo de sucata que usa determina quantos carregamentos faz ao longo de um ciclo, este ciclo também é chamado de “corrida”, ou seja, a cada vazamento inicia uma nova corrida.
- Fusão: Após o FEA carregado os eletrodos iniciam a fusão através dos eletrodos que formam o arco elétrico. Esta fusão vai transformando a sucata em metal líquido.
- Refino Oxidante: Quando a maior parte da sucata já virou metal líquido são ligadas as lanças de oxigênios, que injetam este oxigênio no banho e combinado com o C, Si e outros elementos geram energia química e fazem os ajustes do metal líquido.

- Retirada de escória: O produto da fusão no FEA é o metal líquido e para sua formação é gerada a escória. A escória é formada por óxidos que tem menos densidade que o metal líquido e fica sobrenadante ao banho metálico no forno. Ela deve ser retirada no FEA para que alguns elementos indesejáveis ao aço não retornem para ele no período de vazamento.

- Vazamento: Quando o aço está na temperatura ideal, com a atividade do oxigênio dentro da faixa e a composição química desejada é realizado o vazamento da corrida em uma panela. Esta panela vai para o processo seguinte levando o produto do FEA que é o aço líquido.

-Preparação do FEA: Todo forno necessita após o vazamento de um tempo de preparação, ou seja, realizar limpeza, confeccionar canal se o forno possuir EBT (eccentric botton tapping), tudo depende do tipo de forno.

Cada etapa de FEA tem uma temperatura de operação e reações diferentes acontecendo em seu interior. Os gases gerados no off gás tem temperaturas diferentes em cada etapa e durante suas paradas tem perfil de vazão diferentes, como podemos ver na figura 10.

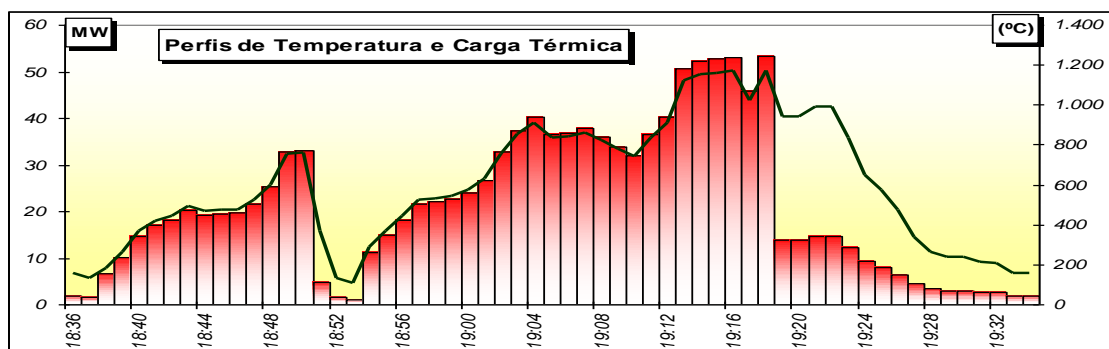


Figura 10 – Temperatura do off gás durante uma corrida

FONTE: GERDAU

### 2.2.3 Forno Panela

No forno-panela, a própria panela é utilizada como reator e é realizado ajuste de composição química via adição de ferroligas, e da temperatura através

do aquecimento via arco elétrico. Além disso, são feitos ajustes na escória para garantir maior eficácia das reações químicas de remoção de enxofre (também denominada de dessulfuração, tem objetivo de reduzir a concentração de enxofre do aço, por se tratar de um elemento prejudicial para as propriedades mecânicas do material) e um menor consumo dos refratários das panelas. Essa etapa também é conhecida como refino redutor, por ser aquela onde há a desoxidação do aço. O aquecimento do banho metálico é realizado por eletrodos de grafita. A Figura 11 apresenta esquematicamente um forno panela, que apresenta dimensões menores que o FEA. A panela durante o processo recebe a injeção de gases inertes (nitrogênio e/ou argônio), que fazem a agitação do banho e prove a homogeneização das ligas e da temperatura de todo o aço líquido, além de favorecer a cinética das reações (ROSSI, 2012).

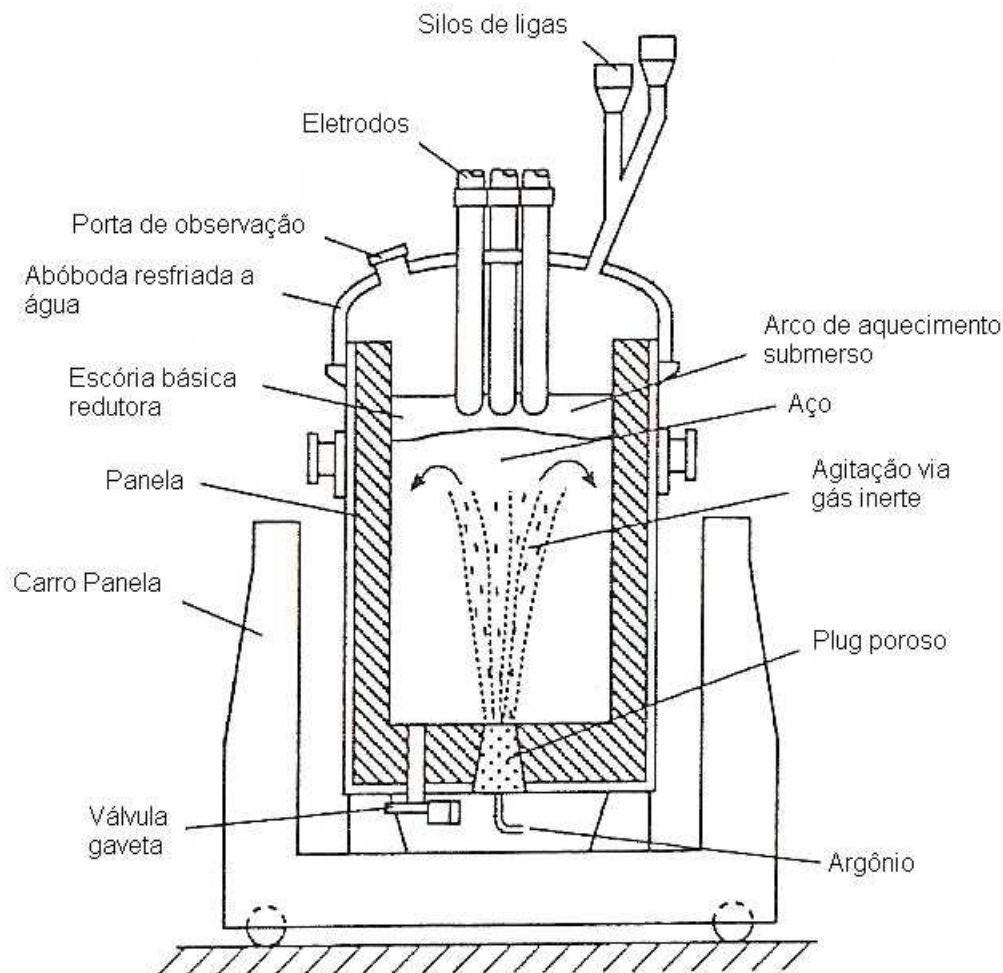


Figura 11 - Desenho do Forno panela

FONTE: Adaptado de Turkdogan (1996)



#### 2.2.4 Lingotamento

O lingotamento contínuo é a etapa que transforma o aço líquido em sólido: o aço é transferido na panela a uma temperatura e composição química especificadas para o produto final da aciaria. Os primeiros lingotamentos eram chamados convencionais, ou seja, seu produto era feito através de lingoteiras onde as panelas eram operadas por pontes e enchiam uma a uma o que torna o processo pouco produtivo (figura 12).

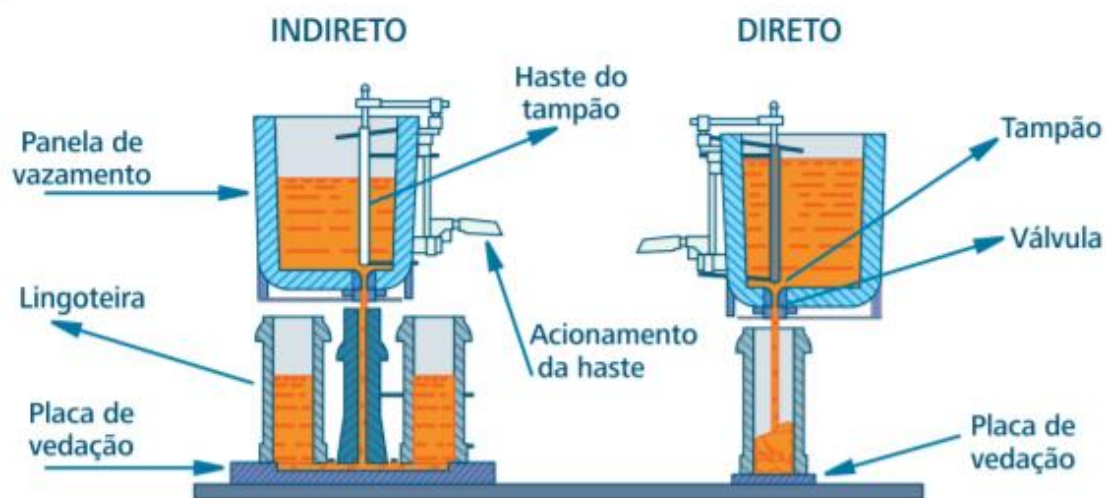


Figura 12- Lingotamento Convencional

FONTE: ARAÚJO 2007

O processo de solidificação mais produtivo e amplamente utilizado nas usinas siderúrgicas é o lingotamento contínuo (LC), figura 13. O processo de lingotamento aumentou sua participação na produção de aço por assegurar notáveis vantagens sobre o processo convencional. Em (Silva 2003), é abordado os aspectos técnicos do processo e detalhes de uma máquina de lingotamento contínuo, destacando que: o processo consiste na panela a ser enviada para a máquina de lingotamento e ocorre em sequenciamento, panela à panela tendo um acumulador que assegura a operação contínua chamado distribuidor. Além disso este distribuidor é responsável por transferir o aço para

os moldes em vários veios. Assim, o LC resulta em menor custo operacional, menor consumo de energia e maior produtividade.

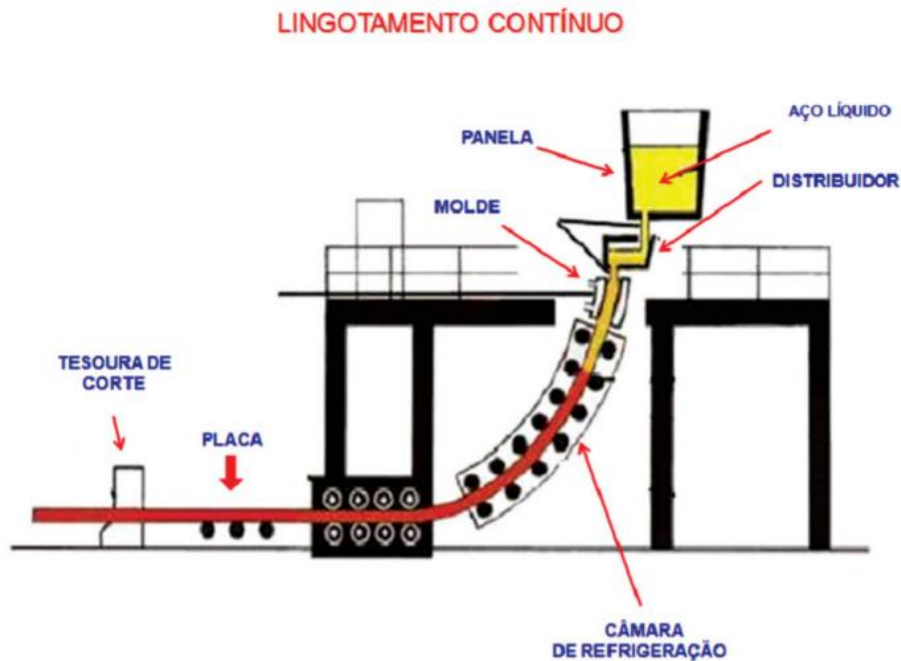


Figura 13 - Desenho do Lingotamento contínuo

Fonte: Apostila de Introdução à engenharia metalúrgica de Nestor Cezar Heck / UFRGS – DEMET

## 2.3 BALANÇO ENERGÉTICO NO FORNO ELÉTRICO A ARCO

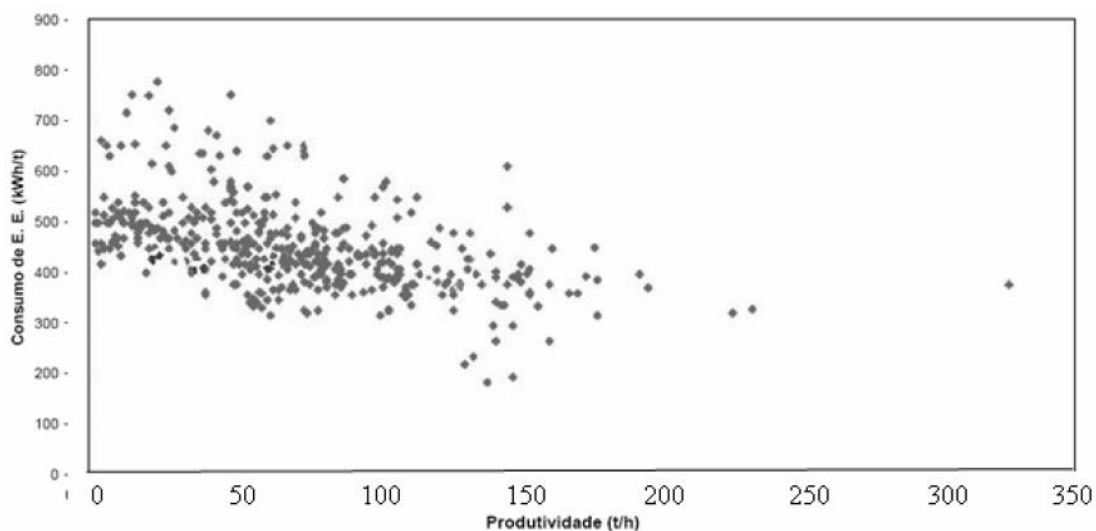
A energia necessária para processar uma corrida de aço no FEA deveria ser constante, independentemente do tamanho do forno e da prática utilizada para tal. Por definição a carga de sucata tem uma taxa de fusão, que por sua vez está relacionado às quantidades de sucata e gusa e os tipos de energias que serão envolvidos no processo, como mostra a Tabela 3.

% SUCATA	% GUSA	TAXA DE FUSÃO DA SUCATA (t/min)	TAXA DE FUSÃO DO GUSA (t/min)	TAXA MÉDIA DE FUSÃO (t/min)	Pon (min)
100%	0%	4,5	1	4,5	26,7
85%	15%	4,5	1	4	30,2
80%	20%	4,5	1	3,8	31,9
70%	30%	4,5	1	3,4	35,1

*Tabela 3 – Relação da taxa de fusão das sucatas e tempo de FEA ligado*

*FONTE: Gerdau Araçariquama*

A taxa de fusão do gusa, por exemplo, é cerca de quatro vezes menor que a da sucata. Assim, a composição da carga de matéria prima a ser fundida no FEA irá determinar o tempo de corrida, como se observa na Tabela 3. O *power on* (Pon), que é o tempo em que o arco elétrico permanece ligado e fornecendo energia ao reator, varia de acordo com a taxa de fusão desses dois componentes da matéria prima (gusa e sucata). Como podemos ver na Figura 14, o consumo de energia elétrica é menor quanto maior for a t/h produzida e consequentemente o Pon tem parcela disso sendo menor.



*Figura 14 - Consumo médio de energia elétrica por tonelada de aço produzido relacionado*

*Fonte: Seminário de Forno Elétrico a Arco UCAR (2008)*

Segundo JOHN (2009), existem vários fatores que influenciam o consumo de energia total por cada tonelada de aço produzido, e que podem ser listados da seguinte maneira:

- Temperatura inicial da carga;
- Temperatura de fusão;
- Massa total;
- Quantidade de carregamentos (vinculado a densidade), ou método de carregamento.
- Perdas no circuito secundário do forno, devido à resistência elétrica dos dispositivos que conduzem a energia até os eletrodos.
- Vazão de água do sistema de refrigeração dos eletrodos;
- Característica do programa de potência;
- Perdas com as trocas térmicas entre a carga, os painéis refrigerados e abóbada;
- Perfil geométrico da carcaça do forno;
- Perdas no sistema de exaustão;
- Entrada de ar frio;
- Quantidade de fundo úmido;
- Adição de materiais fundentes;

Segundo Fortes (2008), a energia introduzida no forno elétrico a arco para fusão e aquecimento da carga é composta de energia elétrica mais uma parcela de energia química. A condução de energia elétrica é realizada através dos eletrodos de grafite, que ao se aproximar da sucata abre o arco elétrico, como consequência da passagem de corrente quando estes são aproximados da carga gera a fusão da mesma. A energia química é gerada pela reação exotérmica de oxidação de alguns elementos presentes no processo, carregados junto a carga metálica, ou então, injetados como finos ou gás. O balanço

energético de perdas está visualizado na figura 15 e o para estudar o assunto mais aprofundado recomenda-se JOHN (2009).

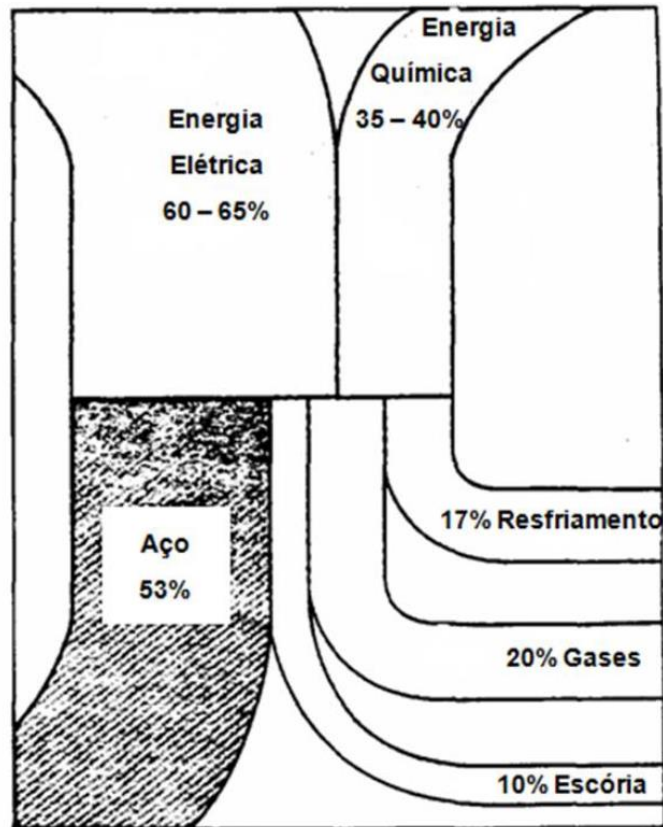


Figura 15 - Diagrama do balanço de energia e perdas no FEA

FONTE: [www.aciarianews.blogspot.com/2012/12/forno-eletrico-arco-fea.html](http://www.aciarianews.blogspot.com/2012/12/forno-eletrico-arco-fea.html)

## 2.4 COGERAÇÃO

A cogeração é uma forma de efficientizar os processos, afim de torna-lo mais rentável e diminuir os desperdícios. O gás natural é o combustível mais utilizado no processo de cogeração de energia e por meio da cogeração é possível alcançar até 85% de energia primária contida no combustível que pode ser transformada em energia mecânica ou elétrica mais energia térmica.

A cogeração pode ser aplicada em qualquer empreendimento no qual exista demanda de energia elétrica e térmica ao mesmo tempo. Na figura 16 temos um esquema de processos com e sem cogeração.



Figura 16 - Sistema de geração de energia elétrica com cogeração

FONTE: Cogeração distribuída – SCGAS

Os sistemas de cogeração podem ser aplicados nas suas diferentes configurações em inúmeros setores. Algumas das suas principais aplicações, segundo MACHADO (2015), são:

- Setor Industrial – Utilização de calor de processo para produção de vapor: Indústria Química, Petroquímica e Farmacêutica, Indústria de Alimentos e Bebidas, Indústria de Papel e Celulose, Indústria Têxtil;
- Setor Industrial – Aquecimento direto - Forno Alta Temperatura: Indústria de Vidro, Indústria de Cimento, Siderúrgica;
- Setor Comercio e Serviços – Ar-Condicionado central, aquecimento de Água: Shopping Center, Centros Comerciais, Supermercado, Hotel, Hospital, Lavanderia e Tinturaria, Clubes Desportivos;
- Setor Sucroenergético – bioeletricidade: Usinas de açúcar e etanol que utiliza o bagaço da cana de açúcar e também da sua palha e pontas para gerar energia elétrica.

As vantagens da cogeração são:

- Redução dos custos na geração de energia elétrica;
- Maior confiabilidade no fornecimento de energia;
- Redução dos custos de transmissão e distribuição de eletricidade;
- Utilização de menos recursos naturais;
- Menor emissão de poluentes.

Segundo ANDREOS (2013), podemos dizer que a cogeração se caracteriza pela produção de energia através de um ciclo com rendimento global:

Rendimento elétrico:

$$\eta_e = \frac{E}{C}$$

Rendimento térmico:

$$\eta_t = \frac{Q}{C}$$

Rendimento global:

$$\eta_G = \frac{E + Q}{C}$$

Onde:

$\eta$  = Rendimento

E = Energia elétrica produzida

Q = Calor produzido

C= Poder calorífico do combustível

Todo ciclo térmico tem por objetivo a produção da energia eletromecânica principal, mas a cogeração parte da energia que seria considerada rejeito térmico e é recuperada para a produção de outra forma de energia, assim temos um aumento do fator de utilização de energia (FUE), que se dá por:

$$FUE = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_u}{\dot{m} \times PCI}$$

Onde:

$\dot{W}$  = Potência de eixo produzida pela máquina (kW)

$\dot{Q}_u$  = Taxa de calor útil produzido ou recuperado (kW)

$PCI$  = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

$\dot{m}$  = vazão mássica de combustível (kg/s)

#### 2.4.1 Dimensionamento da Cogeração

O dimensionamento de uma planta de cogeração é realizado sempre buscando o melhor balanço energético de forma a atender a demanda térmica, podendo utilizar dois tipos de dimensionamento básico:

- Dimensionamento *topping cycle*, onde a geração principal é a energia elétrica, ou seja, o combustível primário gera primeiramente a energia elétrica, sendo o calor residual recuperado e utilizado na produção de energia térmica resultante, esquematizado na figura 17.

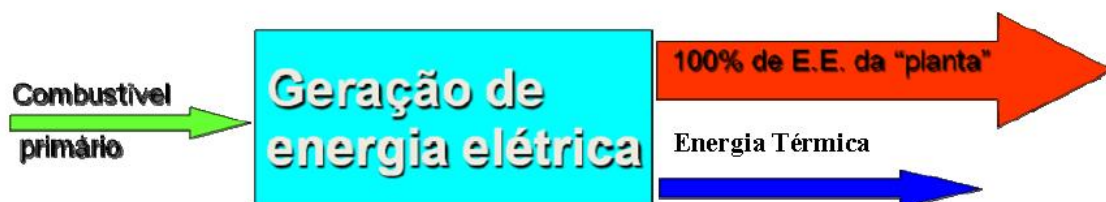


Figura 17 – Cogeração *topping cycle*

FONTE: ANDREOS 2013



- Dimensionamento *bottoming cycle*, onde a geração principal é a energia térmica, assim o combustível primário gera energia térmica, e o calor residual recuperado é utilizado para gerar energia elétrica, esquematizado na figura 18.



Figura 18 - Cogeração *bottoming cycle*

FONTE: ANDREOS 2013

#### 2.4.2 Esquemas Básicos de Cogeração

Dentre as possibilidades de plantas de cogeração existem diferentes formas de máquinas térmicas, diante destas várias possibilidades temos algumas máquinas térmicas que são as principais utilizadas na indústria que possuem boas taxas médias de produção de trabalho e recuperação de energia térmica.

Dentre elas temos os esquemas de cogeração através do ciclo de Rankine, ciclo Brayton e o ciclo combinado.

- Ciclo Rankine: Ciclo de cogeração com extração de vapor na turbina. As turbinas de vapor trabalham em ciclo fechado (condensação) ou aberto (contrapressão).

Nas turbinas de vapor (TV) de condensação a caldeira promove o aquecimento da água e conseqüentemente a geração de vapor, assim o vapor gerado gera trabalho na turbina e na saída da turbina o vapor perde calor sendo condensado iniciando o ciclo novamente sendo bombeado, figura 19.

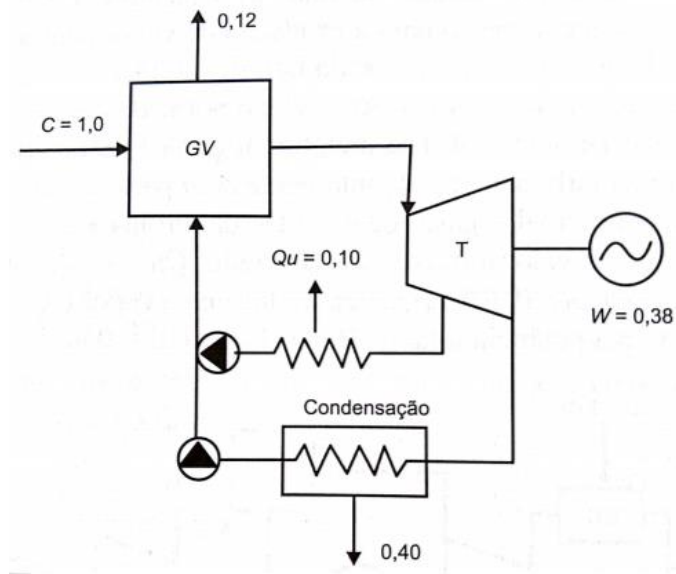


Figura 19 – Planta de cogeração com TV de condensação

FONTE: ANDREOS (2017)

Já nas TVs de contrapressão o vapor que passa pela turbina e pode ser aproveitado nos processos industriais, figura 20.

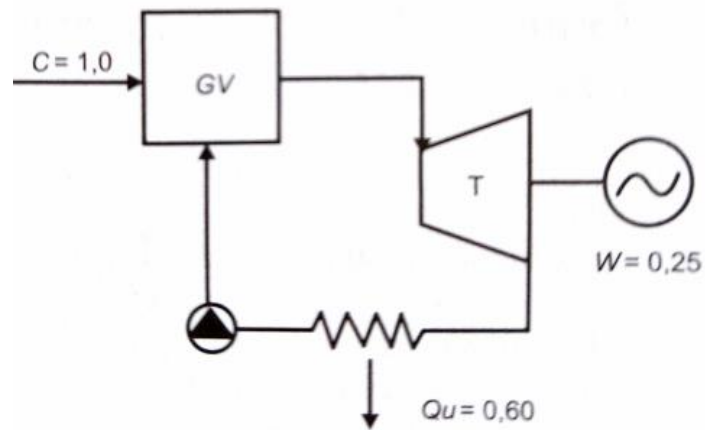


Figura 20 – Planta de cogeração com TV de contrapressão

FONTE: ANDREOS (2017)

No ciclo Rankine, a eficiência na geração de energia elétrica é em média 35% e com a implementação da cogeração pode chegar a 82%.

- Ciclo Brayton: Ciclo de cogeração com turbina a gás e recuperador de calor para a produção de calor útil. As turbinas a gás que operam em ciclo Brayton, operam a pressão constante. Neste ciclo o combustível é queimado em uma câmara de combustão ocorrendo o aquecimento e a expansão destes, sendo encaminhados para a turbina que gera energia mecânica e elétrica se acoplado no sistema um gerador, figura 21. O ciclo Brayton em média tem 40% de eficiência e com a cogeração pode chegar a 82%.

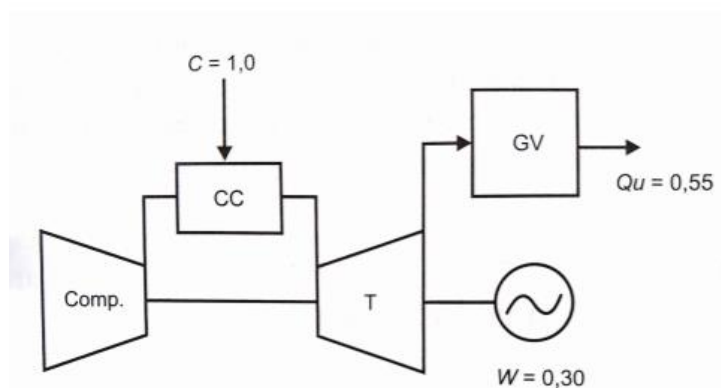


Figura 21 - Planta de cogeração com TG

FONTE: ANDREOS (2017)

O processo de ciclo combinado, figura 22, consiste em unir os dois processos, com uma TG e uma TV no mesmo sistema, este sistema possui eficiência de 55% em média e com a cogeração pode atingir 75%, porém tem alto custo de investimento, de acordo com ANEEL (2008).

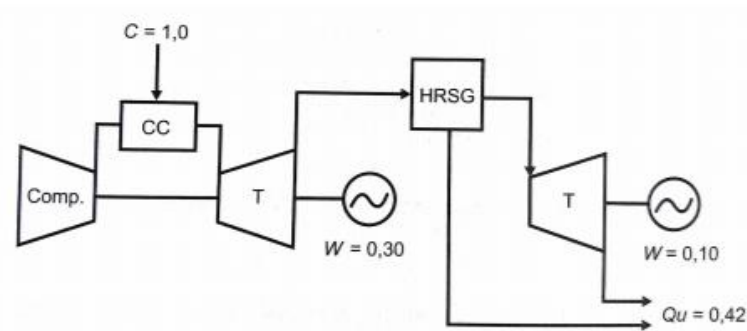


Figura 22 - Planta de cogeração com ciclo combinado

FONTE: ANDREOS (2017)

### 2.4.3 Tecnologias Disponíveis para Cogeração

Hoje no mercado, as tecnologias disponíveis para a cogeração são citadas como: Motor de combustão interna (MCI), Turbina a vapor (TV), Turbina a gás (TG), microturbina a gás ( $\mu$ TG), motores stirling (MS), ciclo orgânico de rankine (ORC), células combustíveis (CC), resfriador líquido por absorção (ABS) entre outros que podem ser aprofundadas em ANDREOS (2013).

## 3. ESTUDO DE CASO

### 3.1 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso trata da obtenção de energia elétrica através da implantação de um sistema de cogeração em uma aciaria elétrica, visando utilizar os gases do FEA captados pelo sistema de despoeiramento.

### 3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO

Os sistemas de despoeiramento nos processos siderúrgicos visam retirar o material particulado presente no fluxo gasoso. O objetivo é minimizar a emissão atmosférica derivada da produção do aço, atendendo a requisitos ambientais legais em âmbito nacional e internacional.

São estruturas complexas, constituídas de diferentes equipamentos e componentes, com dutos que podem ter cinco metros de diâmetro e dezenas de metros de comprimento. Por conta disso, a operação e a manutenção dos sistemas não são tarefas simples. A Figura 23 apresenta um sistema de despoeiramento típico de um FEA.

As operações que geram emissões durante o processo de produção de aço no FEA são: carregamento de sucata, fusão, refino, remoção de escória e vazamento de aço. Estes processos produzem fumos, particulados metálicos e produtos gasosos. A quantidade e a composição do material particulado emitido podem variar dependendo da composição de sucata e dos aditivos que são carregados no FEA.

As emissões do FEA são geralmente capturadas de duas maneiras distintas e complementares: através de pressão negativa na abóbada e por meio de exaustão com coifa localizada acima do forno.

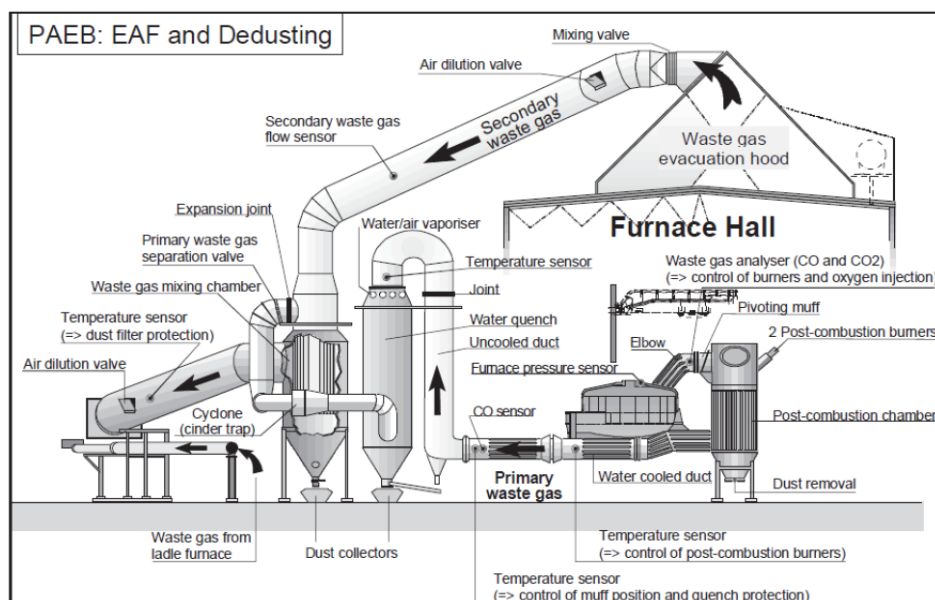


Figura 23 - Sistema de despoeiramento típico de um FEA

FONTE: Acervo Gerdau

Os sistemas de despoeiramento se dividem em primário e secundário. O sistema primário capta os fumos diretamente do FEA e é formado pelos seguintes elementos:

- Um furo na abóbada do FEA, também conhecido como quarto furo;
- Um cotovelo refrigerado à água que conecta o 4º furo ao sistema;
- Dutos fixos próximos ao forno que recebem os gases do cotovelo, geralmente designados como dutos refrigerados à água;

- Dutos refrigerados em geral;
- Câmara de combustão e de sedimentação (*Drop-out Box*) para garantir a combustão completa de monóxido de carbono e coleta de poeira mais pesadas;
- Uma torre de sprays ou torre evaporativa, também conhecida como *Hot Quenching Tower* (HQT);
- Trocador de calor, também conhecido como trocador de ventilação natural ou de ventilação forçada;
- Injeção de carvão ativo;
- Dutos secos;
- Conexão com o sistema secundário.

Os sistemas secundários geralmente consistem de uma coifa disposta acima do forno. A coifa pode ser uma estrutura independente, fazendo um fechamento do prédio ("elephant house"), e é conectada a Casa de Filtros independentemente ou combinada com o sistema primário. A Figura 24 apresenta o sistema secundário.



Figura 24 - Sistema secundário e visão geral do sistema de despoeiramento

FONTE: Acervo Gerdau

A Casa de Filtros é o dispositivo que separa o material particulado do fluxo gasoso. O meio filtrante é geralmente um material de tecido sintético.

Em resumo, a tabela 4 apresenta uma descrição dos parâmetros considerados para o projeto de um sistema de despoeiramento, relacionando os locais específicos ao longo do sistema e respectivas variáveis de projeto.

Localização	Parâmetros Específicos	Cálculo das Variáveis de Projeto
Elbow do Forno	Condições dos gases no elbow após combustão	Calor contido Vazão de gases Temperatura dos Gases
Duto Refrigerado	Temperatura dos gases de saída	Calor a ser removido Comprimento dos dutos
Diluição Primária	Temperatura dos gases de saída	Ar de diluição Entalpia dos gases diluídos Vazão de gas diluído
Resfriamento do Gás	Temperatura dos gases de saída	Taxa de resfriamento Tam anho dos dutos
Ventilador	Pressão Estática do Sistema	Pressão Estática do Ventilador Potencia do motor
Casa de Filtros	Vazão de gases Temperatura dos gases Carga de pós Taxa de filtragem	Área de mangas Perda de carga

Tabela 4 – Parâmetros de processo de um sistema de despoeiramento

Na Tabela 5, encontram-se as especificações do Sistema de Despoeiramento operante na aciaria elétrica, com os seguintes componentes: coifa, câmara de combustão, dutos refrigerados, HQT, separador horizontal, ciclone e uma Casa de Filtros tipo fluxo reverso negativo.

<b>Vazão Nominal (Nm³/h)</b>	1.570.000
<b>Temperatura do Filtro (°C) (máx)</b>	130
<b>Vazão de Água (m³/h)</b>	2.420
<b>Vazão de Ar Comprimido (Nm³/h) (x5) (mín)</b>	500
<b>Vazão de Água da HQT (Nm³/h) (x5)</b>	235
<b>Temperatura de Saída da HQT (°C)</b>	285
<b>Área Filtrante Total (m²)</b>	27.360
<b>Área Filtrante Líquida (m²)</b>	25.840

Tabela 5 - Dados do sistema de despoeiramento

Na figura 25, encontram-se a energia dissipada que o sistema de despoeiramento capta, estes dados são de um sistema de simulação com dados reais da aciaria de estudo, chamado MELTDOWN.

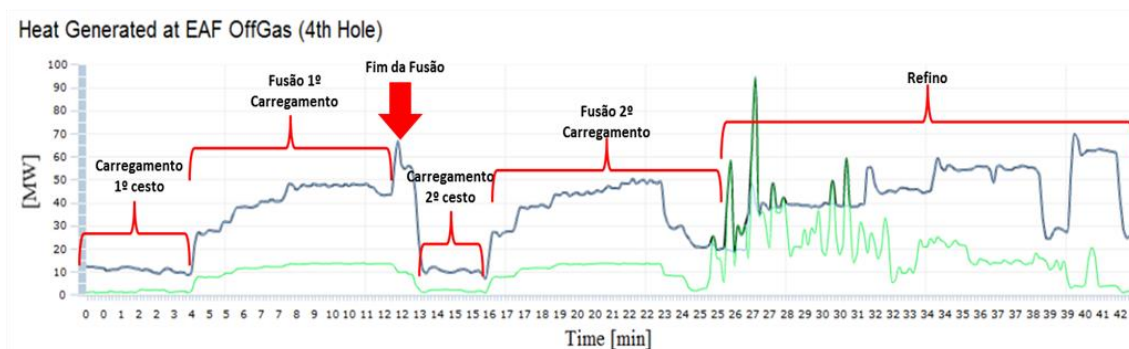


Figura 25 - Exemplo de simulação do software Meltdown, com previsibilidade de energia em função do tempo

FONTE: Acervo Gerdau

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

O objetivo deste projeto é utilizar a energia perdida na fusão da sucata, assim foi escolhido implementar um sistema que gere energia elétrica complementar ao processo do aço. O projeto tem a finalidade de recuperar uma grande quantidade de calor residual perdido no FEA, como podemos ver na figura 26, o balanço de massa do FEA mostra uma perda para o sistema de exaustão de 14,7%.



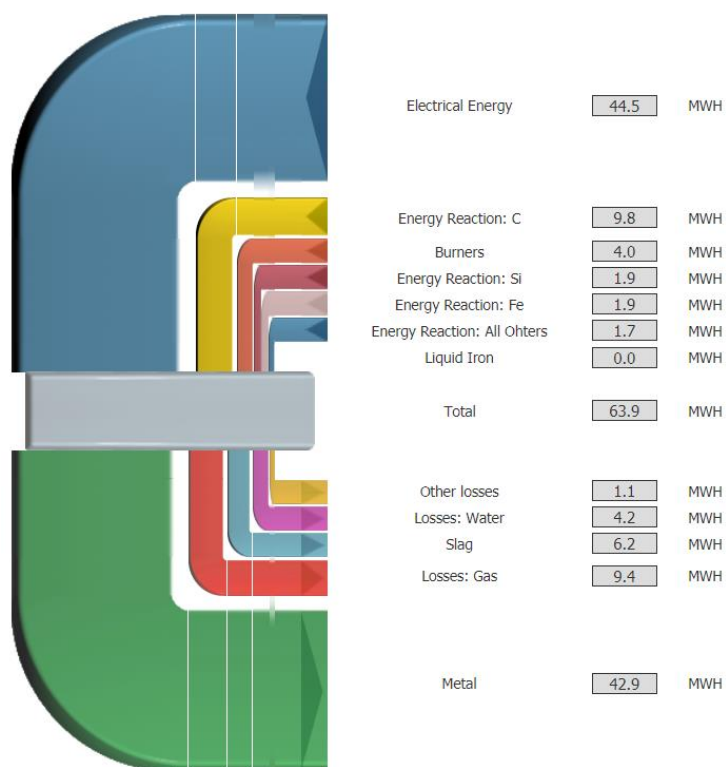


Figura 26 - Balanço de massa do FEA

A partir deste fluxo de entradas e saídas do FEA, calculamos o Fator de utilização de energia (FUE) e a qualificação da cogeração, que é necessário para ver se o projeto se enquadra dentro das propostas da ANEEL de cogeração que se viabilizado pode ter busca de incentivos.

Calculando a FUE:

Antes da cogeração

$$FUE = \frac{42,9}{63,9} \quad 67,1\%$$

Após a cogeração

$$FUE = \frac{42,9+1,94}{63,9} \quad 70,2\%$$

Acréscimo de 1,94 kwh a partir do calor recuperado.

### Qualificação da cogeração:

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
<b>Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:</b>		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
<b>Demais combustíveis:</b>		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
<b>Calor recuperado de processo:</b>		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Tabela 6 – Qualificação do projeto

	Cogeração	MWh	Horas trabalhadas	KWh/h
EF	Energia entrada (eletrica +quimica)	63,9 MWh	8016	7,971557
ET	Energia processo aço	42,9 MWh	8016	5,351796
EE	Energia eletrica da recuperação de calor	1,4 MWh	8016	0,176481

Tabela 7 – Dados do projeto para a qualificação em kwh/h

Considerando a tabela 7 e 8, utilizamos os dados para cálculo da qualificação, segundo a resolução da ANEEL nº 235 14/11/16:

$E_f$	7,972 kWh/h	$67\% = \frac{E_t}{E_f} \geq 25\%$	Cumpre	requisito (a)
$E_e$	0,176 kWh/h			
$E_t$	5,352 kWh/h			
$X$	2,60	$28\% = \left( \frac{E_t}{E_f} \right) + X + \frac{E_e}{E_f} \geq F_c\%$	Cumpre	requisito (b)
$F_c$	25%			

Sendo assim, notamos que nosso projeto é qualificado pela ANEEL, o que permite a busca de incentivos para a realização do projeto

Então, seguindo o desenvolvimento do projeto e já sabendo que não é qualificável, estudamos a utilização de uma turbina para geração de energia, e foi decidido o melhor sistema que não gere mudanças no layout da aciaria e assim definindo a geração de energia como um ganho auxiliar ao processo do aço. O escopo do projeto sugere o aproveitamento dos gases perdidos no FEA pelo sistema de exaustão por meio do aquecimento de água, utilizando um ciclo fechado trabalhando com um fluido orgânico para transformar calor em energia elétrica.

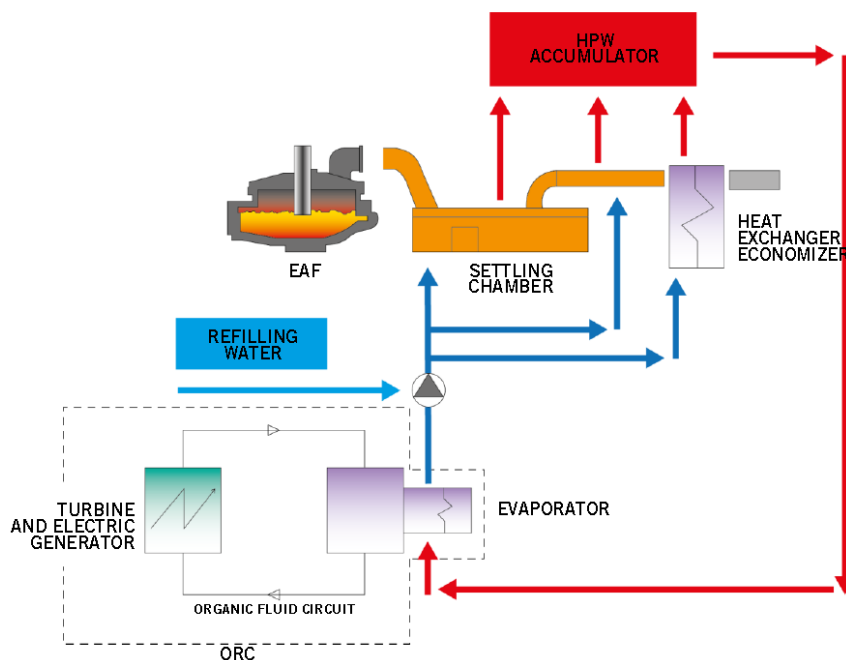


Figura 27 - Desenho do projeto para geração de energia escolhido

Na figura 27, explica o princípio do projeto onde a água circulará pelos pontos quentes do sistema de exaustão via tubulações realizando troca de calor, entendendo que o processo não é contínuo temos um acumulador de água quente para mantermos a geração constante independente de qual parte o processo esteja.

De acordo com o calor rejeitado no processo podemos classifica-los em três faixas segundo (MORELLATO 2016):

- Baixa temperatura: gases liberados em até 230°C
- Média Temperatura: gases liberados entre 230°C e 650°C
- Alta temperatura: gases liberados acima de 650°C

Esta definição é muito importante visto que nossa definição do ciclo a ser utilizado depende disso. Na tabela 5, temos que a temperatura de saída do HQT é em média 285°C e isso mostra que trabalhamos com a faixa de média temperatura.

Para recuperação de calor com média e baixa temperatura é aconselhado utilizar ciclos de Rankine orgânicos, figura 28, que trabalham em circuito fechado

e o tipo de fluido é considerado diferencial para que se tenha o melhor aproveitamento.

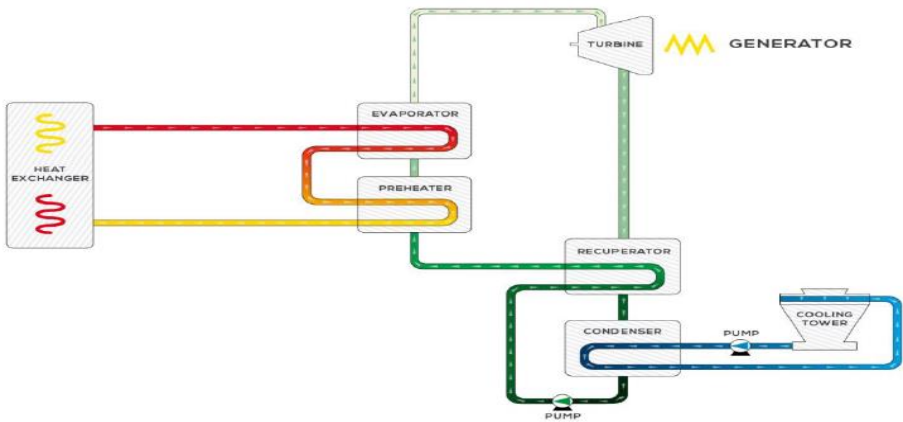


Figura 28 - Funcionamento do ciclo de Rankine orgânico

O fluido a ser escolhido para o trabalho é crucial para o sucesso do projeto, tendo em vista que deve apresentar as melhores condições termodinâmicas possíveis para trabalhar com temperaturas e pressões mais baixas.

A tabela 8 apresenta algumas opções da literatura, sendo que para o projeto o tolueno é o fluido escolhido por que se adequa as características do projeto com mais facilidade.

HFC - 134a	Usado em plantas de potência geotérmica ou em baixas temperaturas de recuperação de calor residual.
HFC - 245fa	Fluido de trabalho de baixa temperatura, principalmente usado em recuperação de calor residual.
n-pentano	Usado na única planta de potência solar comercial de ORC em Nevada.
Solkatherm	Recuperação de calor residual.
OMTS	Plantas de potência de biomassa e cogeração.
Tolueno	Recuperação de calor residual

Tabela 8 - Fluidos comuns em instalações comerciais de ORC

FONTE: MORELLATO 2016

Cada parte do sistema de exaustão (despoeiramento) teve calculado seus pontos com as temperaturas de trabalho para podermos avaliar o quanto de calor seria extraído de cada parte, assim sabendo o quanto seria o aproveitamento deste calor recuperado. Além disso os gases de queremos trabalhar não estão isentos de sujeira então algumas partes da planta do despoeiramento não permitem ser utilizadas por que são áreas de difíceis limpeza e de acúmulo de materiais. Na figura 29 temos os pontos mapeados para a utilização com suas temperaturas variando em torno do processo, assim com estas temperaturas podemos calcular o quanto podemos recuperar de calor no despoeiramento e o quais materiais devemos utilizar no projeto.

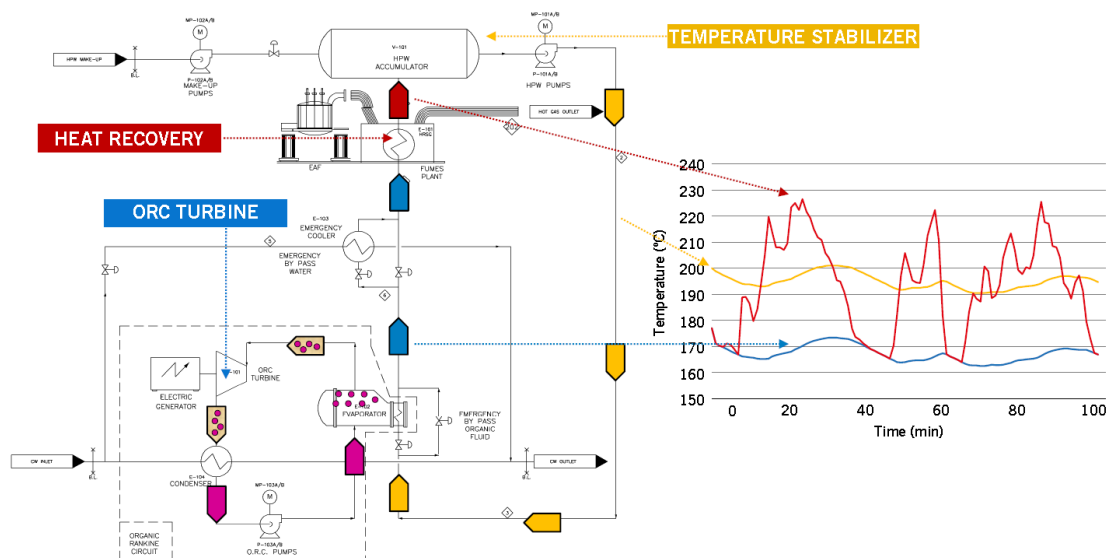


Figura 29 - Esquemático do funcionamento do sistema de acordo com as temperaturas do gás obtidas

Analisando o sistema de geração de energia temos uma planta que necessita dos seguintes componentes para operar, como podemos ver na figura 30:

- A – Vaporizador
- B – Turbina
- C – Condensador
- D – Bomba de recirculação

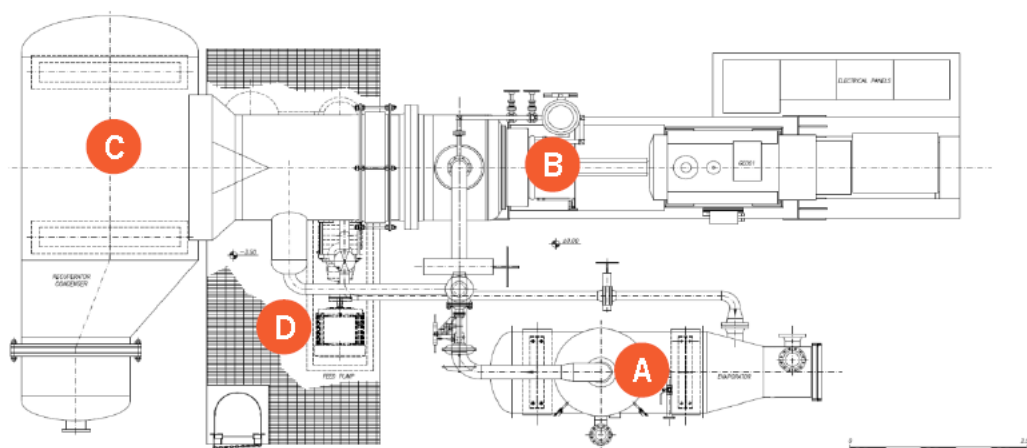


Figura 30 - Sistema ORC

Como o processo de aciaria não é um processo constante temos um acumulador de água quente que faz um buffer quando estamos em baixa geração no sistema de exaustão.

Na figura 31, conseguimos ver a estrutura completa partindo do sistema de despoeiramento para a planta completa de geração de energia, com o trocador de calor (vermelho), a planta de geração de energia elétrica (ORC) e o acumulador (laranja).

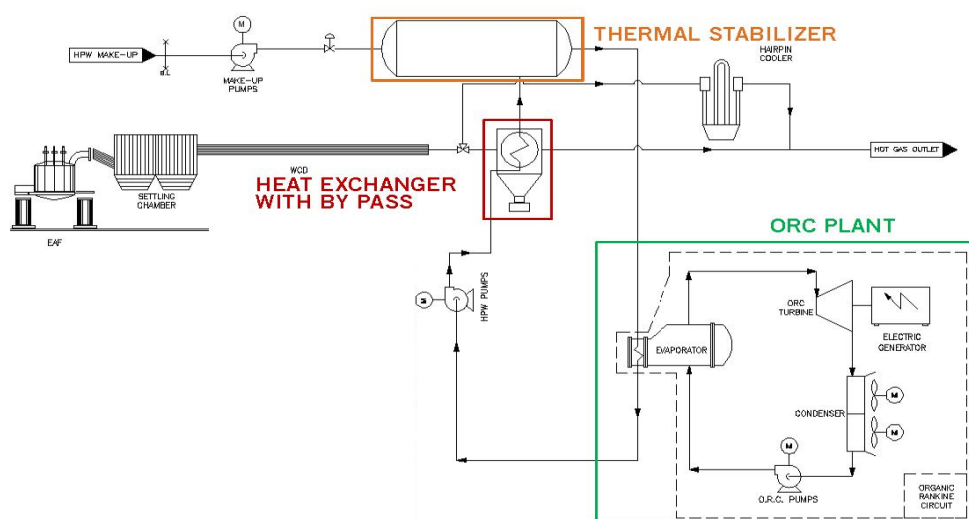


Figura 31 - Projeto para obtenção de energia

Abaixo a planta completa, introduzindo o FEA e o sistema de despoeiramento completo, onde cada etapa deve acontecer e cada equipamento deve ser instalado, lembrando que cada adequação e aumento de distância pode gerar perda de carga.

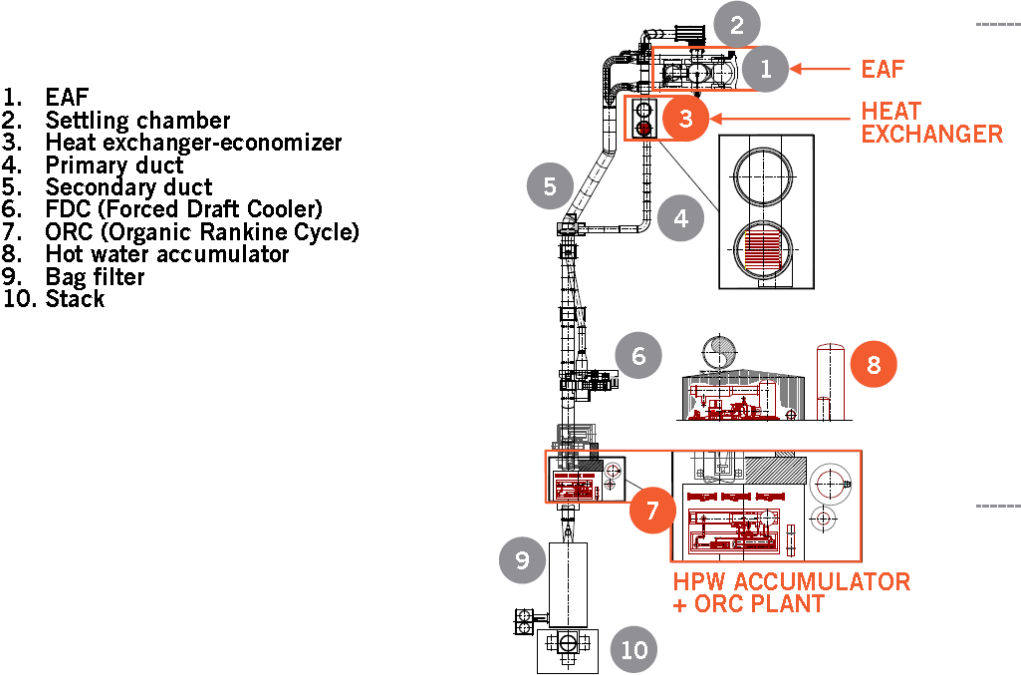


Figura 32 - Planta completa com adição do sistema para gerar energia

Os dados de geração deste sistema estão na tabela abaixo:

Dados do Projeto	
Energia máx recuperado	174 kWh/t
Produção aciaria	54000 t/mês
Dimensionamento de turbina	3,5 MWe
Produtividade	135 t/h
Tamanho do FEA	111 t vazadas
Produção ano	648.000 t
Eficiência	8%

Tabela 9 - Dados de recuperação do sistema instalado

### 3.4 CÁLCULO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Hoje muitas empresas estão com perfis de investimento a curto prazo, com no máximo 5 anos de payback para validar o investimento. O mercado alterna muito e é a causa desta difícil decisão em investimentos que dependem diretamente de produção, visto que a aciaria parada demanda em menor geração de energia, pois o FEA está desligado.

Analisando as tabelas 8 e 9, elas mostram os custos de investimentos e retornos gerados anualmente e os cálculos financeiros para ver o investimento é viável dentro da faixa de 10 anos.

Dados de investimento e retorno			
Investimento do projeto	R\$ 8.412.543,92		
Recuperação de energia ano	9.020.160 kWh		
Custo do kWh	R\$ 0,23 R\$/kWh		
Valor recuperado ano	R\$ 2.074.636,80		

Tabela 10 - Dados do investimento

Ano	Fluxo de caixa	Taxa de juros 10%				Taxa de juros 12%			
		Valor Presente	Valor Presente Líquido			Valor Presente	Valor Presente Líquido		
0	- 8.412.544	- 8.412.544	- 8.412.544	-		- 8.412.544	- 8.412.544	-	
1	2.074.637	1.886.033	6.526.510	✓		1.852.354	6.560.190	✓	
2	2.074.637	1.714.576	4.811.935	✓		1.653.888	4.906.302	✓	
3	2.074.637	1.558.705	3.253.229	✓		1.476.685	3.429.616	✓	
4	2.074.637	1.417.005	1.836.224	✓		1.318.469	2.111.147	✓	
5	2.074.637	1.288.186	548.038	✓		1.177.205	933.943	✓	
6	2.074.637	1.171.078	623.040	✓		1.051.076	117.133	✓	
7	2.074.637	1.064.617	1.687.657	✓		938.460	1.055.593	✓	
8	2.074.637	967.833	2.655.490	✓		837.911	1.893.504	✓	
9	2.074.637	879.849	3.535.339	✓		748.135	2.641.639	✓	
10	2.074.637	799.862	4.335.201	✓		667.978	3.309.617	✓	
VPL		R\$ 4.335.201,12				VPL		R\$ 3.309.616,70	
TIR		21%				TIR		21%	
Payback Descontado		6,47				Payback Descontado		6,89	

Tabela 11 - Cálculos financeiros do projeto



O VPL nos mostra que o projeto em 10 anos apresenta lucros em relação ao valor investido, um VPL positivo é sinal de que o projeto é viável.

A TIR calcula a taxa de retorno do investimento, onde ela sendo positiva e estando acima da taxa mínima de atratividade (no caso do projeto a taxa de juros) ela nos diz que o projeto é viável, sendo assim para as duas taxas de juros que calculamos o projeto se mostra viável modificando apenas o payback em alguns meses de uma taxa de 10% para 12%.

O projeto pelos cálculos de retorno financeiro se mostra muito viável o único problema é aceitação para um payback acima de 5 anos como comentado inicialmente por política da empresa.

Estes cálculos não levam em conta a adequação junto a legislação pela não geração de CO<sub>2</sub>, ou algum incentivo pela nova legislação de energias renováveis é apenas baseado em retorno financeiro na geração de energia elétrica.

## 4. CONCLUSÃO

Avaliando o processo de produção de aço em uma aciaria elétrica e os balanços de massa, notamos que o desenvolvimento tecnológico é fundamental para a competitividade no futuro, principalmente pela energia elétrica ser o principal insumo utilizado e pelas perdas geradas no processo.

O mundo avança desenvolvendo novas fontes de energias para suprir a demanda e para melhorar as condições ambientais, a cogeração vai ter um papel fundamental neste avanço apesar de muito pouco difundido nesta aplicação.

Por vários anos as usinas siderúrgicas trabalharam com o reaproveitamento dos gases em alguns processos, como exemplo, o consteel que aproveita os gases do sistema de exaustão para um prévio aquecimento de sucata, mas no sentido de gerar energia as tecnologias e os campos de estudo ainda são vagos e sem incentivos pelas próprias unidades produtoras que até então pensaram muito em aumentar a produtividade e não reduzir os consumos.

Hoje já notamos uma grande necessidade de evolução da cogeração devido aos avanços que o governo brasileiro está discutindo para as questões ambientais, como no Acordo de Paris e as reduções de emissões de CO<sub>2</sub>.

O projeto se mostrou uma ótima solução para geração de energia, visto que não tem alterações da estrutura original da aciaria, frente a um mercado competitivo pode ser diferencial na competitividade entre usinas, tornando o custo de energia cada vez menor.

Os cálculos financeiros mostram o projeto viável, mas com um payback ainda não estando dentro dos 5 anos de retorno aos quais a empresa julga os investimentos hoje.

Os ganhos não estão apenas na produção de energia elétrica, alguns ganhos intrínsecos não foram calculados porque ainda são supostos, mas o sistema instalado gera um resfriamento do sistema de despoeiramento o que atribui um aumento da vida média de dutos e casa de mangas. Existe também a geração de CO<sub>2</sub> que é salva com esta cogeração e isto tem um impacto

ambiental muito grande, mesmo que as legislações brasileiras ainda não incentivem melhorias de processos perante estes ganhos.

Existem algumas dificuldades pois as tecnologias ainda são novas e importadas e qualquer processo de manutenção ou reposição gerariam ainda custos elevados. Dentre as dificuldades destaca-se muito forte a utilização de um calor dispensado que é constituído de vários elementos o que deixa o sistema com um acúmulo de sujeira o que adiciona atividades de limpeza.

Dentro de uma aciaria e laminação ainda existem muitos pontos para o trabalho com a recuperação de calor, para os próximos projetos a unidade pode levantar todos estes pontos para tentar fazer sua utilização.

## BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: 2008. 236 p. 2008.

ANDRADE, M. L. A; CUNHA, L. M. S; GANDRA, G. T. **A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro: v.6, n.12, p. 51- 76, set. 2000.

ANDREOS, R. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do Estado de São Paulo**. 2013. 151 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

**Apostila de Introdução à engenharia metalúrgica de Nestor Cezar Heck / UFRGS – DEMET**. Site institucional da UFRGS. <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao>>

ARAÚJO, Luiz Antônio. **Manual de Siderurgia**. Vol I. São Paulo: Produção, Editora Arte & Ciências, 2007.

BADIA, A. **Utilização de Carepas como Componente da Carga de um Forno Elétrico a Arco**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**Etapas da produção do aço em uma usina siderúrgica**. Site institucional do Grupo Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br>>.

**Evolução da geração de energias renováveis**. Site institucional da bloombergNEF <<https://about.bnef.com/>>.

**Esquema de produção da aciaria elétrica**. Site institucional American Recycling, <<https://www.americansustainablerecycling.com/metal-recycling>>.

**Evolução da matriz energética Brasileira**. PDE2026 Site institucional do ministério de minas e energias 2018. <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026.pdf/474c63d5-a6ae-451c-8155-ce2938fbf896>>.

FORTES R. et al. **Decarburization and Slag Formation Model for Electric Arc Furnace**. Gerdau S.A., 2008.

**Geração distribuída.** Site institucional da companhia de gás de Santa Catarina

<<http://www.scgas.com.br/site/geracao/info/cogeracaogeracaodistribuida/idse/432>>.

INEQUALITY IS UNSUSTAINABLE Rio +20: the industry's position. **FIESP 2012.**

JOHN, A. L.; **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco.** Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

**MEMOLI, F. et al. AUMENTO DAS PLANTAS CONSTEEL® NO MUNDO: FLEXIBILIDADE PARA A CARGA CONTÍNUA DE GUSA LÍQUIDO E SUCATA NO FORNO ELÉTRICO A ARCO AGORA NA SIDERURGIA BRASILEIRA,** Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 54-60, jul.-set. 2009

MACHADO, I. P. S. **Cogeração: aspectos ambientais, entraves e perspectivas para sua inserção na matriz energética brasileira.** Monografia. Universidade de São Paulo, São Paulo 2015.

ANDREOS R.; MOREIRA J. R. S.; **ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA,** MOREIRA J. R. S., Cap. 12 P. 256-273, São Paulo 2017.

MORELLATO, R. M. M. e ZON, L. F. **MODELAGEM DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO (ORC) PARA APROVEITAMENTO DE CALOR RESIDUAL DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI),** trabalho de conclusão de curso, UFES, Vitória 2016.

MSPC. Disponível em < <http://www.mspc.eng.br> >. Acessado em 20 de novembro de 2015.

PAULINO, M. A. S. **Caracterização da poeira de aciaria elétrica e estudo termodinâmico visando a recuperação da ferrita de zinco ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.** Monografia. Universidade Federal do Ceará, 2013.

**RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA.** Site institucional do ministério de minas e energias 2018. <<http://www.mma.gov.br/comunicacao/item/10570-indc-%20contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada>>.

ROMO, B. N. **Estudo de viabilidade tecnológica de cogeração e eficiência energética aplica ao processo de fabricação de mangueiras multiuso.** Monografia. Universidade de São Paulo, São Paulo 2015.

ROSSI, D. **INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO ENTRE AS VAZÕES DE OXIGÊNIO E GÁS NATURAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO.** Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre 2014.

SANDBERG, E. **Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data.** Luleå: 2005, Licentiate Thesis, Luleå University of Technology.

SILVA M. J. S. **Redução do Consumo Específico de Eletrodos de Grafita nos Fornos Elétricos à Arco da Aciaria da Gerdau Riograndense.** Porto Alegre: UFRGS, 2005.

SILVA, P. H. S. **Cogeração aplicada à dessalinização de água em reatores nucleares no Brasil.** Monografia. Universidade de São Paulo, São Paulo 2015.

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of Steelmaking.** The Institute of Materials, London, 1996.