

DANIEL SOLFERINI DE CARVALHO

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE CO₂ E DE ENERGIA - SIMULAÇÃO COM
NOVAS TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS**

Guaratinguetá
2015

DANIEL SOLFERINI DE CARVALHO

ANÁLISE DE EMISSÕES DE CO₂ E DE ENERGIA - SIMULAÇÃO COM NOVAS
TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

Guaratinguetá
2015

DANIEL SOLFERINI DE CARVALHO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA"

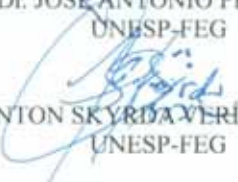
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP-FEG


Dr. ANTON SKYRDA VERÍSSIMO
UNESP-FEG

Janeiro de 2015

C331a	Carvalho, Daniel Solferini de Análise das emissões de CO₂ e de energia – simulação com novas tecnologias siderúrgicas / Daniel Solferini de Carvalho. - Guaratinguetá, 2014 104 f.: il. Bibliografia: f. 89-91 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014 Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior 1. Efeito estufa(Atmosfera) 2. Siderurgia 3. Dióxido de carbono I. Título CDU 536
-------	--

CARVALHO, D. S., **Análise das emissões de CO₂ e de energia – Simulação com novas tecnologias siderúrgicas**. 2015. 104 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

O processo de produção de aço emite uma grande quantidade de gases de efeito estufa, especificamente o dióxido de carbono (CO₂), e a redução dessas emissões é um dos principais desafios para a indústria do aço no século 21. Para quantificar essas emissões, a Worldsteel Association (associação das 170 grandes produtoras de aço do mundo) publicou um método (CO₂ Emission Data Collection) para cálculo e comparação das emissões de CO₂ entre seus membros. Posteriormente, em 2010, este método se tornou uma norma ISO (International Organization for Standardization, ou, em português, Organização Internacional para Padronização). Hoje, os cálculos das emissões de CO₂ na siderurgia seguem a ISO 14404-1 para usinas com alto forno e a ISO 14404-2 para usinas com forno elétrico. Nos últimos anos, novas tecnologias foram e continuam sendo desenvolvidas para o setor siderúrgico, visando melhorias energéticas e reduções das emissões de gases do efeito estufa (principalmente o CO₂) pelos diversos processos envolvidos na produção do aço. Este trabalho teve o objetivo de produzir uma ferramenta para calcular as emissões de CO₂ no setor siderúrgico. Uma planilha foi desenvolvida de maneira a permitir o cálculo das intensidades de emissões de CO₂ de uma usina, no caso a Usina Presidente Vargas, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), fornecendo resultados e fluxos energéticos e simulando os benefícios que algumas novas tecnologias podem proporcionar à empresa. A planilha calcula as emissões de duas maneiras: a) com base nos fluxos de carbono que entra na usina, e b) com base nas emissões de cada processo específico dentro da usina (coqueria, sinterização, alto forno, entre outros).

PALAVRAS-CHAVE: Efeito estufa, siderurgia, emissões de dióxido de carbono, fatores de emissão.

CARVALHO, D. S., **Folded profiles for use in structures of vehicle chassis**. 2015. 104 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The process of steel production emits a large quantity of greenhouse gases, specifically carbon dioxide (CO₂), and the reduction of such emissions is one of the main challenges for the industry in the 21st. Century. To quantify these emissions, the Worldsteel Association (association of the 170 large steel manufacturers of the world) published a methodology (CO₂ Emission Data Collection) for calculation and comparison of CO₂ emissions among its members. After that, in 2010, this methodology became an ISO (International Organization for Standardization) norm. Today, the calculation of the CO₂ emissions in steel making companies follow the ISO 14404-1 for units with blast furnaces and the ISO 14404-2 for units with electric furnaces. In the last years, new technologies were and continue to be developed for the steel making sector aiming at energetic improvements and greenhouse gas reductions (mainly CO₂) by the several processes involved in the production of steel. This work had the objective of producing a tool to calculate the CO₂ emissions for the steel making sector. An Excel spreadsheet was developed to calculate the emission intensities of CO₂ of a steel plant, the Usina Presidente Vargas, of the Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). The spreadsheet furnishes results of CO₂ emissions and energetic fluxes, and simulates the benefits that some of the new technologies can give to the company. The spreadsheet calculates the emissions in two ways: a) based on the carbon fluxes that enter the unit, and b) based on the emissions of each specific process within the unit (coking, sinterization, blast furnace, among others).

KEYWORDS: Greenhouse effect, steel making, emissions of carbon dioxide, emission factors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O efeito estufa. Os números mostram fluxos relativos aproximados de energia em unidades arbitrárias; a radiação incidente do Sol na Terra é 100. (GARRETT, 1992).....	14
Figura 2.2 – Concentrações de CO ₂ atmosférico através dos anos. (ARCE, 2008)	15
Figura 2.3 – Variação da massa específica do ar com a altitude. (U.S. STANDARD ATMOSPHERE, 1976)	19
Figura 2.4 – Tamanho relativo da atmosfera (Fonte: Nasa, 31/05/2011. Foto tirada por astronautas da ISS, International Space Station. Imagem tirada quando o ônibus espacial Endeavour ainda se encontrava acoplado à ISS).	20
Figura 2.5 – Variação do percentual de massa acumulada de ar com a altitude.	20
Figura 3.1 – Fluxo simplificado de produção de aço. (Fonte: http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp)	24
Figura 3.2 – Esquema de um forno de pelletização. (Fonte: Samarco)	25
Figura 3.3 – Fotografia da lateral de um forno de pelletização. (Fonte: Vale) ...	26
Figura 3.4 – Pelotas (ou pellets) (Fonte: http://www.ternium.com/en/products-pellets/)	26
Figura 3.5 – Esquema de uma máquina de sinterização. (LIU et al., 2012)	27
Figura 3.6 – Fotografia de uma máquina de sinterização. (Fonte: ArcelorMittal Tubarão)	27
Figura 3.7 – Sinter (Fonte: http://www.dk-duisburg.de/en/prozess/sinteranlage.html)	28
Figura 3.8 – Processo de coqueificação, (JARDIM, 1991)	29
Figura 3.9 – Unidade de coqueria convencional. (DUPV, 2004)	29
Figura 3.10 – Coque no interior de um forno. (DUPV, 2004)	30
Figura 3.11 – Aspecto final do coque. (ABREU, 2011)	30
Figura 3.12 – Interior de um alto forno. (Fonte: http://hugofrancino.wordpress.com/siderurgicas/)	32
Figura 3.13 – Desenho esquemático do processo de injeção de carvão	

pulverizado. (SILVA, 2006)	33
Figura 3.14 – Regiões, temperaturas e reações dentro de um alto forno. (NOBLAT, 2005)	33
Figura 3.15 – Vista do alto forno número 3 da CSN, destacando o contorno do reator. (SILVA, 2008)	34
Figura 3.16 – Equipamentos principais da redução. (Fonte: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/blast_furnace.html)	35
Figura 3.17 – Conversor LD em posição de sopro. (MOREIRA e LANA, 2002)	37
Figura 3.18 – Carregamento de sucata no conversor LD. (MOREIRA e LANA, 2002)	38
Figura 3.19 – Carregamento de gusa. (MOREIRA e LANA, 2002)	38
Figura 3.20 - Esquema de uma unidade de lingotamento contínuo (1 - Panela, 2 - Distribuidor, 3 e 6 - Moldes, 4 e 5 - Eletrodos, 7 - Rolos extratores). (Fonte: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfFA4AE/lingotamento-contínuo)	40
Figura 3.21 – Laminação. (Fonte: https://sites.google.com/site/epdprocessos/laminacao)	41
Figura 3.22 – Bobinas. (Fonte: http://ficadicanoticias.blogspot.com.br/2012/09/fornecedor-do-ano-da-volkswagen.html)	42
Figura 4.1 – Membros da WorldSteel Association.	45
Figura 4.2 – UPV, município de Volta Redonda, sem a delimitação de uma fronteira. (Fonte da fotografia: Google Maps)	45
Figura 4.3 – UPV, município de Volta Redonda, com a delimitação de uma fronteira. (Fonte da fotografia: Google Maps)	46
Figura 4.4 – Categoria 1, instalações essenciais.	47
Figura 4.5 – Categoria 2, instalações que operam dentro do limite (fronteira) ou podem ser terceirizadas.	47
Figura 4.6 – Categoria 3, instalações não essenciais.	48
Figura 4.7 – Exemplo de fluxos de insumos e energéticos.	49
Figura 4.8 – Emissões diretas.	53

Figura 4.9 – Emissões indiretas.	53
Figura 4.10 – Emissões de créditos.	54
Figura 5.1 – Esquema do processo de apagamento a seco. (Fonte: http://ietd.iipnetwork.org/content/coke-dry-quenching)	66
Figura 5.2 – Esquema do processo de diminuição do teor de umidade do carvão. (Fonte: http://ietd.iipnetwork.org/content/coal-moisture-control)	67
Figura 5.3 – Esquema da tecnologia de pré-aquecimento dos gases combustíveis. (SIEMENS-VAI, 2013)	68
Figura 5.4 – Esquema da recuperação de calor residual na sinterização. (SIEMENS-VAI, 2013)	69
Figura 5.5 – Turbina de topo. (Fonte: http://ietd.iipnetwork.org/content/top-pressure-recovery-turbines)	70
Figura 5.6 – O processo de granulação a seco da escória. (SIEMENS-VAI, 2013)	70
Figura 5.7 – Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores. (SIEMENS-VAI, 2013)	71
Figura 5.8 – Processo atual de resfriamento e armazenamento do gás de aciaria. (SIEMENS-VAI, 2013).	72
Figura 5.9 – Opção A. (SIEMENS-VAI, 2013)	73
Figura 5.10 – Opção B. (SIEMENS-VAI, 2013)	73
Figura 5.11 – Opção C. (SIEMENS-VAI, 2013)	74
Figura 5.12 – Caldeiras do tipo Smoke-Tube, opção D. (SIEMENS-VAI, 2013)	75
Figura 5.13 – Opção E. (SIEMENS-VAI, 2013)	76
Figura 5.14 – Sistema de queimadores regenerativos. (Fonte: http://www.osakagas.co.jp/rd/use/066e.html)	77
Figura 6.1 – Emissões de CO ₂ da UPV.	79
Figura 6.2 – Créditos internos da UPV.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características do Carvão CSN (Fonte: CSN).....	51
Tabela 4.2 – Fatores de conversão ISO 14404-1 e fatores de conversão CSN (Fonte: planilha Excel de análise de emissões de CO ₂ e de energia para a UPV para simulação de novas tecnologias siderúrgicas, elaborada neste trabalho)..	56
Tabela 4.3 – Fatores de emissão direta fornecidos pelo manual CO ₂ <i>Emissions Data Collection</i> . (Fonte: http://www.worldsteel.org/)	58
Tabela 4.4 – Fatores de emissão indiretos. (Fonte: http://www.worldsteel.org/)	58
Tabela 4.5 – Médias dos equivalentes caloríficos de 2010 a 2012, para CSN. (Fonte: Balanço Energético Geral da CSN)	59
Tabela 4.6 – Uso de nitrogênio pelas categorias 1 e 2, sem utilidades.	61
Tabela 4.7 – Uso de nitrogênio pelas categorias 3 e 4, sem utilidades.	61
Tabela 4.8 – Uso do nitrogênio pelas utilidades.	62
Tabela 4.9 – Soma e porcentagem relacionada a cada categoria (sem utilidades).	62
Tabela 4.10 – Distribuição de energia elétrica, vapor e ar soprado utilizado nas categorias 1 a 4 da CSN.	64
Tabela A1 – Produção de cada unidade industrial e consumo de ar comprimido, ar soprado, oxigênio, argônio e nitrogênio. Anos 2010 – 2012. ...	93
Tabela A2 – Consumo de água e vapor. Anos 2010 – 2012.	95
Tabela A3 – Consumo de energia elétrica e de derivados de carvão. Anos 2010 – 2012.	97
Tabela A4 – Consumo de GCO, GAF, GLD, óleo leve, alcatrão e carvão de PCI. Anos 2010 – 2012.	99
Tabela A5 – Consumo de carvão metalúrgico, GN, óleos combustíveis, diesel, e GLP. Anos 2010 – 2012.	101
Tabela A6 – Consumo energético total e metalurgia. Ano 2010 – 2012.	103

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	EFEITO ESTUFA	13
2.1	Causas do efeito estufa	13
2.2	Gases de efeito estufa	16
2.2.1	Vapor de água (H₂O)	16
2.2.2	Dióxido de carbono (CO₂)	16
2.2.3	Metano (CH₄)	17
2.2.4	Óxido nitroso (N₂O)	17
2.2.5	Outros gases	18
2.3	Massa de dióxido de carbono na atmosfera terrestre	19
3.	O PROCESSO SIDERÚRGICO.....	22
3.1	O aço	22
3.1.1	Formação do gás redutor	23
3.1.2	Redução dos óxidos de ferro	23
3.2	Etapas do processo siderúrgico	24
3.2.1	A carga do alto forno	24
3.2.2	Redução	31
3.2.3	Refino	36
3.2.4	Laminação	41
4.	METODOLOGIA	43
4.1	Informações introdutórias	43
4.2	Metodologia ISSO 14404-1	44
4.3	Definição de limite	44
4.4	Instalações	46
4.5	Fluxos de massa e energia	48
4.6	Fatores de conversão	48
4.7	Fontes de emissão	52
4.7.1	Emissões diretas	52
4.7.2	Emissões indiretas (ou <i>upstream</i>)	52

4.7.3	Emissões de créditos	54
4.8	Cálculo	56
4.9	Tabela de fatores de conversão	56
4.10	Cálculo energético	57
4.10.1	Método WorldSteel	57
4.10.2	Método utilizado pela CSN	57
4.11	Cálculo para a metalurgia	60
4.12	Cálculo, para metalurgia, para combustíveis utilizados nas unidades geradoras de energia elétrica e vapor	63
5.	TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS PARA ECONOMIA DE ENERGIA	65
5.1	Coqueria	65
5.1.1	Apagamento a seco do coque	65
5.1.2	Controle de umidade do carvão	66
5.1.3	Pré-aquecimento dos gases combustíveis	67
5.2	Sinterização	68
5.2.1	Recuperação de calor residual	68
5.3	Alto forno	69
5.3.1	Turbina de topo (TRT)	69
5.3.2	Granulação a seco da escória de alto forno	69
5.3.3	Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores	69
5.4	Aciaria	71
5.4.1	Recuperação de calor do gás de aciaria	71
5.4.1.1	Opção A	72
5.4.1.2	Opção B	73
5.4.1.3	Opção C	74
5.5	Laminação de tiras a quente (LTQ)	74
5.5.1	Aproveitamento de calor residual da LTQ	74
5.5.1.1	Opção D	74
5.5.1.2	Opção E	75

5.5.2	Queimadores regenerativos	76
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
6.1	Emissões de CO ₂ total e de metalurgia	78
6.2	Simulação das tecnologias para a coqueria	80
6.2.1	Apagamento a seco do coque	80
6.2.2	Controle de umidade do carvão	80
6.2.3	Pré-aquecimento dos gases	81
6.3	Simulação das tecnologias para a sinterização	82
6.3.1	Recuperação de calor residual	82
6.4	Simulação das tecnologias para o alto forno	83
6.4.1	Turbina de topo (TRT)	83
6.4.2	Granulação a seco da escória de alto forno	83
6.4.3	Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores.....	84
6.5	Simulação das tecnologias para a aciaria	84
6.5.1	Recuperação de calor do gás de aciaria	84
6.5.1.1	Opção A	84
6.5.1.2	Opção B	85
6.5.1.3	Opção C	85
6.6	Simulação das tecnologias para a laminação de tiras a quente (LTQ)	86
6.6.1	Opção D	86
6.6.2	Opção E	86
6.6.3	Queimadores regenerativos	87
7.	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE	88

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, novas tecnologias foram e continuam sendo desenvolvidas para o setor siderúrgico, visando melhorias energéticas e reduções das emissões de gases do efeito estufa (principalmente o CO₂) pelos diversos processos envolvidos na produção do aço.

Este trabalho teve o objetivo de produzir uma ferramenta para calcular as emissões de CO₂ no setor siderúrgico. Uma planilha foi desenvolvida de maneira permitir o cálculo das intensidades de emissões de CO₂ de uma usina, no caso a Usina Presidente Vargas, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), fornecendo resultados e fluxos energéticos e simulando os benefícios que algumas novas tecnologias podem proporcionar à empresa. A planilha calcula as emissões de duas maneiras: a) com base nos fluxos de carbono que entra na usina, e b) com base nas emissões de cada processo específico dentro da usina (coqueria, sinterização, alto forno, etc.).

No Capítulo 2, o efeito estufa é discutido, apresentando suas causas, os gases que o constituem e o total de CO₂ presente na atmosfera terrestre. Em seguida, no Capítulo 3, descreve-se o processo siderúrgico de uma usina integrada. O Capítulo 4 apresenta a metodologia de cálculo utilizada no trabalho. O Capítulo 5 apresenta as tecnologias siderúrgicas que podem ser utilizadas para economizar energia e diminuir as emissões de CO₂. O Capítulo 6 apresenta os resultados e a discussão dos mesmos, mostrando qual tecnologia é a mais atrativa. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho.

2. EFEITO ESTUFA

2.1 Causas do efeito estufa

O efeito estufa é um processo causado por gases de efeito estufa, que ocorrem naturalmente na atmosfera. Este processo tem um papel crucial no aquecimento da superfície da Terra, o que a torna habitável. Os principais gases do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), vapor d'água (H_2O) e gases fluorados (HFC, PFC, SF_6) (JACOB, 1999; GARRETT, 1992; SCHNEIDER, 1989).

No entanto, as emissões de gases de efeito estufa gerados pelos homens, da maneira como é feita atualmente, perturbam o equilíbrio natural do nosso sistema e leva ao aumento da temperatura da atmosfera baixa e da superfície da Terra.

O efeito estufa ocorre da seguinte maneira (GARRETT, 1992):

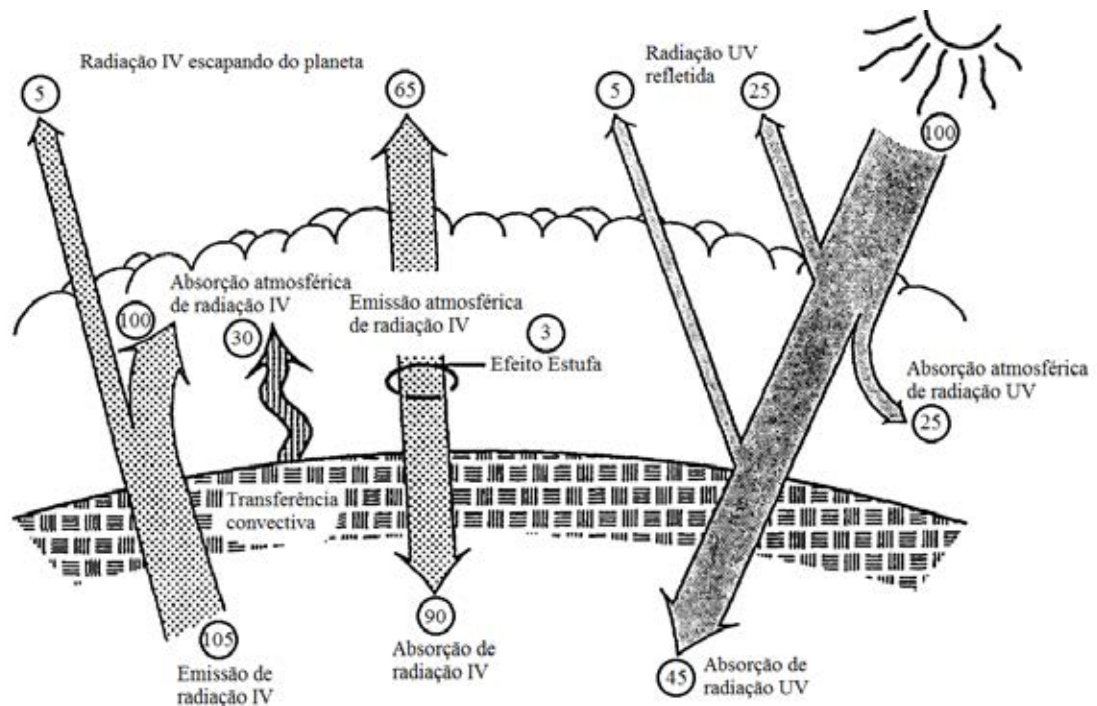
- a) Em primeiro lugar, o Sol emite energia que é transmitida para Terra. A energia é emitida em comprimentos de onda curtos (ultravioleta, UV) que penetram a atmosfera da Terra.
- b) Cerca de 30% da energia do Sol é refletida diretamente de volta para o espaço pela atmosfera, nuvens e a superfície da Terra. O restante da energia do Sol é absorvido no sistema da Terra.
- c) A Terra emite energia na atmosfera. Por ser a Terra mais fria do que o Sol, a energia é emitida na forma de radiação infravermelha (IV), com comprimentos de onda mais longos do que a energia solar incidente.
- d) Gases de efeito estufa na atmosfera absorvem a maior parte da energia de onda longa emitida a partir da superfície da Terra, impedindo-a de imediato de escapar do sistema terrestre. Os gases de efeito estufa, em seguida, reemitem essa energia em todas as direções, aquecendo a superfície da Terra e a baixa atmosfera.

A Figura 2.1 ilustra os fluxos envolvidos no processo. Figuras similares encontram-se na internet e diversas referências da literatura (CUNNINGHAM e

CUNNINGHAM, 2004; HINRICHS e KLEINBACH, 2002; JACOB, 1999; SEINFELD e PANDIS, 1998; SCHNEIDER, 1989).

Figura 2.1 – O efeito estufa. Os números mostram fluxos relativos aproximados de energia em unidades arbitrárias; a radiação incidente do Sol na Terra é 100.

(GARRETT, 1992)



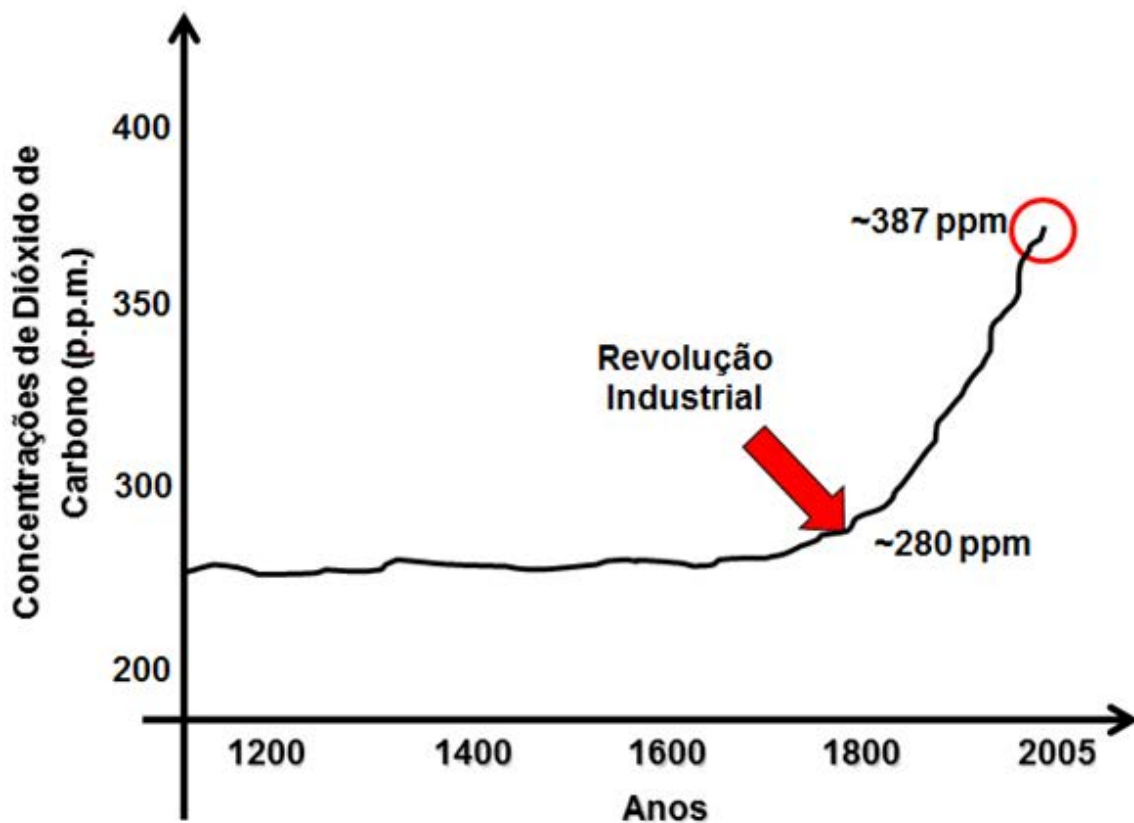
A concentração atmosférica de gases de efeito estufa tem aumentado ao longo dos últimos dois séculos, em grande parte devido às emissões de dióxido de carbono (CO_2) gerado pela queima de combustíveis fósseis. Este aumento tem ampliado o efeito estufa natural, prendendo mais da energia emitida pela Terra. Esta alteração faz com que a temperatura da superfície da Terra aumente.

Dois dos principais gases de efeito estufa, o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), incluem o elemento carbono em sua estrutura atômica. O carbono é um elemento natural que pode ser encontrado na atmosfera da Terra, na biosfera, corpos d'água, nas rochas e sedimentos. A troca de carbono entre os componentes terrestres envolvem processos que removem carbono da atmosfera, tais como a fotossíntese, processos que liberam carbono na atmosfera, tais como a respiração, e também de

outras formas, como entre o oceano e a atmosfera (ARCE, 2008). Antes da revolução industrial, essas trocas eram aproximadamente equilibradas.

Muitas atividades humanas, principalmente as industriais, liberam carbono na atmosfera como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). O carbono, que foi gradualmente armazenado em carvão, petróleo e gás ao longo de milhões de anos, está sendo liberado para a atmosfera em apenas alguns séculos devido a essas atividades humanas. Cerca de metade do dióxido de carbono é absorvida pela biosfera e nos oceanos (ARCE, 2008). O restante permanece na atmosfera. O CO_2 que os seres humanos têm adicionado à atmosfera causou um aumento na concentração atmosférica do gás. A Figura 2.2 mostra o aumento da concentração média de CO_2 atmosférico através dos anos.

Figura 2.2 – Concentrações de CO_2 atmosférico através dos anos. (ARCE, 2008)



2.2 Gases de efeito estufa

2.2.1 Vapor de água (H₂O)

O vapor d'água é o gás de efeito estufa mais abundante e também o mais importante em termos de sua contribuição para o efeito estufa natural, apesar de ter uma vida atmosférica curta (<http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>). Algumas atividades humanas podem influenciar nos níveis de vapor de água locais. No entanto, em uma escala global, a concentração de vapor de água é controlada pela temperatura, que influencia as taxas globais de evaporação e precipitação.

A concentração global de vapor d'água não é substancialmente afetada pela emissão pelos humanos e ele age como age como *feedback* para o clima, sendo seu efeito global nulo (HELD e SODEN, 2000). A quantidade de vapor d'água aumenta quando a atmosfera da Terra aquece, mas também aumenta a formação de nuvens e a precipitação, criando o mais importante mecanismo de *feedback* para o efeito estufa.

2.2.2 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é o gás de efeito estufa que mais contribui para a mudança climática recente (PRENTICE et al., 2005). O CO₂ é absorvido e emitido naturalmente como parte do ciclo de carbono. As atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, acarretam na liberação de grandes quantidades de carbono para a atmosfera em forma de CO₂, fazendo com que as concentrações na atmosfera subam.

As concentrações atmosféricas de CO₂ aumentaram em quase 40% desde os tempos pré-industriais, a partir de cerca de 280 partes por milhão (ppm), no século 18 a 390 ppm 2010. O nível de CO₂ atual é maior do que tem sido em pelo menos 800 mil anos.

Algumas erupções vulcânicas lançaram grandes quantidades de CO₂ no passado distante (<http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>). No entanto, o Serviço Geológico dos EUA (USGS) informa que as atividades humanas emitem atualmente CO₂ a uma taxa 135 vezes superior à quantidade de emissões dos vulcões a cada ano. As atividades humanas liberam atualmente mais de 30 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera a cada ano (ARCE, 2008).

2.2.3 Metano (CH₄)

O metano (CH₄) é o segundo gás de efeito estufa mais importante. Em 2011, foi responsável por 9% de todas as emissões de gases de efeito estufa dos Estados Unidos decorrentes de atividades humanas (<http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>). O metano é emitido por fontes naturais, como as zonas úmidas, bem como as atividades humanas, tais como vazamento de sistemas de gás natural e a criação de gado. Os processos naturais no solo e reações químicas na atmosfera ajudar a remover CH₄ da atmosfera. A vida de metano na atmosfera é muito mais curta do que o dióxido de carbono (CO₂), mas o metano é mais eficiente na captura de radiação do que o CO₂. O impacto comparativo de CH₄ sobre a mudança climática é 21 vezes maior do que o CO₂ durante um período de 100 anos (JACOB, 1999).

2.2.4 Óxido nitroso (N₂O)

Em 2011, o óxido nitroso (N₂O) representou 5% das emissões de gases de efeito estufa dos Estados Unidos (<http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>). O óxido nitroso está presente naturalmente na atmosfera, como parte do ciclo do nitrogênio da terra, e tem uma variedade de fontes naturais. No entanto, as atividades humanas, como a agricultura, a queima de combustíveis fósseis, a gestão de águas residuais e processos industriais estão aumentando a quantidade de N₂O na atmosfera.

Moléculas de óxido nitroso permanecem na atmosfera por uma média de 120 anos antes de serem removidas. O impacto de uma quantidade de N_2O aquecendo a atmosfera é 310 vezes maior que a mesma quantidade de dióxido de carbono (JACOB, 1999).

2.2.5 Outros gases

Ozônio troposférico (O_3) é também um gás de efeito estufa (<http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html>), apesar de ter um tempo de vida atmosférico menor que dos outros gases. As reações químicas criam ozônio das emissões de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis de automóveis, usinas de energia e outras fontes industriais e comerciais, na presença de luz solar. Além de reter o calor, o ozônio é um poluente que pode causar problemas de saúde respiratórios, às colheitas e em ecossistemas.

Os clorofluorcarbonos (CFCs ou HCFC), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), juntamente chamado F-gases, são frequentemente usados em refrigerantes, agentes espumantes, extintores de incêndio, solventes, pesticidas e propulsores de aerossol. Ao contrário do vapor d'água e do ozônio, esses F-gases têm uma vida longa na atmosfera, e alguns dessas emissões podem afetar o clima por muitas décadas ou séculos (SEINFELD e PANDIS, 1998).

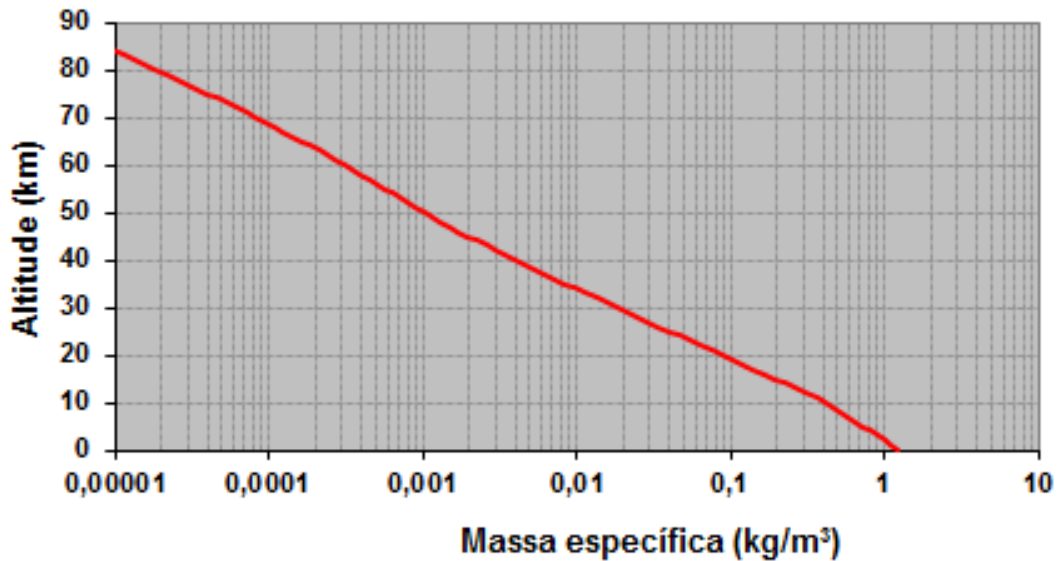
2.3 Massa de dióxido de carbono na atmosfera terrestre

A tabela que fornece a massa específica do ar como função da altitude na atmosfera terrestre (U.S. STANDARD ATMOSPHERE, 1976) foi utilizada para calcular a massa de dióxido de carbono na atmosfera.

A Figura 2.3 mostra a variação da massa específica do ar em relação à altitude. Observa-se que o valor da massa específica a 83 km é aproximadamente 10^{-5} vezes o valor ao nível do mar, e a espessura da atmosfera pode ser aproximada como sendo

correspondente a essa altitude. Assim, como o raio médio da Terra é 6400 km, a atmosfera é um “cobertor” com espessura de 1,3% desse raio. A Figura 2.4 mostra uma fotografia que deixa claro onde termina a atmosfera da Terra.

Figura 2.3 – Variação da massa específica do ar com a altitude. (U.S. STANDARD ATMOSPHERE, 1976)



Primeiramente, a massa de ar foi calculada, considerando intervalos de 100 m até 60 km de altura e de 1000 m entre 60 e 83 km de altura. Em cada intervalo, a massa correspondente, Δm (kg), é dada por

$$\Delta m = \rho \frac{4}{3} \pi [(6400000 + h + \Delta h)^3 - (6400000 + h)^3], \quad (2.1)$$

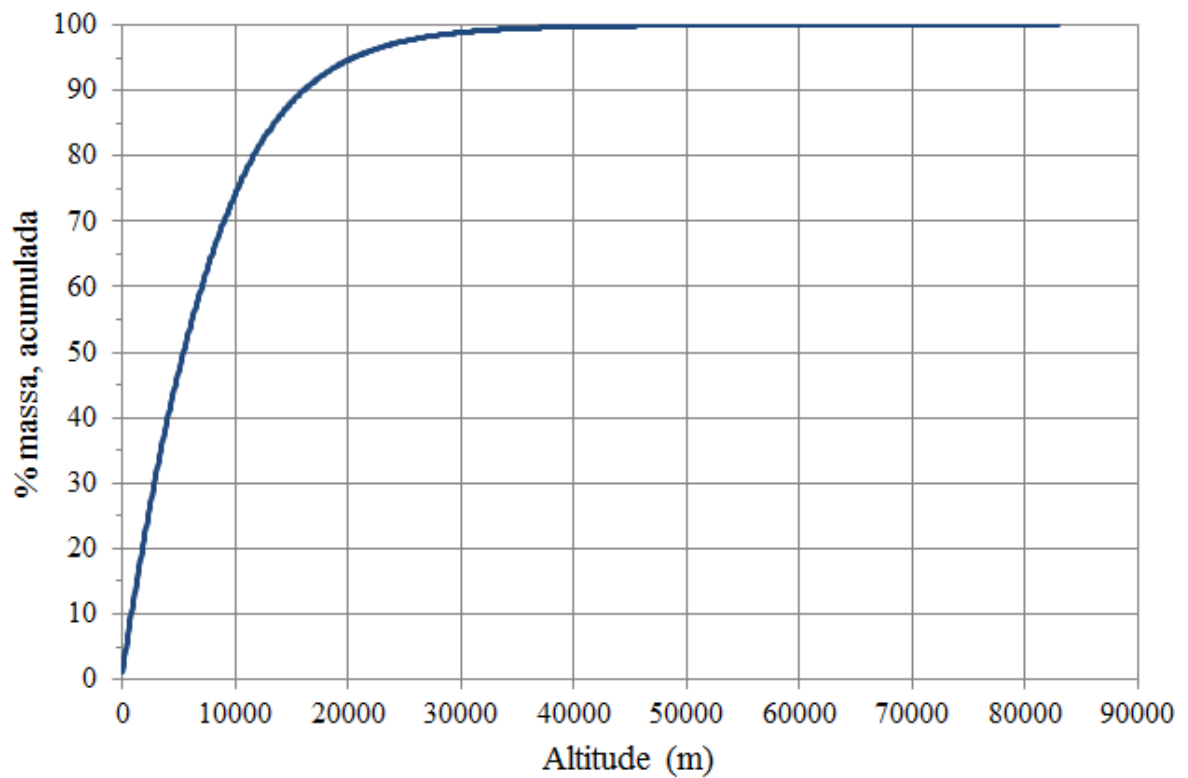
na qual ρ (kg/m³) é a massa específica correspondente à altitude h (m) e Δh (m) é o intervalo.

Assim, a massa de ar na atmosfera é estimada em $5,33 \times 10^9$ Mt. A Figura 2.5 mostra o percentual da massa de ar até uma altitude h . Observa-se, na figura, que abaixo de 16 km de altitude, tem-se 90% da massa da atmosfera. Abaixo de 30 km de altitude, tem-se 98,8% da massa. A partir da tabela que gerou a figura, nota-se que 99,99% da massa de ar da atmosfera estão abaixo da altitude de 65 km.

Figura 2.4 – Tamanho relativo da atmosfera (Fonte: Nasa, 31/05/2011. Foto tirada por astronautas da ISS, International Space Station. Imagem tirada quando o ônibus espacial Endeavour ainda se encontrava acoplado à ISS).



Figura 2.5 – Variação do percentual de massa acumulada de ar com a altitude.



Considerando o ar como composto, em base volumétrica, por 78% de nitrogênio (N_2 , massa molecular = 28 g/gmol), 21% de oxigênio (O_2 , massa molecular = 32 g/gmol) e 1% de argônio (Ar, massa molecular = 40 g/gmol) (JACOB, 1999), sua massa molecular fica: $M = 0,78 \times 28 + 0,21 \times 32 + 0,01 \times 40 = 28,96$ g/gmol. O número de mols de ar na atmosfera é, então, $n = m/M = 5,33 \times 10^9 \times 10^{12} / 28,96 = 1,84 \times 10^{20}$ mols. Com a concentração atmosférica de CO_2 de 387 ppm em volume (ARCE, 2008), e considerando que a massa molecular do gás é 44 g/gmol, sua massa na atmosfera é estimada em $m_{CO_2} = 387 / 10000000 \times 1,84 \times 10^{20} \times 44 \times 10^{-12} = 3,13 \times 10^6$ Mt.

3. O PROCESSO SIDERÚRGICO

3.1 O aço

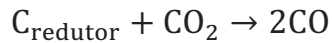
O aço é um dos principais materiais estruturais no mundo moderno. É usado praticamente em todos os setores da indústria, desde a automotiva, a de construção civil, naval e de máquinas pesadas, até em aplicações em eletrodomésticos, computadores e eletrônicos (ABREU, 2011).

O processo de fabricação do aço requer a redução do número de oxigênios dos óxidos de ferro aglomerados (minério de ferro), os quais podem estar nas formas mais comuns em óxidos de ferro, por exemplo, hematita (Fe_2O_3) ou magnetita (Fe_3O_4). O método mais antigo (e ainda mais utilizado atualmente) é a redução do óxido de ferro por carbono, no qual são necessárias altas temperaturas e ambiente com pouco oxigênio (ABREU, 2011; SILVA, 2006).

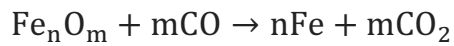
Antigamente, os fornos utilizados para obtenção do ferro líquido eram pequenos, com volumes não muito superiores a alguns metros cúbicos e de funcionamento manual. Os fornos utilizados hoje, chamados de altos fornos, são em sua totalidade automatizados e podem atingir dimensões de até centenas de metros cúbicos de volume interno. Até o século XVIII, os fornos utilizavam apenas carvão vegetal como fonte de carbono e combustível, posteriormente e de forma gradual, o carvão vegetal foi sendo substituído pelo coque, que é o produto sólido da pirólise do carvão mineral (MOURÃO et al., 2007).

O carvão dentro de um alto forno exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$) necessárias à fusão do minério (<http://www.acobrasil.org.br/>). Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. A redução do minério de ferro ocorre através de dois processos, a formação de gás redutor e redução dos óxidos de ferros. As reações principais são mostradas a seguir:

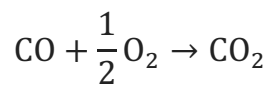
7.1.1 Formação do gás redutor



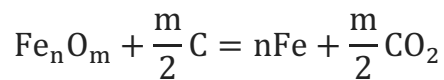
7.1.2 Redução dos óxidos de ferro



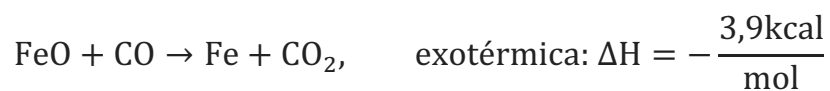
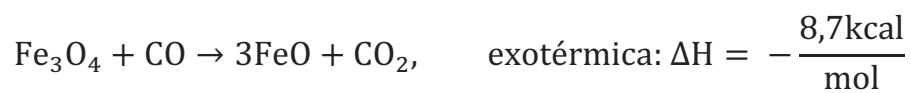
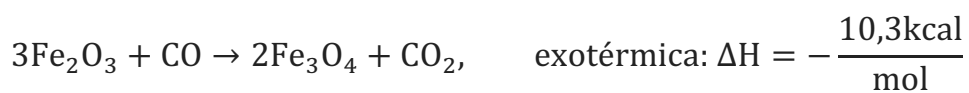
O ar admitido ao longo do forno queima o CO:



A reação global é então:



A redução da hematita, Fe_2O_3 , pelo CO é realizada em estágios, conforme as seguintes reações:

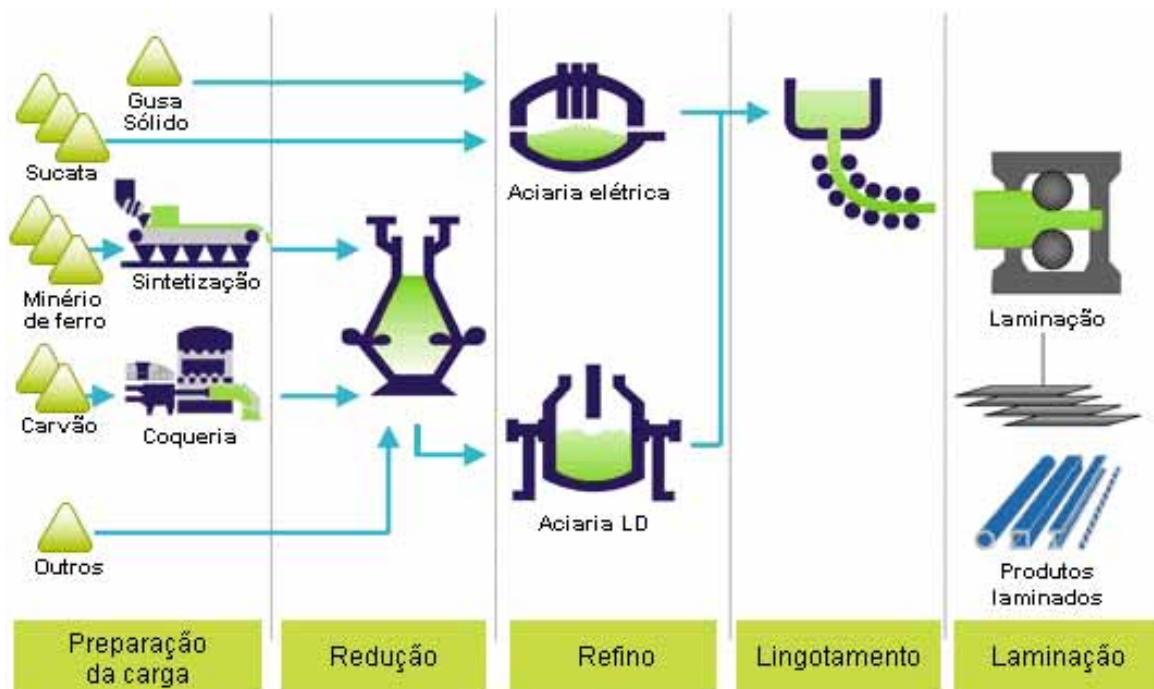


3.2 Etapas do processo siderúrgico

O aço é produzido, basicamente, a partir do minério de ferro, carvão e cal. Conforme a Figura 3.1, a fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação.

Figura 3.1 – Fluxo simplificado de produção de aço. (Fonte:

<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>)



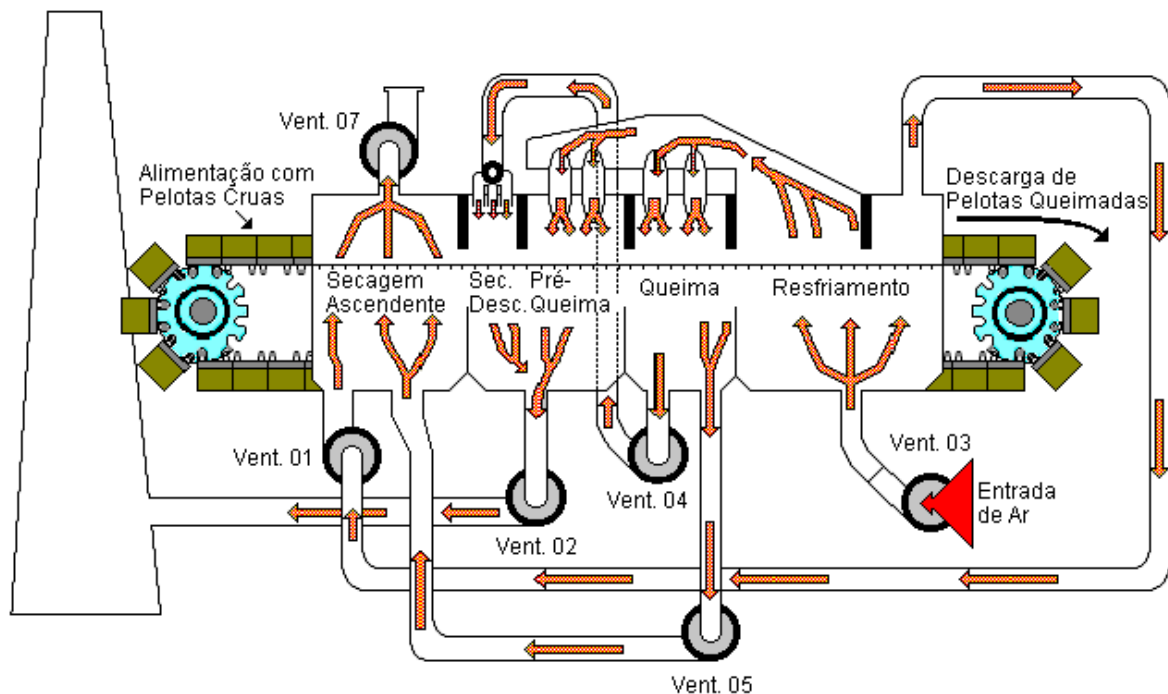
3.2.1 A carga do alto forno

O alto forno não pode ser carregado com material fino, pois esse material poderia tanto ser levado pelos gases ascendentes durante o processo de fabricação do gusa, como também dificultar a passagem dos gases pela carga (podendo aumentar a pressão interna no forno a níveis críticos) (SILVA, 2006).

Existem dois processos principais de aglomeração de minério de ferro, que são a pelletização e a sinterização (CARVALHO, 2011). A pelletização, que é a aglomeração de partículas de minério de tamanhos inferiores a 0,15 mm, é realizada

em geral nas próprias mineradoras, que produzem um aglomerado chamado pelota (ou *pellet*). A Figura 3.2 mostra o esquema de um forno de pelletização e a Figura 3.3 mostra uma fotografia de sua lateral. Um conjunto de pelotas processadas é mostrado na Figura 3.4. A sinterização, que é a aglomeração de partículas de minério com tamanhos entre 0,15 mm e 6 mm, é realizada em geral pelas siderúrgicas. A Figura 3.5 mostra um esquema e a Figura 3.6 uma fotografia de uma máquina de sinterização. Uma fotografia do sinter processado é mostrada na Figura 3.7.

Figura 3.2 – Esquema de um forno de pelletização. (Fonte: Samarco)



Apesar do minério de ferro ser a principal matéria-prima, o coque (produto sólido da destilação do carvão mineral) é essencial para o funcionamento dos altos-fornos. O coque é o combustível e a fonte de carbono para geração de calor e para redução do minério de ferro, e é produzido em unidades chamadas coquerias.

Figura 3.3 – Fotografia da lateral de um forno de pelotização. (Fonte: Vale)



Figura 3.4 – Pelotas (ou pellets) (Fonte: <http://www.ternium.com/en/products-pellets/>)



Figura 3.5 – Esquema de uma máquina de sinterização. (LIU et al., 2012)

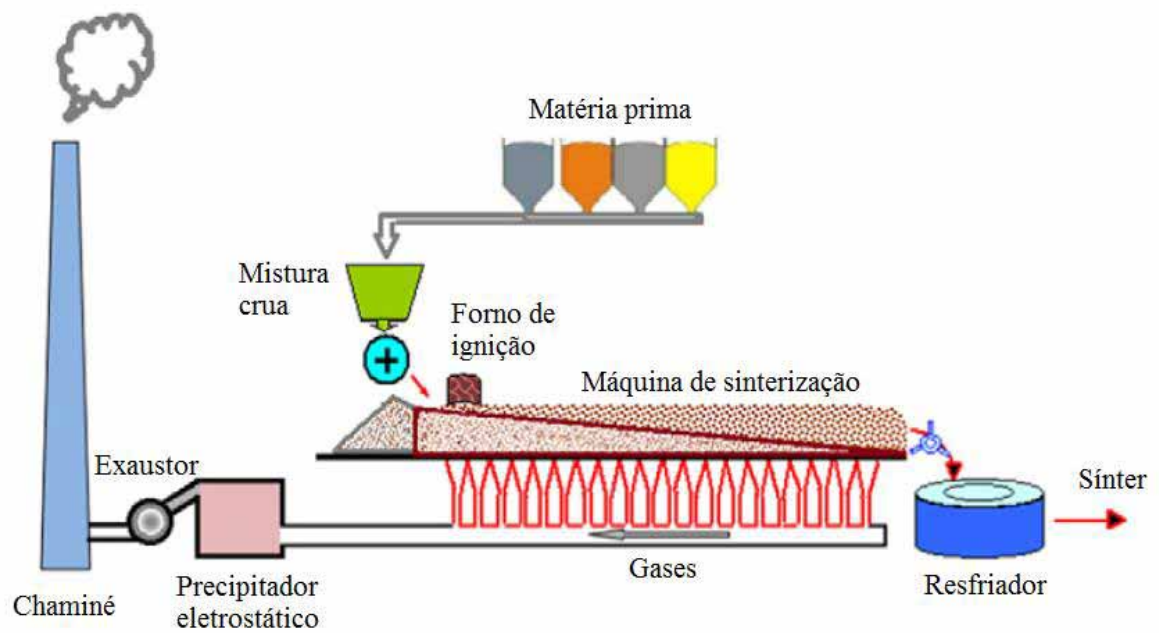


Figura 3.6 – Fotografia de uma máquina de sinterização. (Fonte: ArcelorMittal Tubarão)



Figura 3.7 – Sinter. (Fonte: <http://www.dk-duisburg.de/en/prozess/sinteranlage.html>)



A coqueria é constituída por um conjunto de fornos (baterias) dispostos lado a lado, onde o carvão mineral é depositado, permanecendo por cerca de 16 horas em temperatura acima de 1000 °C, sem contato com o ar. Durante o aquecimento os componentes voláteis do carvão são destilados e evaporados (pirólise). Os componentes gasosos evaporados são inflamáveis e são utilizadas como combustíveis (o gás de coqueria ou GCO). O GCO é destinado a uma estação de limpeza chamada unidade carboquímica. Na CSN, parte do GCO é destinada à central termoeleétrica. Também é utilizado para aquecimento de regeneradores dos altos fornos, que serão mostrados mais à frente. O material sólido que resta é uma massa com aproximadamente 89% de carbono, denominada coque. O coque é retirado dos fornos e esfriado na estação de apagamento. A Figura 3.8 ilustra o processo de coqueificação em um forno de coqueria. A Figura 3.9 mostra uma fotografia de uma unidade de coqueria. A Figura 3.10 apresenta o coque antes de seu descarregamento do forno. A Figura 3.11 apresenta o coque em seu aspecto final.

Figura 3.8 – Processo de coqueificação. (JARDIM, 1991)

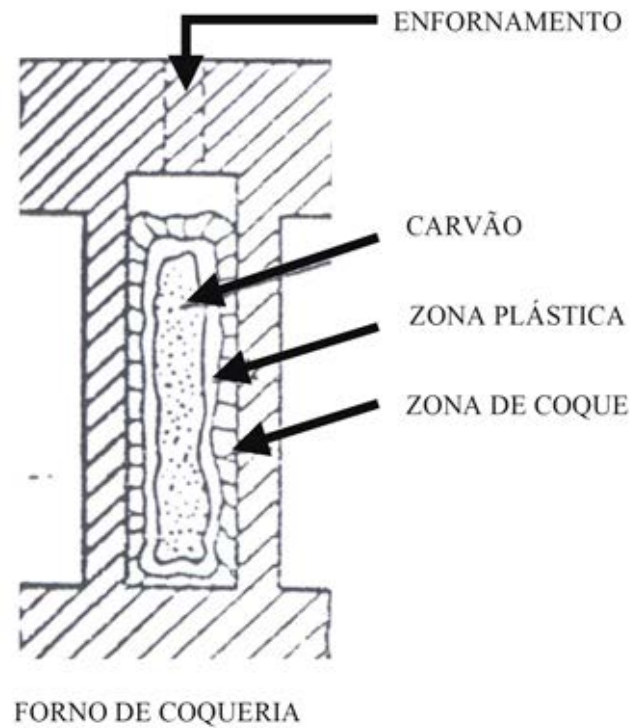


Figura 3.9 – Unidade de coquearia convencional. (DUPV, 2004)

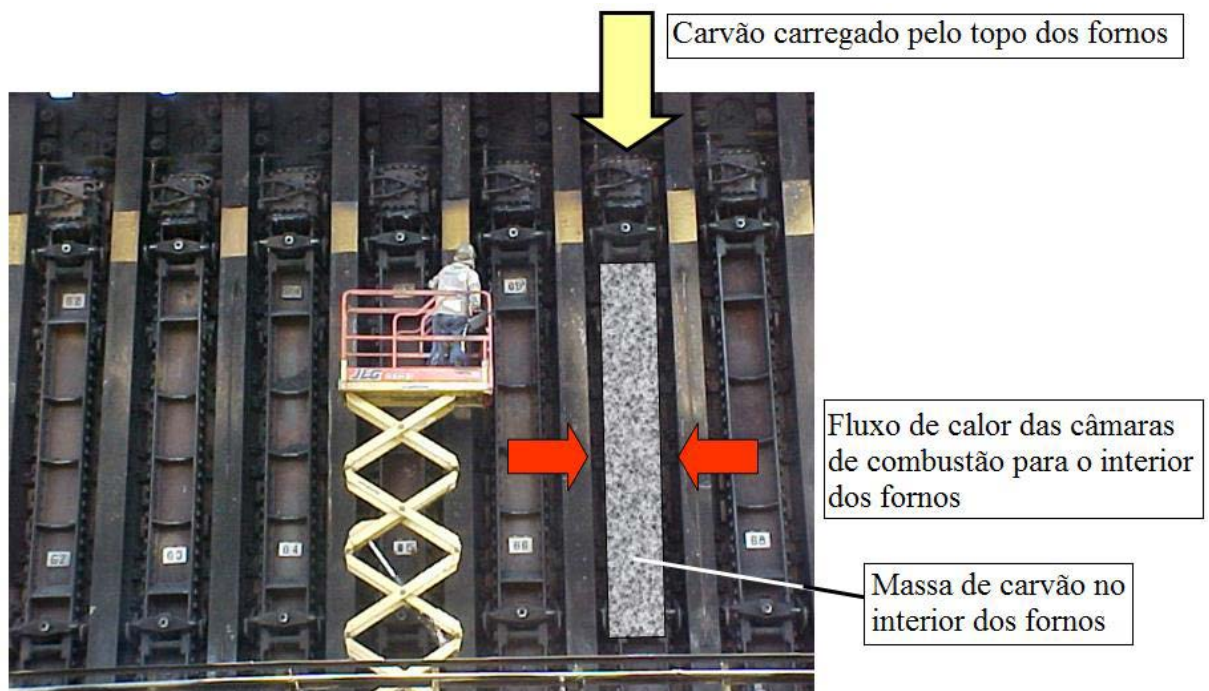


Figura 3.10 – Coque no interior de um forno. (DUPV, 2004)

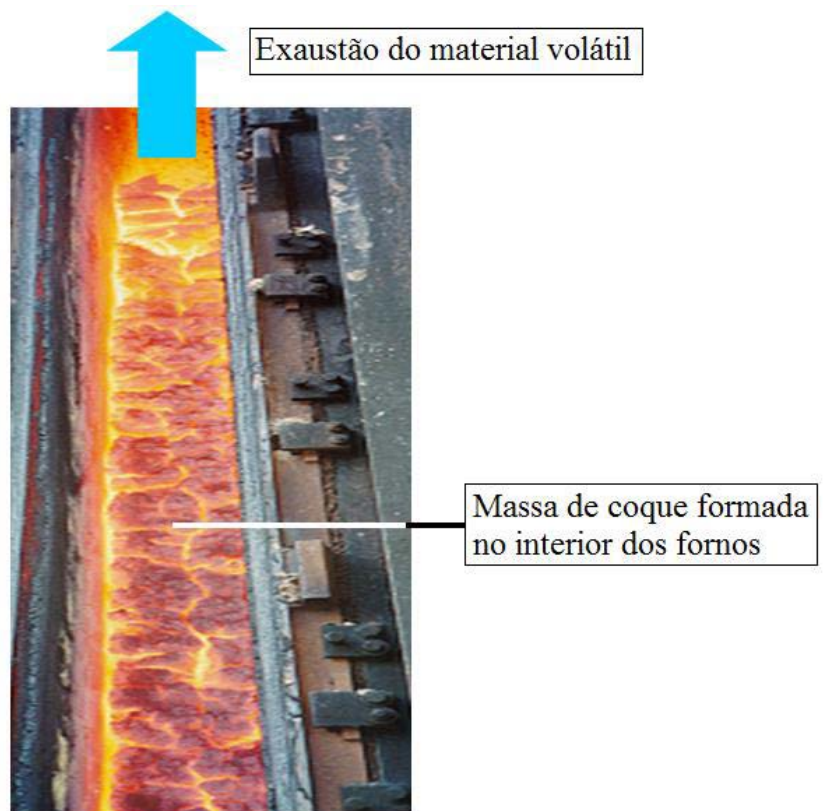


Figura 3.11 – Aspecto final do coque. (ABREU, 2011)



Além de ser preciso ter o minério de ferro e o coque, também é imprescindível, para que possa operar de maneira eficiente o alto-forno, a adição de uma fonte de óxido de cálcio, principal fundente siderúrgico, que pode ser adicionado em forma de calcário, diretamente no alto-forno ou misturado na carga de sinterização, formando um sinter auto fundente. Ela tem a principal missão de reagir com a ganga do minério (ganga é a parte do minério que não contém ferro, contendo principalmente o óxido de silício) para formar uma escória do ferro no forno.

3.2.2 Redução

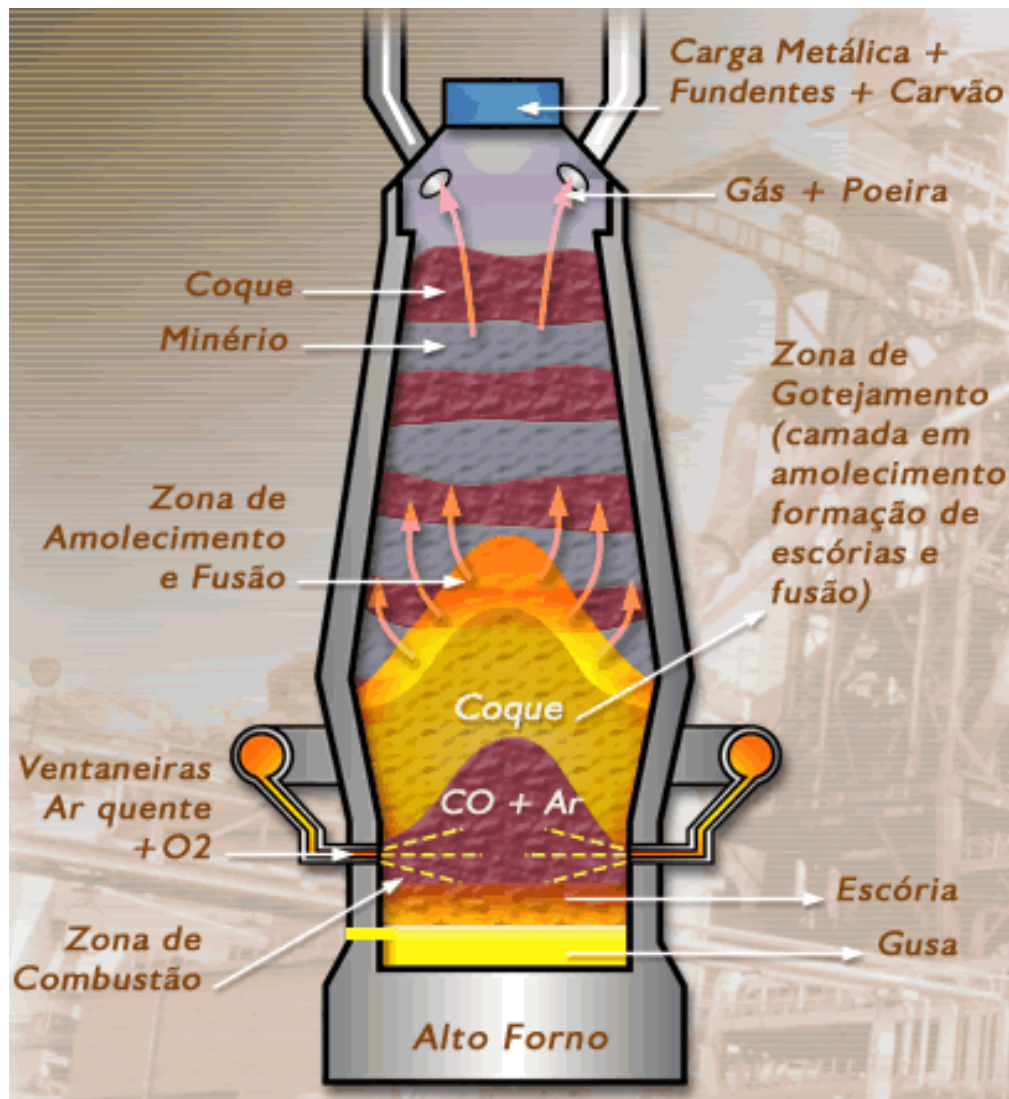
Como já mencionado anteriormente, a redução do minério de ferro ocorre no interior do alto forno. O alto forno constitui ainda o principal aparelho utilizado na metalurgia do ferro (ou siderurgia). A metalurgia do ferro consiste, essencialmente, na redução dos óxidos dos minérios de ferro, mediante o emprego de um redutor, que é um material a base de carbono (carvão vegetal ou coque).

O alto forno é uma estrutura cilíndrica, de grande altura, que compreende essencialmente uma fundação e o forno propriamente dito. Os equipamentos e acessórios auxiliares têm como objetivo limpar os gases que saem do alto-forno, bem como pré-aquecer o ar que é introduzido no forno através das ventaneiras.

A carga do alto forno é constituída do material a base de ferro (minério de ferro) mais o material a base de carbono (coque, carvão vegetal). No interior de um alto forno, conforme mostrado na Figura 3.12, existem duas correntes de materiais responsáveis pelas reações que se verificam:

- Uma corrente sólida representada pela carga que desce paulatinamente;
- Uma corrente gasosa que se origina pela reação do carbono carregado com o oxigênio do ar soprado na base, que sobe em contracorrente.

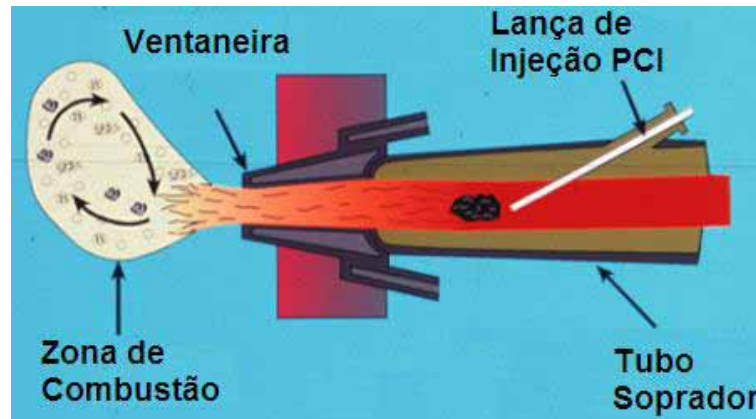
Figura 3.12 – Interior de um alto forno (Fonte: <http://hugofrancino.wordpress.com/siderurgicas/>).



Os altos fornos atuais também utilizam a injeção de carvão pulverizado em suas bases (PCI – *pulverized coal injection*) (SILVA, 2006). O PCI reduz a quantidade necessária de coque metalúrgico, o qual constitui um insumo mais caro. Em alguns casos faz-se também para aporte térmico, o uso do gás natural e injeção de oxigênio puro. O processo é representado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Desenho esquemático do processo de injeção de carvão pulverizado.

(SILVA, 2006)



Na Figura 3.14, pode-se verificar as regiões, temperaturas e as reações conforme o movimento da carga bem como a composição média do gás de saída do alto forno (chamado de gás de alto forno ou GAF). A Figura 3.15 mostra uma foto externa de um alto forno.

Figura 3.14 – Regiões, temperaturas e reações dentro de um alto forno. (NOBLAT, 2005)

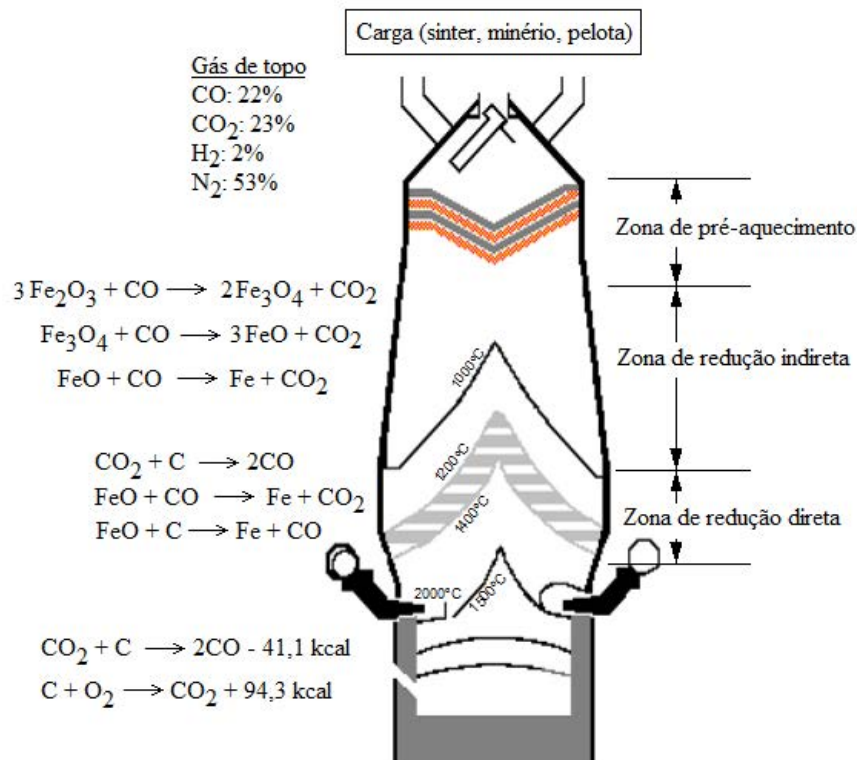
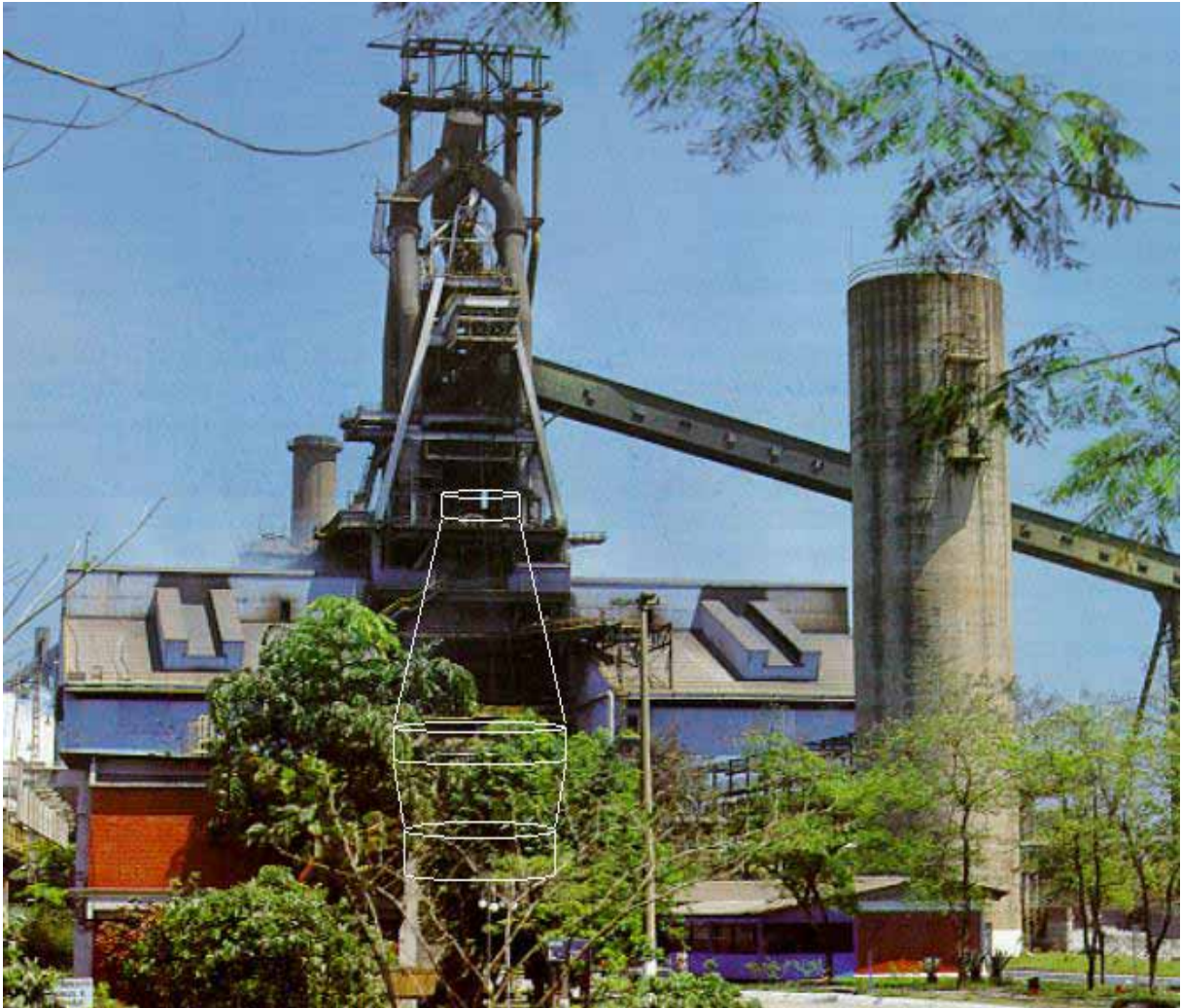


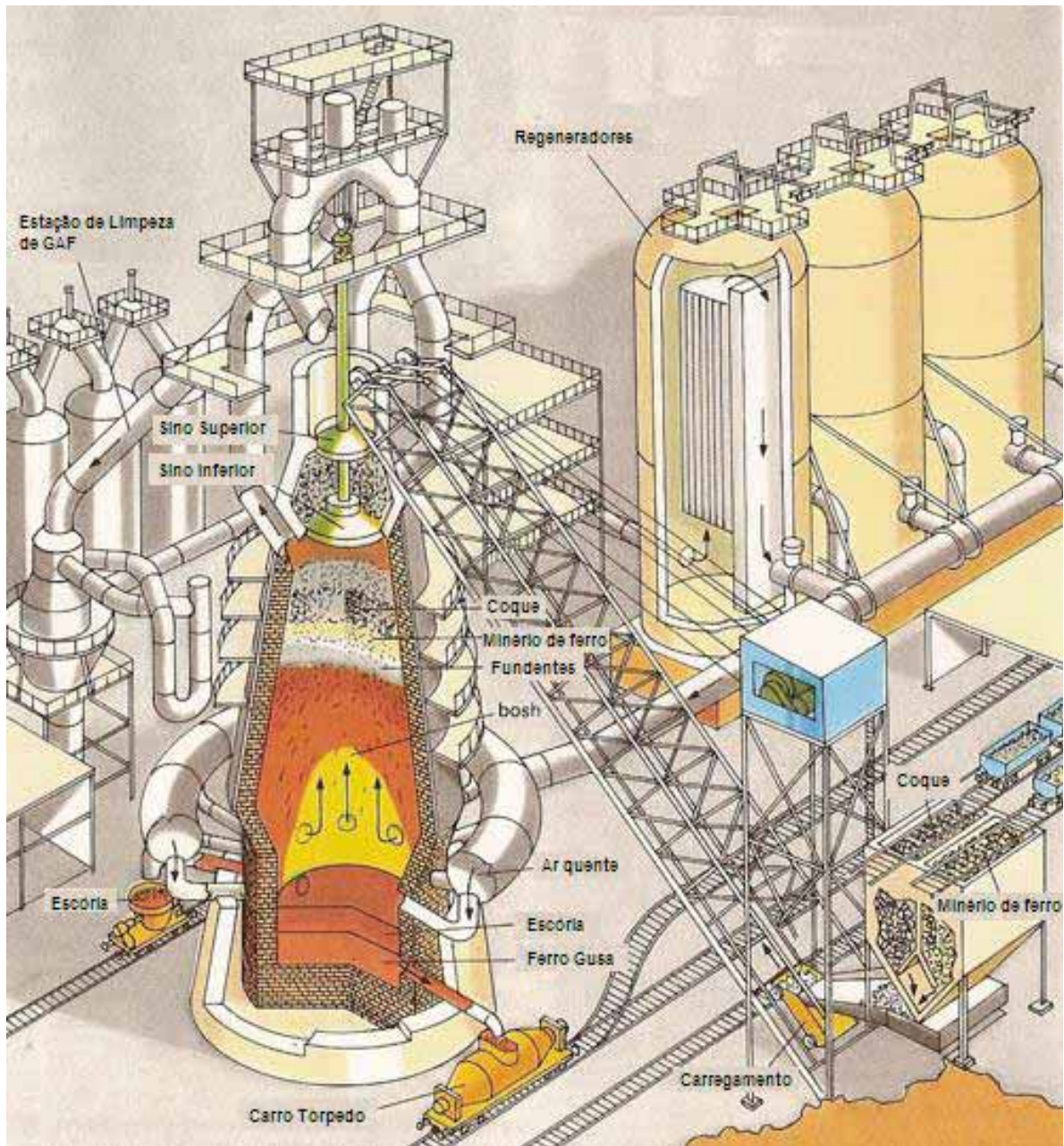
Figura 3.15 – Vista do alto forno número 3 da CSN, destacando o contorno do reator.
(SILVA, 2008)



Na Figura 3.16, pode-se verificar os principais equipamentos relacionados à etapa de redução. O carregamento, que pode ser transportado através de esteiras transportadoras ou carros transportadores, é misturado na casa de silo. A casa de silo é ligada à central do alto forno e garante que porções e/ou composições ideais para a carga sejam mantidas. O ar que é injetado pelas ventaneiras é pré-aquecido nos regeneradores. O gás de alto forno (GAF) que sai pelo topo é tratado (despoeiramento) e encaminhado a um acumulador. Este gás, por ser inflamável, pode ser utilizado como combustível em outros processos, como, por exemplo, para centrais termoeletricas (como ocorre na CSN). O pó que é retirado do GAF é ainda muito rico em partículas de minério de ferro; assim, ele é encaminhado para a sinterização. Os “sinos” (superior

e inferior) garantem que não haja saída do GAF quando houver carregamento de carga. Os fundentes mais utilizados hoje em dia são o calcário e a dolomita e eles facilitam a formação de escórias, que, por sua vez, são granuladas e vendidas para fabricas de cimento.

Figura 3.16 – Equipamentos principais da redução (Fonte: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/blast_furnace.html).



O ferro gusa é o produto imediato da redução do minério de ferro pelo coque ou carvão e calcário no alto forno. É considerado como uma liga de ferro e carbono, contendo de 4 a 4,5% de carbono e outros elementos ditos residuais como, por exemplo: silício, manganês, fósforo e enxofre, dentre outros. O gusa é um material quebradiço e sem grande uso direto. O gusa e a escória são retiradas através de furações na parte inferior do forno. O ferro gusa, após a furação, é separado da escoria por diferença de densidade, e destinado aos carros torpedos. O ferro gusa contém impurezas que trazem inconvenientes para a produção de determinados tipos de aço para utilizações específicas. Os carros torpedos destinam o ferro gusa às estações de refino.

3.2.3 Refino

O ferro gusa, como dito anteriormente, por conter uma taxa muito elevada de carbono e impurezas, ainda não pode ser esfriado e vendido. Ele é primeiramente destinado à estação de dessulfuração e, posteriormente, encaminhado (também através do carro torpedo) para a aciaria. Na aciaria, ocorre a transformação do ferro gusa em aço, que é a passagem da taxa de de 4 a 4,5% de carbono para algo entre 0,008 e 2,11%.

A transformação do ferro gusa em aço é realizada em conversores LD a oxigênio (Figura 3.17), através da oxidação dos elementos do gusa que se deseja remover (ou diminuir), como o carbono, silício, fósforo e enxofre. O teor destes elementos no gusa o torna demasiadamente frágil para ser útil como material de engenharia. A utilização de sucata de aço nos conversores evita que a temperatura atinja valores muito altos durante a oxidação, como também permite o reaproveitamento (ou reciclagem) do aço contido na sucata.

O processo de conversão LD foi idealizado em 1948 por Durrer (Suíça). Plantas em escala piloto foram testadas nas cidades de Linz e Donawitz, daí o nome LD. Foi comercializado em 1952 pela Voest de Linz (MOREIRA e LANA, 2002). A operação no conversor LD se dá em seis etapas. Carregamento de carga sólida, carregamento de

gusa líquido, sopro, medição de temperatura e retirada de amostras, vazamento do aço e vazamento de escória. A Figura 3.18 mostra o carregamento de sucata no conversor LD.

A sucata é preparada de forma que o carregamento seja o menos danoso possível para o conversor. Primeiro são carregadas dentro do conversor as sucatas mais finas, depois as médias, para proporcionar amortecimento na queda das sucatas maiores. O conversor, uma vez carregado com sucata, está preparado para receber o gusa líquido, de forma a proporcionar também amortecimento e evitar danos do contato direto do gusa com o fundo do conversor no momento do carregamento. A Figura 3.19 mostra o carregamento do gusa.

Figura 3.17 – Conversor LD em posição de sopro. (MOREIRA e LANA, 2002)

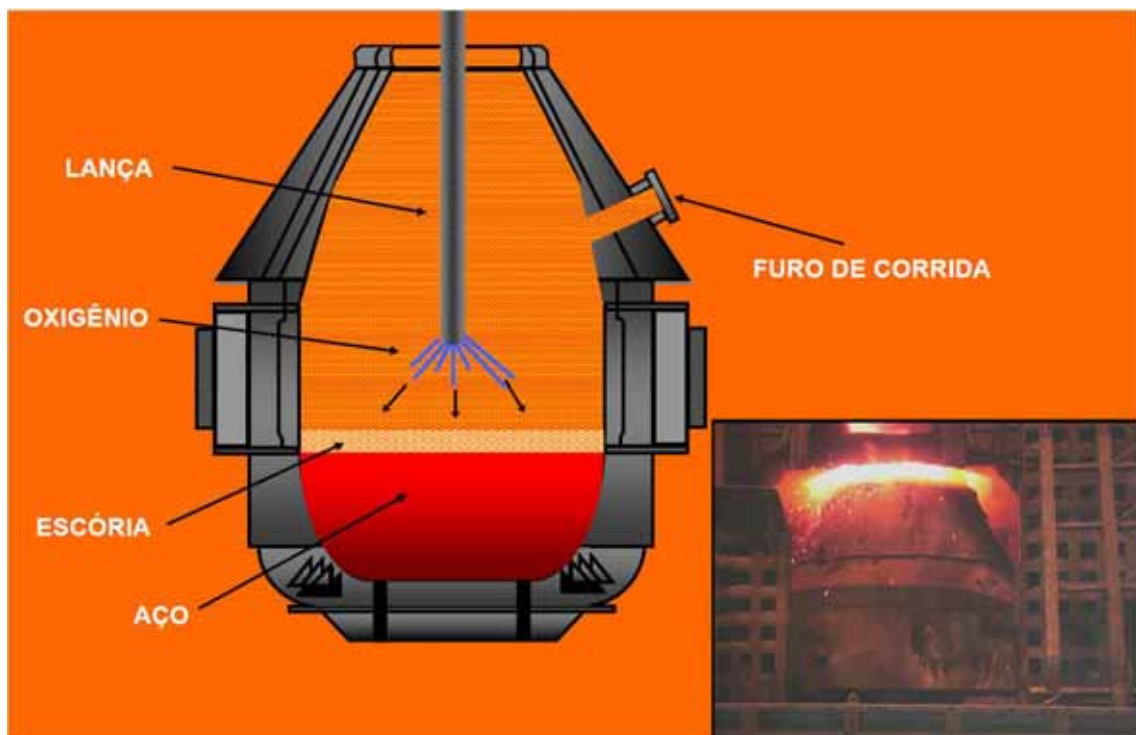


Figura 3.18 – Carregamento de sucata no conversor LD. (MOREIRA e LANA, 2002)

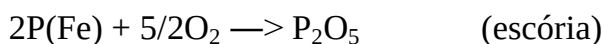
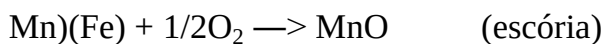
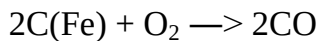
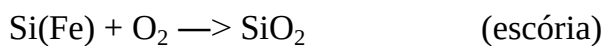


Figura 3.19 – Carregamento de gusa. (MOREIRA e LANA, 2002)



Após o carregamento de gusa, ocorre o sopro de oxigênio bem como a adição de fundentes. Os gases de exaustão do conversor LD também são inflamáveis e são utilizados como combustíveis. Na CSN, ele é então destinado a um acumulador e posteriormente destinado a central termoeletrica da planta.

A seguir, têm-se algumas das reações químicas que ocorrem no momento do sopro de oxigênio. Nas equações, o silício (Si), o carbono (C), o manganês (Mn) e o Fósforo (P), contidos no ferro gusa com a presença do oxigênio soprado, oxidam formando a escória, que é retirada no final do processo.



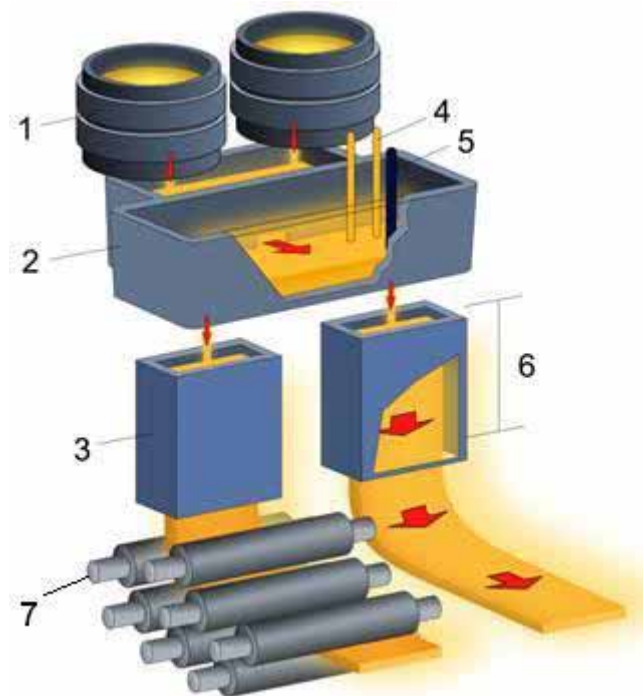
O próximo passo é a medição da temperatura e retirada das amostras com uma sub-lança. Caso esteja dentro dos padrões esperados, o aço é vazado, se não, é necessária uma nova injeção de oxigênio.

Com as características atingidas pelo conversor LD, o aço então pode (conforme as características solicitadas pelo cliente) ser destinado à estação de lingotamento ou então passar por outros tratamentos mais específicos, chamados de metalurgia de panela ou processo de refino secundário. Na metalurgia de panela, de maneira geral ocorre a injeção de gases inertes (como por exemplo, argônio e nitrogênio) e adição de ligas, conforme a necessidade do cliente. O papel dos gases inertes é apenas homogeneizar as características do aço dentro da panela juntamente com a adição de novas ligas. Na metalurgia de panela, pode também ocorrer uma nova dessulfuração do aço.

A produção de oxigênio, hidrogênio e argônio ocorre na fábrica de oxigênio (FOX). Na Companhia Siderúrgica Nacional, a FOX é controlada pela White Martins, dentro da própria CSN.

Feitas as correções na parte de metalurgia de panela ou atingidas as características desejadas nos próprios conversores LD, o aço líquido é então lingotado. Na estação de lingotamento, a panela de aço líquido é posicionada sobre um distribuidor, que por sua vez direciona o aço aos moldes. Eletrodos no distribuidor são responsáveis por manter a temperatura do aço constante e ideal para lingotamento. Uma vez dentro dos moldes (que são refrigerados), o aço começa a se solidificar nas laterais e, à medida que vai descendo, vai sendo posicionado por rolos extratores, deixando o aço solidificado e, em geral, sob o formato de placas. Na Figura 3.20, pode-se verificar o equipamento.

Figura 3.20 - Esquema de uma unidade de lingotamento contínuo (1 - Panela, 2 - Distribuidor, 3 e 6 - Moldes, 4 e 5 - Eletrodos, 7 - Rolos extratores). (Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFfA4AE/lingotamento-contínuo>)



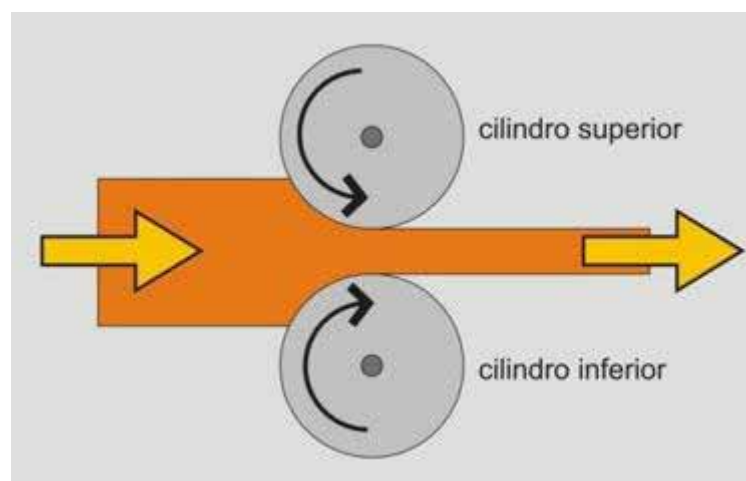
Posicionadas pelos rolos extratores e moldadas, as placas são então cortadas e envidadas, ou para serem diretamente laminadas, ou para antes de laminadas passarem por um forno de reaquecimento de placas, de forma a homogeneizar os grãos de aço. Após essa etapa, chega-se até as linhas de laminação e acabamento.

3.2.4 Laminação

Nas linhas de laminação a quente, a placa é então direcionada entre cilindros dispostos em série que possuem o objetivo de diminuir a seção transversal da placa. Pode-se verificar, na Figura 3.21, o efeito causado na placa quando direcionada entre dois cilindros laminadores.

Figura 3.21 – Laminação. (Fonte:

<https://sites.google.com/site/epdprocessos/laminacao>)



Após passada por uma série de laminadores e atingida a espessura requerida, a placa é então “enrolada” sob forma de bobinas, como na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Bobinas. (Fonte: <http://ficadicanoticias.blogspot.com.br/2012/09/fornecedor-do-ano-da-volkswagen.html>)



Desde o início da introdução deste trabalho, as áreas demonstradas fazem parte da Metalurgia de uma siderúrgica. Quando o objetivo é comparar as emissões de CO₂ e consumos energéticos, deve-se comparar apenas até o lingotamento, pois não são todas as empresas que possuem linhas de acabamento (por exemplo, linhas de zincagem e estanhamento, laminação a frio, galvalume, etc).

4. METODOLOGIA

4.1 Informações introdutórias

Para o cálculo das emissões de CO₂ foi adotado o método ISO 14404-1, que é uma metodologia específica para siderúrgicas com alto forno. Para o cálculo da intensidade energética, foram utilizados dados fornecidos pelos BEG's (Balanço Energético Geral) da UPV para os anos 2010 a 2012.

Posteriormente, para efeito de comparação, foi realizada uma análise energética utilizando o manual CO₂ Emissions Data Collection, fornecido pela World Steel Association. Apesar do título deste material não mencionar nada sobre energia, nele existem duas tabelas que, de maneira similar ao cálculo de CO₂ (que será ainda apresentado), possibilitam o cálculo da intensidade energética.

Deve-se mencionar que uma das versões do manual da World Steel foi a responsável pela origem, em 2012, da metodologia ISO 14404-1. Logo, ambos os documentos são, em essência, os mesmos (exceto apenas pela parte que se refere ao cálculo energético do manual da World Steel). Em suma, tanto a metodologia para cálculos de emissões de CO₂ quando para os cálculos de intensidades energéticas poderiam ter sido feitos utilizando apenas o manual fornecido pela World Steel.

Após o cálculo de intensidade de emissões de CO₂ e de energia, foram selecionadas algumas tecnologias aplicáveis à CSN. Para isso, foram consultados os seguintes manuais:

- The State-of-the-Art Clean Technologies for Steelmaking Handbook, que é um documento elaborado pelo Instituto Americano de Ferro e Aço (American Iron and Steel Institute);
- Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Iron and Steel Industry, elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos;

- Global Warming Counter Measures - Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction, elaborado pela Organização de Desenvolvimento de Tecnologia Industrial do Japão;
- CSN Study Report, que é um estudo exclusivo elaborado pela Siemens-Vai para CSN.

Foram também consideradas propostas de melhorias pelos próprios engenheiros da CSN.

4.2 Metodologia ISO 14404-1

O projeto de norma ISO 14404-1 especifica o método para cálculo de intensidade de emissões de CO₂ para siderúrgicas integradas (com alto forno). Como dito anteriormente, ele surgiu a partir de um manual criado pela World Steel Association, que é a associação (até 2013) entre 170 grandes produtoras de aço do mundo todo. A Figura 4.1 apresenta uma visão geral de todas as empresas associadas à World Steel Association. A norma ISO 14404-1 inclui a definição de limite, material e insumos, fluxo de energia e fatores de conversão de CO₂. Inclui conceitos de emissões diretas, indiretas (também chamadas de upstream) e créditos.

4.3 Definição de limite

Como ao redor do mundo existem siderúrgicas integradas com os mais variados layouts, disposições e equipamentos, nos mais variáveis tipos de climas e geografias, a ISO 14404-1 optou por avaliar a siderúrgica integrada sob a ótica de um limite (fronteira), mais precisamente por um volume de controle. A Figura 4.2 apresenta o mapa da UPV no município de Volta Redonda, RJ. A Figura 4.3 apresenta o mesmo mapa, com a definição do limite (ou fronteira) de estudo. Assim, para o estudo, imagina-se que a empresa seja um volume de controle, com o qual se deve considerar tudo o que entra e tudo o que sai do mesmo.

Figura 4.1 – Membros da WorldSteel Association.



Figura 4.2 – UPV, município de Volta Redonda, sem a delimitação de uma fronteira.
(Fonte da fotografia: Google Maps)

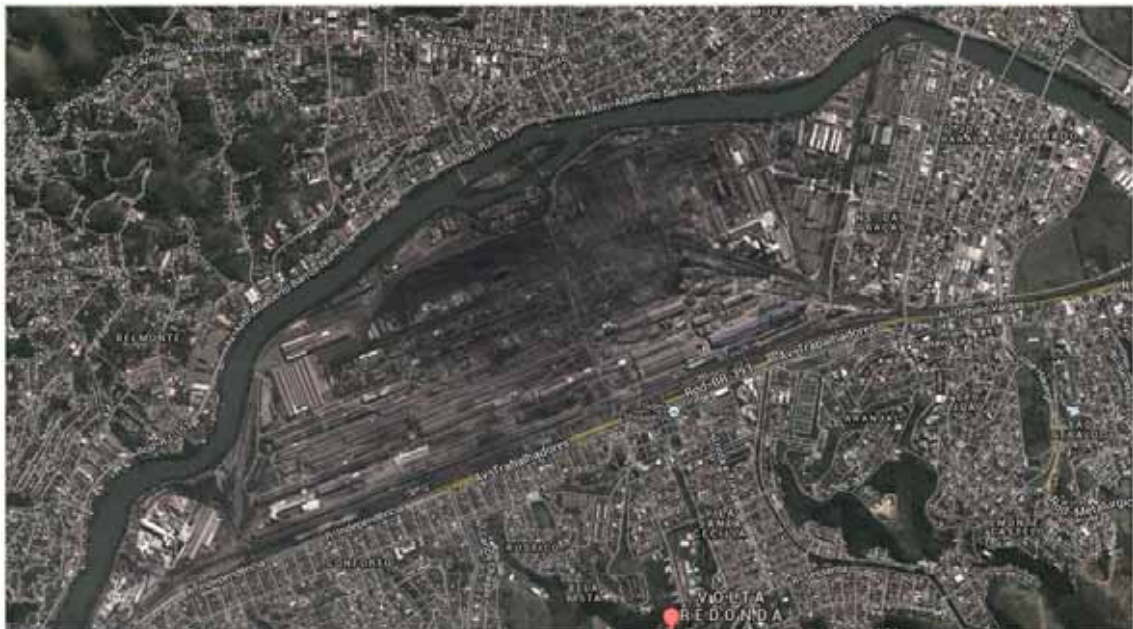


Figura 4.3 – UPV, município de Volta Redonda, com a delimitação de uma fronteira.

(Fonte da fotografia: Google Maps)



4.4 Instalações

Após traçado um volume de controle, deve-se identificar as principais instalações dentro dos limites (ou fronteira) da siderúrgica. A ISO 14404-1 caracteriza essas instalações por categoria:

- Categoria 1: instalações essenciais (Figura 4.4);
- Categoria 2: instalações que operam dentro do limite ou podem ser terceirizadas (Figura 4.5);

- Categoria 3: instalações não essenciais (ou linhas de acabamento) (Figura 4.6);
- Categoria 4: outras instalações para todas as atividades auxiliares.

Figura 4.4 – Categoria 1, instalações essenciais.

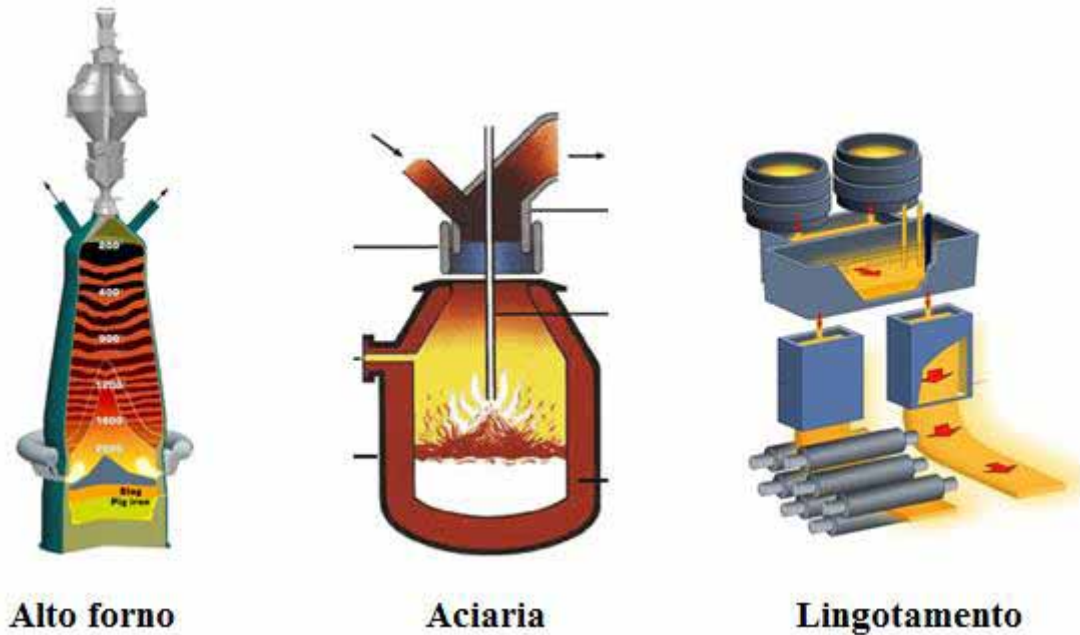
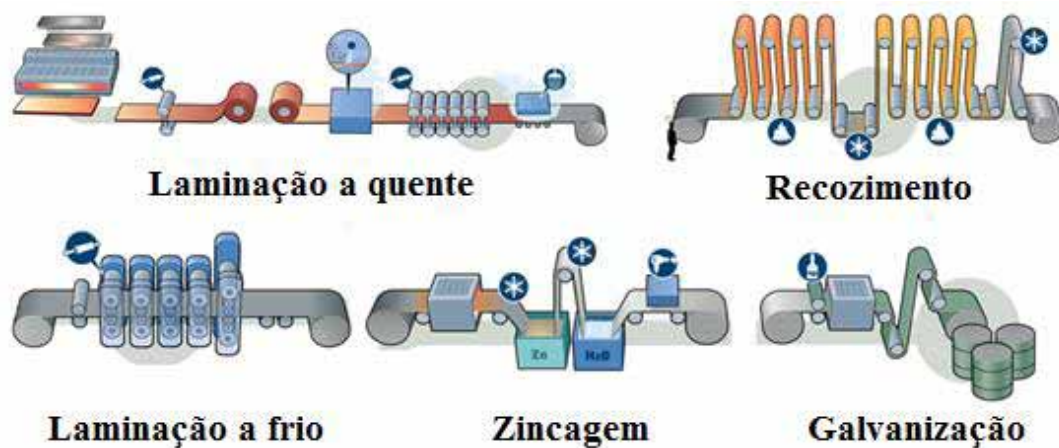


Figura 4.5 – Categoria 2, instalações que operam dentro do limite (fronteira) ou podem ser terceirizadas.



Figura 4.6 – Categoria 3, instalações não essenciais.



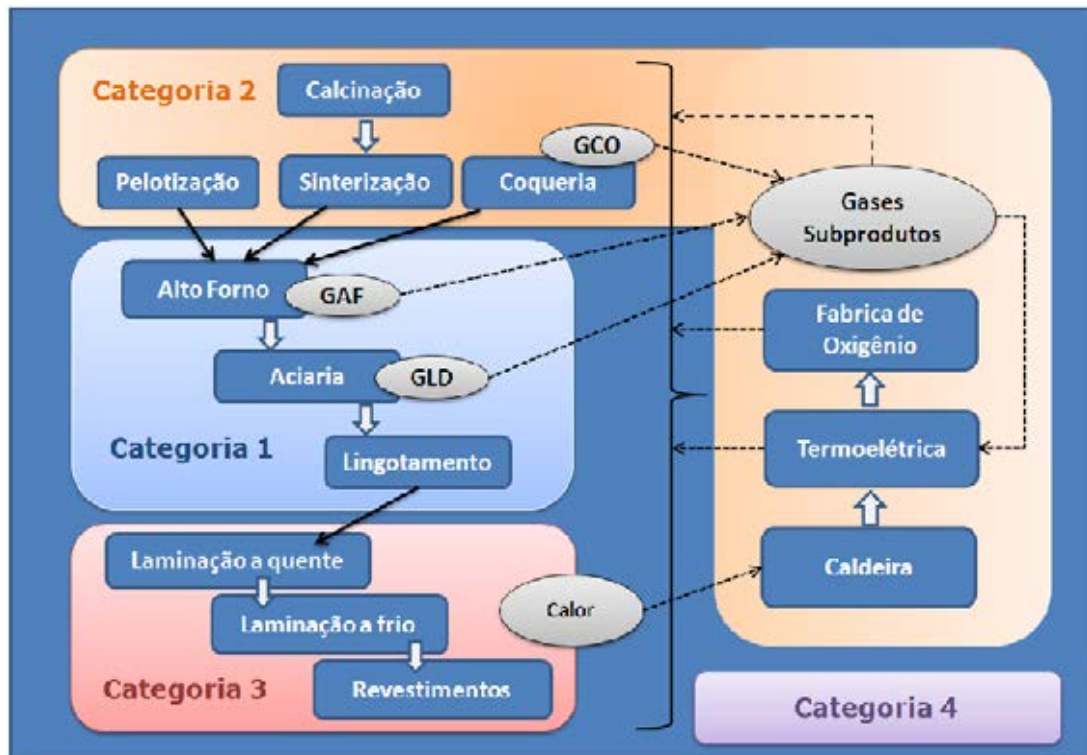
4.5 Fluxos de massa e energia

Depois de identificadas todas as categorias, identificam-se todos os fluxos de insumos e fluxos energéticos relacionados às categorias e ao volume de controle da usina. A finalidade desse procedimento é deixar explícito todo insumo que entra e todo insumo que sai, o que é consumido e o que não é consumido nos limites do site. Essa contabilização deve ser no período anual. A Figura 4.7 apresenta um exemplo de fluxos de insumos e energéticos.

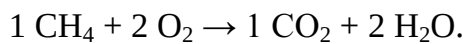
4.6 Fatores de conversão

Para se entender o conceito de fatores de conversão, deve-se primeiramente estar claro o que é um fator de emissão. O fator de emissão de CO_2 de um insumo nada mais é do que a proporção de emissão de CO_2 em relação a uma determinada quantidade pura do insumo, em uma reação de combustão ou dissociação. A seguir, exemplifica-se como é obtido o fator de emissão do produto da combustão do combustível gasoso metano.

Figura 4.7 – Exemplo de fluxos de insumos e energéticos.



Considere a reação estequiométrica de metano com oxigênio:

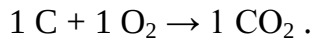


O volume molar do CH_4 é $22,4 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3$. Aqui, a notação N significa que o volume é tomado nas condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm , respectivamente). Como a massa molar do CO_2 é $44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, tem-se o fator de emissão para o CH_4 :

$$\begin{aligned} \text{FE}_{\text{CH}_4} &= \frac{\text{massa molar do CO}_2}{\text{volume molar do CH}_4} = \frac{44 \text{ g}}{22,4 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3} = 1964 \frac{\text{g CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{CH}_4} \\ &= 1,964 \frac{\text{t CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}. \end{aligned}$$

Note que se optou por relacionar tonelada de CO_2 por unidade de volume (dam^3) de CH_4 por se tratar de um combustível gasoso.

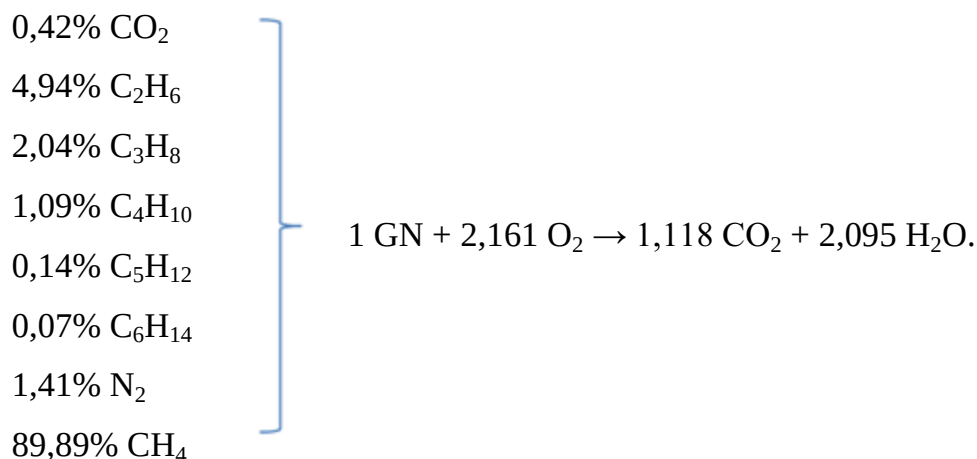
A seguir, como outro exemplo, calcula-se o fator de emissão do carbono puro. Seja a reação estequiométrica de carbono com oxigênio:



$$FE_C = \frac{\text{massa molar do CO}_2}{\text{massa molar do CH}_4} = \frac{44 \text{ g}}{12 \text{ g}} = 3,667 \frac{\text{t CO}_2}{\text{t C}} .$$

Neste caso, optou-se por relacionar tonelada de CO₂ por tonelada de carbono, por se tratar de um combustível sólido.

A ISO 14404-1 fornece apenas fatores de conversão, que é a média ponderada dos fatores de emissão dos componentes de um determinado insumo. Apresenta-se como exemplo, a seguir, como funciona o cálculo do fator de conversão do gás natural. Considere uma composição volumétrica do gás natural fornecida pela própria CSN e sua reação de combustão estequiométrica:



Assim:

$$FC_{GN (0 \text{ oC})} = \frac{1,118 \times 44 \text{ g}}{22,4 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3} = 2,196 \frac{\text{t CO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ GN}} ,$$

$$FC_{GN (20 \text{ oC})} = \frac{273}{293} \times 2,196 \frac{\text{t CO}_2}{\text{dam}^3 \text{GN}} = 2,046 \frac{\text{t CO}_2}{\text{dam}^3 \text{GN}}.$$

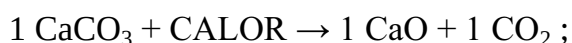
O fator de conversão do gás natural calculado anteriormente é o mesmo utilizado pela CSN. O fator de conversão fornecido pela ISO 14404-1 possui o valor de 2,014 t CO₂ / [10³m³] GN, portanto diferente da CSN. A ISO 14404-1, para casos como esse, afirma que, sempre que possível, deve-se efetuar as devidas correções nos fatores de conversão para as características dos insumos utilizados pelo site.

Mostra-se, a seguir, na Tabela 4.1, outro exemplo relacionado ao perfil de outro insumo, o do carvão utilizado pela CSN. Novamente, o fator de conversão dado pela ISO (3,059 t CO₂ /t carvão) é diferente daquele obtido por cálculo com a formulação média. Isso significa que a porcentagem de carbono no carvão contabilizado pela ISO é maior que a quantidade de carbono do carvão utilizado pela CSN.

Tabela 4.1 – Características do Carvão CSN. (Fonte: CSN)

Tipo	% na mistura	%C	%C parcial
AV...Mu	7	81,6	5,712
SH	25	81,18	20,295
CB	20	82,17	16,634
TST	5	81,2	4,06
HC	23	80	18,4
CSN <i>blend</i>	20	80,66	16,132
% C mistura =	81,033		
FC =	2,971 t CO₂/ t carvão		

No caso do calcário (CaCO₃) por exemplo, o fator de conversão é idêntico ao fator de emissão, que é decorrente do produto da calcinação (e não da combustão, como nos exemplos anteriores). A reação de calcinação e o fator de conversão correspondente são:



$$FC_{\text{calcário}} = \frac{44 \text{ g CO}_2}{100 \text{ g calcário}} = 0,44 \frac{\text{t CO}_2}{\text{t calcário}}.$$

A lógica da ISO14404-1 é que todo insumo consumido e entrante nos limites do site deve ser multiplicado pelo seu respectivo fator de conversão contabilizando sua respectiva emissão de CO₂. Todo insumo que sai dos limites do site deve ser abatido da somatória total. Será mostrado a seguir como deve ser feita tal contabilização. No final deste capítulo será apresentada uma tabela com todos os fatores de conversão utilizados neste trabalho.

4.7 Fontes de emissão

A ISO14404-1 identifica três tipos de fontes de emissão: emissões diretas, emissões indiretas (*upstream*) e emissões de créditos.

4.7.1 Emissões diretas

As emissões de CO₂ relativas às atividades de produção do aço dentro dos limites do site são as responsáveis pelas emissões diretas, conforme mostrado na Figura 4.8.

4.7.2 Emissões indiretas (ou *upstream*)

Emissões de materiais importados relacionadas com as atividades de produção de aço de terceiros fora da fronteira são caracterizadas como emissões indiretas ou *upstream*, conforme mostra a Figura 4.9 Para melhor entendimento, todo material ou insumo que seja processado antes de entrar na indústria, possui um adicional de

upstream quando entra nos limites do site. São exemplos: coque, cal calcítica, cal dolomítica, pelota, minério sinterizado, metal quente, ferro frio, ferro diretamente reduzido, oxigênio, nitrogênio e argônio.

Figura 4.8 – Emissões diretas.

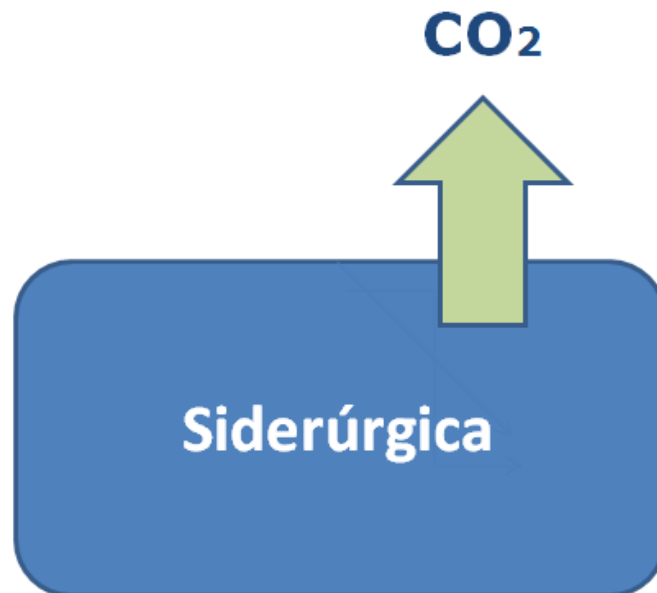
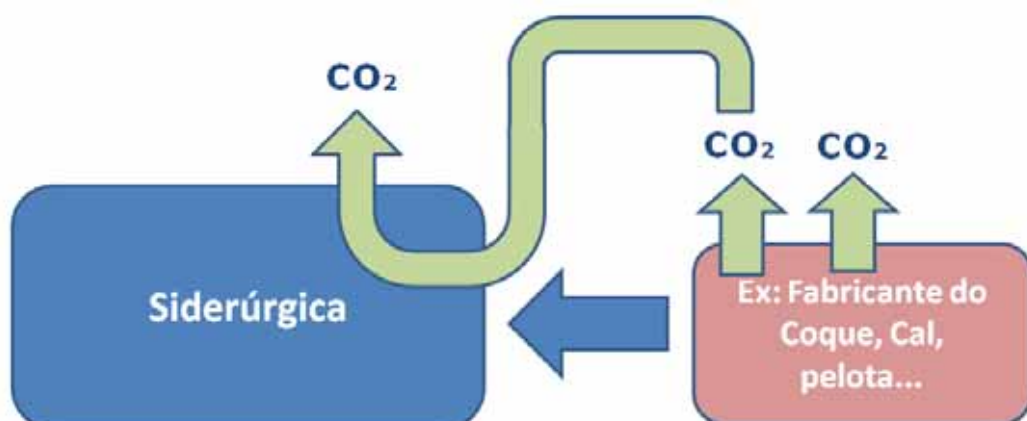


Figura 4.9 – Emissões indiretas.



4.7.3 Emissões de créditos

As emissões de créditos são emissões de CO₂ correspondentes aos materiais ou insumos exportados, conforme mostra a Figura 4.10. Como por exemplo, óleos de descartes, alcatrão gerado na coqueria, coque excedente de produção, eletricidade excedente ou vapor, entre outros.

Figura 4.10 – Emissões de créditos.



4.8 Cálculo

Deve-se então contabilizar todos os insumos que fazem parte das emissões diretas e multiplicá-los pelos seus respectivos fatores de conversão, contabilizar todos os insumos que fazem parte das emissões indiretas e multiplicá-los pelos seus respectivos fatores de conversão e por fim, contabilizar todos os insumos que fazem parte das emissões de créditos e multiplicá-los pelos seus respectivos fatores de conversão.

Quando um insumo é processado (emissões indiretas) antes de entrar nos limites do site, deve-se multiplicar a quantidade deste insumo pelo seu respectivo valor

de emissão direta e multiplicar a mesma quantidade pelo seu respectivo valor de emissão indireta e então somá-los.

Com o valor total de emissão de CO₂ em toneladas por ano, divide-se então este valor pela quantidade total de aço bruto que é produzida pelo site. Este valor é chamado de intensidade de emissão de CO₂, e é o alvo final desta metodologia.

É importante notar que se o insumo que é produzido dentro do site não sai do volume de controle da empresa, ele não deve ser contabilizado. Por exemplo, o gás de aciaria, gás de alto forno e gás de coqueria, quando utilizados apenas dentro do site, não são contabilizados, pois o CO₂ dos mesmos já está contabilizado nos insumos de entrada.

A emissão anual de CO₂ (E_{CO2}) é calculada como:

$$E_{CO_2} = \left(\begin{array}{l} \sum \text{Fontes de emissões diretas x respectivos fatores de emissão} + \\ \sum \text{Fontes de emissões indiretas x respectivos fatores de emissão} - \\ \sum \text{Créditos x respectivos fatores de emissão} \end{array} \right).$$

A intensidade anual de emissão (I_{CO2})

$$I_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}}{\text{Produção}} = \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ Aço bruto}}.$$

4.9 Tabela de fatores de conversão

Na Tabela 4.2 estão os fatores de conversão fornecidos pela ISO e os fatores de conversão corrigidos para a CSN.

Tabela 4.2 – Fatores de conversão ISO 14404-1 e fatores de conversão CSN (Fonte: planilha Excel de análise de emissões de CO₂ e de energia para a UPV para simulação de novas tecnologias siderúrgicas, elaborada neste trabalho).

	Emissão Direta t CO2/unit		Emissão Indireta t CO2/unit		Crédito t CO2/unit		
	FC ISO	FC CSN	FC ISO	FC CSN	FC ISO	FC CSN	unit
Combustíveis/Gases							
1 Gás Natural (GN)	2,014	2,042	N/A	N/A	2,014	2,042	10³m³
2 Gás de Coqueria (GCO)	0,836	0,765	N/A	N/A	0,977 b	0,952 c	10³m³
3 Gás de alto forno (GAF)	0,891	0,81	N/A	N/A	0,170 b	0,185 c	10³m³
4 Gás de Aclaria (GLD)	1,512	1,526	N/A	N/A	0,432 b	0,470 c	10³m³
Combustíveis/Líquidos							
Obs:Condições ambientais de temperatura e pressão.							
5 Óleo Pesado	2,907	3,044	N/A	N/A	2,907		m³
6 Óleo Leve (óleo Diesel)	2,601	2,766	N/A	N/A	2,601		m³
7 Kerosene	2,481		N/A	N/A	2,481		m³
8 GLP	2,985	3,0102	N/A	N/A	2,985		t
Combustíveis Sólidos							
10 Carvão	3,059	2,971	N/A	N/A	3,059		t*
11 PCI	2,955	3,027	N/A	N/A	2,955		t*
12 Sinter / carvão BOF	2,784		N/A	N/A	2,784		t*
13 carvão vapor	2,461		N/A	N/A	2,461		t*
14 Coque comprado	3,257	3,257	0,224	0,224	3,481	3,481	t*
15 Carvão Vegetal	0		N/A	N/A	0		t*
Material Auxiliar							
Obs: *Insentes de umidade (base seca).							
16 Calcário	0,44	0,44	N/A	N/A	0,44		t*
17 Cal Calcética	N/A	N/A	0,95		0,95		t
18 Dolomita Bruta	0,471	0,471	N/A	N/A	0,471		t*
19 Cal Dolomítica	N/A	N/A	1,1		1,1		t
20 Nitrogênio	N/A	N/A	0,103	0,103	0,103	0,103	10³m³
21 Argônio	N/A	N/A	0,103	0,103	0,103	0,103	10³m³
22 Oxigênio	N/A	N/A	0,355	0,541	0,355	0,541	10³m³
Portadores de energia							
Obs:Condições ambientais de temperatura e pressão.							
23 Eletricidade	N/A	N/A	0,504	0,0653	0,504		MWh
24 Vapor	N/A	N/A	0,195	0,195	0,195	0,195	t
Materiais ferrosos							
25 Pellets	N/A		0,137	0,137	0,137		t
26 Sinter	N/A	0,2	Indeterminado		Indeterminado		t
27 Ferro Gusa	0,172		1,855		2,027		t
28 "Gusa Frio"	0,172		1,855		2,027		t
29 Gas based DRI	0,073		0,78		0,853		t
30 Coal based DRI	0,073		1,21		1,283		t
Ligas							
31 Ferro Níquel	0,037		N/A	N/A	0,037		t
32 Ferro Cromo	0,275		N/A	N/A	0,275		t
33 Ferro molibdênio	0,018		N/A	N/A	0,018		t
Produto/Sub-Produto							
34 CO2 para uso externo	1		N/A	N/A	1		
35 Alcatrão	3,389	3,389	N/A	N/A	3,389		t
36 Benzol (óleo leve de carvão)	3,382		N/A	N/A	3,382		t
Produto/Sub-Produto							
34 CO2 para uso externo	1		N/A	N/A	1		
35 Alcatrão	3,389	3,389	N/A	N/A	3,389		t
36 Benzol (óleo leve de carvão)	3,382		N/A	N/A	3,382		t
Outros							
37 Óleo ETEO		2,714				2,714	t
38 Óleo BTX		2,601				2,601	t
39 Escória (Alto Forno)					0	0	t
40 Escória (Aclaria)					0	0	t
41 Minério de Ferro		0,07334					t
42 Small Coque		0,88					t

b. Fator de emissão de crédito é baseado no equivalente mundial de eletricidade com base na metodologia da Worldsteel.

c. Fator de emissão de crédito é baseada em gás natural equivalente.

% Carbono:	
85 %	
64,35 %	
%butano: %propano	
30 %	70 %
Umidade:	
9 %	
9 %	
- %	
- %	
9 %	
- %	
Umidade:	
0,22 %	
0,22 %	

Deve-se estar sempre atento às unidades de conversão; alguns insumos como os combustíveis sólidos, calcário e dolomita, possuem umidade, e, por isso, sua contabilização deve ser feita em base seca.

4.10 Cálculo energético

Foram utilizadas duas formas de cálculos para contabilização energética, sendo uma a que a própria CSN utiliza e a outra fornecida pelo manual *CO₂ Emissions Data Collection*, da WorldSteel. Os métodos são parecidos, mudando apenas os tipos de insumos que são considerados por cada um.

4.10.1 Método WorldSteel

O método da WorldSteel calcula a intensidade de emissão com a metodologia idêntica ao utilizado para emissões de CO₂, variando-se apenas os fatores de conversão para emissões de CO₂, para fatores de conversão energéticos.

Na Tabela 4.3, retirada do manual *CO₂ Emissions Data Collection*, vol.6, tem-se fatores de conversão tanto de CO₂, quanto energéticos para os insumos.

4.10.2 Método utilizado pela CSN

Este método é similar ao anterior pelo fato de utilizar equivalentes caloríficos (equivalentes aos fatores de conversão para energia) para cada tipo de insumo. Alguns insumos levados em consideração neste caso são diferentes (como por exemplo, água, ar comprimido, vapores de alta e baixa pressão).

Na Tabela 4.4, tem-se os insumos considerados, bem como os seus respectivos equivalentes caloríficos. Alguns equivalentes caloríficos (como por exemplo, GCO, GAF, GLD) mudam ano a ano, conforme as mudanças nas características físicas dos seus insumos equivalentes. Os equivalentes caloríficos, quando multiplicados pelas quantidades de insumos, fornecem os resultados em Mcal/tab (mega caloria por tonelada absoluta de aço bruto). A Tabela 4.5 apresenta as médias dos equivalentes caloríficos de 2010 a 2012.

Tabela 4.3 – Fatores de emissão direta fornecidos pelo manual *CO₂ Emissions Data Collection*. (Fonte: <http://www.worldsteel.org/>)

Item	Unit	Default ncv (GJ/unit)	Conversion factor (tCO ₂ /GJ)	Emission factor (tCO ₂ /unit)	Reference
Coking coal	dry t	32.200	0.0950	3.059	IEA
BF injection coal	dry t	31.100	0.0950	2.955	IEA
Sinter/BOF coal	dry t	29.300	0.0950	2.784	IEA
Steam coal	dry t	25.900	0.0950	2.461	IEA
EDF coal	dry t	30.100	0.1082	3.257	IEA
SR/DRI coal	dry t	31.100	0.0950	2.955	worldsteel
Coke	dry t	30.100	0.1082	3.257	worldsteel
Charcoal	dry t	18.800	0.000	0.000	worldsteel
Heavy oil	m ³	37.700	0.0771	2.907	IEA
Light oil	m ³	35.100	0.0741	2.601	IEA
Kerosene	m ³	34.700	0.0715	2.481	IEA
LPG	t	47.300	0.0631	2.985	IEA
Natural gas	k.m ³ N	35.900	0.056	2.014	IEA
Limestone	dry t	0.000	0.000	0.440	IPCC
Crude dolomite	dry t	0.000	0.000	0.471	worldsteel
EDF/BOF electrodes	t	0.000	0.000	3.663	IPCC
Pig Iron	t	0.000	0.000	0.172	worldsteel
Gas based DRI	t	0.000	0.000	0.073	IPCC
Coal based DRI	t	0.000	0.000	0.073	IPCC
Ferro-Nickel	t	0.000	0.000	0.037	ISSF
Ferro-Chromium	t	0.000	0.000	0.275	ISSF
Ferro-Molybdenum	t	0.000	0.000	0.018	ISSF
Coke oven gas	k.m ³ N	19.000	0.044	0.836	worldsteel
Blast furnace gas	k.m ³ N	3.300	0.270	0.891	worldsteel
BOF gas	k.m ³ N	8.400	0.180	1.512	worldsteel
Coal tar	t	37.000	0.092	3.389	WRI
Benzol	t	40.570	0.083	3.382	worldsteel

Tabela 4.4 – Fatores de emissão indiretos (Fonte: < <http://www.worldsteel.org/>).

Item	Unit	Energy Equiv. value (GJ/unit)	Emission factor (tCO ₂ /unit)	Reference
Coke	dry t	4.000	0.224	worldsteel
Heavy oil	m ³	0.000	0.275	IEA
Light oil	m ³	0.000	0.247	IEA
Kerosene	m ³	0.000	0.247	IEA
Burnt lime	t	4.500	0.950	worldsteel
Burnt dolomite	t	4.500	1.100	worldsteel
Pellets	t	2.100	0.137	worldsteel
EDF/BOF electrodes	t	0.000	0.650	worldsteel
Pig Iron	t	20.000	1.855	worldsteel
Gas based DRI	t	14.100	0.780	worldsteel
Coal based DRI	t	17.900	1.210	worldsteel
Electricity	MWh	9.800	0.504	IEA
Steam	t	3.800	0.195	IEA
Oxygen	k.m ³ N	6.900	0.355	IEA
Nitrogen	k.m ³ N	2.000	0.103	IEA
Argon	k.m ³ N	2.000	0.103	worldsteel
Coke oven gas	k.m ³ N	19.000	0.977	worldsteel
Blast furnace gas	k.m ³ N	3.300	0.170	worldsteel
BOF gas	k.m ³ N	8.400	0.432	worldsteel

Tabela 4.5 – Médias dos equivalentes caloríficos de 2010 a 2012, para CSN. (Fonte: Balanço Energético Geral da CSN)

Insumo	Unid.	Equiv. Cal.
Ar comprimido	10 ³ m ³	226
Oxigênio	10 ³ m ³	1.562
Nitrogênio	10 ³ m ³	1.562
Água crua	T	354
Água clarificada	T	962
Água tratada	T	2.815
Água recirculada	T	32.103
Vapor Baixa Pressão	T	743
Vapor Alta Pressão	T	704
Energia elétrica 60Hz	MWh	2.500
Energia elétrica 50Hz	MWh	2.500
Atrafem	T	0
Coque	T	6.900
Coque Petróleo	T	7.600
Moinha Coque	T	6.500
Gás de Coqueria	10 ³ m ³	4.045
Gás de Alto Forno	10 ³ m ³	767
Gás de Aciaria	10 ³ m ³	1.915
Óleo Leve	T	9.000
Alcatrão	T	8.600
PCI	T	6.700
Carvão Metalúrgico	T	7.600
Gás Natural	10 ³ m ³	8.474
Óleos combustíveis	T	10.000
Diesel	kg	10
GLP	kg	12

4.11 Cálculo para a metalurgia

A chamada área da metalurgia abrange apenas a área de transformação da matéria prima em aço, ou equivale às categorias 1 e 2, mencionadas anteriormente. Quando o objetivo do cálculo de emissão for à comparação entre *benchmarks* (ou performances) entre as siderúrgicas integradas, o volume de controle deve ser traçado apenas ao redor da metalurgia.

De maneira geral nas siderúrgicas, as áreas das categorias 3 e 4 são favorecidas pelas áreas de utilidades (por exemplo no uso dos sistemas de tratamento de água, energia gerada nos geradores, uso dos turbo sopradores, dos compressores, óleo Diesel para transportes, etc.) que estão inseridas na metalurgia. Logo, as contabilizações de emissões de CO₂ e energia nas áreas de utilidades, quando se quer fazer o cálculo apenas para metalurgia, devem estar proporcionais ou corrigidas. Mas como isso deve ser feito?

A seguir, será apresentado um exemplo da CSN de como devem ser contabilizadas, para a metalurgia, as emissões de CO₂ e uso de energia relativa ao uso do nitrogênio nas áreas de utilidades. As Tabelas 4.6 a 4.9 apresentam as vazões de nitrogênio e as emissões de CO₂ e os equivalentes de energia correspondentes para a CSN.

Identificam-se então as porcentagens relacionadas a cada categoria:

Porcentagem das categorias 1 e 2 = $(377.923/477.632)*100 = 79,12 \%$;

Porcentagem das categorias 3 e 4 = $(99.708/477.632)*100 = 20,88 \%$.

Posteriormente, multiplicam-se a soma emissões de CO₂ e de energia das utilidades pela fração das porcentagens das categorias 1 e 2. Estes resultados serão as parcelas destinadas a metalurgia.

Assim, tem-se:

Emissão de CO₂ das utilidades destinadas à metalurgia = $704 \times 0,7912 = 577 \text{ tCO}_2\text{ano}$;

Equivalente em energia das utilidades destinadas à metalurgia = $10.669 \times 0,7912 = 8.442 \text{ Gcal/ano}$.

Tabela 4.6 – Uso de nitrogênio pelas categorias 1 e 2, sem utilidades.

Categorias 1 e 2	Nitrogênio (10 ³ m ³ /ano)	Emissão CO ₂ (t/ano)	Equiv. energia (Gcal/ano)
Coqueria	0	0	0
Carboquímicos	14.741	1.518	23.026
Sinterizações	0	0	0
Alto-forno 2	40.589	4.181	63.400
Alto-forno 3	73.750	7.596	115.198
Dessulfuração	1.560	161	2.437
Aciaria LD	163.970	16.889	256.122
Calcinação	0	0	0
RH	0	0	0
Forno panela	0	0	0
Corrida contínua	0	0	0
PCI	83.313	8.581	130.134
Fábrica de oxigênio	0	0	0

SOMA:	377.923	38.926	590.316
-------	---------	--------	---------

Tabela 4.7 – Uso de nitrogênio pelas categorias 3 e 4, sem utilidades.

Categorias 3 e 4	Nitrogênio (10 ³ m ³ /ano)	Emissão CO ₂ (t/ano)	Equiv. energia (Gcal/ano)
Placa	315	32	492
Linha tratamento a quente	0	0	0
Acabamento a quente	0	0	0
Decapagens	0	0	0
Recozimento em caixa	0	0	0
Limpeza eletrolítica	0	0	0
Recozimento contínuo	33.804	3.482	52.802
Linhas de tratamento a frio	0	0	0
Limpeza eletrolítica 1 (LE1)	0	0	0
LE2, LE3, LE4	0	0	0
Estanhamentos	0	0	0
Linha corte e reinspeção	0	0	0
Linha de recozimento contínuo	48.881	5.035	76.352
Linha de acabamento a frio	0	0	0
Zincagem contínua	16.709	1.721	26.099

SOMA:	99.708	10.270	155.744
-------	--------	--------	---------

Tabela 4.8 – Uso do nitrogênio pelas utilidades.

Utilidades	Nitrogênio (10 ³ m ³ /ano)	Emissão CO ₂ (t/ano)	Equiv. energia (Gcal/ano)
Outros	5.493	566	8.581
Tesoura 48	0	0	0
Compressores	0	0	0
Sistema água crua	0	0	0
Sist. água clarificada	0	0	0
Sist Água Tratada	0	0	0
Sist.água recirculada	0	0	0
Caldeiras de alta pressão	0	0	0
Caldeiras de baixa pressão	0	0	0
Distribuição de energia	69	7	109
Geradores - UG#50	0	0	0
Geradores - CTE2	1.268	131	1.980
Turbo Soprador - UG#50	0	0	0
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0
Moto Soprador	0	0	0
Perdas	0	0	0

SOMA:	6.831	704	10.669
-------	-------	-----	--------

Tabela 4.9 – Soma e porcentagem relacionada a cada categoria (sem utilidades).

	Gás Natural (10 ³ m ³ /ano)	Emissão CO ₂ (t/ano)	Equiv. energia (Gcal/ano)
Categorias 1 e 2	377.923	38.926	590.316
Categorias 3 e 4	99.708	10.270	155.744

SOMA:	477.632	49.196	746.061
-------	---------	--------	---------

Portanto, em relação ao nitrogênio, tem-se para a metalurgia:

Emissão de CO₂ = (38.926 + 577) = 39.503 tCO₂/ano;

Energia utilizada = (590.316 + 8.442) = 598.758 Gcal/ano.

Para grande parte dos insumos, a sua aplicação se dá fora das áreas de utilidades. Para os insumos que são aplicados apenas nas áreas de utilidades, utiliza-se a média de todas as médias dos insumos calculados.

4.12 Cálculo, para metalurgia, para combustíveis utilizados nas unidades geradoras de energia elétrica e vapor

Os combustíveis GCO, GAF, GLD, GN, óleos combustíveis, entre outros, são, na maioria das siderúrgicas, destinados às centrais geradoras de vapor e energia elétrica. Logo, a porcentagem a ser considerada de emissão e energia deve estar relacionada tanto à energia elétrica distribuída quanto à energia contida no vapor distribuído. Caso haja, além desses, mais algum insumo (como por exemplo, ar soprado) que seja gerado dentro dessas unidades e destinada a outras áreas, a sua parcela energética distribuída também deve ser considerada.

Na Tabela 4.10, tem-se a distribuição de vapor, energia elétrica e ar soprado na CSN nas categorias 1 a 4.

Assim, as porcentagens de energia são:

Categorias 1 e 2: 63,07 %;

Categorias 3 e 4: 36,93 %

A geração de CO₂ e de consumo energético destinado à metalurgia nas unidades geradoras devem seguir a porcentagem de distribuição energética de vapor e energia dentro da usina.

Na CSN, por exemplo, usa-se na central termoelétrica, em média, $102.124 \times 10^3 \text{ m}^3$ de GN/ano. Logo a emissão ou parcela energética desse insumo na central termoelétrica destinado à metalurgia é de $102.124 \times 0,6307 \times (\text{fator de conversão})$.

Tabela 4.10 – Distribuição de energia elétrica, vapor e ar soprado utilizado nas categorias 1 a 4 da CSN.

	Energia relacionada ao Ar Soprado (Gcal / ano)	Energia Vapor de Alta Pressão (Gcal / ano)	Energia Vapor de Baixa Pressão (Gcal / ano)	Energia Bruta equivalente para geração Elétrica (Gcal / ano)
Coqueria	0	0	22.284	79.116
Carboquímicos	0	116.519	225.318	55.041
Sinterizações	0	0	0	513.188
Alto-forno 2	442.579	0	74.693	144.642
Alto-forno 3	945.651	0	124.511	159.529
Dessulfuração	0	0	0	9.311
Aciaria LD	0	0	0	264.261
Calcinação	0	0	0	62.936
RH	0	39.279	32.967	0
Forno panela	0	0	0	0
Corrida continua	0	0	0	122.425
PCI	0	0	0	0
Fabrica de oxigênio	0	0	73.048	1.538.868
Placa	0	0	0	28.579
LTQ 2	0	0	36.013	1.156.254
Acabamento a quente	0	0	0	1.724
Decapagens	0	0	60.521	108.363
Recozimento em caixa	0	0	0	23.957
Limpeza eletrolítica	0	0	29.608	5.750
LER	0	0	0	32.036
Recozimento contínuo	0	0	112.189	71.784
LTF	0	0	44.082	538.107
LE1	0	0	208	3.447
LE2, LE3, LE4	0	0	5.004	77.169
LPB	0	0	0	23.329
Estanhamentos	0	0	136.894	224.347
Linha corte e reinspeção	0	0	0	8.106
LRCC	0	0	16.936	75.859
LACF#4	0	0	0	5.077
Zincagem contínua	0	0	58.918	70.972

Categorias 1 e 2: 5.046.166 Gcal/ano

Categorias 3 e 4: 2.955.232 Gcal/ano

5. TECNOLOGIAS SIDERÚRGICAS PARA ECONOMIA DE ENERGIA

5.1 Coqueria

5.1.1 Apagamento a seco do coque

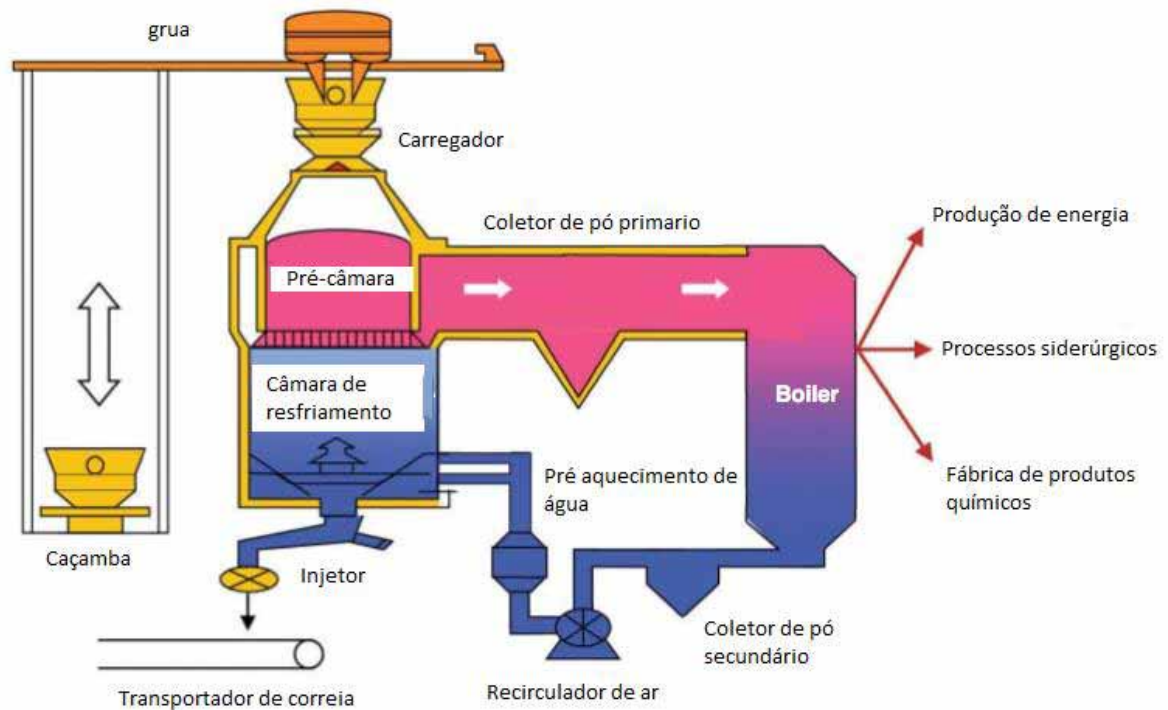
O apagamento a seco (Figura 5.1) é uma alternativa para o método de esfriamento do coque tradicional (apagamento com água). Esse método reduz a emissões de pó, melhora o ambiente de trabalho e recupera o calor sensível do coque. O coque quente vindo dos fornos de coqueria é resfriado em câmaras de resfriamento em contra corrente a um gás inerte (nitrogênio) em um circuito fechado. Neste processo há um coletor de pó, uma caldeira de recuperação de calor, ventiladores, dispositivos de sopro (que introduzem ar frio pela parte de baixo da câmara) e dutos de circulação. O apagamento a seco é tipicamente executado como sendo uma tecnologia de controle ambiental. Vários sistemas já são usados no Brasil, Finlândia, Alemanha, Japão. A energia recuperada na câmara de resfriamento é armazenada em um reservatório, que por sua vez é utilizada para produzir vapor. Este que pode ser utilizado diretamente nos processos da indústria ou para produzir eletricidade.

Sobre a tecnologia pode-se afirmar (SIEMENS-VAI, 2013):

- A energia recuperada é de 800 a 1200 MJ por tonelada de coque, sendo estimada 0,48 tonelada de vapor por tonelada de coque;
- As emissões de poeira, CO₂ e SO_x são diminuídas;
- A qualidade do coque produzido é melhorada, aumentando a dureza em até 4%.

Figura 5.1 – Esquema do processo de apagamento a seco. (Fonte:

<http://ietd.iipnetwork.org/content/coke-dry-quenching>)



5.1.2 Controle de umidade do carvão

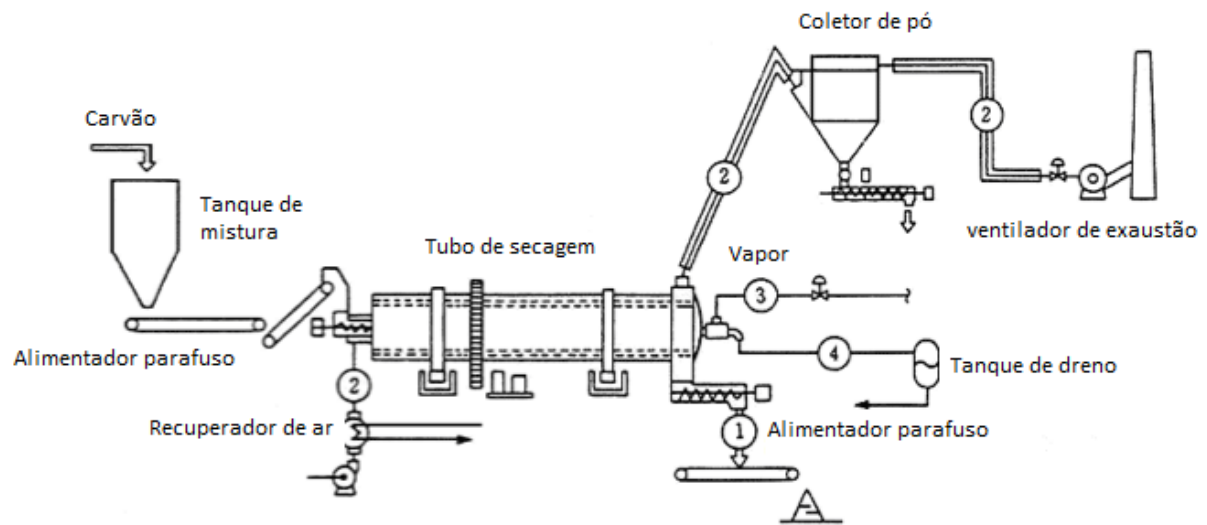
A tecnologia de controle de umidade do carvão (Figura 5.2) utiliza calor residual do gás de coqueria para retirada de umidade do carvão que será transformado em coque.

O teor de umidade dos carvões utilizados em fornos de coque está em entre 8 e 9%. Com a tecnologia, a umidade relativa no carvão seria reduzida para 3-5%, o que reduziria o consumo de combustíveis nos fornos de coque. Adicionalmente, pode-se afirmar (SIEMENS-VAI, 2013):

- A energia recuperada é aproximadamente 0,3 GJ por tonelada de coque produzida;
- A qualidade do coque é melhorada em até 1,7%;
- A produção de coque é aumentada em até 10%;
- O tempo de coqueificação é menor;
- Há diminuição em poluição da água.

Figura 5.2 – Esquema do processo de diminuição do teor de umidade do carvão.

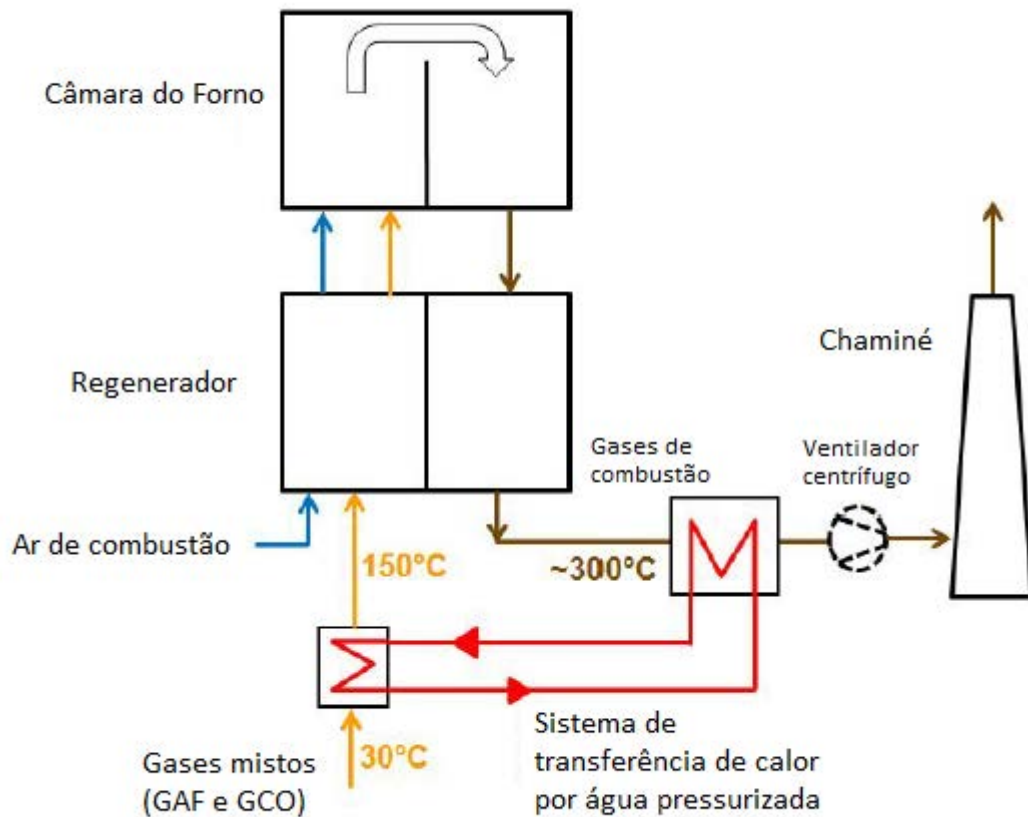
(Fonte: <http://ietd.iipnetwork.org/content/coal-moisture-control>)



5.1.3 Pré-aquecimento dos gases combustíveis

O gás de alto forno e o gás de coqueria são atualmente pré-aquecidos a 60°C (utilizando calor de vapor vindo das centrais termoelétricas) antes de serem queimados nas baterias de coque. Ao invés de substituir o vapor para o pré-aquecimento, a energia térmica dos produtos de combustão pode ser utilizada para aquecer um sistema de água pressurizada, que por sua vez irá pré-aquecer os gases antes da combustão. Um esquema do processo é apresentado na Figura 5.3. Essa tecnologia pode pré-aquecer os gases mistos de 30 para 150 °C aproveitando o calor residual do produto de combustão dos gases mistos no processo de coqueificação, que estão em média a 300°C.

Figura 5.3 – Esquema da tecnologia de pré-aquecimento dos gases combustíveis.
(SIEMENS-VAI, 2013)

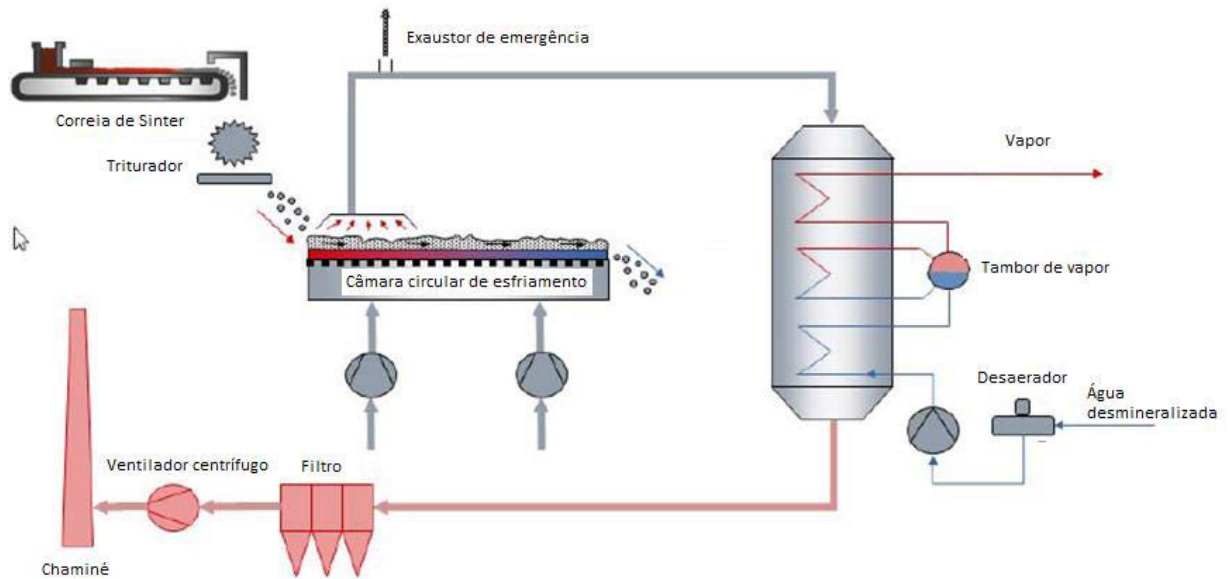


5.2 Sinterização

5.2.1 Recuperação de calor residual

Para recuperação de calor dos gases residuais do refrigerador da Sinter, existem várias opções, sendo aqui mostrada a utilização do calor residual para produção de vapor (Figura 5.4).

Figura 5.4 – Esquema da recuperação de calor residual na sinterização. (SIEMENS-VAI, 2013)



5.3 Alto forno

5.3.1 Turbina de topo (TRT)

A turbina de topo (Figura 5.5) aproveita a pressão na saída do gás de alto forno para geração de energia elétrica. Esta pode gerar de 40 a 60 kWh por tonelada de ferro gusa produzida pelo forno.

5.3.2 Granulação a seco da escória de alto forno

Esta é uma tecnologia similar ao apagamento a seco de coque, porém, neste caso, a escória é utilizada como fonte de energia (Figura 5.6). A escória vinda do alto forno é granulada por rotação no interior de uma câmara de esfriamento; a energia entregue para o gás em contracorrente pode ser utilizada para aquecer uma caldeira e, por fim, produzir vapor. Este pode ser aproveitado pelos processos ou para produção

de energia elétrica. A energia contida na escória é aproximadamente de 1,5 GJ por tonelada.

Figura 5.5 – Turbina de topo. (Fonte: <http://ietd.iipnetwork.org/content/top-pressure-recovery-turbines>)

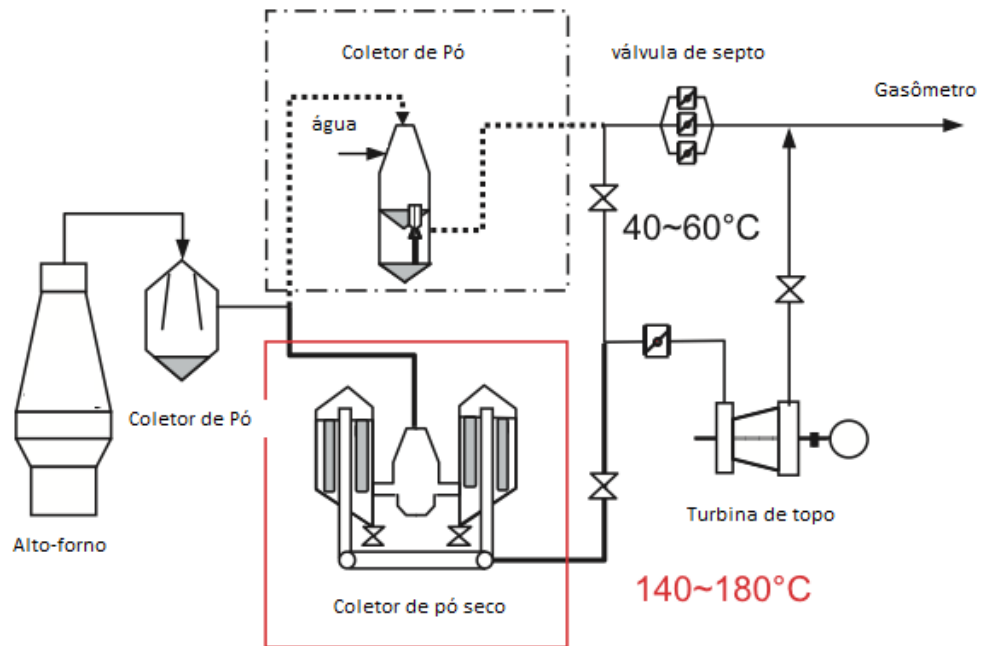
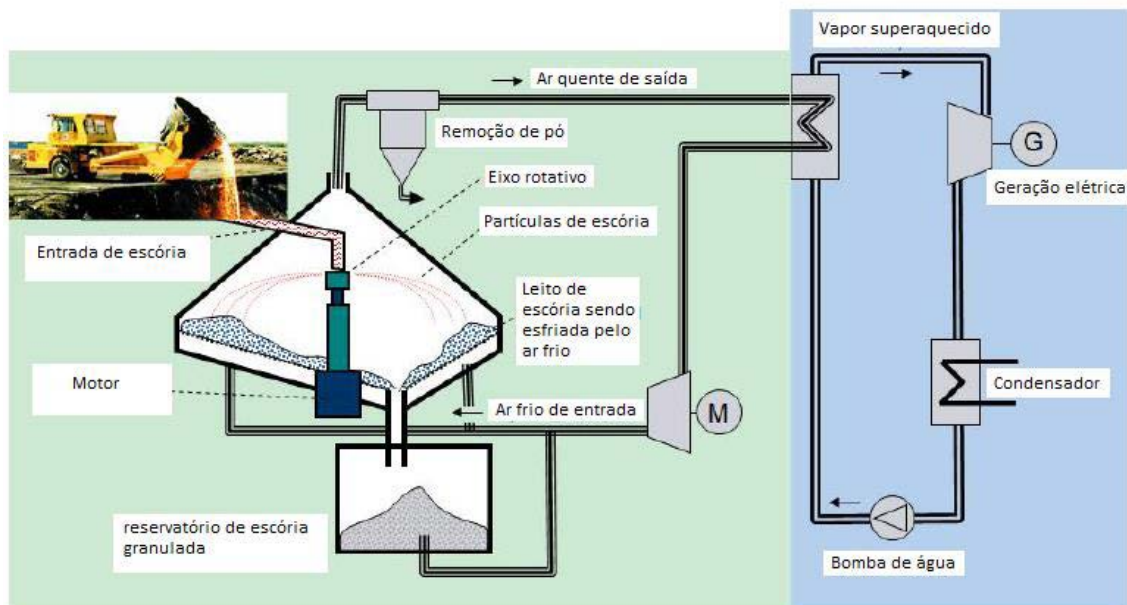


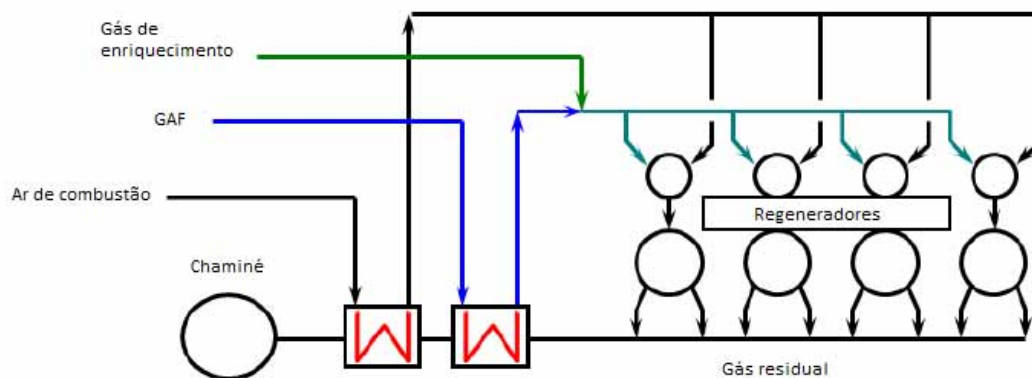
Figura 5.6 – O processo de granulação a seco da escória. (SIEMENS-VAI, 2013)



5.3.3 Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores

Os gases produtos da combustão após passarem pelos regeneradores se encontram a uma temperatura próxima de 250 °C. O aproveitamento deste calor residual poderia, por intermédio de trocadores de calor, aumentar a temperatura de entrada nos regeneradores dos gases GAF e ar de combustão da temperatura ambiente para aproximadamente 150-180°C. Um esquema do processo é mostrado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores.
(SIEMENS-VAI, 2013)



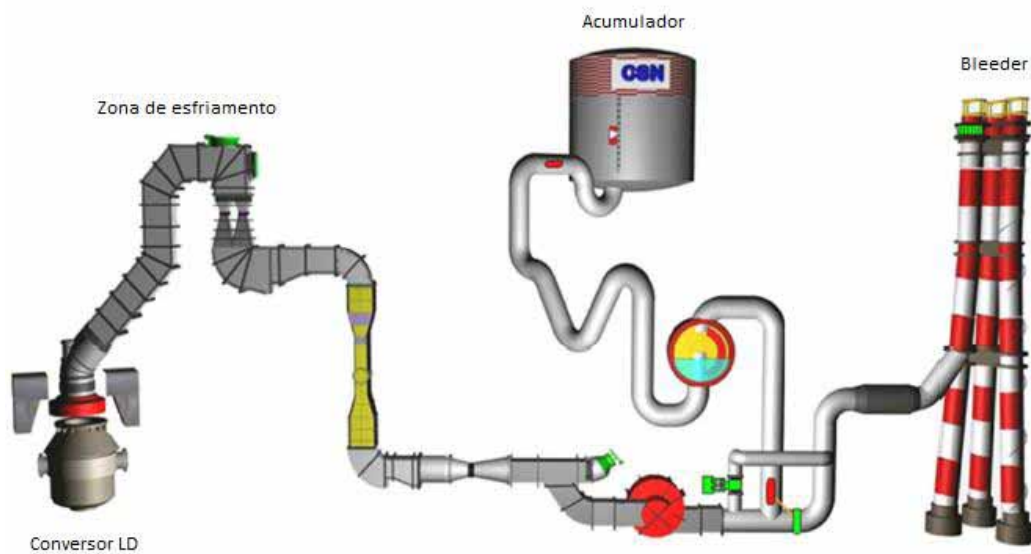
5.4 Aciaria

5.4.1 Recuperação de calor do gás de aciaria

O gás de aciaria, que é o gás que sai dos conversores LD (no processo de transformação de gusa em aço), é esfriado por refrigeradores à água, de uma temperatura de aproximadamente 1800 °C para aproximadamente 75 °C. Todo o calor contido no gás é transferido para a água, que por sua vez não é aproveitado. Na Figura 5.8, pode-se verificar como é o processo atual na CSN.

Figura 5.8 – Processo atual de resfriamento e armazenamento do gás de aciaria.

(SIEMENS-VAI, 2013)

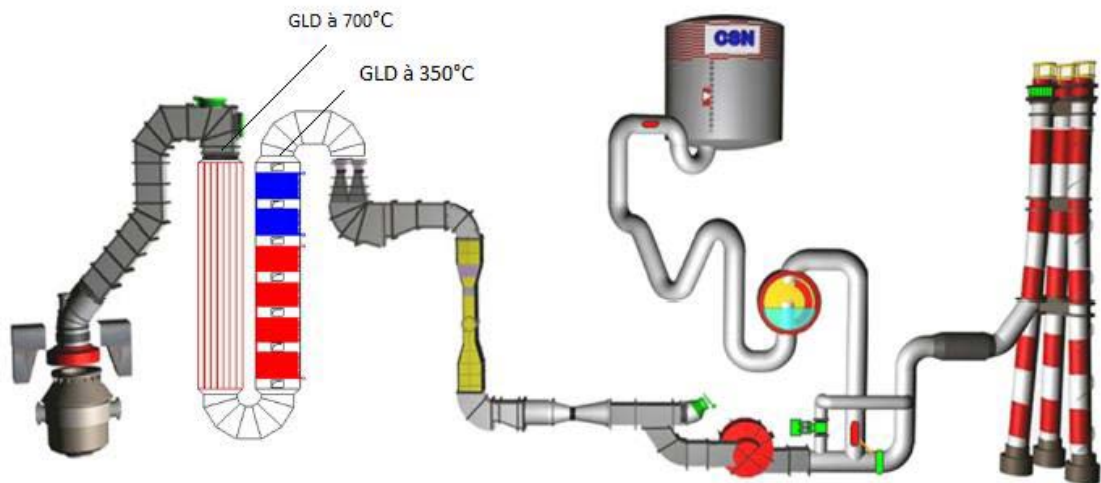


Existem três opções dadas pela empresa Siemens para recuperação do calor do gás de aciaria, que serão chamadas de opções A, B e C.

5.4.1.1 Opção A

A opção A consiste na aplicação de um trocador de calor que trabalha sobre o gás já previamente resfriado. O gás seria esfriado de 1800 °C até uma temperatura aproximada de 700 °C por refrigerador à água e, posteriormente, passaria pelo trocador proposto, retirando o calor do mesmo de 700 °C para 350 °C, conforme mostra a Figura 5.9.

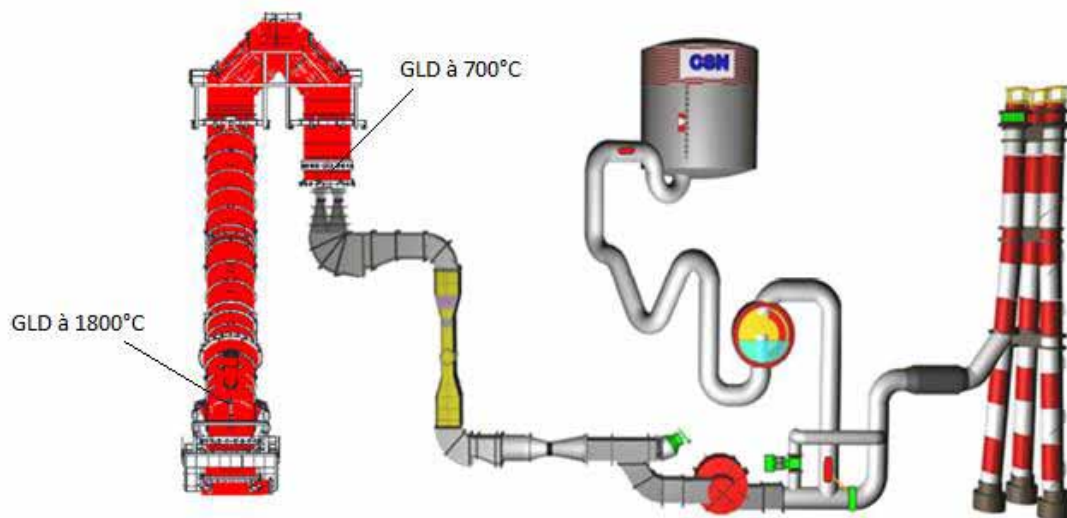
Figura 5.9 – Opção A. (SIEMENS-VAI, 2013)



5.4.1.2 Opção B

A opção B, mostrada na Figura 5.10, seria a aplicação de uma estrutura que aproveitaria o calor de saída do conversor. O princípio básico é aproveitar o calor que o refrigerador à água desperdiça, aproveitando, portanto, o calor da variação de 1800°C a 700°C.

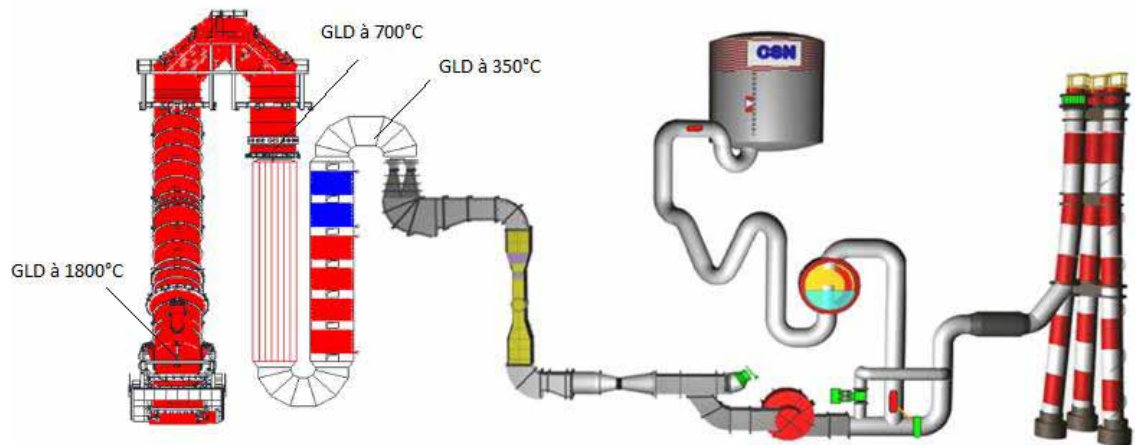
Figura 5.10 – Opção B. (SIEMENS-VAI, 2013).



5.4.1.3 Opção C

A opção C é nada mais nada menos que a aplicação conjunta das opções A e B, conforme mostrado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Opção C. (SIEMENS-VAI, 2013)



5.5 Laminação de tiras a quente (LTQ)

5.5.1 Aproveitamento de calor residual da LTQ

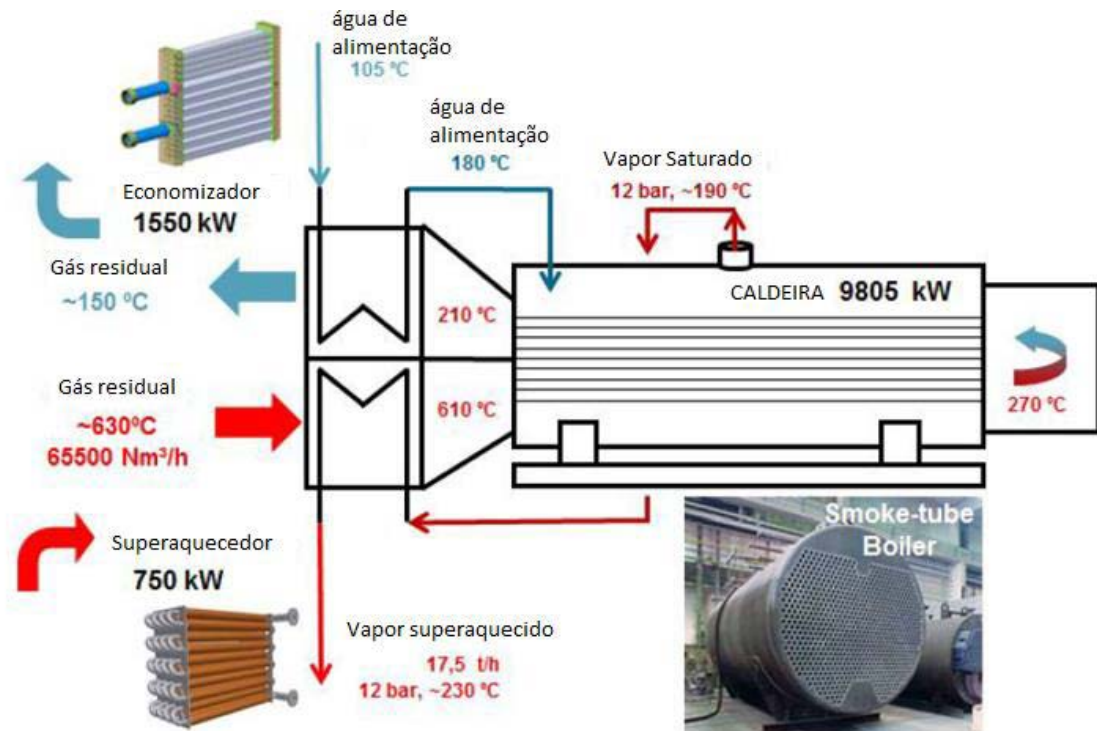
A tecnologia reaproveita o calor residual dos fornos de reaquecimento de placas. Como feito no capítulo anterior, separando em opções, na seção de reaquecimento de placas pode-se ter duas opções, D e E.

5.5.1.1 Opção D

O gás que deixa os fornos de reaquecimento de placas está a uma temperatura aproximada de 1000 °C; ele é, então, resfriado a 630 °C, pré-aquecendo o ar de combustão. O ar de combustão é aquecido da temperatura ambiente para 350°C. A

opção D é justamente direcionar gás que está a 630°C para caldeiras do tipo Smoke-tube, produzindo vapor de processo, conforme mostrado na Figura 5.12. O vapor de processo, que é produzido atualmente nas centrais termoelétricas, poderia então ser direcionado diretamente para produção de energia elétrica.

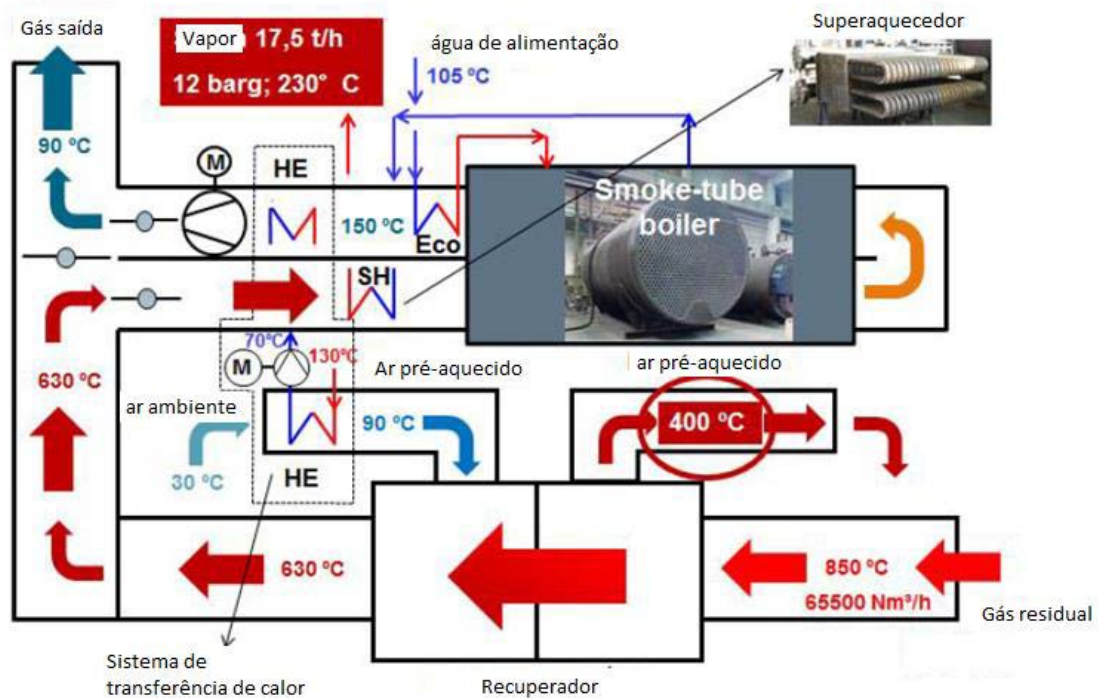
Figura 5.12 – Caldeiras do tipo Smoke-Tube, opção D. (SIEMENS-VAI, 2013).



5.5.1.2 Opção E

A opção E é a recuperação do calor residual do ar que sai da caldeira anterior (a 150°C) para pré-aquecer o ar de combustão antes do mesmo ser pré-aquecido pelos gases residuais do forno, conforme mostra a Figura 5.13. Deste modo o ar pré-aquecido de combustão entraria com 400°C (e não mais a 350°C).

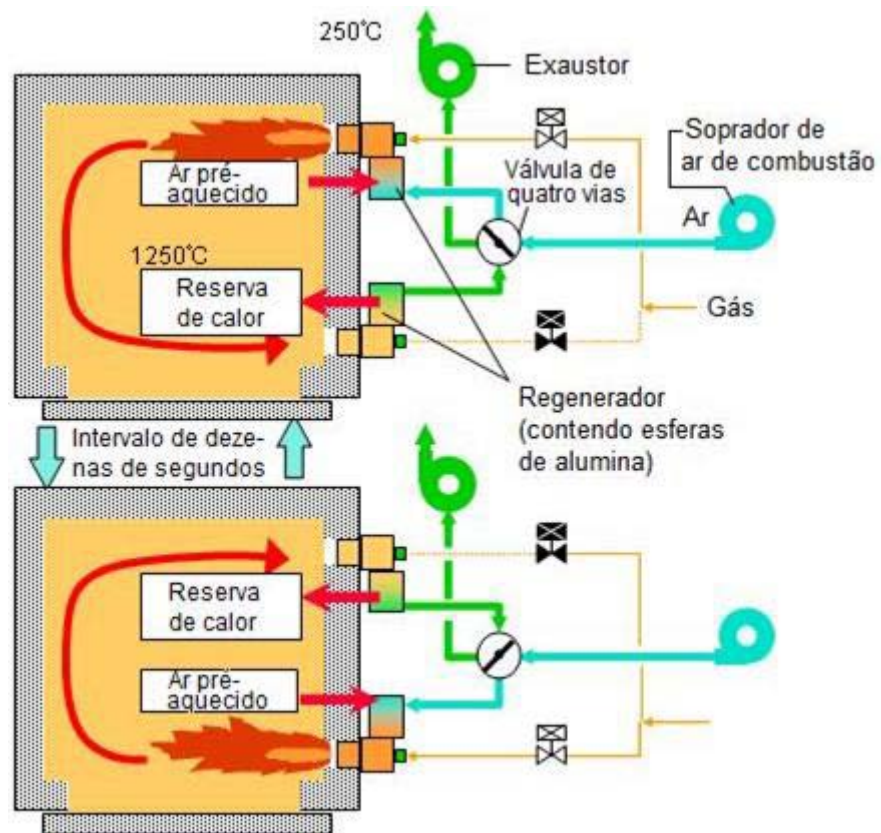
Figura 5.13 – Opção E. (SIEMENS-VAI, 2013)



5.5.2 Queimadores regenerativos

Os queimadores regenerativos compõem um sistema de recuperação de calor residual dos gases de escape do forno para pré-aquecer o ar de combustão do mesmo. Os queimadores regenerativos usam reservatórios de calor (regeneradores) para acúmulo de calor para que a queima seja mais eficiente; funcionam em pares, conforme mostrado na Figura 5.14. Durante a combustão quando um dos lados está em combustão, o outro está acumulando energia dos gases de escape. Então os queimadores trocam. O que estava em acúmulo entra em combustão e o que estava em combustão começa acumular calor. Com este queimador é possível haver uma redução de 20-50% de energia, dependendo do tipo de forno e das condições do combustível.

Figura 5.14 – Sistema de queimadores regenerativos. (Fonte: <http://www.osakagas.co.jp/rd/use/066e.html>)



6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Emissões de CO₂ total e de metalurgia

Todos os cálculos foram incorporados a uma planilha Excel que faz parte deste trabalho e é incluída em um CD neste documento.

A seguir, na Figura 6.1, apresenta-se um fluxograma da somatória total de insumos que entram na usina e as respectivas emissões de CO₂ (com fatores de conversão dos insumos da CSN). Tem-se, também, representado no final da figura, os insumos que são produzidos internamente e vendidos (e que por sua vez são créditos).

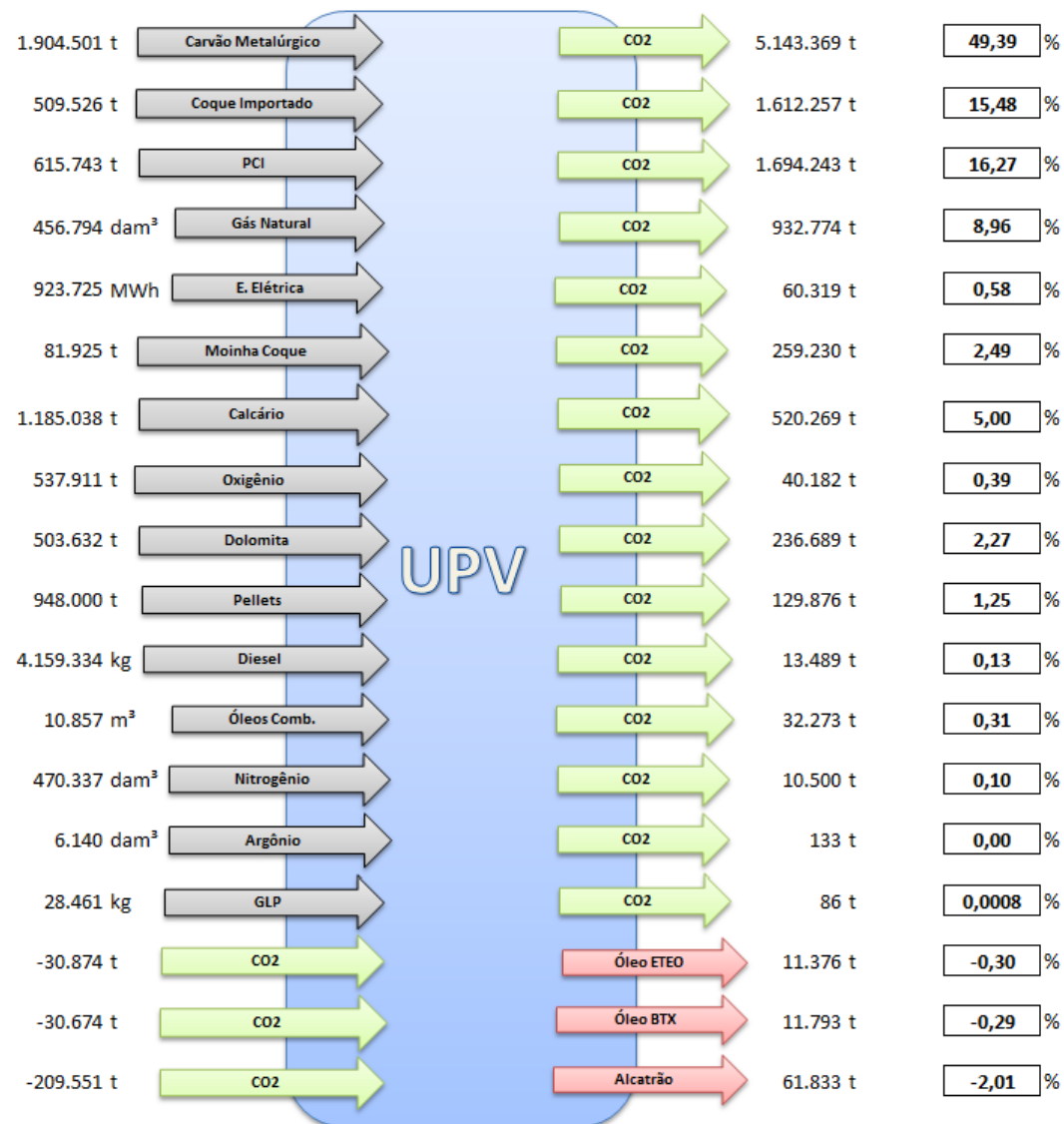
Considera-se também no resultado final o fator de crédito para cada tonelada de aço lingotado como sendo 0,0032 t.CO₂/tab (US-EPA, 2005). Deve-se lembrar que na CSN existe uma TRT (turbina de topo) instalada recentemente no alto forno 3. O crédito gerado por esse equipamento também está sendo considerado.

A Figura 6.2 apresenta um fluxograma com os créditos internos da UPV.

Apresenta-se a seguir a emissão de CO₂ médio por tonelada de aço bruto entre os anos de 2010 e 2012.

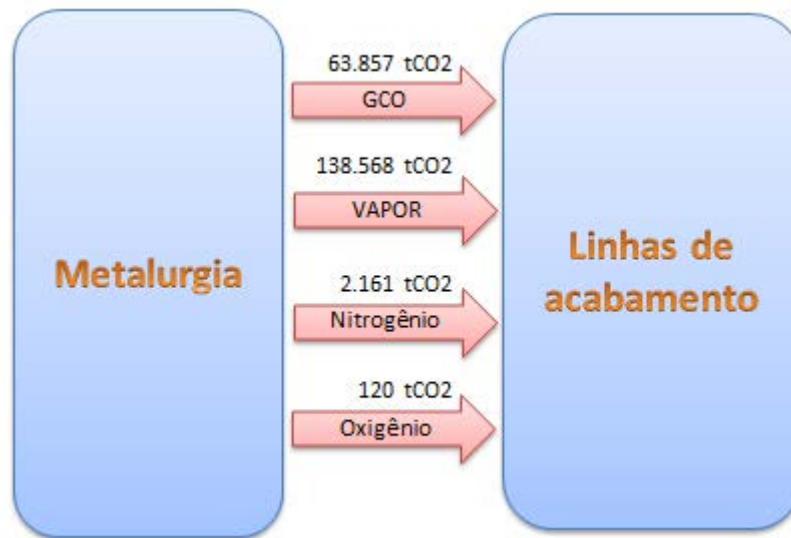
	t.CO2/tab
Emissão total CO₂ (ISO) =	2,319
Emissão Metalurgia CO₂ (ISO) =	2,079

	t.CO2/tab
Emissão total CO₂ (UPV) =	2,177
Emissão Metalurgia CO₂ (UPV) =	2,000

Figura 6.1 – Emissões de CO₂ da UPV.

Total CO ₂ :	10.414.591	T
Aço Líquido:	4.999.164	T
Aço Bruto:	4.869.836	T

Figura 6.2 – Créditos internos da UPV.



6.2 Simulação das tecnologias para a coqueria

6.2.1 Apagamento a seco do coque

Conforme mencionado anteriormente, o apagamento a seco do coque gera em média uma economia de 1,5 GJ por tonelada de coque produzido. Isso equivale a 2.248.748 GJ/ano, o que seria uma economia de 0,46 GJ/tab. Geraria em média 824.541 MWh/ano, que seria uma redução de emissão de 415.569 tCO₂/ano.

6.2.2 Controle de umidade do carvão

Com potencial de redução de 0,3 GJ/t.coque, a tecnologia teria um potencial de redução de 449.750 GJ/ano, equivalente a 0,09 GJ/tab. Como a tecnologia propõe reduzir a energia empregada na pirólise do carvão, considera-se no cálculo, a

diminuição de vazão dos combustíveis utilizados (nas condições de funcionamento padrão da coqueria), que são GCO e GAF. Assim, tem-se:

$$\begin{aligned} [\text{Redução de CO}_2] = \\ (0,4 \times 449.750 \times 0,765) / \text{PCI}(\text{GCO}) + (0,6 \times 449.750 \times 0,810) / \text{PCI}(\text{GAF}) = \\ 76.234 \text{ t.CO}_2/\text{ano}, \end{aligned}$$

sendo: 0,4 = porcentagem da energia total empregada na coqueria pelo GCO e 0,6 = porcentagem da energia total empregada na coqueria pelo GAF, 0,765 = fator de conversão do GCO, 0,810 = fator de conversão do GAF, $\text{PCI}(\text{GCO}) = 17,452 \text{ GJ}/10^3\text{m}^3$, e $\text{PCI}(\text{GAF}) = 3,198 \text{ GJ}/10^3\text{m}^3$.

6.2.3 Pré-aquecimento dos gases

Considera-se, no cálculo básico da energia recuperada, como sendo a energia que a central termoeletrica deixará de consumir para produzir o vapor e a energia recuperada dos gases produtos de combustão. Assim, a energia necessária para gerar 29.056 t de vapor a 250 °C e 12 bar é:

$$Q = [\text{Massa de vapor} \times (h_v - h_a) / \text{eficiência}] + [\text{Energia retirada dos gases de exaustão}],$$

ou seja,

$$Q = (29.056 \times 1000 \times ((2935,6 - 83,91) / 0,42)) / (1000000) + 0,1 \times 1.499.165.$$

$$Q = 347.199 \text{ GJ/ano} = 0,07 \text{ GJ/tab.}$$

sendo $h_v = 2935,6 \text{ kJ/kg}$ e $h_a = 83,91 \text{ kJ/kg}$ (valores da entalpia da água).

Para a redução de CO₂ tem-se:

Redução CO₂ = [CO₂ equivalente ao vapor deixado de ser consumido] + [CO₂ equivalente à emissão da mistura de COG + BFG] =

[CO₂ equivalente ao vapor deixado de ser consumido] + [((0,1x1.499.165)/(PCI do COG + BFG))x(Fator de conversão do COG + BFG)] =

$(29.056 \times 0,195) + ((0,1 \times 1.499.165) / 4,9) \times 0,655 = 25.697 \text{ t.CO}_2/\text{ano}.$

Para o cálculo do PCI foi considerada uma mistura de 11,09 % de gás de coqueria e 88,91 % de gás de alto forno, lembrando que o PCI do gás misto está em GJ/dam³.

6.3 Simulação das tecnologias para a sinterização

6.3.1 Recuperação de calor residual

Segundo o relatório da SIEMENS-VAI (3013), a recuperação de calor dos gases de exaustão da sínter seria suficiente para produzir 0,036 t de vapor (230 °C e 12 bar) por tonelada de sínter produzida. Isso seria uma quantidade equivalente a 219.000 t de vapor por ano. A energia recuperada seria:

$Q = \text{Massa de vapor} \times (h_v - h_a) / \text{eficiência},$

ou seja,

$Q = 219.000 \times (h_v - h_a) / \text{eficiência} = 219.000 \times (2888,6 - 441,0) / 0,9 / 100.000 = 482.422 \text{ GJ/ano},$

sendo: $h_v = 2888,6 \text{ kJ/kg}$ (230 °C e 12 bar), $h_a = 441,0 \text{ kJ/kg}$ (105 °C e 12 bar), eficiência = 0,9.

A emissão de CO_2 para essa quantidade de vapor é de 42.705 t. CO_2 /ano.

6.4 Simulação das tecnologias para o alto forno

6.4.1 Turbina de topo (TRT)

Uma turbina de topo é capaz de gerar em média de 40 a 60 kWh por tonelada de ferro gusa produzida. Isso significa que a instalação de uma TRT no alto forno 2 seria capaz de gerar 73.619 MWh/ano de energia elétrica. A turbina de topo do alto forno 3 gera anualmente 146.211 MWh/ano. Isso seria equivalente a 883.428 GJ/ano de energia bruta para o alto forno 2 e 1.754.538 GJ/ano de energia bruta para o alto forno 3. A redução de CO_2 (relacionada à energia elétrica) seria de 37.104 t. CO_2 /ano para o alto forno 2 e atualmente a TRT no alto forno 3 reduz 73.691 t. CO_2 /ano.

6.4.2 Granulação a seco da escória de alto forno

O potencial de redução energético é na ordem de 1,5 GJ por tonelada de escória produzida. Isso seria equivalente a 657.000 GJ/ano (0,13GJ/tab) para o alto forno 2 e 1.533.000 GJ/ano (0,31 GJ/tab) para o alto forno 3. Transferindo esta energia para produção de vapor teríamos:

$$Q \times \text{eficiência} = \text{Massa de vapor} \times (h_v - h_a);$$

$$\text{Massa de Vapor anual} = (0,9 \times (\text{energia escória}) / ((2888,6 - 83,91) \times 0,001),$$

sendo: $h_v = 2888,6 \text{ kJ/kg}$ (230°C e 12 bar), $h_a = 88,91 \text{ kJ/kg}$ (20°C), eficiência = 0,8.

A massa de vapor produzida pela energia retirada da escória seria de 187.400 t/ano para o alto forno 2 e de 437.268 t/ano para o alto forno 3. Uma redução de respectiva de CO_2 de 36.543 t. CO_2 /ano para o alto forno 2 e 85.267 t. CO_2 /ano para o alto forno 3.

6.4.3 Pré-aquecimento do GAF e/ou ar de combustão dos regeneradores

Reaproveitando o calor contido nos gases produtos de combustão dos regeneradores seria possível pré-aquecer o ar de combustão e o GAF de 45°C para 160°C . Essa energia de variação de entalpia é equivalente a 92.709 GJ/ano para o alto forno 2 e de 224.983 GJ/ano para o alto forno 3. Isso implicaria na redução de combustível nos regeneradores. A redução de CO_2 equivalente ao combustível economizado é de 18.306 t. CO_2 /ano para o alto forno 2 e 224.963 t. CO_2 /ano para alto forno 3.

6.5 Simulação das tecnologias para a aciaria

6.5.1 Recuperação de calor do gás de aciaria

6.5.1.1 Opção A

A energia recuperada pela opção A é da ordem de 0,0756 GJ por tonelada de aço processado (lingotado), equivalente a 377.756 GJ/ano. Tem-se:

$$Q_{\text{BOFG}} \times \eta = Q_{\text{vapor}},$$

sendo: $Q_{BOFG} = (\text{Variação entálpica do gás BOFG de } 900 \text{ a } 350 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times \text{vazão mássica anual do gás}$; $Q_{\text{vapor}} = \text{massa de vapor} \times (\text{variação de entálpia de } 25 \text{ a } 250 \text{ }^{\circ}\text{C})$.

Considera-se vapor $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e 12 bar e o rendimento da caldeira = $\eta = 0,8$.

A massa de vapor anual produzida seria na ordem de 106.789t/ano, equivalente à um abatimento na ordem de 20.824 t.CO₂/ano.

6.5.1.2 Opção B

A energia recuperada na opção B é da ordem de 0,136 GJ por tonelada de aço processado (lingotado), equivalente a 677.765 GJ/ano. Fazendo um raciocínio similar a opção anterior, temos:

$$Q_{BOFG} \times \eta = Q_{\text{vapor}},$$

sendo: $Q_{BOFG} = (\text{Variação entálpica do gás BOFG de } 1800 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ até } 900 \text{ }^{\circ}\text{C}) \times \text{vazão anual do gás}$; $Q_{\text{vapor}} = \text{vazão mássica} \times (\text{variação de entálpia de } 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ até } 250 \text{ }^{\circ}\text{C})$.

Considera-se vapor $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e 12 bar e o rendimento da caldeira = $\eta = 0,8$.

A massa de vapor seria de 191.610t/ano, equivalente a uma emissão de 37.364 t.CO₂/ano.

6.5.1.3 Opção C

A opção C, como dito anteriormente, seria a aplicação das opções A e B juntas. Logo, a economia de energia seria da ordem de 0,211 GJ por tonelada de aço processada, o que daria uma produção de 298.427 t de vapor (nas condições anteriores) e um abatimento de 58.193 t.CO₂/ano.

6.6 Simulação das tecnologias para a laminação de tiras a quente (LTQ)

6.6.1 Opção D

Considerando a energia de variação de temperatura de 903 K para 423 K, do gás de exaustão do forno de reaquecimento de placa do LTQ, a composição do gás de exaustão como sendo 8,32% CO₂, 16,22% H₂O, 2,79% O₂, e 72,67% N₂, e a vazão de 65500 m³/h, tem-se:

Energia recuperada para 8 caldeiras = 3.244.352 GJ/ano;

Energia elétrica produzida = $0,3 \times 3.244.352 \times 1000/3600 = 270.363$ MWh/ano, equivalente a um abatimento de 136.263 t.CO₂/ano.

6.6.2 Opção E

Considerando a energia correspondente à variação de temperatura de 903 K para 363 K do gás de exaustão do forno de reaquecimento de placas da LTQ, a composição do gás de exaustão como sendo 8,32% CO₂, 16,22% H₂O, 2,79% O₂, e 72,67% N₂, e a vazão de 65500 m³/h, tem-se:

Energia recuperada para 8 caldeiras = 3.824.833 GJ/ano.

Energia elétrica produzida = $0,3 \times 3.824.833 \times 1000/3600 = 302.069$ MWh/ano , equivalente a um abatimento de 152.243 t.CO₂/ano.

6.6.3 Queimadores regenerativos

A energia possível de ser recuperada é calculada como:

Energia recuperada = $((8471000000 \times 4,184 \times 216899)/10^9) \times 0,35 = 2.690.617$
GJ/ano,

sendo $PCI(GN) = 8.471.000.000 \text{ J/dam}^3$.

A taxa de redução energética é de 20 a 50%, sendo assumida aqui a média 35%, o que equivale a um abatimento de 155.018 t.CO₂/ano.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de produzir uma ferramenta para calcular as emissões de CO₂ no setor siderúrgico. Uma planilha foi desenvolvida de maneira permitir o cálculo das intensidades de emissões de CO₂ de uma usina siderúrgica. No caso, foram utilizados dados de produção e processo da Usina Presidente Vargas, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), fornecendo resultados e fluxos energéticos e simulando os benefícios que algumas novas tecnologias podem proporcionar à empresa. A planilha calcula as emissões de duas maneiras: a) com base nos fluxos de carbono que entra na usina, e b) com base nas emissões de cada processo específico dentro da usina (coqueria, sinterização, alto forno, etc.). Considerando os fatores de emissão ISO, os valores obtidos, para os anos 2010-2012, foram 2,32 e 2,08 tCO₂/tab, valores total e de metalurgia, respectivamente. Considerando os fatores de emissão calculados especificamente para a UPV, os valores obtidos, também para os anos 2010-2012, foram 2,18 e 2,00 tCO₂/tab, valores total e de metalurgia, respectivamente. O total emitido para o triênio 2010-2012 foi 10.414.591 tCO₂/ano.

As novas tecnologias estudadas, com a finalidade de abater as emissões de CO₂, foram a) apagamento a seco do coque, b) controle de umidade do carvão para coqueificação, c) pré-aquecimento dos gases combustíveis na coqueria, d) recuperação de calor residual na sinterização, e) utilização de turbina de topo nos altos fornos, f) granulação a seco da escória de alto forno, g) pré-aquecimento de gás de alto forno e/ou ar de combustão nos regeneradores de alto forno, h) recuperação de calor do gás de aciaria (três opções), i) aproveitamento de calor residual da laminação de tiras a quente (duas opções), e j) uso de queimadores regenerativos. Dessas tecnologias, a que apresenta maior potencial de abatimento de CO₂ é o apagamento a seco do coque, com redução de emissão equivalente a 415.569 tCO₂/ano.

REFERÊNCIAS

ABREU, G.C., Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Processo de Fabricação do Sinter. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2011.

ARCE, G.L.A.F., Uma Modelagem de Sequestro e Armazenamento de Dióxido de Carbono Atmosférico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2008.

CARVALHO, J.A., Processos e Equipamentos de Combustão. Material Didático, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2011.

CUNNINGHAM, W.P.; CUNNINGHAM, M.A., Principles of Environmental Science: Inquiry and Applications, The McGraw-Hill Companies, 2004.

DUPV – Diretoria de Operação da UPV, Análise de Carvões, 2004.

GARRETT, C.W., 1992. On global climate change, carbon dioxide, and fossil fuel combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 18:369-407.

HELD, I.M.; SODEN, B.J., 2000. Water vapor feedback and global warming. Annual Review of Energy and the Environment, 25:441-475, 2000.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M., Energy: Its Use and the Environment, Thomas Learning, Inc., 2002.

JACOB, D.J., Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press, 1999.

JARDIM, J.C., Carvão e Coque Aplicados à Siderurgia. Material Didático, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 1991.

LIU, G.; ZHENG, M.; DUA, B.; NIE, Z.; ZHANG, B.; LIU, W.; LI, C.; HUA, J., 2012. Atmospheric emission of polychlorinated naphthalenes from iron ore sintering processes. *Chemosphere*, 89:467–472.

MOREIRA, D.B.; LANA, M.F., A Geração de Escória de Aciaria LD pelo Método de Convertedor com Sopros de Oxigênio, Material Didático, Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2002.

MOURÃO, M.B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; SILVA, L.C.A.; TAKANO, C.; QUITES, E.E.C.; GENTILE, E.F.; SILVA, G.F.B.L.; BOLOTA, J.R.; GONÇALVES, M.; FACO, R.J., Introdução à Siderurgia, ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007.

NOBLAT, S.J.X., Processo de Alto Forno Aplicado à Operação na Companhia Siderúrgica Nacional, Volta Redonda, RJ, 2005.

PRENTICE, I.C.; FARQUHAR, G.D.; FASHAM, M.J.R.; GOULDEN, M.L.; HEIMANN, M.; JARAMILLO, V.J.; KHESHGI, H.S.; LE QUERE, C.; SCHOLLES, R.J.; WALLACE, D.W.R.; ARCHER, D.; ASHMORE, M.R.; AUMONT, O.; BAKER, D.; BATTLE, M.; BENDER, M.; BOPP, L.P.; BOUSQUET, P.; CALDEIRA, K.; CIAIS, P.; COX, P.M.; CRAMER, W.; DENTENER, F.; ENTING, I.G.; FIELD, C.B.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HOLLAND, E.A.; HOUGHTON, R.A.; HOUSE, J.I.; ISHIDA, A.; JAIN, A.K.; JANSSENS, I.A.; JOOS, F.; KAMINSKI, T.; KEELING, C.D.; KEELING, R.F.; KICKLIGHTER, D.W.; HOHFELD, K.E.; KNORR, W.; LAW, R.; LENTON, T.; LINDSAY, K.; MAIER-REIMER, E.; MANNING, A.C.; MATEAR, R.J.; MCGUIRE, A.D.; MELILLO, J.M.; MEYER, R.; MUND, M.; ORR, J.C.; PIPER, S.; PLATTNER, K.; RAYNER, P.J.; SITCH, S.; SLATER, R.; TAGUCHI, S.; TANS, P.P.; TIAN, H.Q.; WEIRIG, M.F.; WHORF, T.; YOOL, A., The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, in Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2005: The Scientific Basis*, edited by IPCC, pp. 183-238, Cambridge University, 2005.

SCHNEIDER, S.H., 1989. The greenhouse effect: science and policy. *Science*, 243:771-781.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.P., Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc., 1998.

SIEMENS-VAI, CSN Study Report, 2013.

SILVA, A.M., Estudo da Utilização da Biomassa em Substituição Parcial ao Carvão Mineral no Processo de Fabricação do Ferro-Gusa em Alto Forno, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2008.

SILVA, A.M., Estudo da Combustão dos Carvões e Misturas com Coque Verde de Petróleo Injetadas em Altos Fornos, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Campus de Guaratinguetá, 2006.

U.S.-EPA, United States Environmental Protection Agency, Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol, 2005.

U.S. STANDARD ATMOSPHERE, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976.

APÊNDICE

Tabelas de Consumo

Tabela A1 – Produção de cada unidade industrial e consumo de ar comprimido, ar soprado, oxigênio, argônio e nitrogênio. Anos 2010 – 2012.

Produção média (2010/2012)		Produções Unidades Industriais	Ar Comprimido (10 ³ m ³ /ano)	Ar Soprado (10 ³ m ³ /ano)	Oxigênio (10 ³ m ³ /ano)	Argônio (10 ³ m ³ /ano)	Nitrogênio (10 ³ m ³ /ano)
A. Líquido =	4.999.164						
A. Bruto =	4.869.836						
Coqueria		1.499.165	7.681	0	0	0	0
Carboquímicos		1.499.165	30.714	0	0	0	14.741
Sinterizações		6.079.046	61.146	0	0	0	0
Alto-Forno 2		1.472.380	9.334	1.689.232	59.772	0	40.589
Alto-Forno 3		3.249.144	88.298	3.609.356	192.796	0	73.750
Dessulfuração		4.783.517	3.198	0	0	0	1.560
Aciaria LD		4.999.164	54.193	0	263.117	3.392	163.970
Calcinacao		507.007	0	0	0	0	0
RH		451.746	0	0	0	0	0
Forno Panela		1.172.561	0	0	0	0	0
Corrida Contínua		4.869.836	10.002	0	20.071	1.106	0
PCI		0	529	0	0	0	83.313
Placa		4.893.988	5.855	0	1.606	0	315
LTQ 2		4.893.988	111.248	0	0	0	0
Acabamento a Quente		1.896.865	32.780	0	0	0	0
Decapagens		2.463.643	90.087	0	0	0	0
Recozimento em Caixa		450.116	1.329	0	0	0	0
Limpeza Eletrolítica		115.030	2.909	0	0	0	0
LER		323.407	0	0	0	0	0
Recozimento Contínuo		642.381	14.805	0	0	0	33.804
LTF		2.247.716	103.364	0	0	0	0
LE 1		29.699	686	0	0	0	0
LE 2, LE 3, LE 4		727.911	14.849	0	0	0	0
LPB		658.790	6.658	0	0	0	0
Estanhamentos		635.324	19.684	0	0	0	0
Linha Corte e Reinspeção		74.227	54	0	0	0	0
LRCC		439.230	1.337	0	0	0	48.881
LACF#4		67.723	3.265	0	0	0	0
Zincagem Contínua		576.042	12.365	0	0	0	16.709
Outros		0	41.580	0	549	1.642	5.493
Tesoura 48		0	0	0	0	0	0
COMPRESSORES		754.485	0	0	0	0	0
FABRICA DE OXIGÊNIO		429.040	369	0	0	0	0
Sistema Água Crua		231.861	0	0	0	0	0
Sist.Água Clarificada		74.088	0	0	0	0	0

Sist Água Tratada	4.165	0	0	0	0	0
Sist.Água Recirculada	11.867	9.930	0	0	0	0
Caldeiras de A.P.	7.559.814	14.404	0	0	0	0
Caldeiras de B.P.	1.576.724	0	0	0	0	0
Distribuição de Energia	0	2.199	0	0	0	69
Geradores - UG#50	98.746	0	0	0	0	0
Geradores - CTE2	1.190.504	0	0	0	0	1.268
Turbo Soprador - UG#50	0	0	0	0	0	0
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0	0	0	0
Moto Soprador	0	0	0	0	0	0
Perdas	0	0	0	0	0	0
Total		754.854	5.298.588	537.911	6.140	470.337
Produção		754.854	5.298.588		0	
Balanco		0	0	537.911	6.140	470.337

Tabela A2 – Consumo de água e vapor. Anos 2010 – 2012.

	Água					Vapor	
	Crua (t/ano)	Clarificada (t/ano)	Tratada (t/ano)	Recircula da (t/ano)	Desminerali zada (t/ano)	Alta Pressão (t/ano)	Baixa Pressão (t/ano)
Coqueria	3.845	0	0	0		0	31.646
Carboquimicos	49.254	387	0	0		156.914	319.986
Sinterizações	0	7.602	0	0		0	0
Alto-Forno 2	4.157	0	0	1.315		0	106.075
Alto-Forno 3	9.527	1.793	0	789		0	176.825
Dessulfuração	0	0	0	0		0	0
Aciaria LD	426	56	0	701		0	0
Calcinacao	0	61	0	0		0	0
RH	0	0	0	0		52.897	46.818
Forno Panela	0	0	0	0		0	0
Corrida Contínua	0	0	0	3.335		0	0
PCI	524	341	0	0		0	0
Placa	5.066	0	0	1.637		0	0
LTQ 2	0	1	0	3.375		0	51.145
Acabamento a Quente	1.909	0	0	9		0	0
Decapagens	0	4.421	0	9		0	85.949
Recozimento em Caixa	0	0	0	0		0	0
Limpeza Eletrolítica	0	1.104	0	0		0	42.048
LER	146	89	0	0		0	0
Recozimento Contínuo	0	31	0	118		0	159.326
LTF	0	5.033	0	264		0	62.603
LE 1	82	82	0	0		0	295
LE 2, LE 3, LE 4	0	4.328	0	66		0	7.106
LPB	0	92	0	0		0	0
Estanhamentos	0	17.063	0	114		0	194.410
Linha Corte e Reinspeção	0	0	0	0		0	0
LRCC	0	858	0	63		0	24.051
LACF#4	0	19	0	0		0	0
Zincagem Contínua	0	2.200	0	9		0	83.672
Outros	513	2.957	4.043	3		0	0
Tesoura 48	0	0	0	0		0	0
COMPRESSORES	0	309	0	60		0	0
FABRICA DE OXIGÊNIO	0	1.945	0	1.885		0	103.180
Sistema Água Crua	0	0	0	0		0	0
Sist.Água	74.088	0	0	0		0	0

Clarificada							
Sist Água Tratada	0	4.227	122	0		0	0
Sist.Água Recirculada	4.612	10.399	0	0		0	0
Caldeiras de A.P.	1.031	1.080	0	0		57.219	13.988
Caldeiras de B.P.	0	0	0	0		111.546	0
Distribuição de Energia	136	0	0	2.601	2.045	0	1.380
Geradores - UG#50	45.114	0	0	0		595.172	473
Geradores - CTE2	0	5.748	0	0		5.626.684	0
Turbo Soprador - UG#50	36.044	0	0	0		138.008	3.592
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0	0		794.507	0
Moto Soprador	0	1.853	0	0			0
Perdas	0	0	0	0		26.694	47.302
Total	236.473	72.137	4.166	11.867	2.045	7.559.642	1.458.691
Produção	231.861	74.088	4.165	13.752	2.045	7.559.814	1.576.724
Balanco	4.612	-1.952	0	-1.885	0	-172	-118.033

Tabela A3 – Consumo de energia elétrica e de derivados de carvão. Anos 2010 – 2012.

	Energia Elétrica (MWh/ano)			Derivados do Carvão			
	60 Hz (MWh/ano)	50 Hz (MWh/ano)	Total (soma 50Hz + 60Hz)	Antrafem (t/ano)	Coque (t/ano)	Coque Petróleo (t/ano)	Moinha Coque (t/ano)
Coqueria	31.646	0	31.646	0	0	0	0
Carboquímicos	21.944	72	22.016	0	0	0	0
Sinterizações	205.275	0	205.275	0	0	0	285.812
Alto-Forno 2	56.200	1.656	57.857	0	546.403	0	0
Alto-Forno 3	63.280	532	63.812	0	1.258.402	0	0
Dessulfuração	3.724	0	3.724	0	0	0	0
Aciaria LD	104.731	973	105.704	0	0	0	0
Calcinacao	25.174	0	25.174	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	0	0	0
Forno Panela	0	0	0	0	0	0	0
Corrida Contínua	48.466	504	48.970	0	0	0	0
PCI	0	0	0	0	0	0	0
Placa	11.432	0	11.432	0	0	0	0
LTQ 2	462.502	0	462.502	0	0	0	0
Acabamento a Quente	0	690	690	0	0	0	0
Decapagens	43.345	0	43.345	0	0	0	0
Recozimento em Caixa	3.013	6.570	9.583	0	0	0	0
Limpeza Eletrolítica	1.771	529	2.300	0	0	0	0
LER	12.730	84	12.814	0	0	0	0
Recozimento Contínuo	28.713	0	28.713	0	0	0	0
LTF	214.208	1.035	215.243	0	0	0	0
LE 1	0	1.379	1.379	0	0	0	0
LE 2, LE 3, LE 4	25.831	5.037	30.867	0	0	0	0
LPB	5.391	3.941	9.331	0	0	0	0
Estanhamentos	74.944	14.795	89.739	0	0	0	0
Linha Corte e Reinspeção	3.242	0	3.242	0	0	0	0
LRCC	30.344	0	30.344	0	0	0	0
LACF#4	2.031	0	2.031	0	0	0	0
Zincagem Contínua	28.389	0	28.389	0	0	0	0
Outros	0	19.965	19.965	0	0	0	0
Tesoura 48	0	0	0	0	0	0	0
COMPRESSORES	68.150	0	68.150	0	0	0	0
FABRICA DE OXIGÊNIO	615.461	0	615.461	0	0	0	0
Sistema Água Crua	11.030	21.694	32.724	0	0	0	0
Sist.Água	11.155	7.472	18.627	0	0	0	0

Clarificada							
Sist Água Tratada	36	3.023	3.059	0	0	0	0
Sist.Água Recirculada	194.383	756	195.139	0	0	0	0
Caldeiras de A.P.	0	17.682	17.682	0	0	0	0
Caldeiras de B.P.	0	0	0	0	0	0	0
Distribuição de Energia	9.993	0	9.993	0	0	0	0
Geradores - UG#50	0	2.142	2.142	0	0	0	0
Geradores - CTE2	0	0	0	0	0	0	0
Turbo Soprador - UG#50	0	2.401	2.401	0	0	0	0
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0	0	0	0	0
Moto Soprador	294.987	1.982	296.969	0	0	0	0
Perdas	0	0	0	0	0	0	0
Total	2.098.061	114.914	2.212.975	0	1.804.805	0	285.812
Produção	1.190.504	98.746	1.289.249		1.295.279		203.886
Balanco	907.557	16.168	923.725	0	509.526	0	81.925

Tabela A4 – Consumo de GCO, GAF, GLD, óleo leve, alcatrão e carvão de PCI. Anos 2010 – 2012.

	GCO (10 ³ m ³ /ano)	GAF (10 ³ m ³ /ano)	GLD (10 ³ m ³ /ano)	Óleo Leve (t/ano)	Alcatrão (t/ano)	PCI (t/ano)
Coqueria	140.310	1.124.549	0	0	0	0
Carboquímicos	9.107	0	0	0	0	0
Sinterizações	31.785	0	0	0	0	0
Alto-Forno 2	36.216	559.545	0	0	0	183.744
Alto-Forno 3	117.281	1.303.671	0	0	0	431.999
Dessulfuração	0	0	0	0	0	0
Aciaria LD	1.903	0	0	0	0	0
Calcinacao	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	0	0
Forno Panela	0	0	0	0	0	0
Corrida Contínua	1.903	0	0	0	0	0
PCI	0	59.794	0	0	0	0
Placa	23.314	0	0	0	0	0
LTQ 2	0	0	0	0	0	0
Acabamento a Quente	0	0	0	0	0	0
Decapagens	0	0	0	0	0	0
Recozimento em Caixa	15.543	0	0	0	0	0
Limpeza Eletrolítica	0	0	0	0	0	0
LER	0	0	0	0	0	0
Recozimento Contínuo	32.071	0	0	0	0	0
LTF	0	0	0	0	0	0
LE 1	0	0	0	0	0	0
LE 2, LE 3, LE 4	0	0	0	0	0	0
LPB	0	0	0	0	0	0
Estanhamentos	0	0	0	0	0	0
Linha Corte e Reinspeção	0	0	0	0	0	0
LRCC	23.841	0	0	0	0	0
LACF#4	0	0	0	0	0	0
Zincagem Contínua	12.019	0	0	0	0	0
Outros	53.069	0	0	0	0	0
Tesoura 48	0	0	0	0	0	0
COMPRESSORES	0	0	0	0	0	0
FABRICA DE OXIGÊNIO	0	0	0	0	0	0
Sistema Água Crua	0	0	0	0	0	0

Sist.Água Clarificada	0	0	0	0	0	0
Sist Água Tratada	0	0	0	0	0	0
Sist.Água Recirculada	0	0	0	0	0	0
Caldeiras de A.P.	0	0	0	0	0	0
Caldeiras de B.P.	0	0	0	0	0	0
Distribuição de Energia	0	0	0	0	0	0
Geradores - UG#50	27.427	912.852	0	0	0	0
Geradores - CTE2	139.214	3.230.306	303.792	0	809	0
Turbo Soprador - UG#50	0	0	0	0	0	0
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0	0	0	0
Moto Soprador	0	0	0	0	0	0
Perdas	15.972	751.954	128.676	0	0	0
Total	680.976	7.942.672	432.467	0	809	615.743
Produção	680.976	7.942.672	432.467	11.793	62.642	
Balanço	0	0	0	-11.793	-61.833	615.743

Tabela A5 – Consumo de carvão metalúrgico, GN, óleos combustíveis, diesel, e GLP.
Anos 2010 – 2012.

	Carvão Metalúrgico Importado (t/ano)	Gás Natural (10 ³ m ³ /ano)	Óleos Combustíveis (t/ano)	Diesel (kg/ano)	GLP (kg/ano)
Coqueria	1.904.501	3.158	0	0	0
Carboquímicos	0	1.378	0	0	0
Sinterizações	0	23.421	0	0	0
Alto-Forno 2	0	0	0	0	0
Alto-Forno 3	0	1.247	0	0	0
Dessulfuração	0	0	0	0	0
Aciaria LD	0	208	0	0	0
Calcinacao	0	46.058	0	0	0
RH	0	0	0	0	0
Forno Panela	0	0	0	0	0
Corrida Contínua	0	730	0	0	0
PCI	0	1.279	0	0	0
Placa	0	216.899	0	0	0
LTQ 2	0	0	0	0	0
Acabamento a Quente	0	0	0	0	0
Decapagens	0	0	0	0	0
Recozimento em Caixa	0	0	0	0	0
Limpeza Eletrolítica	0	0	0	0	0
LER	0	0	0	0	0
Recozimento Contínuo	0	0	0	0	0
LTF	0	0	0	0	0
LE 1	0	0	0	0	0
LE 2, LE 3, LE 4	0	0	0	0	0
LPB	0	0	0	0	0
Estanhamentos	0	0	0	0	0
Linha Corte e Reinspeção	0	0	0	0	0
LRCC	0	1.117	0	0	0
LACF#4	0	0	0	0	0
Zincagem Contínua	0	13.721	0	0	0
Outros	0	33.826	0	4.159.334	28.461
Tesoura 48	0	0	0	0	0
COMPRESSORES	0	0	0	0	0
FABRICA DE OXIGÊNIO	0	0	0	0	0
Sistema Água Crua	0	0	0	0	0
Sist.Água Clarificada	0	0	0	0	0

Sist Água Tratada	0	0	0	0	0
Sist.Água Recirculada	0	0	0	0	0
Caldeiras de A.P.	0	0	0	0	0
Caldeiras de B.P.	0	0	0	0	0
Distribuição de Energia	0	0	0	0	0
Geradores - UG#50	0	11.630	10.424	0	0
Geradores - CTE2	0	102.124	433	0	0
Turbo Soprador - UG#50	0	0	0	0	0
Turbo Soprador - CTE2	0	0	0	0	0
Moto Soprador	0	0	0	0	0
Perdas	0	0	0	0	0
Total	1.904.501	456.794	10.857	4.159.334	28.461
Produção					
Balanço	1.904.501	456.794	10.857	4.159.334	28.461

Tabela A6 – Consumo energético total e metalurgia. Ano 2010 – 2012.

	Total	Somente metalurgia
	(Mcal/tab)	(Mcal/tab)
Coqueria	3.293	3.293
Carboquímicos	99	99
Sinterizações	558	558
Alto-Forno 2	1.330	1.330
Alto-Forno 3	3.067	3.067
Dessulfuração	2	2
Aciaria LD	242	242
Calcinacao	93	93
RH	15	15
Forno Panela	0	0
Corrida Continua	56	56
PCI	26	26
Placa	412	-
LTQ 2	266	-
Acabamento a Quente	2	-
Decapagens	40	-
Recozimento em Caixa	18	-
Limpeza Eletrolítica	8	-
LER	7	-
Recozimento Contínuo	71	-
LTF	127	-
LE 1	1	-
LE 2, LE 3, LE 4	19	-
LPB	5	-
Estanhamentos	79	-
Linha Corte e Reinspeção	2	-
LRCC	50	-
LACF#4	1	-
Zincagem Contínua	64	-
Outros	128	88
Tesoura 48	0	0
COMPRESSORES	35	20
FABRICA DE OXIGÊNIO	340	188
Sistema Água Crua	17	4
Sist.Água Clarificada	15	8
Sist Água Tratada	2	0
Sist.Água Recirculada	103	56
Caldeiras de A.P.	21	11
Caldeiras de B.P.	17	17
Distribuição de Energia	19	10

Geradores - UG#50	303	225
Geradores - CTE2	1.783	1.441
Turbo Soprador - UG#50	25	24
Turbo Soprador - CTE2	121	121
Moto Soprador	153	84
Perdas	193	173

Soma:

6.199	5.421
-------	-------

 [Mcal/A. Bruto]

Soma:

25.935	22.682
--------	--------

 [MJ/A. Bruto]

Total:	12.889	Mcal/tab	A. Líquido:	4.999.164	t
Produção:	6.691	Mcal/tab	A. Bruto (tab):	4.869.836	t
Balanço:	6.199	Mcal/tab			

	GJ/tab
Consumo energético Total =	25,57
Consumo energético Metalurgia =	22,32