



MOISÉS TELES FERNANDES

**ANÁLISES DO APROVEITAMENTO DOS GASES DE ALTO-FORNO PARA  
COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA:  
Um estudo de caso**

BAMBUÍ – MG

2021

MOISÉS TELES FERNANDES

**ANÁLISES DO APROVEITAMENTO DOS GASES DE ALTO-FORNO PARA  
COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA:  
Um estudo de caso**

Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG, Campus Bambuí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, pela Linha de Pesquisa em Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio (IFMG/Arcos)

Coorientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva (UNIFEI)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
Campus Bambuí  
Diretoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação  
Seção de Pós-Graduação  
Av. Professor Mário Werneck, 2590 - Bairro Buritis - CEP 30575-180 - Belo Horizonte - MG  
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

## PARECER N° 2

### FICHA DE APROVAÇÃO

Dissertação de Mestrado, intitulada “**Análises do aproveitamento dos gases de alto-forno para cogeração de energia elétrica em uma indústria siderúrgica: um estudo de caso**”, de autoria do mestrando em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, **Moisés Teles Fernandes**, sob a orientação do professor **Dr. Ricardo Carrasco Carpio (IFMG/Arcos)** e coorientador **prof. Dr. Rogério José da Silva (Unifei)**, obteve aprovação pela Banca Examinadora de Defesa, em 04/02/2022, com a média de 77,0 pontos.  
A análise das correções finais da dissertação sugeridas pela Banca Examinadora será feita pela equipe de orientação.

Bambuí (MG), 04 de fevereiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo Goncalves Leao Junior, Professor**, em 07/02/2022, às 09:31, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Carrasco Carpio, Professor**, em 07/02/2022, às 09:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo adolfo ronceros rivas, Usuário Externo**, em 07/02/2022, às 11:29, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ROGERIO JOSE DA SILVA, Usuário Externo**, em 09/02/2022, às 09:22, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco de Sousa Junior, Professor**, em 09/02/2022, às 10:26, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Sousa Cavalcanti, Professor**, em 09/02/2022, às 14:48, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador 1082777 e o código CRC 2B1A7391.



F363a Fernandes, Moisés Teles.

Análises do aproveitamento dos gases de alto-forno para cogeração de energia elétrica em uma indústria siderúrgica: um estudo de caso. / Moisés Teles Fernandes. – Bambuí, 2021.

79 f.: il.; color.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2021.

1. Cogeração. 2. Alto-forno. 3. Gases de alto-forno. I. Carpio, Ricardo Carrasco. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 333.7932

## RESUMO

A cogeração de energia em uma indústria siderúrgica é uma alternativa bastante viável. O valor expressivo da energia elétrica impacta diretamente nos custos de produção em função do grande número de maquinários utilizados nas operações deste segmento industrial. As termelétricas nestas usinas têm como combustível os gases provenientes das reações do alto-forno, porém, durante o processo produtivo, o volume disponível de gás é insuficiente. No presente trabalho, utilizando as ferramentas e os conceitos de energia para o processo siderúrgico, foi realizado um estudo detalhado do sistema de cogeração de energia elétrica, em uma siderúrgica não integrada acoplada a uma termelétrica, com o propósito de melhorar o aproveitamento dos gases gerados na produção de ferro-gusa em um alto-forno a carvão vegetal. Foram realizadas análises energéticas para cada um dos componentes do ciclo de geração de energia da termelétrica. Foi possível evidenciar a relação entre a variação do fluxo de gás do alto-forno e a geração de energia bem como a redução considerável com o custo de compra de energia elétrica da concessionária de energia.

**Palavras-chave:** Cogeração. Alto-Forno. Gases de Alto-Forno. Análise Energética.

## **ABSTRACT**

The Energy cogeneration in a steel industry is a very viable alternative. The significant value of electric energy has a direct impact on production costs due to the large number of machinery used in the operations of this industrial segment. The thermoelectric plants in these plants are fueled by gases from the reactions of the blast furnace, however, during the production process, the available volume of gas is insufficient. In the present work, using the tools and energy concepts for the steelmaking process, a detailed study of the electrical energy cogeneration system was carried out, in a non-integrated steel plant coupled to a thermoelectric plant, with the purpose of improving the use of the generated gases. in the production of pig iron in a charcoal-fired blast furnace. Energy analyzes were carried out for each of the components of the thermoelectric power generation cycle. It was possible to evidence the relationship between the variation of the blast furnace gas flow and the energy generation as well as the considerable reduction in the cost of purchasing electricity from the power utility.

**Keywords:** Cogeneration. Blast furnace. Blast Furnace Gases. Energy Analysis.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>09</b>
1.1 Justificativa.....	11
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	<i>12</i>
1.2.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>12</i>
1.3 Metodologia do trabalho.....	13
<b>2 SIDERURGIA E COGERAÇÃO.....</b>	<b>14</b>
2.1 Siderurgia.....	14
2.1.1 <i>Contextualização da indústria siderúrgica.....</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>O Processo produtivo de ferro gusa.....</i>	<i>20</i>
2.1.3 <i>Gases siderúrgicos.....</i>	<i>30</i>
2.1.4 <i>Utilização do gás gerado na siderurgia.....</i>	<i>31</i>
2.2 A cogeração no contexto siderúrgico.....	32
2.2.1 <i>Critérios gerais para a seleção de sistemas de cogeração.....</i>	<i>33</i>
2.2.2 <i>Critérios de eficiência termodinâmica para sistemas de cogeração.....</i>	<i>36</i>
<b>3 ANÁLISE ENERGÉTICA EM ALTOS-FORNOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 Reações químicas no alto-forno.....	37
3.2 Balanço energético da geração de energia.....	45

<b>3.2.1 Gerador de vapor (caldeira).....</b>	<b>46</b>
3.2.1.1 Estequiometria da combustão.....	48
<b>3.2.2 Turbina a vapor.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.3 Condensador.....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.4 Bomba.....</b>	<b>50</b>
<b>4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SIDERURGIA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Parâmetros de simulação.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.1 Composição do gás de alto-forno – GAF – e poder calorífico.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 Metodologia de cálculo.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3 Programação.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4 Resultados dos cálculos.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.1 Caldeira.....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 Análise energética quando há variação na vazão de gás de alto-forno ...</b>	<b>58</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos sistemas de conversão de energia e a otimização daqueles atualmente existentes estão ligados ao progresso industrial, à vida cotidiana e ao bem estar humano. A crescente demanda de eletricidade e outras formas de energia incentivam seu desenvolvimento e a pesquisa de sistemas mais eficientes e com menor consumo de combustíveis - fatores econômicos e aqueles que possam impactar no meio ambiente devem ser observados nesses sistemas. Menores custos de investimento, baixos níveis de emissões, minoração dos impactos ambientais e redução do consumo de fontes naturais são fatores que devem acompanhar o desenvolvimento populacional. (EPE, 2009).

A atividade siderúrgica é tipicamente relacionada ao desenvolvimento econômico de um país, do que deriva a sua importância para a construção de infraestrutura e produção de equipamentos para outros setores da economia. Os principais mercados de produtos siderúrgicos são as indústrias automobilísticas, construção civil, manufatura de bens de capital, transporte, bens de consumo duráveis e a infraestrutura. (EPE, 2009).

Segundo o panorama mundial, diversos fatores econômicos e socioambientais têm prejudicado a dinâmica mundial da siderurgia, assim como acontece com outros setores da indústria, o que gera grandes desafios para o setor. Dentre os quais podemos mencionar uma grande expansão da capacidade produtiva siderúrgica, com o crescimento da concorrência e da pressão sobre o preço de insumos na última década; o aumento da pressão exercida pelos órgãos ambientais e governos, para reduzir os impactos ambientais, dentro de um contexto com mais exigência por qualidade de vida e o aumento e a incerteza em cima dos preços de energia, no âmbito mundial. (EPE, 2009).

O setor das indústrias siderúrgicas no Brasil, nos últimos anos, vem desenvolvendo uma série de ações com a finalidade de reduzir o consumo energético na operação, destacando-se a cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de gases do processo; a substituição de insumos/combustíveis e a otimização do controle dos processos via automação. (BNDES, 2012).

O melhor aproveitamento dos gases de alto-forno, em torno de 90%, e da aciaria, aproximadamente 70%, são fatores fundamentais na indústria siderúrgica

Brasileira. Vale ressaltar que, quanto mais se reaproveitar os gases, menor será o consumo de insumos não renováveis durante a produção, além de ser possível a cogeração de energia elétrica. (BNDES, 2012).

Utilizando ferramentas e conceitos de energia para o processo siderúrgico, o presente trabalho realiza um estudo de caso detalhado sobre o sistema de geração de energia elétrica (cogeração) em uma siderurgia não integrada<sup>1</sup> a uma termelétrica. Esta siderúrgica está localizada em uma cidade do Centro Oeste de Minas Gerais. Além disso, resalta-se ser ela produtora de ferro gusa, comercializado no mercado interno e externo, busca sempre aumentar a sua competitividade no setor siderúrgico e de se tornar uma empresa ecologicamente sustentável.

O fluxograma do processo de produção de ferro gusa em uma indústria siderúrgica não integrada, até a destinação dos gases de alto-forno para a termelétrica ou para os regeneradores (*glendons*), segue demonstrado na Figura 1, a seguir.

Figura 1 - Produção de ferro gusa em uma indústria Siderúrgica não Integrada

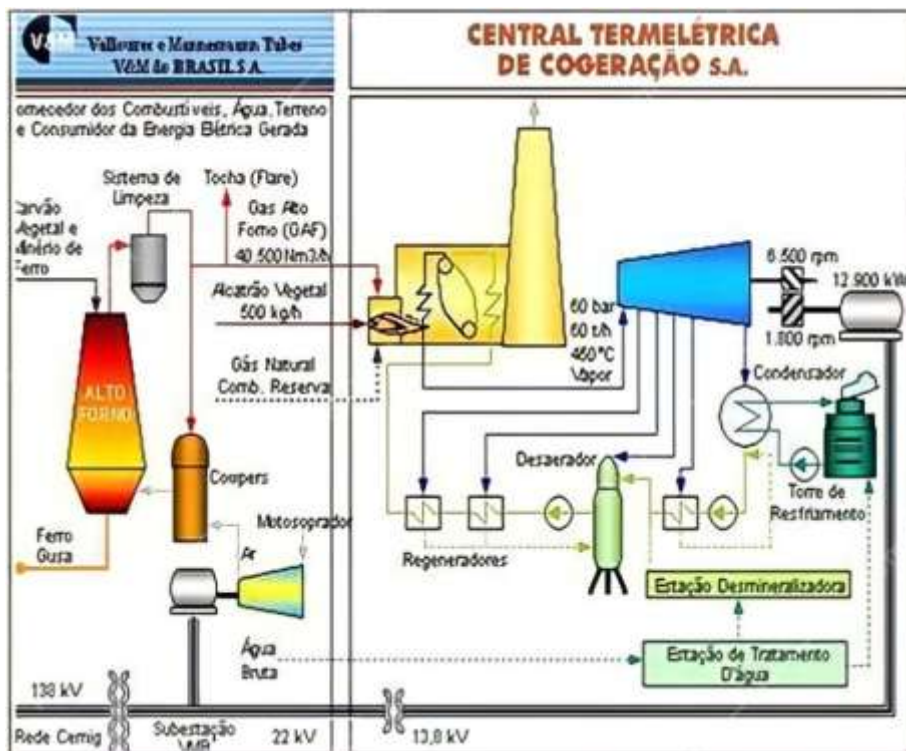


Fonte: Chaves, 2013.

<sup>1</sup> Siderúrgicas não integradas são aquelas que apenas produzem o ferro gusa, operam apenas a fase da redução do minério de ferro e não as fases do refino e laminação como as siderúrgicas integradas.

A empresa em que foi realizado o estudo de caso supracitado possui em sua planta um alto-forno em operação e outro desativado, além de uma usina termelétrica dimensionada para funcionar com o excedente de gases dos dois altos-fornos, o que torna necessária a correta gestão e controle de parâmetros operacionais associados à possível aplicação de novas tecnologias de controle para aumentar a sua eficiência a partir do melhor aproveitamento energético do gás de alto-forno (GAF). O esquema de gás de alto-forno e da termelétrica está representado na Figura 2, logo abaixo.

Figura 2 - Esquema de gás de alto-forno e termelétrica



Fonte: FEAM, 2010.

## 1.1 Justificativa

No setor siderúrgico das usinas não integradas que usam o carvão vegetal como matéria prima, a sustentabilidade vem sendo estudada de maneira intensa: a busca de um caminho para sobreviver neste mercado disputado é fundamental para tais usinas. (CHAVES, 2013).

Nesse sentido, busca-se analisar o Gás de Alto-forno (GAF), gerado ao longo do processo de fabricação do ferro gusa; os equipamentos de controle

usados nas siderúrgicas não integradas a carvão vegetal; e os sistemas de aproveitamento desse gás na usina, principalmente em função da cogeração.

O controle dos parâmetros operacionais mencionados, deve considerar:

1. As matérias primas variáveis de processo e até as características do ferro gusa e do aço;
2. Controle das variáveis comuns entre a produção do ferro gusa e a disponibilidade de gás para a cogeração de energia;
3. Controle eficiente de combustão no alto-forno durante o processo de produção do ferro gusa;
4. Eficiência no controle de combustão dos gases provenientes do alto-forno, no processo de geração de energia elétrica.

A análise a ser aqui desenvolvida se justifica devido ao fato de que o processo de aproveitamento do gás de alto-forno (GAF), no meio siderúrgico, servirá de referência para a empresa na qual se baseia o estudo em comento, bem como para outras pequenas e médias indústrias siderúrgicas da região, que têm como finalidade melhorar a sua eficiência.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 *Objetivo geral***

Realizar a análise energética através da conservação da massa e energia dos gases de alto-forno bem como de cada um dos elementos do ciclo de potência da cogeração tendo como finalidade aumentar a eficiência da termelétrica.

### **1.2.2 *Objetivos específicos***

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Estudar e analisar as variáveis de processo e as características do ferro gusa e do aço;

2. Estudar e analisar as variáveis comuns entre a produção do ferro gusa e a disponibilidade de gás para a cogeração de energia;
3. Analisar o processo de combustão dos gases provenientes do alto-forno, no processo de geração de energia elétrica.
4. Realizar um balanço de energia do alto-forno.
5. Calcular o sistema energético para cada elemento do Ciclo de Potência de Geração de Energia.

### **1.3 Metodologia do trabalho**

A metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho está em concordância com os objetivos específicos apresentados. Primeiramente, foi realizado embasamento teórico-prático e mapeamento sobre o processo de fabricação do ferro gusa e da cogeração de energia.

Posteriormente, fez-se a realização de um embasamento teórico sobre os seguintes temas: balanço de massa e energia para um alto-forno siderúrgico, princípios sobre gerenciamento de dados coletados no processo produtivo, análise energética do gás de alto-forno e dos componentes da usina termelétrica da siderúrgica.

Paralelamente a tais estudos, foram selecionados programas para cálculos específicos para as análises energéticas de cada elemento do ciclo de potência da geração de energia (Ciclo Rankine): caldeira, turbina a vapor e do sistema de condensação. Finalizada a fase de cálculos, foi realizada a validação destes por meio de leituras obtidas nos equipamentos instalados na empresa Siderúrgica.

## 2 SIDERURGIA E COGERAÇÃO

### 2.1 A siderurgia

O início dos processos de extração de metais se deu há mais de 6 mil anos, no Oriente, sendo o bronze o material principal a ser extraído. A idade do ferro, estabelecida no ano 1000 a.C., surgiu inicialmente no Oriente e se propagou pela Europa. Já a metalurgia do ferro surgiu de forma independente na China, na Índia e na África, ao passo que, na Oceania e nas Américas, tal descoberta só se deu por meio dos europeus. (FAPESP, 2010).

Atualmente, os processos siderúrgicos de redução do minério de ferro em aço continuam sendo os mesmos que já eram aplicados desde os tempos antigos: tais processos são realizados através de uma fonte de carbono (carvão vegetal ou coque) que reage com sopro de ar para extrair o ferro do minério e para fornecer a energia necessária para o processo de obtenção do metal. (FAPESP, 2010).

No Brasil, a redução do minério de ferro iniciou em 1557 com a instalação de dois fornos rústicos catalães, por Alfonso Sardinha e seu filho, em Iperó, São Paulo; porém, com a morte de Alfonso Sardinha, em 1616, e a proibição da produção de manufaturados na colônia, o ferro utilizado na produção de ferramentas agrícolas e utensílios domésticos teve sua produção paralisada. (FAPESP, 2010).

A existência de minério de ferro em Minas Gerais e em São Paulo era, há muito tempo, sabida pelos povos europeus que aqui chegaram. Portanto, no final do século XVIII, os portugueses investiram em treinamentos de brasileiros e portugueses nos melhores centros metalúrgicos - após a Corte se transferir para o Brasil, foi autorizado ao intendente Manoel Ferreira da Câmara Bittencourt lançar, em 1809, os fundamentos da fábrica Patriótica em Gaspar Soares, hoje Morro do Pilar, em Minas Gerais. Ao mesmo tempo, a administração portuguesa ordenou a construção da Real Fábrica de Ferro São João de Ipanema (Figura 3), em Iperó, São Paulo, que foi inaugurada em 1810. (FAPESP, 2010).

Figura 3 - Fornos de São João de Ipanema



Fonte: Calderon, 2016.

As fábricas anteriormente citadas demoraram anos para produzir algum metal, haja vista a falta de técnicas apropriadas e de mão de obra especializada, o que somente foi superado no Brasil na segunda metade da década de 1810, de acordo com Fernando Landgraf, diretor de Inovação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e pesquisador da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (FAPESP, 2010).

Na Europa, ingleses, suecos e alemães tinham tradição em siderurgia, com vários altos-fornos construídos na região. Além disso, na primeira década de 1800, os portugueses contrataram Frederico Luiz Guilherme Varnhagen e Guilherme Eschwege, alemães que davam suporte a José Bonifácio de Andrada e Silva na Fábrica de Ferro de Figueiró dos Vinhos, em Portugal. Na Suécia, o Império contratou uma equipe de técnicos com o experiente Carl Gustav Hedberg à frente, para começar a produzir o metal no Brasil. (FAPESP, 2010).

Era fundamental aprender a técnica de se construir um alto-forno para se ter êxito na produção de ferro na fábrica de Iperó, em São Paulo, e Hedberg foi o escolhido, por sua experiência em altos-fornos: foi Hedberg o responsável por trazer ao Brasil outros técnicos e máquinas compradas no exterior; porém, o resultado foi decepcionante. No período de 1811 a 1814, ele construiu quatro pequenos fornos de fusão, uma casa de fundição, forjas de refino, canais, roda-d'água, represa, mas não construiu alto-forno - neste intervalo de tempo, Hedberg

conseguiu produzir apenas três toneladas de ferro de péssima qualidade. (FAPESP, 2010).

A indústria siderúrgica passou a ser um indicador do desenvolvimento mundial: o desenvolvimento de tal indústria passou a mensurar a capacidade dos países de produzir e/ou comercializar produtos siderúrgicos e seus insumos. Em meados do século XX, o Brasil estava entre os três países com maiores reservas conhecidas de minério de ferro do mundo, e passou do terceiro para o segundo lugar após a descoberta de ricas reservas de minério, no norte de Minas Gerais e na serra de Carajás, no estado do Pará. (MACHADO, 2006).

Minas Gerais se destacava por possuir o carvão vegetal e a principal matéria-prima, o minério de ferro, utilizados para a fabricação do ferro gusa, o que fez com que este estado se tornasse o polo para a instalação da siderurgia. Nos anos 70, em função do crescimento da indústria siderúrgica mundial, a construção de altos-fornos em Minas Gerais<sup>2</sup> se intensificou. (JACOMINO *et al.*, 2002).

### **2.1.1 Contextualização da indústria siderúrgica**

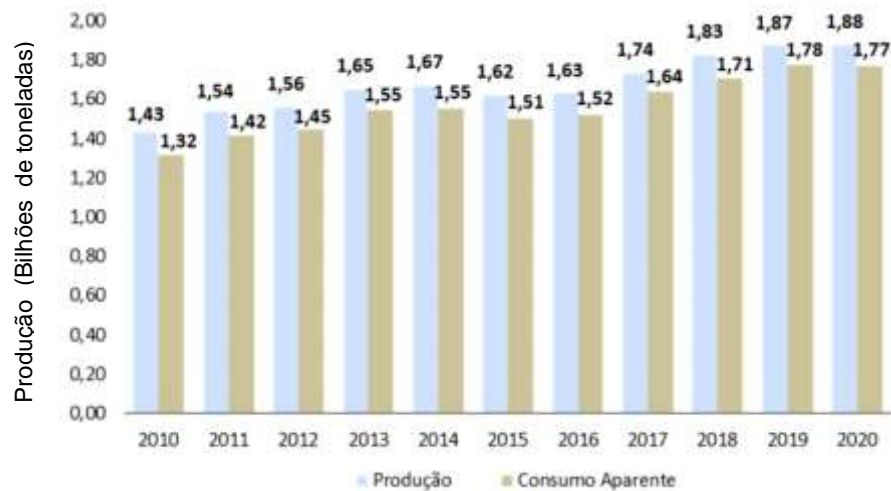
A indústria siderúrgica é de extrema relevância no desenvolvimento econômico de um país devido às várias aplicações do aço, como, por exemplo, na construção civil, no transporte, dentre outros segmentos da sociedade moderna, além de produzir matérias-primas para outros setores da indústria de transformação, na participação no Produto Interno Bruto (PIB) e na geração de empregos. (VIANA, F. L., 2017).

A Figura 4 apresenta o gráfico que demonstra principalmente a partir de 2010, que a produção mundial de aço se sustentou acima do consumo aparente. Em 2020, essa realidade não sofreu alteração, e os números continuaram exibindo oferta global superior ao consumo. (SICETEL, 2021).

---

<sup>2</sup> O Estado de Minas Gerais possui atualmente o maior número de siderúrgicas a carvão vegetal do país, destacando-se neste setor as cidades de Sete lagoas, Divinópolis, Itaúna, Bom Despacho, Pitangui, Ipatinga, Pará de Minas, Pedro Leopoldo e Matozinhos (JACOMINO *et al.*, 2002).

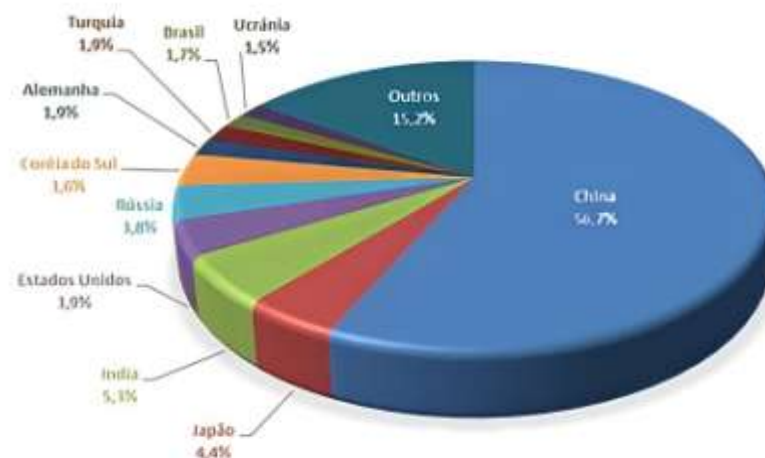
Figura 4 - Gráfico Representativo da Produção mundial e consumo aparente de aço (em bilhões de toneladas)



Fonte: SICETEL,2021.

Antes de ingressar na Organização Mundial do Comércio (OMC), em 2000, a China produzia aproximadamente 130 milhões de toneladas de aço por ano, volume equivalente ao dos Estados Unidos e inferior ao do parque siderúrgico europeu. Em vinte anos, o país assumiu a liderança mundial e alcançou 57% do total em 2020 - um ano traumático para a humanidade - superando, pela primeira vez, a produção de 1,0 bilhão de toneladas (Figura 5) (SICETEL, 2021).

Figura 5 - Gráfico do Ranking de participação dos países na produção mundial de aço em 2020 (Países: dez principais fabricantes)



Fonte: SICETEL,2021.

Por ser um dos principais insumos empregados na fabricação de vários produtos, o aço está presente em diferentes setores da economia. De uma simples colher a uma torre metálica, é visível a utilização do aço em várias atividades. Em termos globais, o setor da construção civil/infraestrutura consome mais da metade do aço produzido (52%), sendo acompanhado pela produção de máquinas e equipamentos (16,0%) e, na terceira posição, pela indústria automobilística (12,0%), como é apresentado na Figura 6. (SICETEL, 2021).

Figura 6 - Utilização setorial do aço

Setores/Produtos	Distribuição Setorial (%)
Construção e Infraestrutura	52,0%
Máquinas e Equipamentos	17,0%
Automobilística	12,0%
Produtos de Metal	10,0%
Outros Transportes	4,0%
Equipamentos Elétricos	3,0%
Equipamentos Domésticos	2,0%

Fonte: SICETEL,2021.

Em termos *per capita*, a Coreia do Sul seguiu como o país de maior consumo de produtos acabados de aço em 2020: 954,9 mil kg/hab. Taiwan desponta em segundo lugar, com 777 kg/hab., sendo seguido pela China, que opera com consumo por habitante de 691,3 kg/hab.

Considerando-se que a demanda *per capita* mundial de produtos acabados de aço se situou ao redor de 230 kg/hab. em 2020, é possível dividir o consumo *per capita* em dois grupos de países: aqueles que consomem acima de 230 kg/hab., representado pelos países anteriormente mencionados e por um expressivo conjunto de nações da Europa; e, em outro grupo, países com consumo abaixo da referência mundial - nesse caso, além de França, Reino Unido e Índia, estão os principais países do continente latino-americano, como México, Argentina e Brasil.

Vivendo um quadro de estagnação econômica há cerca de cinco anos e com consumo *per capita* estacionado ao redor de 100 kg/hab., o Brasil revela pouca atratividade para investimentos siderúrgicos locais e múltiplas restrições para maior uso da capacidade disponível. (SICETEL, 2021).

Embora o consumo aparente de aço tenha se mantido estável, fruto da forte recuperação das atividades industriais no segundo semestre de 2020, é inescapável reconhecer que o desequilíbrio entre oferta e demanda de matérias-primas e componentes, produzidos pela desorganização das cadeias globais de valor, motivou gigantesca aceleração dos preços de commodities agrícolas e minerais. (SICETEL, 2021).

O Brasil concentra o maior parque siderúrgico da América Latina. A despeito da abrupta queda da demanda provocada pela pandemia do Covid-19, a participação da produção brasileira se manteve em 1,7% do total mundial, garantindo assim a nona posição entre os principais países produtores. Em relação à América Latina, a participação brasileira subiu de 53,8%, em 2019, para 56,1%, em 2020. (SICETEL, 2021).

Em termos geográficos, os estados da região Sudeste (Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo) responderam por 90% do aço produzido no País em 2020. (SICETEL, 2021).

A fabricação de aço bruto alcançou 31,4 milhões de toneladas, correspondendo a uma retração de 3,4% frente ao ano de 2019. Apesar do desligamento de 8 altos-fornos nos primeiros meses da pandemia em território nacional, e de todos os percalços enfrentados no primeiro semestre do ano – fenômeno sem precedente na história, a recuperação da utilização da capacidade no transcurso do segundo semestre fez com que a queda da produção em 2020 (-3,4%) fosse menor do que aquela observada na passagem de 2018 para 2019 (-8,0%). (SICETEL, 2021).

A diminuição nos volumes de aço interrompeu a recuperação do uso da capacidade conforme demonstrado na figura 7, ficando bem abaixo da ocupação histórica do setor. Apesar de se contar a história de 2020 em dois momentos – crise sem precedentes na primeira metade e recuperação na segunda – o uso da capacidade declinou para 61,7% no ano – percentual equivalente ao de 2016 (SICETEL, 2021).

Figura 7 - Gráfico da Produção de aço bruto, capacidade instalada e uso da capacidade (em milhões de toneladas e participação percentual - %)



Fonte: SICETEL,2021.

### 2.1.2 O processo produtivo de ferro gusa

As principais matérias-primas utilizadas na produção do aço são ferro, carvão e cal. A obtenção do ferro se dá através do minério de ferro (Figura 8), que é extraído pelas minerações na forma de óxido de ferro e misturado a um tipo de areia de baixíssima granulometria. (IABr, 2015).

Figura 8 - Minério de Ferro



Fonte: Revista Minério e Minerale, 2021.

O carvão mineral e o carvão vegetal utilizados pela siderurgia têm duas funções na fabricação do aço; uma delas pode ser como combustível, por alcançar altas temperaturas necessárias para a redução do minério de ferro; e a outra como reagente da reação de redução, por se associar ao oxigênio desprendido do minério, deixando o ferro livre dentro do alto-forno. (IABr, 2015).

O coque metalúrgico (Figura 9), proveniente do coque mineral, é o principal combustível utilizado na fabricação de ferro gusa em grandes altos-fornos. A sua fabricação consiste na mistura de vários tipos de carvões minerais nas coquerias, em fornos nos quais o carvão é depositado e permanece por aproximadamente 16 horas a 1300 °C, sem contato com o ar, para obtenção de um combustível de alto poder calorífico e de alto teor de carbono. (SILVA, J. N., 2011).

Figura 9 – Coque Metalúrgico



Fonte: Infoescola, 2021.

Altos-Fornos de menor capacidade produtiva, principalmente no estado de Minas Gerais, utilizam o carvão vegetal (Figura 10) como combustível, porém, tal uso tem algumas desvantagens, como, por exemplo, a baixa resistência mecânica.

No parque siderúrgico nacional, o carvão vegetal participa como combustível em aproximadamente 20% da produção total de ferro gusa. (SINDIFER, 2016).

Figura 10 - Carvão Vegetal



Fonte: Portal Ambiente Legal, 2018.

O coque metalúrgico e o carvão vegetal, além de combustível, geram o gás que auxilia no processo de redução do minério de ferro por meio da permeabilidade da coluna de carga, através da circulação do calor na carga do alto-forno (SILVA, J. N., 2011).

Mesmo em condições elevadas de temperatura, o coque continua sólido em alto-forno, mantendo níveis de resistência para as reações que ocorrem e apresentando a distribuição de tamanhos adequados para a permeabilidade entre a carga. (FERNANDES, M. V., 2007).

O ferro gusa é a liga resultante da redução do minério de ferro granulado, sinter ou pelotas, através do coque metalúrgico ou do carvão vegetal juntamente ao calcário em um alto-forno - tanto o carvão vegetal quanto o coque atuam como combustíveis e redutores da reação (DIAS, C. A. C. M., 2011).

O calcário, que é uma combinação de cálcio com carbono e oxigênio ( $\text{CaCO}_3$ ), e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) participam do processo produtivo do ferro gusa como fundentes por aglutinar as impurezas decorrentes no processo de fusão do minério de ferro, formando a escória. Os fundentes mais comumente utilizados são o calcário, a sílica e a bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (SILVA, J. N., 2011). O calcário está representado na figura 11.

Figura 11 – Calcário



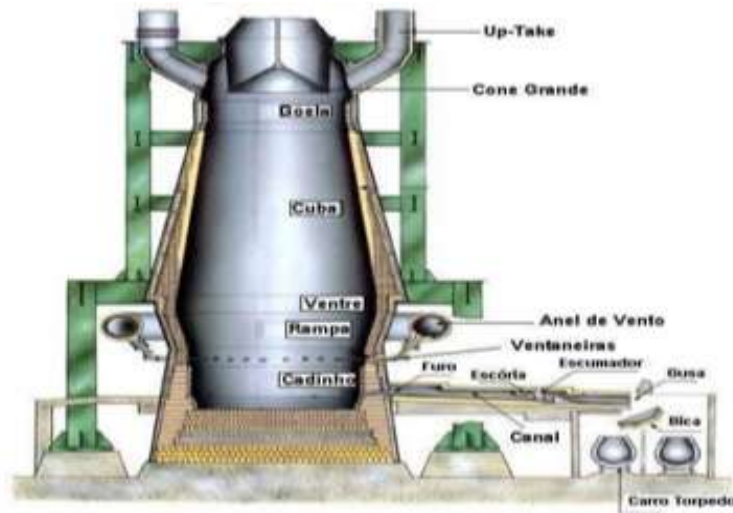
Fonte: Notícias de Mineração Brasil, 2019.

O Carvão vegetal ou o coque, que são os combustíveis e redutores associados aos fundentes e ao minério de ferro no alto-forno, produzem o ferro gusa, que é uma liga composta por ferro (90 a 95%), por elevados teores de carbono (da ordem de 3,0 a 4,5 %) e apresenta teores de impurezas como manganês (cerca de 0,5 a 2%), silício (de 0,3 a 2%), enxofre (cerca de 0,01 a 1%) e fósforo (cerca de 0,05 a 2%). (DIAS, C. A. C. M., 2011).

O alto-forno ainda é o equipamento mais utilizado na produção de ferro gusa em todo o mundo, mesmo que existam outros equipamentos e sistemas produtivos: a carga sólida é abastecida através do topo do alto-forno e desce por gravidade da rampa até a região do cadinho, reagindo com os gases que ascendem desde as ventaneiras até a cuba superior do forno. (DIAS, C. A. C. M., 2011).

A estrutura do alto-forno é subdividida em topo, goela, cuba, rampa e cadinho, mas existem outras partes no alto-forno que são de grande importância na produção do ferro gusa, como as ventaneiras, a coroa conhecida - como anel de vento - e o canal de corrida do ferro gusa e da escória conforme Figura 12. (SILVA, J. N., 2011).

Figura 12 - Regiões de um alto-forno



Fonte: edisciplinas.usp.br, (2017).

No alto-forno, o carregamento é feito através da região denominada goela, onde também ocorre a distribuição da carga a partir de um distribuidor instalado nesta seção. A região da cuba apresenta a área de maior volume do alto-forno - nesta seção, a carga de minério de ferro, de carvão vegetal ou de coque e os fundentes são colocados em camadas sucessivas.

A cuba possui um formato tronco-cônico, apresentando diâmetro maior na parte inferior por necessitar de maior área para compensação da expansão da carga que ocorre pelo aumento da temperatura, como também para possibilitar a descida da carga, evitando a agregação de cascões de material semifundido nas paredes do forno. (RIZZO, 2009).

A região do ventre tem formato cilíndrico e apresenta o maior diâmetro do alto-forno. Nesta região os refratários do alto-forno são mais comprometidos devido às condições de pré-aquecimento, redução e fusão parcial da carga, com intensa variação de temperatura em suas estruturas, exigindo-se assim eficientes sistemas de resfriamento, para proporcionar maior vida útil desta região. (MOURÃO, 2011).

Segundo Rizzo (2009), a região da rampa possui também um formato tronco-cônico, com menor diâmetro na parte inferior para auxiliar na sustentação da carga do alto-forno e no gotejamento do ferro gusa e da escória para o cadinho - a inclinação da rampa é da ordem de  $80^\circ$  a  $82^\circ$  em relação à horizontal.

Já o cadinho, de acordo com Rizzo (2009), é uma região cilíndrica do alto-forno na qual se acumulam o ferro gusa e a escória formada pelas reações que ocorrem no interior do alto-forno. O diâmetro desta região depende da capacidade produtiva do forno e pode ser mais de aproximadamente 10 metros, enquanto que a altura pode ser superior a 4 metros. Na parte inferior do cadinho encontra-se o furo de corrida, perfurado periodicamente para se drenar o ferro gusa e a escória. Na parte superior do cadinho, localizam-se as ventaneiras em que são acoplados os bicos injetores para injeção do ar aquecido proveniente dos regeneradores que podem ser *cowpers* ou *glendons*. Através dessas ventaneiras o ar de combustão é soprado para o interior do forno. Também através delas podem ser injetados outros combustíveis como finos de carvão e gás natural. O número de ventaneiras aumenta de acordo com o tamanho dos fornos, de forma a proporcionar distribuição homogênea do sopro de ar no interior do alto-forno.

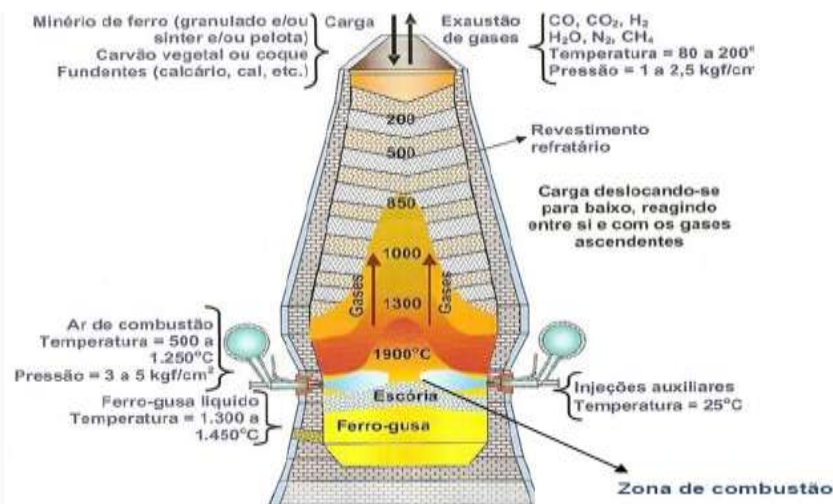
De acordo Mourão (2011), as ventaneiras geralmente são feitas de cobre e possuem um sistema de resfriamento com água sob alta pressão, de modo que esta possa penetrar e passar por todos os canais internos que apresentam formato espiralado. As ventaneiras são encaixadas por dentro de um suporte chamado timpa, que tem a forma de um anel também de cobre, oco e resfriado por água.

Em frente às ventaneiras, encontra-se a região denominada de zona de combustão, onde ocorre a queima (oxidação) do carbono do redutor que pode ser o coque ou o carvão vegetal e das injeções auxiliares para formar monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), que atuam como redutores no alto-forno. Esta é uma região parcialmente vazia devido à elevada energia cinética do sopro de ar quente onde o combustível é consumido. Além do ar de combustão, podem ser feitas injeções auxiliares de oxigênio (O<sub>2</sub>), para o enriquecimento do ar de combustão (RIZZO, 2009).

O processo produtivo do alto-forno, como apresentado na Figura 13, tem como principal agente os gases gerados pela combustão do carbono, que é um redutor sólido, e do ar injetado na região inferior do forno, que promove a reação deste redutor com o oxigênio do ar quente injetado através das ventaneiras, gerando gases que seguem um fluxo ascendente que têm contato direto com a carga de minérios que tem fluxo descendente. Desta forma ocorre a reação dos gases com a carga do alto-forno, resultando, como produto da reação de redução

do minério de ferro, o ferro gusa e escória, considerada como um subproduto ou resíduo, assim como o gás de alto-forno. (RIZZO, 2009).

Figura 13 - Representação simplificada do processo de produção de ferro gusa no alto-forno

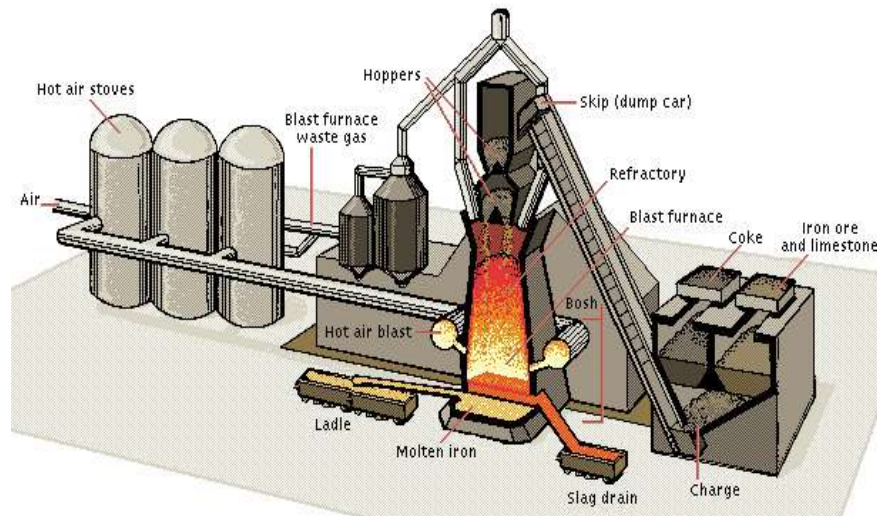


Fonte: RIZZO, 2009.

O oxigênio presente no ar injetado reage com o coque ou carvão vegetal formando o monóxido de carbono (CO), que ascende no alto-forno e na sequência entra em reação com o oxigênio presente no óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) do minério de ferro, presente na carga que desce em contracorrente (VIEIRA, D. H., 2012).

Para que ocorra o funcionamento de um alto-forno, existe uma série de equipamentos auxiliares, como o sistema de limpeza dos gases e os regeneradores que podem ser *cowpers* ou *glendons*, como já pontuado anteriormente (Figura 14) (SILVA, J. N., 2011).

Figura 14 - Equipamentos auxiliares do alto-forno



Fonte: LOUW, 2000.

O ferro gusa é a camada mais densa, resultante das transformações da operação de um alto-forno; e, a outra camada, menos densa, é a escória. Tais camadas saem do alto-forno juntas através do furo de corrida, no entanto, diferença de densidade promove a separação destas duas fases.

A escória é formada pela decomposição do calcário em óxido de cálcio e dióxido de carbono e impurezas como silicatos e aluminatos. Logo após seu vazamento, é granulada através de jatos de água pressurizados, o que resulta numa granulometria bem fina em função do choque térmico (SILVA, J. N., 2011).

O ferro gusa (Figura 15), produzido no alto-forno, apresenta altos teores de enxofre em função do coque, que é bastante concentrado neste elemento, e geralmente passa por uma etapa de dessulfuração nos carros torpedos com uma mistura dessulfurante, que é composta aproximadamente por 50% de carbureto de cálcio, 38% de calcário e 12% de coque. (MACHADO, M. L., 2003).

Figura 15 - Ferro Gusa



Fonte: Sindifer, 2021.

Na sequência, os carros torpedos seguem para a aciaria com a finalidade de transformar o ferro gusa em aço, ou pode ser solidificado nas lingoteiras, alcançando o produto final. (SILVA, J. N., 2011).

São gerados também os gases do alto-forno, que são utilizados para aquecimento do ar nos *glendons* ou *cowpers* e para produzir energia elétrica nas termelétricas. (SILVA, J. N., 2011).

As indústrias siderúrgicas podem ser integradas, semi-integradas e não-integradas. As siderúrgicas integradas consomem matérias primas no estado bruto e contemplam todas as fases do processo industrial. Além disso, vendem os produtos acabados, ou seja, operam as três etapas básicas da produção de aço que consistem na redução, no refino e na laminação. (CHAVES, 2013).

As siderúrgicas semi-integradas, por sua vez, executam duas fases, que são a de refino e a de laminação. Esse tipo de siderúrgica compra ferro gusa de outras siderúrgicas para transformá-lo em aço. (CHAVES, 2013).

Por fim, tem-se as siderúrgicas não-integradas, que produzem somente o ferro gusa através do processo de redução do minério de ferro em alto-forno, que é vendido para fundições e aciarias. (CHAVES, 2013).

Os altos-fornos a carvão vegetal e coque apresentam tecnologias diferentes em função da menor resistência mecânica do carvão vegetal utilizado predominantemente nas usinas não integradas pelos produtores independentes de

gusa, mas é também utilizado por algumas usinas integradas de menor porte e de menor capacidade produtiva. (QUARESMA, 2010).

É conhecida como mini altos-fornos a carvão vegetal a tecnologia adotada por usinas não integradas por apresentarem capacidade produtiva entre 55 a 350 t/dia de ferro gusa; e são considerados como altos-fornos a carvão vegetal as usinas integradas que não possuem coqueria, assim como os reatores metalúrgicos que apresentam capacidade produtiva entre 1000 a 2500 t/dia. (RIZZO, 2009).

Os altos-fornos que utilizam coque e possuem coqueria em usinas integradas podem apresentar capacidade produtiva instalada de aproximadamente 3500 a 13000 t/dia. (RIZZO, 2009).

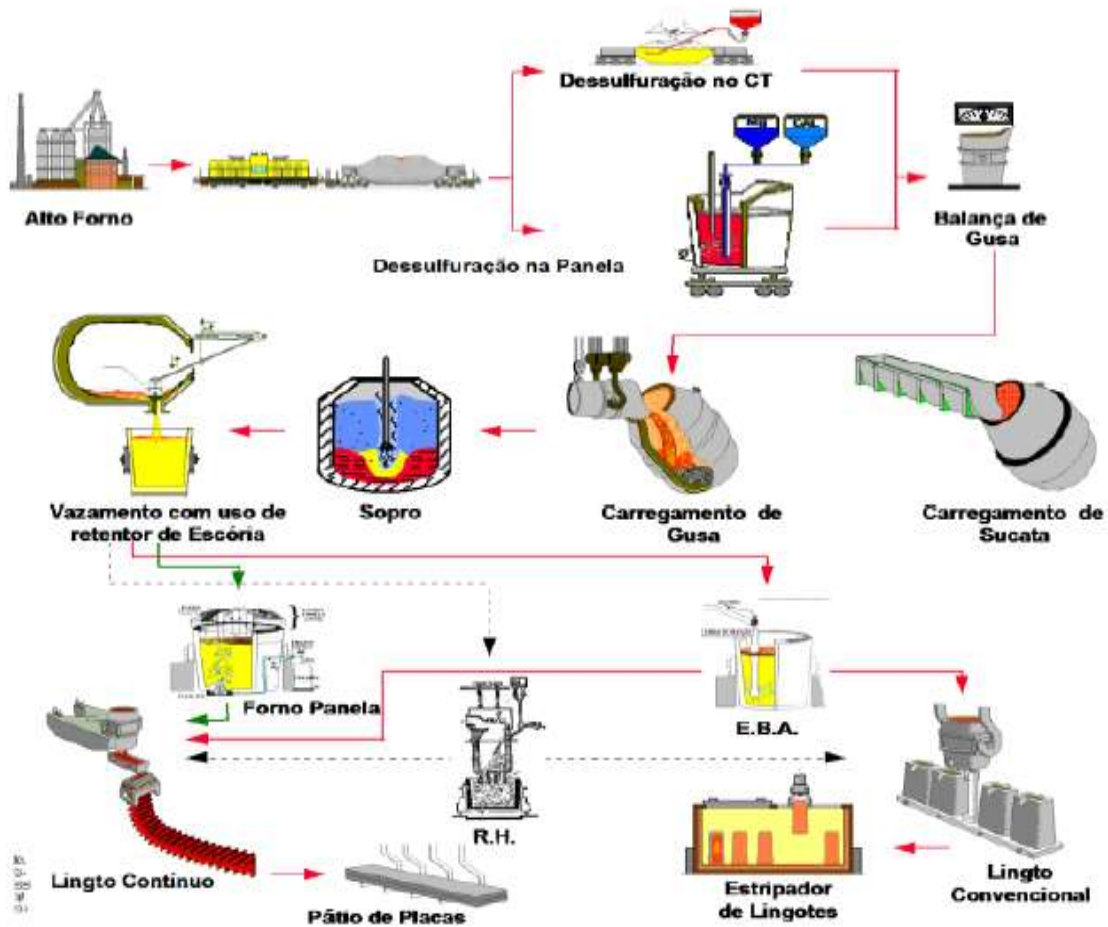
O processo de fabricação do aço começa com a preparação do minério de ferro e do carvão para melhorar a performance e os custos produtivos - quando o minério de ferro é sinterizado ou transformado em pelotas, e o carvão mineral passa pelo processo de coqueificação para a obtenção do coque. (IABr, 2015).

Em seguida, o minério de ferro e o carvão são inseridos no processo de redução no alto-forno, onde o ferro se torna líquido, formando o ferro gusa. Outros componentes, chamados de fundentes, tais como a o calcário, a sílica, entre outros, são processados juntamente e formam a escória. (IABr, 2015).

Na sequência, o ferro gusa líquido é transportado até a aciaria para refino em fornos a oxigênio para a eliminação de impurezas, e, logo depois, é solidificado na forma de produtos como lingotes, tarugos e outros produtos semiacabados do aço. (IABr, 2015).

A Figura 16 mostra esquematicamente as principais etapas do processo produtivo de uma unidade integrada a coque (alto-forno e lingotamento direto).

Figura 16 - Rota de produção em unidades integradas a coque  
(alto-forno e lingotamento direto)



Fonte: Machado, 2003.

### 2.1.3 Gases siderúrgicos

Os gases siderúrgicos são subprodutos gerados nos processos siderúrgicos, geralmente aproveitados nas mais diversas etapas do processo em função de seu poder calorífico. O gás de coqueria (*coke oven gas* ou “COG” em inglês) apresenta o maior poder calorífico entre eles. Este gás é gerado no processo da transformação do carvão mineral em coque metalúrgico, processado de forma a reduzir as frações voláteis do carvão para obtenção do coque. (COSTA, 2017).

A produção de ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal gera um gás (*blast furnace gas* ou “BFG” em inglês) com um poder calorífico menor, na ordem

de 3300 kJ/m<sup>3</sup>. A composição química deste gás varia entre 21% a 33% de monóxido de carbono, 1% a 4% de hidrogênio, 50% a 60% de nitrogênio 8% a 23% de dióxido de carbono e aproximadamente 3% de gás sulfídrico. Este gás possui um elevado teor de gases inertes, de 58% a 75%, o que torna seu poder calorífico baixo. O teor de monóxido de carbono é elevado, o que oferece risco em caso de vazamento pela sua toxicidade. (COSTA, 2017).

Outro gás siderúrgico é o gás de aciaria, também conhecido por gás de conversor, BOFG (*“bottom oxygen furnace gas”*) ou *“LD gas”* (*“Linz-Donawitz gas”*). Seu poder calorífico inferior é de 8.000 kJ/Nm<sup>3</sup>. Este gás apresenta em sua composição química 55% a 60% de monóxido de carbono, 12% a 18% de gás carbônico, 15 a 21% de nitrogênio, 0 a 3% de hidrogênio e 0,1% a 0,3% de oxigênio. (COSTA, 2017).

#### **2.1.4 Utilização do gás gerado na siderurgia**

Segundo Costa (2017), os gases siderúrgicos são de grande importância principalmente como combustíveis nas usinas siderúrgicas por suas diversas possibilidades de aplicações, apesar de suas composições químicas e poderes caloríficos - o poder calorífico de um combustível é dado pelo número de calorias desprendidas na queima do mesmo. Uma caloria é uma unidade de calor necessário para elevar um grama de água pura de 14,5°C até 15,5°C, sobre pressão atmosférica normal. (LINERO, 2008).

O gás de coqueria, por exemplo, apresenta um poder calorífico médio, como o antigo gás de rua ou gás manufacturado, sendo limitado à própria planta siderúrgica e proximidades. Geralmente, este gás é empregado para o aquecimento de fornos de reaquecimento para laminação, painéis e outros na própria siderúrgica, mas pode ser utilizado também na geração de energia elétrica. Além disso, referido gás normalmente é misturado aos outros gases siderúrgicos de poderes caloríficos inferiores de forma a enriquecê-los, possibilitando a sua utilização em processos em que gases de baixo poder calorífico não podem ser utilizados.

Já o gás de alto-forno, gerado em usinas independentes, tem cerca de 50% de sua utilização nos regeneradores em *cowpers* e *glendons* para o pré-aquecimento do ar de sopro do próprio alto-forno, e o restante é redirecionado para

ser utilizado em outros processos, como na geração de eletricidade em turbinas de geração de topo ou em termelétricas.

O gás de alto-forno pode ser misturado a gases de poderes caloríficos mais elevados, como gás de coqueria, gás natural, GLP, biometano, e pode ser utilizado para enriquecer o ar de combustão com oxigênio ou até mesmo queimar o gás com elevado teor de oxigênio em um processo conhecido como oxi-queima.

A composição química do gás de alto-forno – GAF – nas usinas siderúrgicas mineiras não integradas é obtida, na maioria das vezes, através do uso do aparelho de determinação química do tipo ORSAT: a análise no ORSAT determina a composição dos gases secos (não inclui vapor d'água).

Os aparelhos tipo ORSAT possuem ampolas tipo buretas que contêm soluções químicas que absorvem o gás a ser determinado. É possível analisar  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}$  por absorção química e  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e outros hidrocarbonetos por diferença e/ou combustão. (ANDRADE, 1977).

Existem tecnologias modernas, no que se refere a analisadores de gases no mercado, como analisadores de linha, analisadores portáteis, cromatográficos e outros, que requerem maior investimento na sua aquisição em relação ao ORSAT.

A análise da composição química é importante na avaliação de aspectos operacionais de aproveitamento dos gases residuais gerados durante o processo de produção do ferro gusa.

## **2.2 A cogeração no contexto siderúrgico**

A cogeração de eletricidade no setor siderúrgico ocorre a partir do aproveitamento de gases do processo produtivo, como no caso de gases de coqueria, de alto-forno e de aciaria. Este setor já tem capacidade instalada de cogeração no Brasil em torno de 920 MW, o que, considerando um fator de capacidade médio de 85%, permitiria gerar um montante de eletricidade um pouco superior a 6 GWh por ano. (EPE, 2009).

As usinas siderúrgicas integradas com coqueria própria possuem, em média, necessidade de aquisição de energia elétrica da ordem de 0,38 GJ/t aço bruto ou 106 kWh/t aço bruto, porém, existem casos de usinas que geram mais eletricidade do que a sua própria necessidade e que, portanto, são exportadoras

líquidas de energia elétrica, como no caso de usinas integradas dedicadas à produção de placas, que terminam a sua produção nesta fase do processo produtivo siderúrgico por não terem laminação, o que consome muita energia elétrica e que, quando associadas a formas avançadas de cogeração, permite a geração de excedentes de eletricidade para comercialização. (EPE, 2009).

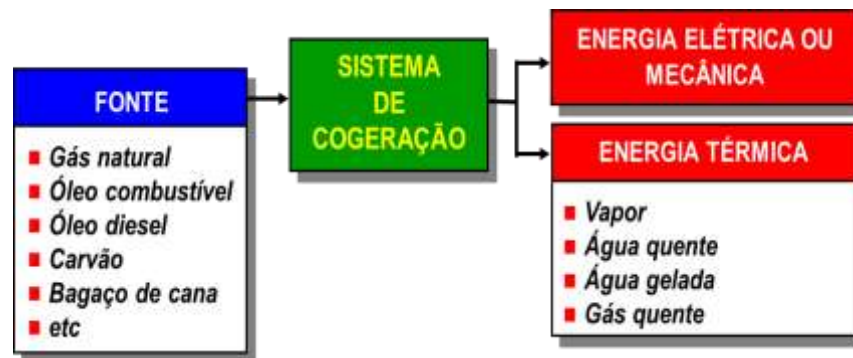
As usinas classificadas como semi ou não integradas, sejam com alto-forno a coque ou com o a carvão vegetal, têm baixa ou nenhuma recuperação dos gases de alto-forno para a cogeração de eletricidade, tendo de comprar, em média, ordem de 510 kWh/t de aço, enquanto usinas com aciaria elétrica apresentam a necessidade de compra de cerca de 870 kWh/t de aço. (EPE, 2009).

Com a expansão da indústria siderúrgica, deverá ocorrer o aumento da cogeração, considerando que a tendência das novas plantas é a exportação de placas, podendo obter excedentes de energia elétrica nas suas gerações. (EPE, 2009).

### ***2.2.1 Critérios Gerais para a Seleção de Sistemas de Cogeração***

O conceito de cogeração pode variar segundo o enfoque do processo. A cogeração de energia, de tal maneira, pode ser definida como um processo termodinâmico no qual ocorre a produção simultânea e sequencial de energia elétrica ou mecânica, e energia térmica útil, a partir de uma única fonte de energia, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Sistema de Cogeração



Fonte: Carpio, 2000.

Em função da sequência relativa de produção de energia elétrica, mecânica e calor, os ciclos de cogeração podem se dividir em ciclos *Topping* e *Bottoming*. No sistema *Topping*, ocorre primeiro a produção de energia elétrica através dos gases de combustão a uma temperatura mais elevada, seguida da utilização da energia residual em forma de calor para o processo. Da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento promove a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), e, em seguida, para o aproveitamento de calor útil (Figura 25).

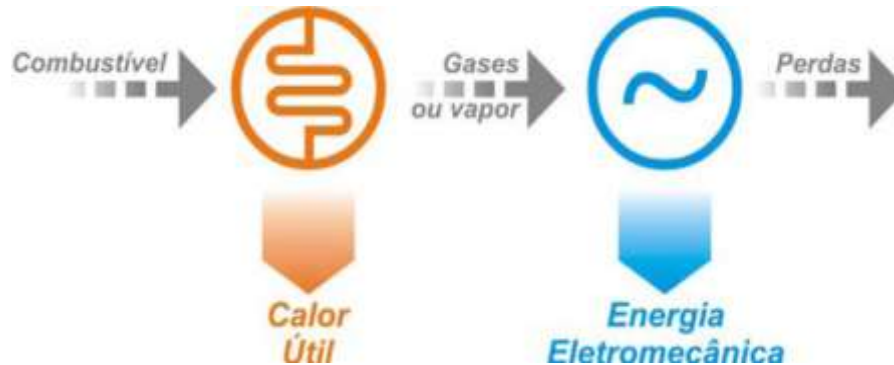
Figura 18 - Cogeração do tipo *topping*

Fonte: Nogueira *et al.*, 2004

No ciclo *Bottoming*, inicialmente é gerada energia térmica em um processo, e, em seguida, utiliza-se o calor residual para gerar energia elétrica ou mecânica. Da energia disponibilizada pelo combustível, o primeiro aproveitamento

consiste em aproveitar o calor útil a elevadas temperaturas, e, em seguida, este calor é aproveitado para a geração de energia eletromecânica (Figura 26).

Figura 19 - Cogeração do tipo *bottoming*



Fonte: Nogueira *et al.*, 2004

A racionalidade da cogeração em se aproveitar toda a faixa da temperatura disponibilizada pelo combustível, para a produção sequencial de eletricidade e calor útil, é representada na Figura 27, a seguir. De acordo com Carvalho *et al.* (2001), a utilização de calor nas indústrias, é predominante na faixa entre 120°C e 200°C, temperatura típica para os processos de secagem, cozimento, evaporação e outros e já na geração de energia elétrica opera-se em níveis mais elevados de temperatura, entre 400°C e 950°C.

Figura 20 - Faixa típica de temperatura para os sistemas de cogeração em *topping* e em *bottoming*



Fonte: COGEN Europe, 2001

### 2.2.2 Critérios de eficiência termodinâmica para sistemas de cogeração

Numa planta de cogeração, o objetivo é satisfazer demanda elétrica e térmica com o mínimo consumo de combustível. Na literatura, apresentam-se diferentes critérios de avaliação destes produtos, entre os quais o principal é o Fator de utilização de energia (FUE). Tal fator nos diz que a energia contida no combustível, para um sistema de cogeração, é transformada uma parte em trabalho e outra em calor. (MOREIRA, SIMOES, 2017).

$$FUE = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_U}{\dot{m} \times PCI} \quad (1)$$

$\dot{W}$  = potência de eixo produzida pela máquina, em kW;

$\dot{Q}_U$  = taxa de calor útil produzido ou recuperado, em kW;

$PCI$  = poder calorífico inferior do combustível, em kJ/kg;

$\dot{m}$  = vazão máxima de combustível, kg/s

### 3 ANÁLISE ENERGÉTICA EM ALTOS-FORNOS

O método tradicional utilizado para quantificar a energia envolvida em processos físicos ou químicos entre materiais, bem como aqueles que envolvem transferência e/ou conversão de energia, é a análise energética: a análise energética se baseia em balanços energéticos que são associados à Primeira Lei da Termodinâmica para avaliação da eficiência energética.

O balanço energético é utilizado na determinação e na redução das perdas de energia, contudo, não apresenta dados relacionados à degradação de energia ou de recursos durante um processo, bem como não quantifica o potencial ou a qualidade dos fluxos energéticos que ocorrem em um determinado sistema e resultam nos produtos e perdas. (MENIN, 2009).

#### 3.1 Reações químicas no alto-forno

A matéria-prima utilizada no alto-forno consiste em carga metálica composta por minério de ferro, pelota ou sinter associados a um combustível que pode ser o coque ou carvão vegetal e os fundentes, como o calcário, a dolomita e a sílica, conforme o alto-forno e a matéria-prima disponível - o processo de redução do óxido de ferro acontece de forma descendente das matérias-primas em relação aos gases resultantes da combustão do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras. (ARAUJO, L. 1997). Esse processo produtivo tem como produtos das reações entre gases e matérias primas o ferro gusa, a escória e gases finos provenientes do peneiramento das matérias-primas e particulados diversos.

As reações químicas no alto-forno acontecem de acordo com a região ou a zona do equipamento apresentadas no capítulo anterior, de acordo com a temperatura e pressão.

Inicialmente, tem-se a zona granular, uma região situada logo após o topo do alto alto-forno, no qual se inicia o carregamento de minério e coque ou carvão vegetal que descem como carga sólida. na forma de uma reserva térmica e química onde o minério de ferro, na forma de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), é reduzido à magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a partir da reação com o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), que é o gás redutor desta reação - no processo de descida de carga, já na região da cuba, a

magnetita continua reagindo com o monóxido de carbono (CO), formando então o óxido de ferro *wustita* (FeO).

Na zona coesiva ou na zona de amolecimento, a uma temperatura de aproximadamente 1000°C, a *wustita* (FeO) reduz-se a ferro metálico, através da utilização da carga térmica, e ao potencial redutor dos gases provenientes das regiões situadas na parte inferior do alto-forno, ou seja, nestas reações de redução não há consumo de carbono.

As reações químicas representadas pelas equações 2 e 3 ocorrem num intervalo de temperaturas entre 200°C a 950°C, durante o pré-aquecimento da carga e secagem e redução indireta dos minérios:



Em temperaturas aproximadas a 900°C, o calcário é calcinado através das seguintes reações químicas, como representadas pelas equações 4, 5 e 6:



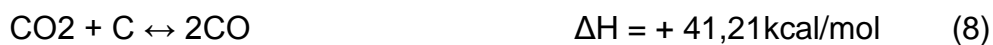
No intervalo de temperaturas entre 950°C e 1000°C, na região de reserva térmica e química, ocorre, em equilíbrio termodinâmico, a seguinte reação (Equação 7):



Na zona coesiva – também chamada de zona de amolecimento e fusão – a uma temperatura entre 1000°C a 1450°C, ocorre o início do amolecimento e da fusão da carga metálica através da distribuição do fluxo gasoso no interior do alto-forno, tal processo se dá através da relação entre os minérios e combustíveis no alto-forno, no qual se forma o perfil da reação influenciada principalmente pelo diâmetro do equipamento. (MOURAO, 2007). Os minérios são amolecidos e

fundidos nesta região, o coque permanece sólido, possibilitando o fluxo gasoso para as partes superiores, como a cuba do alto-forno, formando, assim, o ferro metálico e a escória primária líquida, que tem baixo ponto de fusão de aproximadamente 1300°C e com alto teor de *wustita* (FeO), que pode chegar a 40%.

A reação de Boudouard, extremamente endotérmica, ocorre na região anteriormente mencionada, através da redução do óxido de ferro, resultando no aumento de consumo de carbono e calor, conforme pontua a equação 8:



Nesta região de amolecimento, ocorre ainda a redução direta através do resultado da soma das seguintes reações, como apresentadas pelas equações 9, 10 e 11:



A escória primária é formada a partir das seguintes reações químicas, representadas pelas equações 12,13, 14 e 15:

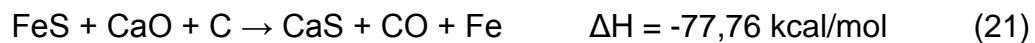


Já na zona de gotejamento, situada logo abaixo da zona coesiva, em uma temperatura compreendida entre 1400°C e 1800°C, o ferro gusa e a escória gotejam nas proximidades das ventaneiras, formando uma região conhecida como “*homem morto*”. Nesta região ocorre também a incorporação de carbono ao ferro gusa.

O peso de toda a coluna de carga do alto-forno está concentrado nesta região e é mantido através da relação de forças entre o peso de carga e o empuxo

exercido pelo ferro gusa, pela escória e pelo ar injetado até a região do cadinho. A partir do gotejamento do ferro gusa até o cadinho, acontecem as reações que incorporam os elementos de liga ao metal. (MOURÃO, 2007).

O ferro gusa e a escória líquidos descem através de um leito poroso de coque, em contra corrente, com o gás redutor, reduzindo neste momento as impurezas do minério e parte do FeO contido na escória a teores de aproximadamente 5%, como são apresentadas nas equações 16 a 23:



A uma temperatura de aproximadamente 2000°C na zona de combustão, as ventaneiras do alto-forno promovem o sopro do ar aquecido nos *glendons*, na parte superior do cadinho, fazendo o coque entrar em combustão, elevando a temperatura acima de 1900°C. Neste mesmo momento, os gases resultantes ascendem por toda a carga a partir da seguinte equação 24:



Na sequência, o gás CO<sub>2</sub>, resultante da combustão do coque com o ar, reage com o carbono, formando o gás redutor monóxido de carbono através da equação 25:



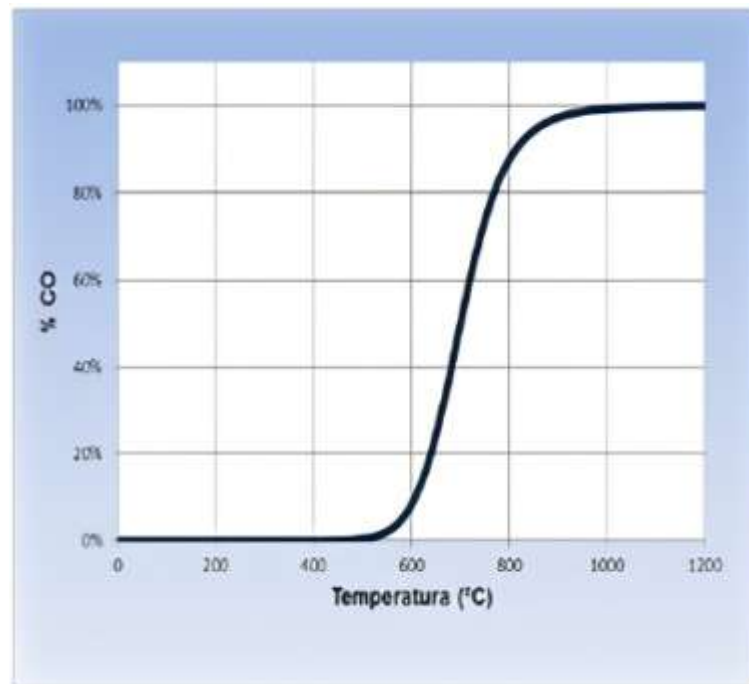
O monóxido de carbono sobe através da carga para promover a redução do minério de ferro, formando também a escória final através da reação com o

calcário que não ocorreu na rampa: a ascensão do monóxido de carbono através da carga transfere o calor necessário para as reações de redução.

O digrama de equilíbrio de Boudouard no alto-forno está representada na Figura 21, que demonstra que o gás, com uma composição acima da curva de equilíbrio, tende a dissociar o monóxido de carbono (CO) e formar o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e carbono (C); e já o gás, com uma composição abaixo da curva de equilíbrio, favorece a reação entre o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e carbono (C), tendo como produto da reação o gás redutor monóxido de carbono (CO), ficando na área de gaseificação do carbono.

Observa-se que a reação de *solution-loss*, à medida que vai reduzindo os óxidos, também vai diminuindo seu conteúdo energético por se tratar de uma reação endotérmica, na qual o gás redutor vai perdendo calor à medida que ascendem ao longo do alto-forno - quando os gases chegam a 950 °C, a reação de *solution-loss* deixa de ocorrer, não vindo a reagir novamente carga sólida do alto-forno, exceto se encontrar uma carga com temperatura mais baixa para reagir. (QUINTANILLA,2012).

Figura 21 - Diagrama de equilíbrio da reação de Boudouard (Pressão 1 atm)



Fonte: QUINTANILLA, 2012.

As trocas térmicas no alto-forno, associadas às condições termodinâmicas e cinéticas resultantes da reação de Boudouard, possibilitam dividir

duas regiões do alto-forno de acordo com características bem distintas: a zona de preparação, na qual o carbono do carvão vegetal ou coque não reage; e zona de elaboração, na qual o carbono do carvão vegetal ou coque reage com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), possibilitando a formação do gás redutor monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) através da reação de Boudouard. (QUINTANILLA,2012).

Por se tratar de uma temperatura crítica, de acordo com a cinética do processo, abaixo da qual o carbono do coque não reage com os gases, torna-se necessário transferir a maior quantidade de oxigênio da carga metálica aos gases, antes que o carbono passe a ser gaseificado. (QUINTANILLA,2012).

Na reação de Boudouard, num volume de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ocorre a produção de dois volumes de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) à pressão constante, o que provoca um aumento na pressão total do sistema. Se o sistema C-O estiver em equilíbrio, com o aumento da pressão, a reação do sistema tende a diminuir a pressão, decompondo o  $\text{CO}$  em  $\text{CO}_2$  e C, e, para manter a mesma relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$  em pressões maiores, a temperatura também aumentaria. A pressão do monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), somada à pressão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no alto-forno, apresenta em média o valor de 0,6 a 0,7 atm, o que equivale a 40% da pressão total - a estabilidade do monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) diminui com a redução da temperatura, e o máximo de instabilidade encontra-se no intervalo de temperatura entre 600°C a 800°C. (QUINTANILLA,2012).

A velocidade da decomposição do monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) torna-se muito lenta para temperaturas inferiores a 400°C, e praticamente o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) não se decompõe mais, sendo que o monóxido de carbono é estável em temperaturas superiores a 850°C. (QUINTANILLA,2012).

No que se refere à cinética da reação de Boudouard, vale ressaltar que a gaseificação de carbono ocorre conforme a difusão externa e intra-particular dos gases reagentes e produtos, assim como da reação química com a adsorção e dessorção nos sítios livres da superfície de carbono que, em caso de baixas temperaturas, a velocidade depende da reação química. (QUINTANILLA,2012).

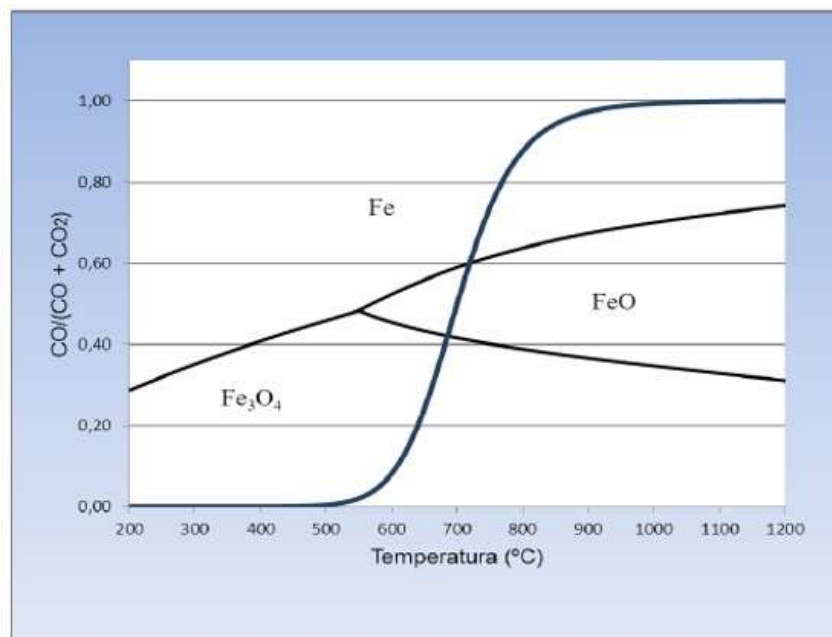
Em temperaturas médias ou mais altas, as etapas controladoras seriam as difusões através dos poros das partículas de carbono e da transferência de  $\text{CO}_2$  para a superfície externa das partículas, nos quais o mecanismo básico de reação é

a troca reversível de oxigênio entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da fase gasosa e a superfície de carbono. (QUINTANILLA,2012).

É importante destacar que a curva da reação de Boudouard ( $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2\text{CO}$ ), que define o equilíbrio entre o carbono e as suas fases gasosas  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ , também é projetada sobre o diagrama de Chaudron, apresentado na Figura 22, no qual há mostra da redução dos óxidos de ferro por se tratar de uma etapa limitante do processo de redução. (QUINTANILLA,2012).

O equilíbrio da fase gasosa na auto-redução segue aproximadamente a relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$  de equilíbrio entre as fases reagentes da redução dos óxidos, informando os estágios de redução dos óxidos de ferro. (QUINTANILLA,2012).

Figura 22 - Diagrama de Chaudron estabilidade do sistema Fe-O-C em função da temperatura



Fonte: QUINTANILLA, 2012

De acordo com o diagrama de Chaudron, pode se evidenciar, por exemplo, que, no ponto em que a curva de Boudouard intercepta a curva da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )/wustita ("FeO"), observa-se valores de temperatura aproximada de 650°C e a composição da atmosfera gasosa de 43% de monóxido de carbono (CO).

A redução da *wustita* necessita de um elevado potencial de gás redutor. Este gás, após a redução da *wustita*, ascende no forno e reduz facilmente, conforme a reação química apresentada na equação 26:



A hematita será reduzida à magnetita, conforme as equações 27 e 28:



O diagrama de Chaudron demonstra os limites de ocorrência dos óxidos de ferro e do ferro metálico, em função da temperatura e do potencial redutor da atmosfera gasosa - o diagrama apresenta à esquerda da curva de Boudouard, em baixas temperaturas, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como fase gasosa estável. Neste caso, o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) tende a se decompor em  $\text{CO}_2$  e Carbono, ou seja, tem-se aí a reação reversa de Boudouard. Em temperaturas maiores, o  $\text{CO}_2$  reage com Carbono para produzir  $\text{CO}$ , conforme o Princípio de Le-Chatelier, por se tratar de uma reação endotérmica favorecida pelas altas temperaturas.

Ainda de acordo com o diagrama, observa-se que, em temperaturas superiores a  $1000^\circ\text{C}$ , a reação de Boudouard é completa, ou seja, a fase gasosa apresenta 100% de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), momento em que, de acordo com a termodinâmica, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) não pode existir na presença de Carbono para temperaturas acima de  $1000^\circ\text{C}$ .

A redução dos óxidos ocorre de acordo com as reações representadas pela Equação 29 e pela Equação 30:



As duas reações apresentadas anteriormente podem ser combinadas para indicar a reação global, como está representado pela equação 31:



Esta reação é a de redução direta pelo carbono, enquanto que a reação da equação 32 é chamada de redução indireta pelo carbono.

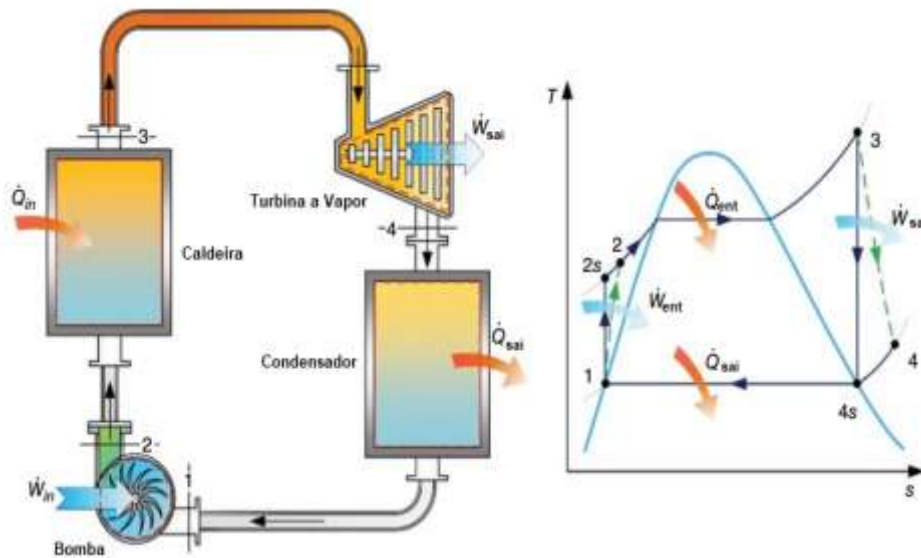


Na curva de equilíbrio, a reação de Boudouard cruza a curva do equilíbrio *wustita*-ferro, à aproximadamente 700°C, e a curva de equilíbrio magnetita-*wustita* a cerca de 650 °C, o que demonstra que, de acordo com a termodinâmica, a *wustita* não pode ser reduzida diretamente em temperaturas menores do que 700°C, e a magnetita não pode ser reduzida em temperaturas menores do que 650°C, já que o monóxido de carbono (CO) tem a tendência de se decompor em CO<sub>2</sub> e C, sem reduzir os óxidos desejados. (PIMENTEL, F. *et. al.* 2007).

### 3.2 Balanço energético da geração de energia

Conforme mencionado inicialmente, a presente dissertação tem como um de seus objetivos analisar a geração de eletricidade a partir do aproveitamento dos gases de alto-forno. Para o desenvolvimento desta fase, foi realizada fundamentação teórica sobre o ciclo e potência utilizado na indústria siderúrgica (Ciclo Rankine), assim como análises da equação da energia para um regime permanente. Foi realizado ainda um balanço de massa e energia de cada componente (volume de controle) do ciclo. A Figura 23 e o Quadro 1, a seguir, e respectivamente, apresentam o Ciclo de Potência Rankine, o ciclo termodinâmico, bem como a descrição de cada processo térmico.

Figura 23 - Ciclo de Potência Rankine



Fonte: DINÇER; ZAMFIRESCU, 2014

QUADRO 1 - Ciclo de Potência Rankine Ideal x Real

Processo	Ciclo Ideal	Ciclo Real
Bomba Adiabática (Compressão)	Isentrópico (1-2s)	Não Isentrópico (1-2)
Isobárico	Adição de Calor (2s-3)	Adição de Calor (2-3)
Expansão	Isentrópico (3-4s)	Não Isentrópico (3-4)
Isobárico	Rejeição de calor (4s-1)	Rejeição de Calor (4-1)

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

A continuidade das ideias aqui desenvolvidas apresentará descrição e equacionamento dos principais equipamentos do ciclo de Potência de Geração de Energia (Ciclo Rankine): Caldeira, Turbina a Vapor, Sistema de condensação e Bomba.

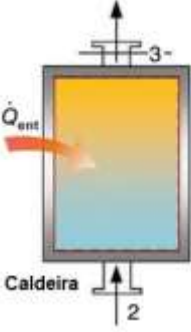
### 3.2.1 Gerador de vapor (caldeira)

A preferência pelo vapor como fluido de trabalho é justificado pelo seu alto calor específico, aliado à ampla disponibilidade da água no meio industrial.

A função principal da Caldeira é captar a energia liberada pelo combustível. Para que ocorra o processo de queima do combustível dentro da fornalha da caldeira, é preciso que exista uma reação de combustão, que são reações químicas entre o combustível e o comburente juntamente com um calor suficiente para permitir a reação. (MORAN *et al.*, 2013).

A maioria dos processos utiliza o ar ambiente como fonte de oxigênio para a combustão, devido a sua praticidade de obtenção. O conhecimento das necessidades de ar, bem como da composição e do volume dos produtos é fundamental para o projeto e para o controle de equipamentos de combustão. (BIZZO, 2003). As equações de Balanço de massa - EBM (33) e energia - EBE (34) são apresentadas no Quadro 2.

QUADRO 2 - Equações de Balanço de massa e energia da Caldeira

Caldeira (2 -3)	Balanço de Equações:
	$EBM: \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m} \quad (33)$ $EBM: \dot{m}_2 h_2 + \dot{Q}_{ent} = \dot{m}_3 h_3 \quad (34)$

Fonte: DINÇER; ZAMFIRESCU, 2014

A eficiência térmica da Caldeira ( $\eta$ ) pode ser encontrada através da equação 35, a seguir (SILVA, 2002):

$$\eta = \frac{\dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_2)}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (35)$$

$\dot{m}_3$  = vazão mássica de vapor ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$h_3$  = entalpia de vapor ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$h_2$  = entalpia da água de alimentação ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$\dot{m}_c$  = vazão mássica de combustível ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

PCI = poder calorífico inferior do combustível ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 3.2.1.1 Estequiometria da Combustão

A estequiometria da combustão geralmente é feita para minimizar perdas. E para isto, é necessário ter suprimento adequado de ar, mistura ar/combustível apropriada, temperaturas compatíveis e tempo suficiente de combustão.

Vale ressaltar que, para realizar a combustão é necessária quantidade de ar estequiométrica, chamada ar teórico. Entretanto, para assegurar a combustão completa, é necessário um "excesso de ar", de modo a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama. O excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, a temperatura e a entalpia dos produtos da combustão.

Desse modo, portanto, calcula-se o excesso de ar e obtém-se uma nova equação balanceada, considerando o excesso de ar.

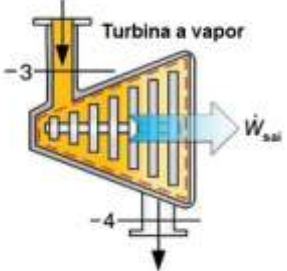
### 3.2.2 Turbina a Vapor

Uma turbina a vapor é considerada como sendo um volume de controle em regime permanente, e seu principal objetivo consiste em produzir trabalho de eixo. À medida que o fluido de trabalho (vapor) escoar através da turbina, trabalho é realizado nas pás, que estão presas ao eixo da turbina. Como resultado, o eixo gira e a turbina produz trabalho, acionando o gerador elétrico e produzindo consequentemente potência elétrica.

A transferência de calor das turbinas em geral é desprezível ( $Q \approx 0$ ), uma vez que elas são bem isoladas. As variações de energia potencial também são desprezíveis em análises de turbinas a vapor ( $\Delta e_p \approx 0$ ). As velocidades dos escoamentos na maioria das turbinas são muito altas, e o fluido sofre variação significativa em sua energia cinética. Entretanto, essa variação em geral é muito pequena com relação à variação da entalpia e, portanto, pode ser desprezada

(ÇENGEL; BOLES, 2015). As equações de Balanço de massa - EBM (36) e energia - EBE (37) são apresentadas no Quadro 3.

QUADRO 3 - Equações de Balanço de massa e energia da Turbina

Turbina (3 - 4)	Balanço de Equações:
	$EBM: \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m} \quad (36)$ $EBM: \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_{sai} \quad (37)$

Fonte: DINÇER; ZAMFIRESCU, 2014

A eficiência isentrópica de uma turbina ( $\eta_T$ ) é dada pela equação 38 (DINCER; ZAMFIRESCU, 2016):

$$\eta_T = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4s})} \quad (38)$$

$h_3$  = entalpia real do vapor na entrada da turbina ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$h_4$  = entalpia real do vapor na saída da turbina ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

$h_{4s}$  = entalpia isentrópica do vapor na saída da turbina ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

### 3.2.3 Condensador

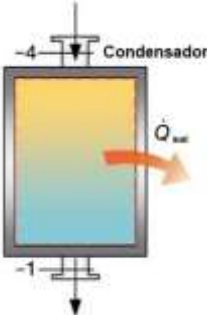
Um sistema de condensação (torre de resfriamento) pode ser considerado como um trocador de calor operando em regime permanente, no qual duas correntes de fluido em movimento trocam calor entre si. Os trocadores de calor podem operar com os fluidos em contato direto, ou sem se misturarem.

O princípio de conservação da massa aplicado a um trocador de calor operando em regime permanente exige que a soma dos fluxos de massa que entram seja igual à soma dos fluxos de massa que saem. Trocadores de calor

normalmente não envolvem interações de trabalhos ( $w = 0$ ), e as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis ( $\Delta ec \approx 0$ ,  $\Delta ep \approx 0$ ) para cada corrente de fluido. (ÇENGEL; BOLES, 2013).

As equações para balanço de massa - EBM (39) e energia EBM (40) de uma torre de resfriamento seguem representadas no Quadro 4.

QUADRO 4 - Equações de Balanço de massa e energia do Condensador

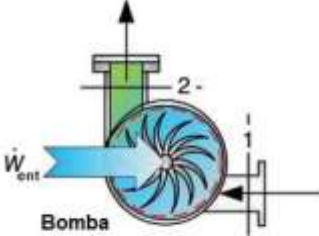
Condensador (4 - 1)	Balanço de Equações:
	$EBM: \dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m} \quad (39)$ $EBM: \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{sai} \quad (40)$

Fonte: DINÇER; ZAMFIRESCU, 2014

### 3.2.4 Bomba

O líquido condensado que deixa o condensador é bombeado para a caldeira a uma pressão mais alta. Considerando-se um volume de controle no entorno da bomba, e admitindo-se que não exista transferência de calor para as vizinhanças. As equações de balanços de massa - EBM (41) e de energia - EBE (42) são dadas no Quadro 5.

QUADRO 5 - Equações de Balanço de massa e energia da Bomba

Bomba (1 - 2)	Balanço de Equações:
	$EBM: \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (41)$ $EBM: \dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{ent} = \dot{m}_2 h_2 \quad (42)$

Fonte: DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016

Cabe mencionar que, paralelamente, foi iniciada a construção e solução do modelo, utilizando-se a linguagem de programação *Python* (Software livre), versão 3.7.11, conjuntamente com a ferramenta *CoolProp*, versão 6.4.1 (Software livre para propriedades termodinâmicas).

Para o cálculo e para a solução do modelo, são necessários alguns dados da siderúrgica, como apresentados no item das reações químicas, com foco especial na composição química, no Poder Calorífico Inferior (PCI) e na vazão do Gás de Alto-Forno, produto do processo de formação do ferro gusa. Uma parte desses gases, após o processo de lavagem, passará por um processo de combustão na fornalha da Caldeira, gerando vapor saturado, e energia através do turbo gerador do sistema de potência descrito anteriormente.

## 4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SIDERURGIA – ESTUDO DE CASO

O estudo de caso aqui apresentado foi realizado em uma unidade termelétrica com refrigeração a ar que possui capacidade de fornecer 2.000 kW de energia e é composta por uma caldeira para a queima do gás de alto-forno, que gera o vapor para mover uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. A energia é gerada em 440 V, 2.500 KVA / 1.968 A / 60 Hz, e pode ser utilizada diretamente na alimentação dos motores elétricos ou transformada em 13.800 V para ser transmitida a outras partes da empresa.

A caldeira é do tipo mista (aquatubular e flamotubular), adequada para queima do gás de alto-forno, gerando vapor para turbo-redutor. É um equipamento totalmente automatizado e montado sobre um chassi metálico compacto.

A fornalha é reatora com queimador Biochamm projetada para gás de alto-forno e tem uma combustão pirolítica que transforma os gases em energia térmica com baixíssimo teor de particulados emitidos para a atmosfera.

O vapor gerado na caldeira passa para a turbina a vapor da TGM multiestágio, tipo TM FLEX 3000, com capacidade de gerar potência de 2.000 kW nos bornes do gerador, juntamente com um redutor de velocidade que opera de 6.500 rpm para 1.800 rpm, e está acoplado a um gerador trifásico, fechado, sem escovas, e com regulador eletrônico de tensão.

### 4.1 Parâmetros de simulação

#### 4.1.1 *Composição do gás de alto-forno - GAF e poder calorífico*

No processo de produção do ferro gusa em altos-fornos são formados gases de combustão, os quais são denominados como gases de alto-forno (GAF).

A composição química do gás de alto-forno nas usinas siderúrgicas mineiras não integradas é obtida, na maioria das vezes, por meio do uso do aparelho de ORSAT: a análise de ORSAT determina a composição dos gases secos (não inclui vapor d'água). Os aparelhos de ORSAT possuem reagentes químicos que absorvem o gás a ser determinado - é possível analisar  $CO_2$ ,  $O_2$  e  $CO$

por absorção química, e  $H_2$ ,  $N_2$  e  $CH_4$  e outros hidrocarbonetos por diferença. (ANDRADE, 1977).

A análise da composição química é importante na avaliação de aspectos operacionais de aproveitamento dos gases residuais gerados durante o processo de produção do ferro gusa. Os componentes do gás de alto-forno analisados em ORSAT são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do Gás de Alto-Forno

Composição do Gás de Alto-Forno (%Volumétrico)					
CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

O poder calorífico de um combustível é dado pelo número de calorias despreendidas em sua queima. Uma caloria é uma unidade de calor necessária para elevar um grama de água pura de 14,5°C até 15,5°C, sobre pressão atmosférica normal. (LINERO, 2008).

O poder calorífico do GAF obtido em um calorímetro é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Poder Calorífico do Gás de Alto-Forno

Poder Calorífico	
	Energia Específica (kJ/Nm <sup>3</sup> )
PCI	3.768
PCS	3.919

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

A seguir são apresentados outros dados sobre o gás de alto-forno que será utilizado como o gás de combustão na caldeira:

- Vazão de Combustível: 16.363  $Nm^3/h$
- Temperatura de entrada: 70 °C
- Temperatura dos gases de combustão: 600 °C
- % de  $O_2$  livre: 10 %
- Pressão:  $10^5 N/(m^2)$

Os parâmetros de operação da caldeira são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros Operacionais da Caldeira

Itens	Pressão	Temperatura	Vazão
Vapor da Caldeira	21kgf/cm <sup>2</sup>	300°C	20t/h
Água de alimentação	26,25kgf/cm <sup>2</sup>	90°C	20t/h

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

A turbina, por sua vez, apresenta os dados de operação expressos na Tabela 4, logo a seguir:

Tabela 4 - Parâmetros Operacionais da Turbina

Itens	Pressão	Temperatura	Vazão
Turbina	21kgf/cm <sup>2</sup>	300°C	20t/h

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

Sobre o condensador, o consumo de energia e o consumo de energia elétrica da planta de cogeração seguem os dados:

- Temperatura de entrada do vapor no condensador: 100 °C
- Temperatura de saída da água do condensador: 80 °C
- Pressão de entrada do vapor no condensador: 0, 05 kgf/cm<sup>2</sup>

- Vazão da água: 2, 52 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura de entrada do ar: 27 °C
- Temperatura de saída do ar: 40 °C
- Vazão do ar: 210.000 m<sup>3</sup>/h cada ventilador (4 ventiladores no total)
- Outros: Consumo de energia elétrica da planta de cogeração: 442 kWh

## 4.2 Metodologia de cálculo

A metodologia empregada para a realização dos cálculos iniciou-se com um embasamento prático sobre o processo de fabricação do ferro gusa até a cogeração de energia elétrica.

Foi realizado um estudo teórico sobre temas como balanço de massa e energia, balanço energético e princípios sobre gerenciamento de dados através do software utilizado no projeto (*Python*). Seguiu-se então o desenvolvimento de etapa relativa ao cálculo energético para cada elemento do Ciclo de Potência de Geração de Energia (*Ciclo Rankine*): Caldeira, Turbina a Vapor, Sistema de condensação.

Para realizar os cálculos referentes à cogeração, é preciso primeiramente analisar o combustível, no caso, o GAF. A Tabela 5 mostra a composição elementar do combustível, considerando uma análise em peso, juntamente com outras informações.

Tabela 5 - Composição Elementar do Gás de Alto-Forno

Composição Elementar do Gás de Alto-Forno (%Volumétrico)						
	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
%Vol	22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76
MM	28	2	18	16	28	44
X	0,2215	0,0546	0,0988	0,0102	0,4673	0,1476

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

Onde:

- MM representa a massa molar de cada elemento
- X representa a fração molar de cada termo, dada por:

$$x = \frac{\%Vol}{100} \quad (43)$$

Com essas informações, é possível então realizar o balanço estequiométrico para uma reação de combustão. Porém, antes disso, é comum a utilização de uma porcentagem de Oxigênio a mais nas reações de combustão, a fim de garantir que todo o combustível presente seja devidamente utilizado. O cálculo estequiométrico se encontra no Produto Técnico em anexo.

O cálculo da quantidade de Oxigênio que será necessário é dado pela seguinte equação:

$$\%O_2 = \frac{O_2}{V_{gc} + 4,76 O_2} \quad (44)$$

Onde:

- $\%O_2$  Representa a porcentagem de oxigênio que é necessária para o cálculo, estimado entre 7 a 14%.
- $V_{gc}$  significa a quantidade de gases secos que são obtidos nos produtos. Por se tratar de uma análise em base seca, não é considerado a quantidade de H<sub>2</sub>O.

Assim, é possível realizar os cálculos e encontrar um valor para a variável  $O_2$ , que representa então a quantidade necessária de Oxigênio relacionado à porcentagem de  $O_2$  que foi estipulada no início dos cálculos.

### 4.3 Programação

Partindo da necessidade de auxiliar os cálculos do projeto e o balanço estequiométrico do combustível, foi utilizada programação em *Python*, que conta com diversas bibliotecas que facilitam e favorecem a sua utilização.

Para obter os valores das entalpias, foi utilizada a biblioteca *CoolProp*, que possui informações das propriedades de algumas substâncias - as equações que foram citadas anteriormente foram escritas em *Python*.

### 4.4 Resultados dos Cálculos

A partir das definições e dos dados mostrados anteriormente, realizou-se então os cálculos de balanço de energia e massa e balanço de energia para a caldeira, para a turbina a vapor e para o sistema de condensação, através das programações elaboradas em *Python*. Os principais resultados serão mostrados nos tópicos a seguir e os cálculos são apresentados no Produto Técnico em anexo.

#### 4.4.1 Caldeira

Os resultados que foram obtidos para a caldeira são mostrados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resultados do Valor de Entalpia da Água de alimentação

Definição	Valor
Entalpia do vapor ( $h_v$ )	3022 KJ/kg

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

Tabela 7 - Resultados do Valor de Entalpia do Condensador

Definição	Valor
Entalpia do condensado ( $h_c$ )	378,99 KJ/kg

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

A Tabela 8 mostra os Resultados do Valor de Entalpia e da Eficiência da Turbina a Vapor de Contrapressão.

Tabela 8 - Resultados do Valor de Entalpia da Turbina a Vapor de Contrapressão

Definição	Valor
Entalpia de entrada ( $h_1$ )	3022,48 kJ/kg
Entalpia de saída ( $h_2$ )	2692,22 kJ/kg
Entalpia de saída isentrópica ( $h_{2s}$ )	2509,14 kJ/kg
Potência produzida (W) Eficiência	1834,77 kW 64,34%

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

Já a Tabela 9 mostra os Resultados do Valor de Entalpia do Sistema de Condensação.

Tabela 9 - Resultados - Sistema de Condensação

Definição	Valor
Entalpia de entrada da água ( $h_{1h}$ )	2688,08 kJ/kg
Entalpia de saída da água ( $h_{2h}$ )	335,05 kJ/kg
Entropia de entrada da água ( $s_{1h}$ )	8,7791 kJ/kg . K
Entropia de saída da água ( $s_{2h}$ )	1,0775 kJ/kg . K
Entalpia de entrada do ar ( $h_{1c}$ )	47,04 kJ/kg
Entalpia de saída do ar ( $h_{2c}$ )	117,67 kJ/kg
Entropia de entrada do ar ( $s_{1c}$ )	0,1685 kJ/kg . K
Entropia de saída do ar ( $s_{2c}$ )	0,4058 kJ/kg . K

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

#### 4.5 Análise energética quando há variação na vazão de gás de alto-forno (BFG)

Os cálculos foram realizados quando o gás de alto forno (BFG) usado como fluxo de combustível varia, o que afeta diretamente a geração de energia elétrica. A faixa de gás de alto forno (BFG) é apresentada na Tabela 10. Os dados foram obtidos junto à empresa parceira.

Tabela 10 - Variação do Fluxo de Gás do Alto-Forno

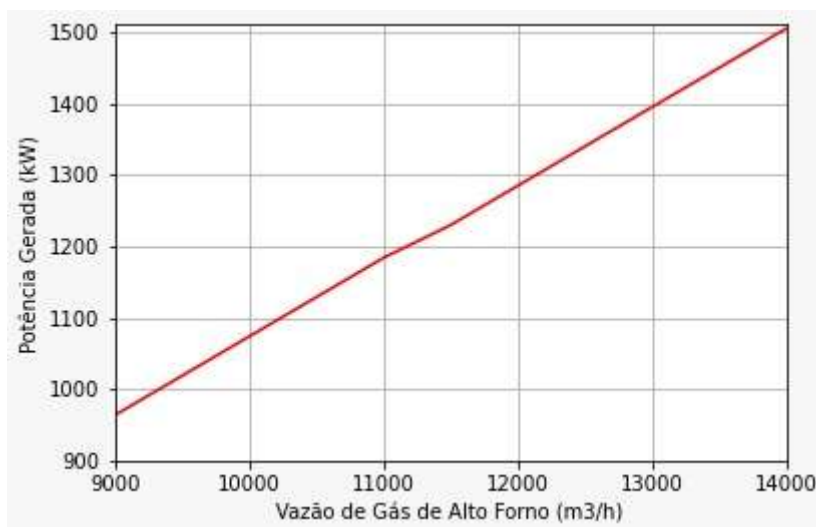
Gás de Alto-Forno usado como Combustível	
Fluxo de Combustível	$Nm^3/h$
Mínimo	9000
Máximo	14000

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

Conforme mencionado acima, existe uma faixa de gás de alto-forno de 45% a 50% que é usada como combustível no sistema de cogeração de energia elétrica da empresa. É por isso que é importante realizar uma análise energética quando esta variação existe.

A Figura 24, a seguir, mostra a relação direta entre a variação do fluxo de gás do alto-forno e a geração de energia elétrica - quanto maior o fluxo do alto-forno gás (BFG), maior será a geração de eletricidade.

Figura 24 - Relação entre a Variação do Fluxo de Gás do Alto-Forno e a Geração de Energia Elétrica



Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2021

As despesas com o consumo energia expressas no quadro 6, foram extraídas das faturas emitidas pela Cemig - Concessionária de Energia Elétrica e já o consumo em kWh e a geração da termelétrica da empresa estuda foram retirados do histórico da CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

A empresa teve sua operação paralisada para reforma do alto-forno na primeira quinzena de janeiro/21 e retornou na segunda quinzena de abril/21 porém, a termelétrica, teve suas atividades iniciadas somente no mês de junho/21 em função da manutenção na caldeira.

É possível evidenciar no mês de maio/21, no qual o alto-forno e os demais equipamentos da siderurgia funcionaram em sua totalidade sem a cogeração de energia, o pleno consumo da planta e o valor significativo que representa a operação de uma indústria deste porte sem o funcionamento da termelétrica.

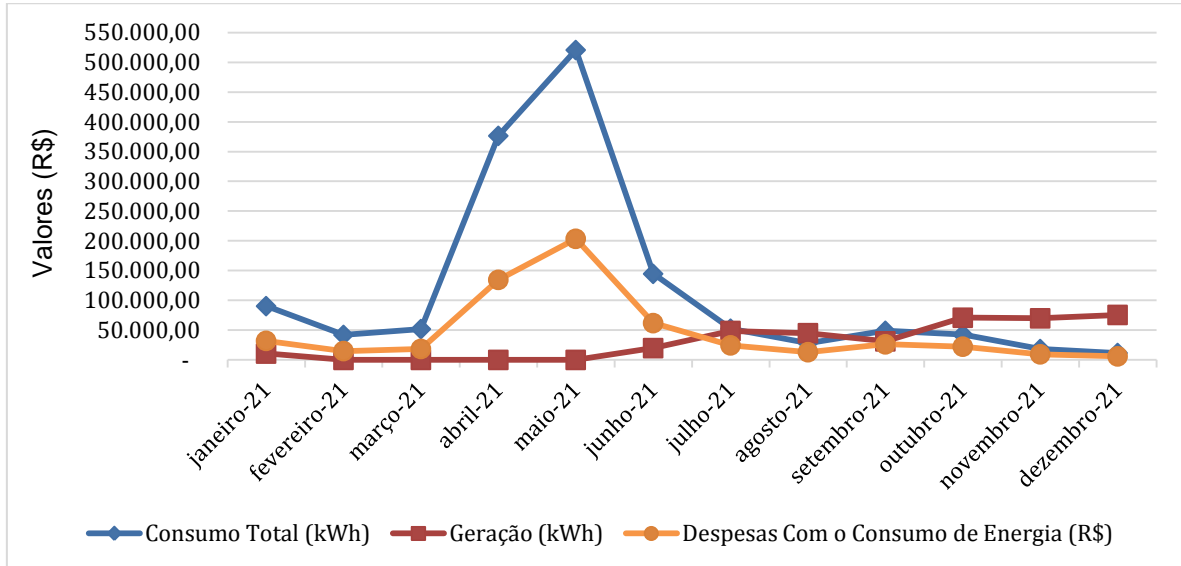
O impacto das despesas de consumo de energia elétrica associadas aos demais componentes dos custos de produção de ferro-gusa, com base nos dados abaixo e outras consultas realizadas na empresa pesquisada, agregam o aumento de R\$40,00 por tonelada de ferro-gusa produzido sem o funcionamento da termelétrica.

QUADRO 6 - Consumo, geração e despesas relacionados a energia elétrica.

Mês	Consumo Total (kWh)	Geração (kWh)	Consumo Ponta (R\$)	Consumo Fora Ponta (R\$)	Despesas Com o Consumo de Energia (R\$)
janeiro-21	90.361,56	10.664,70	4.055,73	27.993,94	32.049,67
fevereiro-21	42.023,05	-	1.962,27	12.922,24	14.884,51
março-21	51.821,25	-	2.823,58	15.633,92	18.457,50
abril-21	376.480,22	-	18.674,65	115.875,81	134.550,46
maio-21	520.675,97	-	26.265,50	177.229,35	203.494,85
junho-21	144.606,48	19.809,83	54.745,95	7.088,44	61.834,39
julho-21	52.457,09	48.652,12	22.129,90	2.333,57	24.463,47
agosto-21	28.251,19	44.934,95	12.419,46	577,81	12.997,27
setembro-21	48.939,50	31.208,83	21.546,45	4.678,49	26.224,94
outubro-21	42.448,46	70.859,55	2.034,23	20.228,63	22.262,86
novembro-21	18.291,61	69.884,14	164,97	9.254,56	9.419,53
dezembro-21	11.636,75	75.592,91	268,36	5.710,67	5.979,03

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2022.

O gráfico representado na figura 25 demonstra a correlação dos dados descritos no quadro 6:



Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2022.

Pode-se observar a importância da geração de energia elétrica em função das despesas em função do consumo de eletricidade por uma indústria siderúrgica.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Conclusões**

É possível afirmar que há grande complexidade nos processos industriais, em particular nos processos siderúrgicos: ao se considerar tamanha diversidade e complexidade, torna-se necessária a constante inovação em melhorias dos projetos de planta e maquinário, otimizando a eficiência com a utilização e distribuição correta de insumos pareada à consciência dos impactos ambientais.

Com os dados obtidos em relação à caldeira, pôde-se observar o alto valor para eficiência de primeira lei (86%). Portanto, mesmo que existam inúmeras fontes para obtenção de energia, não é possível aproveitar o seu total potencial energético, uma vez que, dadas as perdas relacionadas a vários fatores internos e externos ao sistema da caldeira, esta apresenta um baixo valor de trabalho.

Mesmo que haja perdas por fatores não controláveis, é possível reforçar os fatores controláveis, tais como a utilização de combustíveis com maior índice PCI e aumento da vazão da água de alimentação.

### **5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros**

O estudo de tecnologias de controle associado à automação de processos pode favorecer a performance do processo de cogeração de energia elétrica de forma a aumentar a produtividade e lucratividade da empresa.

Para isso, torna-se necessário o desenvolvimento de levantamento teórico e prático das melhores opções tecnológicas existentes no mercado para esta operação.

Recomenda-se o melhoramento do programa computacional, com a finalidade de calcular a potência de geração e a eficiência do ciclo em função da variação dos gases de alto forno.

Análises exérgicas do sistema de cogeração poderiam ser realizadas de forma a obter mais dados quantitativos sobre os componentes do ciclo.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, José Oscar Costa de. **Combustão no alto-forno: Funcionamento do alto-forno: balanço térmico**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1977.
- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997.
- BIZZO, W.A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Apostila. Campinas: Unicamp, 2003.
- CALDERON, D. E. R. **Superfície de Mínimo Consumo de Carbono do Processo de Redução em Altos-Fornos**. Tese (Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais) - Pontífice Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2016.
- CARPIO, C.R. **Avaliação técnico-econômica de sistemas avançados de cogeração com altos parâmetros de vapor no setor sucroalcooleiro brasileiro**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Itajubá, Minas gerais, 2000.
- CARVALHO, F. R.; NOGUEIRA, L. A. H.; TEIXEIRA, F. N. Co-geração e geração distribuída. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1296 p.
- CARVALHO, P. S.; Mesquita, P. P.; Araújo, E. D. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. In: **BNDES Setorial Siderurgia** (pp. 181-236). Rio de Janeiro: BNDES, 2015.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- CHAVES, L. E. **Gestão Ambiental do Gás do Alto-forno e Avaliação dos Sistemas de Controle Atmosféricos de Siderúrgica, Viabilizando um Sistema de Geração de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental com ênfase em Gestão Ambiental) - Universidade de Santa Catarina, Santa Catarina, 2013.
- COSTA, E.; Costa, A., Turetta, L; **Estudo da influência do excesso de ar na composição de saída de fornalha siderúrgica real empregando conceitos termodinâmicos e modelagem matemática**, Engevista, v.19, n.1, p. 109-121, UFF, 2017.
- DIAS, C. A. C. M. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- DINCER, Ibrahim.; ZAMFIRESCU, Calin. **Sustainable Hydrogen Production**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.

DINCER, Ibrahim; ZAMFIRESCU, Calin. **Advanced Power Generation Systems**. Academic Press, 2014.

EDICLINAS.**Metalurgia Geral 2017** Disponível: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4138040/mod\\_resource/content/1/MG%206%20altoforno.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4138040/mod_resource/content/1/MG%206%20altoforno.pdf)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica DEA 02/09**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430\\_2\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/20090430_2[1].pdf). Acesso em: 10 out. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica DEA 001/17**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites/nota-tecnica-1\\_revisao\\_quadrimestral-20170519\\_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites/nota-tecnica-1_revisao_quadrimestral-20170519_v2.pdf). Acesso em: 10 out. 2021.

FAPESP - **Os Primeiros Anos da Siderurgia**. Ed. 173/2010. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/os-primeiros-anos-da-siderurgia/>. Acesso em: 3 set. 2021.

FEAM. **Utilização do Gás de Alto-forno para Produção de Energia em Indústria Siderúrgica no Estado de Minas Gerais**. Sumário Executivo. Belo Horizonte. 2010.

FERNANDES, M. V. **Efeito do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno no consumo de combustíveis (Fuel-Rate)**. 2007. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – UFMG, Belo Horizonte, 2007.

HORLOCK, J. H. **Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP)**. Malabar: Rieger Publishing Company, 1997.

INFOESCOLA. **Coque**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/combustiveis/coque/> Acesso em: 25 out. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABr). **Relatório de Sustentabilidade**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 14 out. 2021.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; CASTRO, Luiz Fernando Andrade de; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; LEAO, Mônica Maria Diniz; SOUZA, Caetano Marciano de; GOMES, Abdias Magalhães; ALMEIDA, Marys Lene Braga; FURIATTI, Luiz Eduardo. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica Ltda., 2002.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. London: Edit. Butterworths, 1985. 295 p.

LINERO, Francisco Antônio Barba. **Caldeiras: funcionamento e operação**. Maceió, 2008.

LOUW, Phillip. **Microsoft Encarta Encyclopedia Deluxe 2000**. Lexikos, v. 10, 2000.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. **Theory of exergetic cost.** *Energy*, v. 18, n. 9, p. 939-960, 1993.

MACHADO, M. L., 2003 - **Siderurgia para não siderurgistas** - Vitória

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira; SOBRINHO, Vicente de Paulo Ferreira Marques; ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Siderurgia para não Siderurgistas.** Vitória, 2006.

MACIEL, Carlos Renato França. **Análise energética e exergética de uma central termoelétrica.** Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica). PUC Minas, Belo Horizonte, 2004.

MARAFIGO, Aline Aidil de; ROSA, Willian Bella. **Produção do ferro gusa.** Curso técnico em metalurgia. São Roque, 2010.

MARÇAL, Ana Gabriela Garcia; SANDOLI, Guilherme; MONTE, Juliana; DE ZORZI, Vinícius Gaburro. **Cogeração: uma abordagem introdutória.** Piracicaba, 2010.

MENIN, A. **Exergetics analyses in a steel industry.** Brasil, 2009.

MORAN, M.L.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 4 ed. São Paulo: LTC, 2002.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MOURÃO, J. M. **Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro.** Disponível em: <http://aspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacao-de-minerio-de-ferro>. Acesso em: 2 de ago. 2021.

MOURÃO, M. B. **Siderurgia para não siderurgistas.** Programa de educação continuada da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo: ABM, 2004. 251p.

MUNDIM, Marcos José. **Tecnologia de fabricação do aço líquido.** 2 ed. Belo Horizonte: Cotec, 1983.

PORTAL AMBIENTE LEGAL. Carvão. <https://www.ambientelegal.com.br/siderurgia-sustentavel-desenvolve-cadeia-de-producao-com-baixa-emissao-de-poluentes/>

QUINTANILLA, J.E. **Reatividade ao CO<sub>2</sub> de Carvões Minerais de Biomassas e Coques.** Tese (Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais) - Pontífice Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

REVISTA MINÉRIO E MINERALES. **Minério de Ferro.** Disponível em: <http://www.https://revistaminerios.com.br/>. Acesso em: 25 out. 2021.

RIZZO, E. M. **Introdução aos processos de refino secundário dos aços.** São Paulo: ABM, 2006.

RIZZO, Ernanes Marcos da Silveira. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2009.

SICETEL - Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos. **Análise do Mercado do Aço.** 2021.

SILVA, Guilherme Liziero R. Silva; DESTRO, Elton; MARINHO, Geraldo Magela. **Otimização da mistura de carvão na produção de coque metalúrgico.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, UFOP, Ouro Preto.

SILVA, J. D. **Análise termoeconômica do processo de geração de vapor e potência do segmento de celulose e papel.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2002.

SILVA, J. N., 2011 - **Siderurgia.** (l. : UFSM, Ed.) - Acesso em 2018, disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/siderurgia.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf)

SIMÕES-MOREIRA, J. R.; Hernandez Neto, A.; Amaral, A. C. do; Leite, B. M.; Pacheco, C. R. de F.; Sowmy, D. S., *et al.* **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SINDIFER. **Ferro Gusa.** Edição 25. Junho, 2021.

SOTOMONTE, C. A. R. **Análise exergética, termoeconômica e ambiental de uma usina termoelétrica supercrítica a carvão mineral.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009.

VIEIRA, D. H. **Avaliação de parâmetros operacionais que influenciam a taxa de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos a carvão vegetal.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, Belo Horizonte, 2012.

VIEIRA, S.; OLIVEIRA JR, S. **Estudo de sistemas de cogeração e geração termelétrica através da análise termo econômica,** Proceedings of the 7th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Novembro, 1998.

## ANEXO PRODUTO TÉCNICO



**INSTITUTO FEDERAL  
MINAS GERAIS**

Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental -  
IFMG

Produto Técnico

Combustão dos Gases do Alto Forno na Fornalha da Caldeira

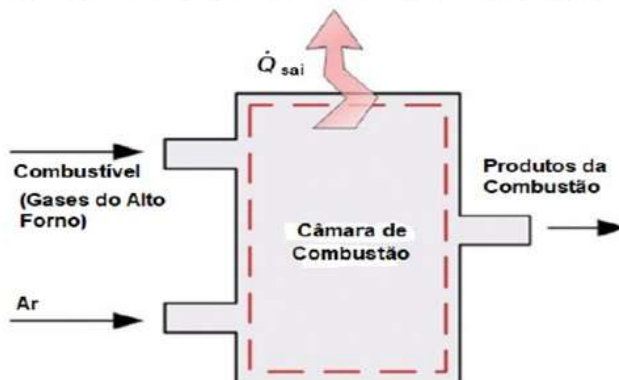
Indústria Siderúrgica

Mestrando: Moises Teles Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ricardo C. Carpio

Coorientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva

(Cogeração em uma Indústria Siderúrgica). Realizar um balanço térmico para um sistema de cogeração em uma indústria siderúrgica Não integrada. (Utilizando o programa COOLPROP para o cálculo das entalpias).



```
In [9]: import numpy as np
import pandas as pd
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
```

### DADOS DE ENTRADA

Tabela de Composição dos Gases do Alto Forno (AF):

Composição do Gás do Alto Forno						
	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
(% em Peso)	22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76
Massa Molar (MM)	28	2	18	16	28	44

```
In [11]: df = pd.read_excel("composicao.xlsx")
display (df)
```

Unnamed: 0	CO	H2	H2O	CH4	N2	CO2	
0	(% em Peso)	22.15	5.46	9.88	1.02	46.73	14.76
1	Massa Molar (MM)	28.00	2.00	18.00	16.00	28.00	44.00

### Dados Referentes ao combustível que entra na Caldeira:

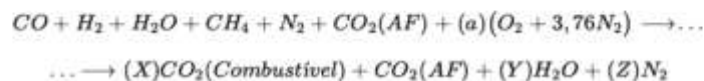
- Vazão do gás do alto forno  $\rightarrow V_{gaso} = 16363 Nm^3/h = 4,54 Nm^3/s$
- Vazão do gás do alto forno  $\rightarrow V_{masa} = 20318,04 kg/h = 5,64 kg/s$
- Temperatura do gás do alto forno  $\rightarrow Temp = 95^\circ C = 368,15 K$

```
In [12]: #Dados de entrada:
#Dados de entrada:
#### VAZÃO DO COMBUSTÍVEL DO ALTO FORNO #####
MG      = 5.64   # Kg/s
#### PORCENTAGEM EM PESO DE CADA ELEMENTO #####
CO      = 22.15  # %
H2      = 5.46   # %
H2O     = 0.80   # %
CH4     = 1.02   # %
N2      = 46.73  # %
CO2     = 14.76  # %
#### MASSA MOLAR DE CADA ELEMENTO #####
MMCO    = 28    # Kg/Kmol
MMH2    = 2     # Kg/Kmol
MMH2O   = 18    # Kg/Kmol
MMCH4   = 16    # Kg/Kmol
MMN2    = 28    # Kg/Kmol
MMCO2   = 44    # Kg/Kmol
```

## EQUAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA

### Equação de Balanço de Massa - EBM

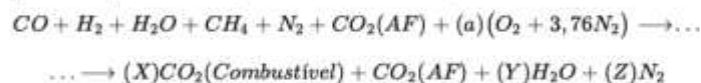
Escrevendo a equação estequiométrica (100\% de ar teórico).



## EQUAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA

### Equação de Balanço de Massa - EBM

Escrevendo a equação estequiométrica (100\% de ar teórico).



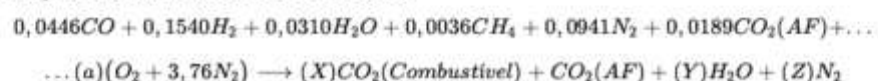
Cálculo do Número de Moles de Cada elemento do Gás de Alto Forno (GAF)

$$N_{mol} = \frac{Qtd_{comb} \times \%_{elemento}}{MM_{elemento}}$$

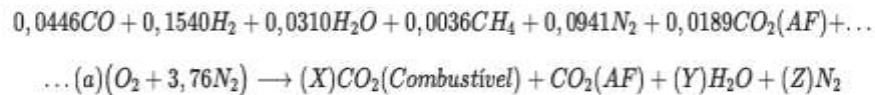
```
In [13]: df = pd.read_excel("calculo.xlsx")
display (df)
```

	Elemento	MM	Nmol
0	NaN	kg/kmol	kmol/s
1	CO	28	0,044616
2	H2	2	0,153972
3	H2O	18	0,030957
4	CH4	16	0,003596
5	N2	28	0,094128
6	CO2	44	0,01892

Equação estequiométrica com seus coeficientes:



Equação estequiométrica com seus coeficientes:



```
In [14]: # Balanço de Massa de cada elemento

NCO = df.iat[1,2]
NH2 = df.iat[2,2]
NH2O = df.iat[3,2]
NCH4 = df.iat[4,2]
NN2 = df.iat[5,2]
NCO2AF = df.iat[6,2]

# Para o carbono:
X = NCO + NCH4

# Para o Hidrogênio:
Y = NH2 + NH2O + 2*NCH4

# Para o Oxigênio:
a = (0.5*X + Y - NCO - NH2O)/0.5

# Para o Nitrogênio:
Z = NN2 + 3.76*a

print('O valor para X = ' "{0:.4f}".format(X))
print('O valor para Y = ' "{0:.4f}".format(Y))
print('O valor para a = ' "{0:.4f}".format(a))
print('O valor para Z = ' "{0:.4f}".format(Z))
print('O valor para NN2 = ' "{0:.4f}".format(NN2))
print('O valor para CO2_AF = ' "{0:.4f}".format(NCO2AF))
```

```
O valor para X = 0.0482
O valor para Y = 0.1921
O valor para a = 0.2813
O valor para Z = 1.1518
O valor para NN2 = 0.0941
O valor para CO2_AF = 0.0189
```

Realizando o Balanço de Massa, para cada elemento:

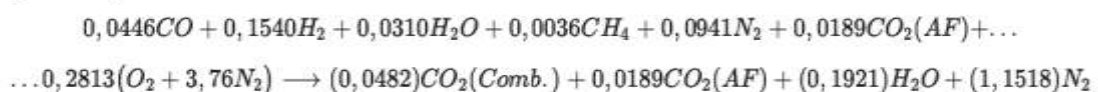
$$C : X = 0,0446 + 0,0036 \implies X = 0,0482$$

$$H_2 : Y = 0,1540 + 0,0310 + 2 \times 0,0036 \implies Y = 0,1921$$

$$O : 0,0446 + 0,0310 + 0,5a = 0,5X + Y \implies a = 0,2813$$

$$N_2 : Z = 0,0941 + 3,76a \implies Z = 1,1518$$

Equação estequiométrica com seus coeficientes:



## CÁLCULO DE $O_2$ LIVRE (EM BASE SECA)

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

$$\%O_2livre = \frac{O_2livre}{V_{gc} + 4,76O_2livre} \quad (1)$$

Dados:

$$\%O_2livre = 10\% \quad (2)$$

$V_{gc}$  = Volume dos gases de combustão em base seca

Cálculo do Volume de Gases de Combustão ( $V_{gc}$ )

$$V_{gc} = (0,0482)CO_2(Comb.) + (0,0189)CO_2(AF) + (1,1518)N_2 = 1,2189Kmol/s$$

### Cálculo do Volume de Gases de Combustão ( $V_{gc}$ )

$$V_{gc} = (0,0482)CO_2(Comb.) + (0,0189)CO_2(AF) + (1,1518)N_2 = 1,2189 \text{ kmol/s}$$

Sustituindo os valores para calcular o  $O_2$  livre:

$$0,1 = \frac{O_2 \text{ livre}}{(0,0482 + 0,0189 + 1,1518) + 4,76 O_2 \text{ livre}} \quad (3)$$

$$O_2 \text{ livre} = 0,2326 \text{ kmol/s} \quad (4)$$

```
In [15]: # Cálculo do volume de gases de combustão
Vgc = X + NCO2AF + Z
print('O Volume de gases de combustão V_gc = ' "{0:.4f}".format(Vgc), 'kmol/s')
O Volume de gases de combustão V_gc = 1.2198 kmol/s
```

```
In [16]: # Cálculo do O2 livre
O2_livre = 0.2326 #kmol/s
print('O valor para O2 livre = ' "{0:.4f}".format(O2_livre), 'kmol/s')
O valor para O2 livre = 0.2326 kmol/s
```

```
In [17]: O2 = O2_livre + a
print('O Novo valor para o Oxigênio = ' "{0:.4f}".format(O2), 'kmol/s')
O Novo valor para o Oxigênio = 0.5139 kmol/s
```

```
In [18]: N2 = 3.76 * O2 + Nn2
print('O Novo valor para o Nitrogênio = ' "{0:.4f}".format(N2), 'kmol/s')
O Novo valor para o Nitrogênio = 2.0264 kmol/s
```

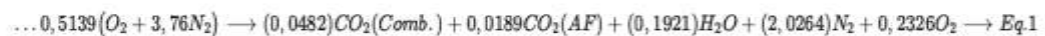
Valores de  $O_2$  e  $N_2$  para a equação de reação considerando  $O_2$  livre

$$O_2 = O_2 \text{ livre} + O_2 \text{ estequiométrico} = 0,5139 \text{ kmol/s} \quad (5)$$

$$N_2 = 3,76 \times O_2 \text{ livre} + N_2 \text{ estequiométrica} = 2,0264 \text{ kmol/s} \quad (6)$$

## Equação de reação considerando - $O_2$ livre

Equação de reação:



## Cálculo do Excesso de Ar

Equação para calcular o excesso de Ar:

$$\% \text{excesso de ar} = \frac{Ar_{real}}{Ar_{teórico}}$$

```
In [19]: Ex_ar = O2/a
print("A Eficiência da Turbina = ", "{0:.3f}".format(Ex_ar-1),)
print("A Eficiência da Turbina = ", "{0:.1f}".format((Ex_ar-1)*100), '%')
```

A Eficiência da Turbina = 0.827  
A Eficiência da Turbina = 82.7 %

Excesso de Ar será:

$$\% \text{excesso} - \text{de} - \text{ar} = 82,7\%$$

## Análise Energético - Equação de Balanço de Energia - EBE

### Temperatura Adiabática da Chama dentro da Fornalha

EBE:

$$\sum_{\text{reagentes}} \dot{n}_i [\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_r = \sum_{\text{produtos}} \dot{n}_i [\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_p$$

$$\sum_{\text{reagentes}} \dot{n}_i [\bar{h}_f^\circ + \bar{h}(T) - \bar{h}(T)_{ref}]_r = \sum_{\text{produtos}} \dot{n}_i [\bar{h}_f^\circ + \bar{h}(T) - \bar{h}(T)_{ref}]_p \rightarrow \text{Eq.2}$$

Os valores de calor de formação  $\bar{h}_f^\circ$  e valores da entalpia a temperatura de referência  $\bar{h}_{Tref}$ . Tabela A-23 - Moran.

substância	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{h}(T)_{ref}$ (kJ/kmol)
CO	-110530	-
CH <sub>4</sub>	-74850	-
O <sub>2</sub>	0	10809
N <sub>2</sub>	0	10763
CO <sub>2</sub>	-393520	12148

substância	$\bar{h}_f^\circ$ (kJ/kmol)	$\bar{h}(T)_{ref}$ (kJ/kmol)
H <sub>2</sub> O	-241820	12331

Aplicando a Eq.2 a cada elemento da Eq. 1:

$$\begin{aligned} &0,0446[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CO} + 0,0036[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CH_4} = \\ &\dots + 0,0482[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CO_2} \\ &\dots + 0,1921[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{H_2O} \\ &\dots + 2,0264[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{N_2} \\ &\dots + 0,2326[\bar{h}_f^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{O_2} \end{aligned}$$

```
In [22]: # Valores de calor de Formação:
hFCO = -110530 # kJ/kmol
hFCH4 = -74850 # kJ/kmol
hFO2 = 0 # kJ/kmol
hFN2 = 0 # kJ/kmol
hFCO2 = -393520 # kJ/kmol
hFH2O = -241820 # kJ/kmol

# Valores de temperatura de Referência
TrCO = 0 # kJ/kmol
TrCH4 = 0 # kJ/kmol
TrO2 = 10809 # kJ/kmol
TrN2 = 10763 # kJ/kmol
TrCO2 = 12148 # kJ/kmol
TrH2O = 12331 # kJ/kmol
```

Substituindo os valores da tabela, aplicando a Eq.2 a cada elemento da Eq. 1:

$$\begin{aligned} &0,0446 \times (-110530) + 0,0036 \times (-74850) = 0,0482 \times [-393520 - (\bar{h}_{CO_2}(T) - 12148)] + \dots \\ &\dots + 0,1921 \times [-241820 - (\bar{h}_{H_2O}(T) - 12331)] + 2,0264 \times [0 + (\bar{h}_{N_2}(T) - 10763)] + 0,2326 \times [0 + (\bar{h}_{O_2}(T) - 10809)] \end{aligned}$$

```
In [24]: reagente = 0.0446*(hFCO) + 0.1540*(hFCH4)
produtos = 0.0482*(hFCO2 - TrCO2) + 0.1921*(hFH2O - TrH2O) + 2.0264*(-TrN2) + 0.2326*(-TrO2)
RP = reagente - produtos
print("O valor dos reagentes = ", "{0:.2f}".format(reagente), 'kJ/kmol')
print ("O valor dos produtos = %.3f kJ/kmol" %produtos)
print ("O valor dos reagentes menos produtos :será = %.3f kJ/kmol" %RP)

O valor dos reagentes = -16456.54 kJ/kmol
O valor dos produtos = -92699.921 kJ/kmol
O valor dos reagentes menos produtos será = 76243.383 kJ/kmol
```

Podendo ser também:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(T) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(T) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(T) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(T) = 76243,383(kJ/kmol)$$

## Iteração 1: Assumindo T = 1000 K

Substituindo os valores do lado esquerdo para 1000 K. E verificando os valores da Tabela A-23 (Moran), obtemos:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(1000) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(1000) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(1000) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(1000) = 76243,383$$

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(42769) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(35882) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(30129) + \dots \\ \dots + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(31389) = 76243,383$$

$$77308,89 > 76243,383$$

```
In [34]: LE1 = 0.0482*42769 + 0.1921*35882 + 2.0264*30129 + 0.2326*31389
print("O valor do lado Esquerdo = ", "{0:.2f}".format(LE1), 'kJ/kmol')

O valor do lado Esquerdo = 77308.89 kJ/kmol
```

## Iteração 2: Assumindo T = 800 K

Substituindo os valores do lado esquerdo para 800 K. E verificando os valores da Tabela A-23 (Moran), obtemos:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(800) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(800) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(800) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(800) = 76243,383$$

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(32179) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(27896) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(23714) + \dots \\ \dots + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(24523) = 76243,383$$

$$60667,95 < 76243,383$$

```
In [33]: LE2 = 0.0482*32179 + 0.1921*27896 + 2.0264*23714 + 0.2326*24523
print("O valor do lado Esquerdo = ", "{0:.2f}".format(LE2), 'kJ/kmol')

O valor do lado Esquerdo = 60667.95 kJ/kmol
```

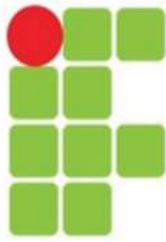
Interpolando entre T = 1000 K e T = 800 K:

h	T(K)
60667,95	800
76243,383	T
77308,89	1000

Obtemos a temperatura Adiabática de Chama.

T = 987,19 K

In [ ]:



**INSTITUTO FEDERAL  
MINAS GERAIS**

Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental -  
IFMG

Produto Técnico

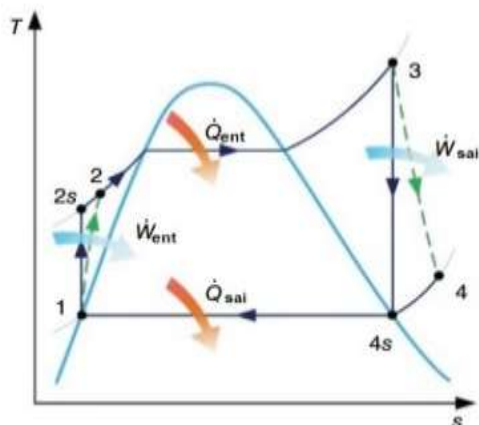
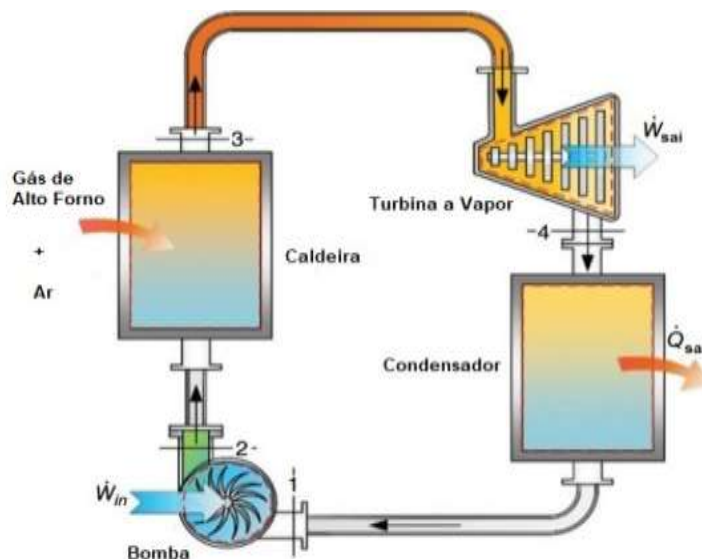
## Sistema de Cogeração em uma Indústria Siderúrgica

Mestrando: Moises Teles Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ricardo C. Carpio

Coorientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva

(Cogeração em uma Indústria Siderúrgica). Realizar um balanço térmico para um sistema de cogeração em uma indústria siderúrgica Não integrada. (Utilizando o programa COOLPROP para o cálculo das entalpias).



## Dados Fornecidos da Instalação:

### Dados Referentes ao vapor da Caldeira:

- Pressão do vapor Gerado na Caldeira P\_cald = 21 kgf/cm<sup>2</sup>
- Temperatura do vapor gerado na Caldeira T\_cald = 300 C
- Vazão de vapor Vazao = 20 ton/h

### Dados Referentes a água de alimentação (condensado) da Caldeira:

- Pressão de entrada na Caldeira P\_ent\_cald = 26 kgf/cm<sup>2</sup>
- Temperatura da água de entrada na Caldeira T\_ent\_cald = 90 C
- Vazão de água Vazao\_agua = 18,6 m<sup>3</sup>/h

### Dados referentes ao combustível e aos gases de combustão da Caldeira:

- Vazão do combustível Vcomb = 16363 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura dos gases de combustão TGC = 600°C
- %O<sub>2</sub> livre nos gases de combustão O2livre = 10%

### Dados referentes a Turbina:

- Pressão de entrada do vapor P\_turb\_ent = 21 kgf/cm<sup>2</sup>
- Pressão de saída do vapor P\_turb\_saida = 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>
- Temperatura de admissão do vapor T\_turb = 300 C
- Vazão de vapor que entra na turbina Vazao\_turb = 20 ton/h

### Dados referentes ao sistema de Condensação:

- Vazão do combustível Vcomb = 16363 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura dos gases de combustão TGC = 600°C
- %O<sub>2</sub> livre nos gases de combustão O2livre = 10%
  
- Temperatura de entrada do vapor TEC = 90 C
- Temperatura de saída da água TSC = 80 C
- Pressão de admissão no condensador P\_cond\_ent = 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>
- Pressão de saída no condensador P\_cond\_saida = 1 kgf/cm<sup>2</sup>
  
- Vazão no condensador Vazao\_cond = 2,52 m<sup>3</sup>/h

```
In [109]: import numpy as np
from CoolProp.CoolProp import PropsSI # importa o pacote coolprop para o código
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

In [110]: #Dados de entrada:

##### CALDEIRA #####
P_cald = 21 #kgf/cm2
P_ent_cald = 26.25 #kgf/cm2
T_cald = 380 # C
T_ent_cald = 90 # C

##### TURBINA #####
P_turb_ent = 21 #kgf/cm2
P_turb_saida = 1.5 # kgf/cm2 (Vapor saturado)
T_turb = 380 # C
Vazao_turb = 20 # ton/h

##### CONDENSADOR #####
P_cond_ent = 0.5 #kgf/cm2
TEC = 100 # C
TSC = 80 # C
P_cond_saida = 1 #kgf/cm2

##### VAZÃO DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DA CALDEIRA #####
Vazao_agua = 18.6 # m3/h

# Dados de conversão:
kgf = 98066.52 #Pascal
m3h = 0.28 #kg/s

```

Escrevendo as equações para cada processo, sendo estes:

Equação de Balanço de Massa - EBM

Equação de Balanço de Energia - EBE

Processo 1 - 2 - Bomba

EBM:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad (1)$$

EBE:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{bomba} = \dot{m}_2 h_2 \quad (2)$$

Processo 2 - 3 - Caldeira

EBM:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m} \quad (3)$$

EBE:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{Q}_{entra} = \dot{m}_3 h_3 \quad (4)$$

Processo 3 - 4 - Turbina

EBM:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m} \quad (5)$$

EBE:

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{W}_{turbina} + \dot{m}_4 h_4 \quad (6)$$

## Processo 4 - 1 - Condensador

EBM:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m} \quad (7)$$

EBE:

$$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{\text{out}} \quad (8)$$

Achando as Entalpias em cada Ponto do Processo.

Ponto 2:

```

20 [111. # Entrada de água na Caldeira - Líquido Comprimido

T2 = T_ent_cald + 273.15 # K
P2 = P_ent_cald*kgf # Pascal

h2 = (PropsSI('H', 'P', P2, 'T', T2, 'Water')/1000)
s2 = (PropsSI('S', 'P', P2, 'T', T2, 'Water')/1000)

print('Temperatura da água na entrada na Caldeira = ' "{0:.1f}".format(T2), "K")
print('Pressão da água na entrada na Caldeira = ' "{0:.4f}".format(P2), "Pascal")
print('Entalpia da água comprimida na entrada da caldeira h2 = ' "{0:.1f}".format(h2), "KJ/Kg")
print('Entropia da água comprimida na entrada da caldeira s2 = ' "{0:.3f}".format(s2), "KJ/Kg K")

Temperatura da água na entrada na Caldeira = 363.1 K
Pressão da água na entrada na Caldeira = 2574246.1500 Pascal
Entalpia da água comprimida na entrada da caldeira h2 = 379.8 KJ/Kg
Entropia da água comprimida na entrada da caldeira s2 = 1.191 KJ/Kg K

```

Ponto 3:

```

20 [130. # cálculo da entalpia do Vapor Superaquecido que sai na caldeira e entra na Turbina

T3 = T_turb + 273.15 # K

P3 = P_turb_ent * kgf #Pascal

h3 = (PropsSI('H', 'P', P3, 'T', T3, 'Water')/1000)
s3 = (PropsSI('S', 'P', P3, 'T', T3, 'Water')/1000)

print('Temperatura de entrada na Turbina = ' "{0:.1f}".format(T3), "K")
print('Pressão de entrada na Turbina = ' "{0:.4f}".format(P3), "Pascal")
print('Entalpia do Vapor Superaquecido na entrada da Turbina h3 = ' "{0:.1f}".format(h3), "KJ/Kg")
print('Entropia do Vapor Superaquecido na entrada da turbina s3 = ' "{0:.3f}".format(s3), "KJ/Kg K")

Temperatura de entrada na Turbina = 573.1 K
Pressão de entrada na Turbina = 2859396.9200 Pascal
Entalpia do Vapor Superaquecido na entrada da Turbina h3 = 3822.5 KJ/Kg
Entropia do Vapor Superaquecido na entrada da turbina s3 = 6.753 KJ/Kg K

```

Ponto 4:

```

20 [157. P4 = P_turb_saida * kgf #Pascal
s3 = s3*1000

h4 = PropsSI('H', 'P', P4, 'Q', 1, 'Water')/1000 #entalpia do vapor saturado
s4 = PropsSI('S', 'P', P4, 'Q', 1, 'Water')/1000 #entropia do vapor saturado
h4s = PropsSI('H', 'S', s3, 'P', P4, 'Water')/1000

print('Entalpia do Vapor Saturado na saída da turbina h4 = ' "{0:.4f}".format(h4), "KJ/Kg")
print('Entropia do Vapor Saturado na saída da turbina s4 = ' "{0:.4f}".format(s4), "KJ/Kg")

print('Entalpia Isentrópica da turbina h4s = ' "{0:.4f}".format(h4s), "KJ/Kg")

h4r = h3 - 0.7*(h3 - h4s) ##### Teste com Effic da turbina
print (h4r)

Entalpia do Vapor Saturado na saída da turbina h4 = 2692.2209 KJ/Kg
Entropia do Vapor Saturado na saída da turbina s4 = 7.2295 KJ/Kg
Entalpia Isentrópica da turbina h4s = 2589.1440 KJ/Kg
2589.1439882101713

```

Encontrar  $h_{4s}$ : Para uma  $P_4 = 1,5 \text{ kg/cm}^2$  e  $s_{4s} = s_3$ , Sabemos que:

$$x_4 = \frac{s_{4s} - s_f}{s_{fg}} \quad e \quad h_{4s} = h_f + x_4 h_{fg}$$

In [118]: #Calculando os valores da entalpia e entropia do líquido-vapor saturado no ponto 4:

```
hf = PropsSI('H','P',P4,'Q',0,'Water')/1000; #entalpia líquido saturado
hg = PropsSI('H','P',P4,'Q',1,'Water')/1000; #entalpia vapor saturado
hfg = hg - hf

sf = PropsSI('S','P',P4,'Q',0,'Water')/1000; #entropia do líquido saturado
sg = PropsSI('S','P',P4,'Q',1,'Water')/1000; #entropia do vapor saturado
sfg = sg - sf

print('Entalpia do líquido saturado hf = ' + "{0:.4f}".format(hf),"KJ/Kg")
print('Entalpia do vapor saturado hg = ' + "{0:.4f}".format(hg),"KJ/Kg")
print('Entalpia do líquido-vapor saturado hfg = ' + "{0:.4f}".format(hfg),"KJ/Kg")

print('Entropia do líquido saturado sf = ' + "{0:.4f}".format(sf),"kJ/Kg K")
print('Entropia do vapor saturado sg = ' + "{0:.4f}".format(sg),"kJ/Kg K")
print('Entropia do líquido-vapor saturado sfg = ' + "{0:.4f}".format(sfg),"kJ/Kg K")
```

```
Entalpia do líquido saturado hf = 464.6508 KJ/Kg
Entalpia do vapor saturado hg = 2692.2209 KJ/Kg
Entalpia do líquido-vapor saturado hfg = 2227.5701 KJ/Kg
Entropia do líquido saturado sf = 1.4273 kJ/Kg K
Entropia do vapor saturado sg = 7.2295 kJ/Kg K
Entropia do líquido-vapor saturado sfg = 5.8023 kJ/Kg K
```

In [119]: # Achando o valor de x4 e h4s:

```
s4s = s3
x4 = (s4s - sf)/sfg
h4s = hf + x4*hfg
print("O valor do título x4 = ", "{0:.4f}".format(x4))
print("Entalpia Isentrópica na saída da turbina h4s = ", "{0:.2f} kJ/kg".format(h4s))
```

```
O valor do título x4 = 0.9178
Entalpia Isentrópica na saída da turbina h4s = 2509.14 kJ/kg
```

### Ponto 1:

In [144]: # NA ENTRADA DO CONDENSADOR

```
P4c = P_cond_ent * kgf #Pascal
P1 = P_cond_saida *kgf #Pascal
T4c = TEC + 273 # Kelvin - temperatura de entrada no Condensador
T1 = TSC + 273 # Kelvin - temperatura de saída do condensador e entrada na Bomba
```

```
h4c = PropsSI('H','P',P4c,'T',T4c,'Water')/1000 #entalpia vapor saturado
s4c = PropsSI('S','P',P4c,'T',T4c,'Water')/1000 #entalpia vapor saturado
```

```
print('Entalpia de entrada do Vapor Saturado na entrada do condensador h4c = ' + "{0:.1f}".format(h4c),"KJ/Kg")
print('Entropia de entrada do Vapor Saturado na entrada do condensador s4c = ' + "{0:.4f}".format(s4c),"KJ/Kg K")
```

# SAÍDA DO CONDENSADOR ENTRADA DA BOMBA

```
h1 = PropsSI('H','P',P1,'T',T1,'Water')/1000 #entalpia vapor saturado
s1 = PropsSI('S','P',P1,'T',T1,'Water')/1000 #entalpia vapor saturado
```

```
print('Entalpia de saída da água saturada no condensador h1 = ' + "{0:.1f}".format(h1),"KJ/Kg")
print('Entropia de saída da água no condensador s1 = ' + "{0:.4f}".format(s1),"KJ/Kg")
```

# PARA O AR

```
Te = T_ar_ent = 27 + 273
Ts = T_ar_saida = 40 + 273
P = P_atm = 101325 # Pa
```

```
h_ar_ent = HAPropsSI('H','T', Te,'P',P,'R',0.35)/1000
s_ar_ent = HAPropsSI('S','T', Te,'P',P,'R',0.35)/1000
```

```
h_ar_sai = HAPropsSI('H','T', Ts,'P',P,'R',0.63)/1000
s_ar_sai = HAPropsSI('S','T', Ts,'P',P,'R',0.63)/1000
```

```
print('Entalpia do ar de entrada = ' + "{0:.4f}".format(h_ar_ent),"KJ/Kg")
print('Entalpia do ar de saída = ' + "{0:.4f}".format(h_ar_sai),"KJ/Kg")
```

```
print('Entropia do ar de entrada = ' + "{0:.4f}".format(s_ar_ent),"KJ/Kg K")
print('Entropia do ar de saída = ' + "{0:.4f}".format(s_ar_sai),"KJ/Kg K")
```

```
Entalpia de entrada do Vapor Saturado na entrada do condensador h4c = 2682.3 KJ/Kg
Entropia de entrada do Vapor Saturado na entrada do condensador s4c = 7.7838 KJ/Kg K
Entalpia de saída da água saturada no condensador h1 = 334.4 KJ/Kg
Entropia de saída da água no condensador s1 = 1.0738 KJ/Kg
Entalpia do ar de entrada = 46.7105 KJ/Kg
Entalpia do ar de saída = 116.8618 KJ/Kg
Entropia do ar de entrada = 0.1674 KJ/Kg K
Entropia do ar de saída = 0.4832 KJ/Kg K
```

## Cálculo da Potência Consumida pela Bomba

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} = 5,21 \text{ Kg/s} \quad (9)$$

```
In [121]: Vazao_agua = 18,6 # m3/h
mb = Vazao_agua*3600 # kg/s
print('A vazão de água na Bomba = ' "{0:.2f}".format(mb),"Kg/s")
```

A vazão de água na Bomba = 5.21 Kg/s

Potência Consumida pela Bomba:

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 5,21(378,97 - 334,42) = 232,04 \text{ kW} \quad (10)$$

```
In [122]: P_bomba = mb*(h2 - h1)
print('A Potência Consumida pela Bomba = ' "{0:.2f}".format(P_bomba),"kW")
```

A Potência Consumida pela Bomba = 232.04 kW

## Cálculo do Calor na Caldeira

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m} = 5,56 \text{ Kg/s} \quad (11)$$

```
In [123]: Vazao_vapor = 20 # ton/h
mv = Vazao_vapor*(1000/3600) # kg/s
print('A vazão de vapor gerado na caldeira = ' "{0:.2f}".format(mv),"kg/s")
```

A vazão de vapor gerado na caldeira = 5.56 Kg/s

Calor Gerado:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}(h_3 - h_2) = 14686,12 \text{ kW}$$

```
In [124]: Q_ent = mv*(h3 - h2)
print('O calor gerado na Caldeira = ' "{0:.2f}".format(Q_ent),"kW")
```

O calor gerado na Caldeira = 14686.12 kW

## Cálculo da Potência e Eficiência na Turbina

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m} = 5,55 \text{ Kg/s} \quad (12)$$

Potência de Energia Produzida (Potência de Eixo):

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}(h_3 - h_4) = 5,55(3022,48 - 2692,22) = 1834,77 \text{ kW} \quad (13)$$

```
In [126]: W = mv*(h3 - h4)
print('A Potência de eixo Produzida na Turbina = ' "{0:.2f}".format(W),"kW")
```

A Potência de eixo Produzida na Turbina = 1834.77 kW

Eficiência Isentrópica da Turbina:

$$\eta_{turb} = \frac{\dot{m}(h_3 - h_4)}{\dot{m}(h_3 - h_{4s})}$$

$$\eta_{turb} = \frac{5,55(3022,48 - 2692,22)}{5,55(3022,48 - 2509,14)} = 0,6434 = 64,34\%$$

```
In [127]: Eff_t = (h3 - h4)/(h3 - h4s)
print('A Eficiência da Turbina = ', "{0:.4f}".format(Eff_t),)
print('A Eficiência da Turbina = ', "{0:.2f}".format(Eff_t*100), '%')
```

A Eficiência da Turbina = 0.6434  
A Eficiência da Turbina = 64.34 %

## Cálculo da Eletricidade Gerada

$$\text{Potência Elétrica} = W_{\text{turbina}} \times \eta_{\text{gerador}}$$

```
In [156]: Eff_gerador = 85 #%
PE = (W * (Eff_gerador/100)) - P_bomba
print("A Potência Elétrica Gerada será = ", "{0:.4f}".format(PE), 'kW')
```

A Potência Elétrica Gerada será = 1327.5152 kW

## Cálculo do Calor que Sai no Condensador

Calor que sai:

$$\dot{Q}_{\text{sai}} = \dot{m}(h_{4c} - h_1) = 13043,49 \text{ kW}$$

```
In [78]: Q_sai = m * (h4c - h1)
print("O Calor que sai do condensador = ", "{0:.2f}".format(Q_sai), 'kW')
```

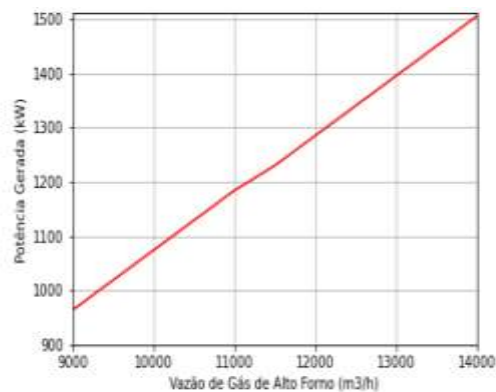
O Calor que sai do condensador = 12227.49 kW

## Variação de Gás de alto Forno - BFG

```
In [79]: X = [9000, 9500, 10000, 10500, 11000, 11500, 12000, 12500, 13000, 13500, 14000]
Y = [963.25, 1018.30, 1073.34, 1128.30, 1183.43, 1229.30, 1284.34, 1339.30, 1394.43, 1449.47, 1504.51]

plt.plot(X,Y,color = 'red')
plt.xlim(9000,14000)
plt.ylim(900,1510)

plt.xlabel("Vazão de Gás de Alto Forno (m3/h)")
plt.ylabel("Potência Gerada (kW)")
plt.grid()
plt.show()
```



In [ ]: