



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ROSENILDO LIMA GOMES

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO DE 40 t  
UTILIZANDO GUSA LIQUIDO.**

MARABÁ  
2012

ROSENILDO LIMA GOMES

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO DE 40 t  
UTILIZANDO GUSA LÍQUIDO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.  
Orientador: Prof. Márcio Corrêa de Carvalho

MARABÁ  
2012

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Gomes, Rosenildo Lima

Análise energética de um forno elétrico a arco de 40 T utilizando gusa líquido / Rosenildo Lima Gomes ; orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2012.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2012.

1. Fornos elétricos. 2. Energia - Consumo. 3. Ferro fundido. 4. Usinas siderúrgicas. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.1424

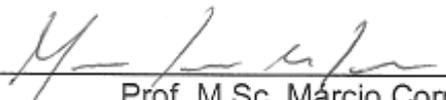
---

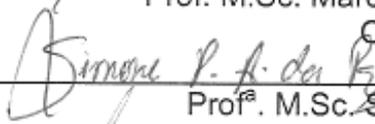
ROSENILDO LIMA GOMES

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO DE 40 T  
UTILIZANDO GUSA LIQUIDO.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de  
Engenharia de Materiais da  
Universidade Federal do Pará –  
UFPA, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia de Materiais.  
Orientador: Prof. Márcio Corrêa de  
Carvalho

Data de aprovação: 14/08/2012  
Conceito: EXCELENTE  
Bancada Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho  
ORIENTADOR – UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Simone Aranha da Paz  
EXAMINADOR – UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luis Moreira Gomes  
EXAMINADOR – UFPA

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a cada pessoa que ao longo de minha vida acadêmica teve confiança e respeito pelo que eu almejo, foram inúmeros professores e amigos que entraram e saíram da minha vida, provas difíceis, tropeços e vitórias. Momentos de extrema alegria, proporcionados pelo êxtase da aprovação no vestibular até as inesquecíveis confraternizações da FEMAT 07, e por perdas de amigos que estarão para sempre em meu coração. In memoriam aos meus queridos e eternos amigos, Felipe e Danilo, que partiram deixando duas certezas, a primeira é que o mundo pode ser melhor, bastando somente um sorriso e a segunda é que o mundo perdeu um pouco do seu brilho com a partida tão cedo de pessoas tão maravilhosas.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus de infinitas graças, que com sua misericórdia e compaixão ilimitadas me concedeu o dom de ter uma família maravilhosa e amigos sensacionais, além de me oferecer oportunidades e dar forças para superar todos os obstáculos ao longo de toda minha vida, em especial no período desses quase cinco de Marabá-PA.

Aos meus pais queridos o Senhor Raimundo e dona Vera, que sempre fizeram de tudo para me oferecer uma educação com princípios éticos e morais. Sendo durante toda minha vida os pilares de sustentação social, religiosa e econômica.

Aos melhores irmãos do mundo Rogério e Vivian, pelo incentivo, apoio e por me aturarem em todas as horas que chorei pensando que tudo parecia perdido.

Aos meus amigos da querida e melhor turma que já tive o prazer de estudar FEMAT 2007 pelo carinho, “respeito” e brincadeiras.

Um agradecimento em especial a Milto, Erson, Andreia, Jhone, e Erson, que dividiram durante toda minha graduação, momentos sem iguais de alegria, proporcionados por vitórias e superações.

Agradeço a Rejane que é uma pessoa que sempre me deu carinho, amizade, força e confiança.

Ao meu orientador professor Marcio Corrêa de Carvalho, pelo apoio acadêmico para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao líder de operação da empresa Sinobras Rubens Giusti e o Engenheiro Elétrico Marcus, por apoiarem no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho, sendo flexíveis e prestativos na divisão dos seus conhecimentos acadêmicos.

Aos grandes amigos que tive o prazer de fazer durante minha jornada na UFPA, o meu grandíssimo obrigado a Andrejev Souza, Rodrigo Sampaio, Luan Fernandes, Mário Eduardo, Neyvaldo Lopes e Adilton Rocha.

Aos meus irmãos, amigos e companheiros de longa data, Anderson, Guilherme, Fabiano, Erbson, Gabriel, Murilo e Valdegildo e as minhas grande amigas Ivete, Neves, Arlete, Dena, Linda, Juliane, Fernanda, Mirelly e Juliana.

Agradeço ao meu eterno amigo Felipe Palhares que neste momento esta La no céu, “deixando muitas saudades para a sua família e amigos”.

A minha prima Jakeline, tia Lina, tio Jakson, Ester e família Marques, pois foram eles que me proporcionaram a oportunidade de estudar em Belém.

Aos meus amigos da Faculdade que de alguma maneira me ajudaram diretamente e indiretamente.

À Universidade Federal do Pará, pela formação em Engenharia de Materiais.

## EPÍGRAFE

Não conheço nenhuma fórmula  
infalível para obter o sucesso,  
mas conheço uma forma infalível  
de fracassar: tentar agradar a todos  
John F. Kennedy

## RESUMO

Existe grande variação de energia total consumida entre fornos elétricos a arco. A intenção deste trabalho é explicar algumas das variáveis e pontos de modificação em práticas ou equipamentos que podem conduzir à redução do consumo de energia total do processo de um FEA de 40 toneladas, levando em consideração o percentual de gusa líquido carregado no forno, de modo a esclarecer as variações entre a eficiência térmica, foi escolhido considerar todas as formas de energias térmicas equivalentes das várias formas de energia utilizadas. A energia elétrica é uma prática usual nos fornos elétricos, sendo medida no transformador primário. As entradas de energia química requerem uma consideração mais cautelosa, pois provém de várias fontes como a oxidação exotérmica do carbono, metais e combustíveis de hidrocarbonetos. Portanto, desde que as aciarias escolheram usar diferentes proporções de energias elétricas e químicas, é mais significativo discutir o consumo de energia total. Por esta razão, energias não elétricas foram convertidas em equivalentes kWh, por causa da sua familiaridade, apesar de não ser uma unidade métrica de medida. O estudo considerou os dois estados físicos (sólido e líquido) da carga metálica de gusa utilizada atualmente nos processos siderúrgicos. O estudo possibilitou verificar que a quantidade de carregamentos e fundentes no FEA influencia no aumento do consumo de energia elétrica, adicionalmente foi comprovado que o aumento do percentual de gusa líquido carregado no FEA reduz o consumo de energia elétrica e oxigênio.

Palavras – chaves: FEA. Aciaria. Consumo. Energia.

## **ABSTRACT**

There is a great variation of the total energy consumption between electric arc furnaces. The aim of this work is to explain some of the variables and points of change in practices or equipment which can lead to reduction in total power consumption of an Electric Arc Furnace (EAF) process of 40 tons, taking into consideration the percentage of hot metal loaded. In order to clarify the variations between the thermal efficiency, was chosen to consider all forms of thermal energy equivalent of several forms of energy used. The electric power measure is a usual practice, being measured in the furnace primary transformer. The chemistry energy requires a carefully consideration, because it has been originated from various sources as exothermic oxidation of carbon, metals and hydrocarbon fuels. Furthermore as the steelworks chose to use different proportions of electrical and chemical energy, it is more meaningful to discuss the total energy consumption. For this reason, The oxidation energy from GLP and Oxygen have been converted to its equivalent in kWh, because of its familiarity, in spite of it is not a metric unit of measure. The study considered the two states (solid and liquid) loaded of pig iron and hot metal, currently used in steelmaking processes. The study enabled one to verify that the amount of flux loaded, influence on the increase of electricity consumption and also has been proved that the increase of the percentage of hot metal loaded in FEA, reduces energy consumption and oxygen.

Keywords: EAF. Steelmaking. Consumption. Energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de aço bruto ( $10^6$ t). .....	17
Figura 2 - Produção de aço bruto por grupo (%) .....	18
Figura 3 - Produção brasileira de aço bruto.....	19
Figura 4 - Evolução da indústria brasileira do aço.....	20
Figura 5 - Carreta de panela de gusa. ....	22
Figura 6 - Constituição esquemática de um forno elétrico a arco .....	24
Figura 7 - Forno elétrico a arco.....	27
Figura 8 - Máquina de lingotamento contínuo.....	28
Figura 9 - Fluxograma simplificado do balanço de massa e energia .....	29
Figura 10 - Visualização dos eletrodos e formação do arco elétrico.....	35
Figura 11 - Consumo de energia elétrica.....	35
Figura 12 - Manipulador de lanças.....	36
Figura 13 - Consumo de oxigênio.....	37
Figura 14 - Injetores modo queimador.....	37
Figura 15 - Consumo de GLP.....	38
Figura 16 - Consumo energético total FEA.....	39
Figura 17 - Redução do consumo Energia elétrica em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA .....	40
Figura 18 - Redução do consumo Energia elétrica em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA.....	43
Figura 19 - Redução do consumo energia elétrica em função do peso médio do FEA.....	44
Figura 20 - Redução do consumo de oxigênio em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA.....	47
Figura 21 - Influência do consumo de GLP em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de aço bruto ( $10^6$ t).....	18
Tabela 2 - Dados da carga metálica .....	31
Tabela 3 - Composição química da escória.....	32
Tabela 4 - Energia Elétrica X Carregamento de Cal.....	32
Tabela 5 – Cálculo de Energia Elétrica X Carregamento de Cal.....	33
Tabela 6 - Energia Elétrica para dois carregamentos de metálicos.....	42
Tabela 7 - Energia Elétrica para três carregamentos de metálicos.....	42
Tabela 8 - Programa de potência Antigo.....	45
Tabela 9 - Programa de potência Atual.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AOD	Descarburação Argônio Oxigênio
BF	Alto Forno
BOF	Forno básico a oxigênio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CaCO	Monóxido de Cálcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
Cor.	Corrida
DC	Direção continua
DRI	Redução de ferro continua
FEA	Forno elétrico a arco
FGV	Fundação Getulio Vargas
GLP	Gás liquefeito de petróleo
G.S	Gusa sólido
IABR	Instituto Aço Brasil
Kg	Quilo
kWh	Quilo watt hora
MgO	Óxido de magnésio
MW	Mega watt
N° Cor.	Numero de corrida
PIB	Produto interno bruto
t	Tonelada
VLB	Lança e queimador virtual
VOD	Descarburação de oxigênio a vácuo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1	PANORAMA DA PRODUÇÃO SIDERÚRGICA CENÁRIO MUNDIAL.....	16
2.2	CENÁRIO BRASILEIRO.....	17
2.3	PROCESSO SIDERÚRGICO .....	20
2.3.1	PROCESSO PRODUTIVO.....	20
2.3.2	MATÉRIA-PRIMA .....	21
2.3.3	PROGRAMA DE POTÊNCIA.....	23
2.3.4	FORNOS ELÉTRICOS.....	23
2.3.5	REFINO.....	26
2.3.6	REFINO SECUNDÁRIO.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
3.1	PARÂMETROS E DESCRIÇÃO DO SISTEMA DO FEA ANALISADO.....	31
3.2	ENERGIA ELÉTRICA (CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA).....	34
3.3	ENERGIA QUÍMICA.....	36
3.3.1	INJEÇÃO DE OXIGÊNIO (CONSUMO DE OXIGÊNIO).....	36
3.3.2	INJEÇÃO DE GLP (CONSUMO DE GLP).....	37
3.4	ENERGIA TOTAL FEA (CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA + QUÍMICA). .....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	40
4.1	ENERGIA ELÉTRICA.....	40
4.1.1	QUANTIDADE DE CAL CARREGADO.....	41
4.1.2	QUANTIDADE DE CARREGAMENTO DE METÁLICOS.....	41
4.1.3	CARREGAMENTO DE GUSA LÍQUIDO.....	42
4.1.4	PESO MÉDIO.....	44
4.1.5	PROGRAMA DE POTÊNCIA.....	44
4.2	ENERGIA QUÍMICA.....	46
4.2.1	INJEÇÃO DE OXIGÊNIO (CONSUMO DE OXIGÊNIO).....	46
4.2.2	INJEÇÃO DE GLP (CONSUMO DE GLP).....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	49
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	51
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos principais temas recorrentes no âmbito de processos da produção de aço, refere-se ao desenvolvimento de elementos que possam proporcionar diferenciais competitivos em relação às demais empresas. Esses diferenciais são comumente relacionados ao processo pela busca de novas fontes de energia, tais como, as de origem química através de injeções de gases ou através do uso de metal líquido. Então, fabricantes de aços têm devotado esforços significantes para reduzir custos de transformação, seguindo duas direções no desenvolvimento do FEA, isto é, fazendo experiências de métodos alternativos de fusão e promovendo melhorias em métodos tradicionais.

Cerca de 20% da produção brasileira de aço é realizado em FEA, cuja matéria prima principal é a sucata de aço. Além desta, a carga é composta, nos casos mais freqüentes, por cerca de 30 a 40% de gusa líquido. O gusa não só atua como um diluidor das impurezas não removíveis presentes na sucata, mas, principalmente, como fonte de calor, devido à oxidação de Si e C [1].

Este trabalho aborda a análise energética de um forno elétrico arco - FEA, considerando a energia elétrica fornecida pela concessionária, energia química pelas reações de oxidação e o aporte térmico proveniente da utilização de gusa líquido, tendo como finalidade obter um balanço térmico que proporcione uma maior produção com um custo reduzido, através de um tratamento mais detalhado sobre as alterações de parâmetros importantes no processo operacional do FEA.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os fatores que mais influenciam na Matriz Energética do FEA de 40 t através de balanços de massa e energia.

### 1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Elaborar uma metodologia de balanço de massa e energia, para investigar a influência dos seguintes fatores no processo:

- Carregamento de gusa líquido (quantidade e atendimento do alto forno);
- Número de cestos carregados; eficiência na injeção de oxigênio e GLP;
- Quantidade de cal adicionada: redução de impurezas na sucata e garantia da qualidade da cal utilizada;
- Peso médio;
- Programa de potência.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PANORAMA DA PRODUÇÃO SIDERÚRGICA CENÁRIO MUNDIAL

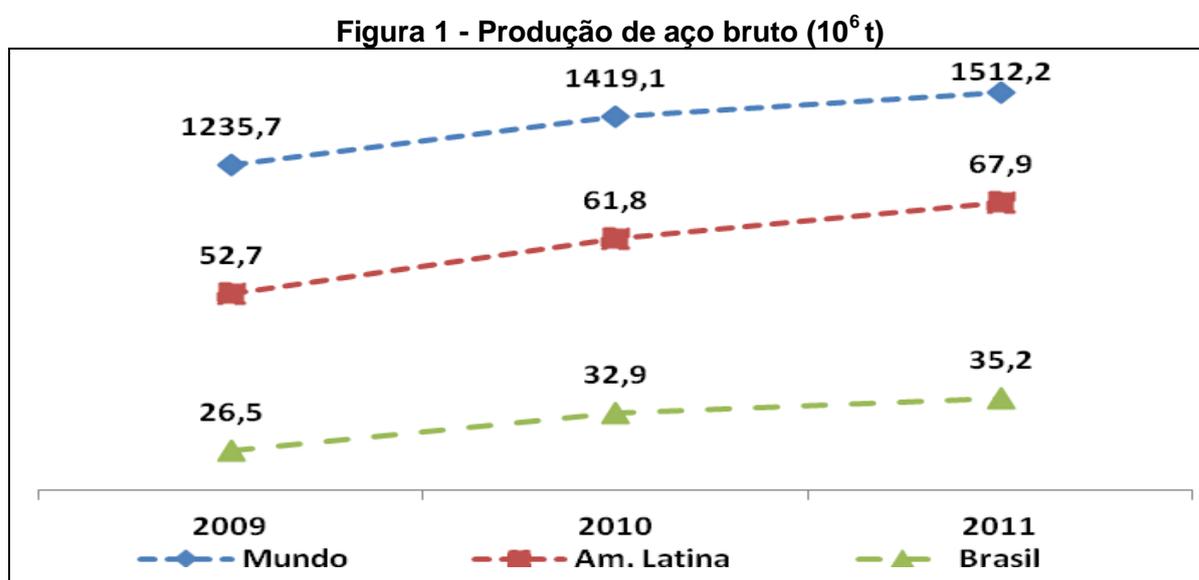
Segundo o IABR em seu Relatório de Sustentabilidade, 2012 [3]. O consumo de aço tem grande relação e impacto sobre o PIB e o crescimento econômico dos países. Estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), em 2011, intitulado “Importância Estratégica do Aço Economia Brasileira”, utilizou metodologia de análise multisetorial baseada no modelo matriz insumo produto e apontou a relevância da indústria produtora de aço na alavancagem de diversas cadeias produtivas.

Segundo o estudo, utilizando o método de insumo-produto, foi possível analisar os impactos socioeconômicos do aço muito além dos seus efeitos imediatamente visíveis, incorporando as cadeias efeitos indiretos e induzidos gerados pela atuação simultânea de cada setor como produtor, consumidor de insumos e gerador de consumo das famílias.

Da mesma forma, se esses efeitos fossem aplicados à quantidade de empregos gerados diretamente pelo setor, o número de ocupações no período passaria para quase 3,3 milhões. Isso significa que as ocupações geradas na economia, a partir do setor de produção do aço, se multiplicam por mais de 23 vezes, devido aos impactos carregados para setores mais intensivos em mão de obra.

O crescimento da indústria do aço tem grande impacto para a economia e sobre a sociedade como um todo. Enquanto em países europeus a média de consumo per capita passa de 400 kg/habitante, no Brasil se manteve em torno de 100 kg/habitante nos últimos 30 anos, indicador que mostra a possibilidade de crescimento do mercado interno de aço para o desenvolvimento econômico do país. No mundo, segundo dados da World Steel Association, o crescimento da demanda de aço tem ocorrido com intensidades bem distintas nas diversas regiões, ocasionando alterações expressivas no fluxo de comércio internacional de produtos siderúrgicos. O consumo em 2011 cresceu 5,6% e atingiu 1.373 milhões de toneladas, apesar das catástrofes naturais no Japão e Tailândia e da deterioração econômica na Europa.

A crise financeira de 2008 fez com que a demanda global por aço regredisse, gerando sensível impacto na produção mundial até 2010, quando a indústria começou a superar os efeitos negativos da crise. Esse primeiro ano de recuperação foi marcado por um aumento de 15% na produção mundial de aço bruto e todos os principais países produtores de aço apresentaram crescimento de dois dígitos. A produção brasileira cresceu aproximadamente 24% nesse período. Em 2011, o ritmo de crescimento da produção mundial de aço foi mais moderado, chegando a uma taxa de 6,6%. Ainda assim, verificou-se novo recorde na produção de aço bruto ao final do período. A produção brasileira acompanhou a indústria mundial, apresentando também crescimento de 6,9% e mantendo a posição de nono maior produtor mundial de aço, ver a Figura 1.



Fonte: Aço Brasil/ALACERO/worldsteel.

## 2.2 CENÁRIO BRASILEIRO

Grande parte da produção nacional de aço está aglomerada em poucos grupos privados, que são: CSN, Gerdau, Arcelor Mittal e Usiminas/Cosipa. Nos últimos anos o Brasil vem diminuindo sua participação na produção mundial de aço (Tabela 1), devido à estagnação de sua produção, aliado ao incremento acelerado da produção chinesa.

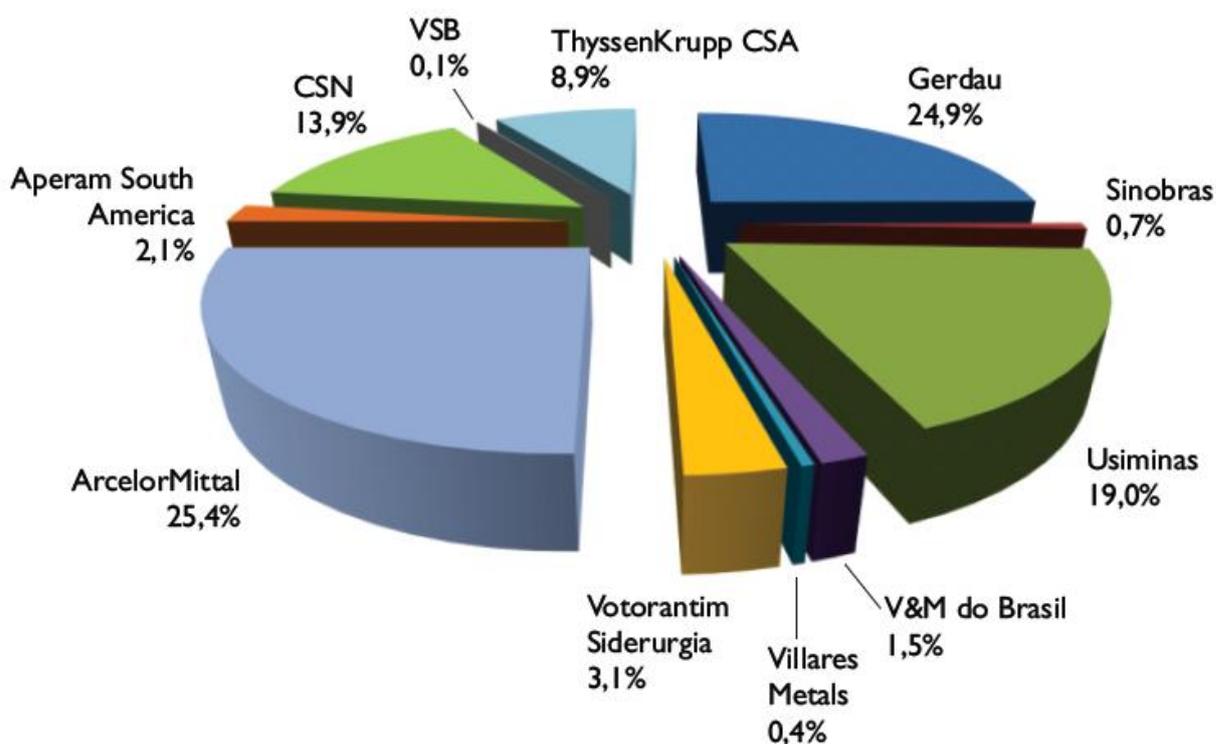
O Brasil, em 2012, foi o nono maior produtor de aço e o segundo das Américas, ficando apenas atrás dos Estados Unidos, que está na terceira posição do ranking mundial (IABR, 2012).

**Tabela 1 - Produção mundial de aço bruto (10<sup>6</sup> t)**

PAÍS	2010	2011
China	627,5	679,2
EUA	109,6	107,6
Japão	80,5	86,4
Índia	68,3	71,3
Rússia	66,9	68,9
Coreia do Sul	58,9	68,5
Rep. Fed. Alemanha	43,8	44,3
Ucrânia	33,4	35,3
Brasil	32,9	35,2
Turquia	29,1	34,1
Outros	268,2	281,4
Total Mundo	1.419,10	1.512,20

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2011.

Uma característica importante do aço produzido no Brasil é que a grande parte é aço-carbono, que possuem baixos teores de ligas em sua composição, e uma pequena parte de aços ligados especiais – aços ligados ou com alta concentração de carbono. O setor siderúrgico brasileiro tem capacidade instalada de produzir mais de 47,8 milhões de toneladas de aço por ano, capacidade essa que está dividida nas seguintes empresas ilustrado na Figura 2.

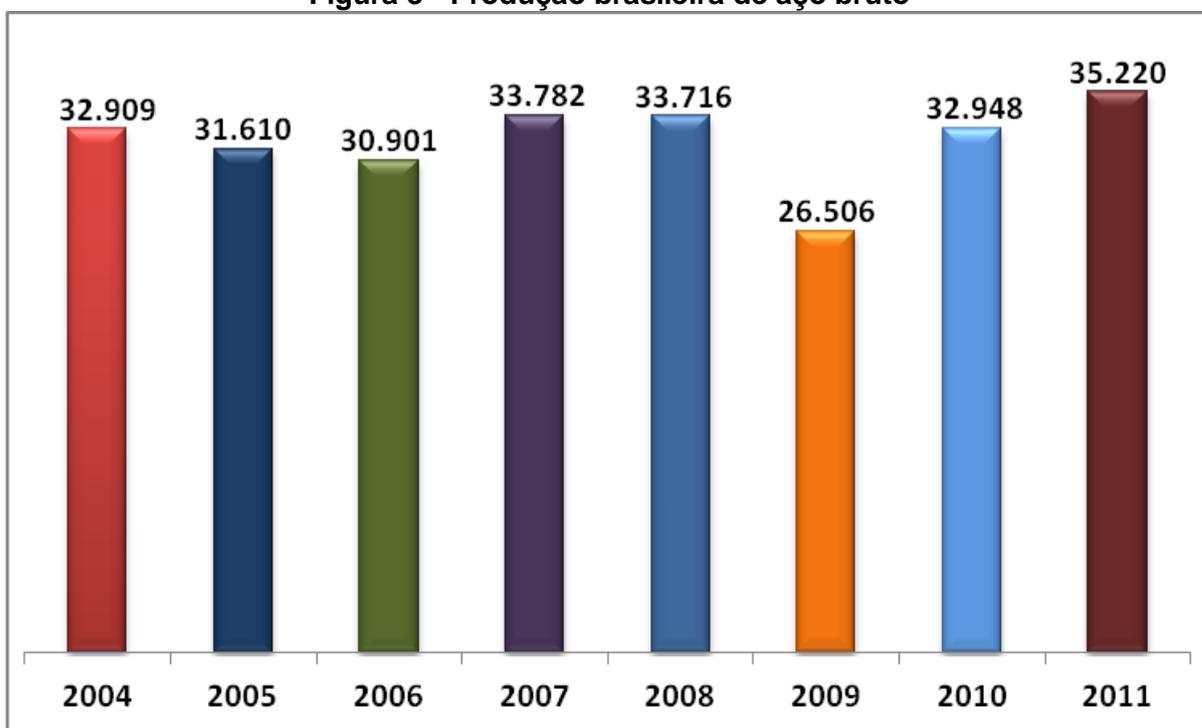
**Figura 2 - Produção de aço bruto por grupo (%)**

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2011.

A indústria de aço nacional dispõe de tecnologias avançadas de produção e beneficiamento, com potencial para produzir os mais diversos produtos siderúrgicos e capacidade instalada bastante superior à demanda do mercado interno. Atualmente, a capacidade instalada do setor corresponde ao dobro de suas vendas internas anualizadas.

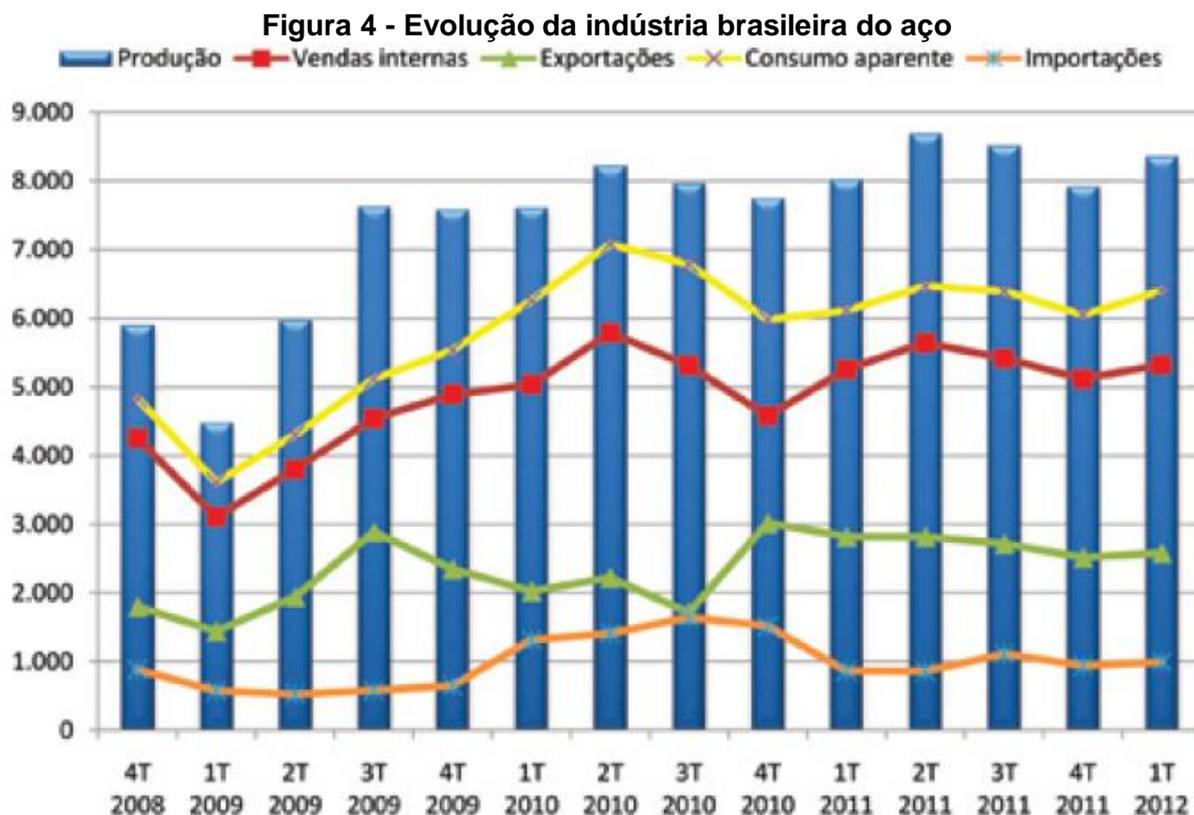
A produção de aço bruto do setor, ver Figura 3, atingiu 35,2 milhões de toneladas em 2011, 7,0% superior a 2010. Esta produção situa o Brasil como 9º maior produtor mundial, com participação de 2,4% na produção global e de 51,3% na produção latino-americana do setor.

**Figura 3 - Produção brasileira de aço bruto**



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2012.

A Figura 4 demonstra o desempenho da indústria brasileira do aço ao longo dos últimos meses. Observa-se claramente considerável oscilação da produção e do consumo aparente (vendas internas das empresas siderúrgicas mais importações de distribuidores e consumidores finais) ao longo do período, atribuída, sobretudo, aos impactos provocados pelas crises econômicas mundiais dos últimos anos.



## 2.3 PROCESSO SIDERÚRGICO

### 2.3.1 PROCESSO PRODUTIVO

Em todo o mundo, duas principais rotas tecnológicas segmentam os processos de produção de aço nas usinas: unidades industriais integradas e unidades industriais semi-integradas. As usinas integradas produzem aço a partir da fabricação de ferro-gusa líquido em seus altos-fornos. O coque é o elemento redutor comumente utilizado na maior parte das usinas.

No Brasil, entretanto, parte da produção utiliza o carvão vegetal como redutor. Gera menor emissão de gases do efeito estufa se comparado ao processo tradicional, mas possui limitações técnicas e operacionais que restringem sua aplicação em maior escala de produção. Já as usinas semi-integradas produzem aço a partir da fusão de metálicos (sucata, gusa e/ ou ferro-esponja) em aciaria elétrica. Algumas usinas possuem, ainda, um processo híbrido e associam o uso de aciarias elétricas com altos-fornos a carvão vegetal (IABR, 2012).

### 2.3.2 MATÉRIA-PRIMA

Existem vários tipos de matérias-primas disponíveis para a fabricação do aço. Todavia, devido ao seu menor custo, maior disponibilidade, e por ser reciclável, a matéria-prima básica para a produção de barras e fios de aço para armadura de concreto é a sucata. Esta sucata, rigorosamente selecionada, é constituída por retalhos de chapas metálicas, cavacos de usinagem, latarias de carros usados, peças de aço e ferro de equipamentos em desuso, e outros.

A utilização de sucata gera um produto final de melhor desempenho na construção civil. Os elementos químicos residuais normalmente existentes em maior porcentagem na sucata, tais como níquel, cromo e estanho, entre outros, fazem com que se obtenham materiais com características mecânicas mais altas quando comparados com aços provenientes da matéria-prima minério de ferro. A sucata recebida é separada por tipo (pesada, leve, cavaco de aço, cavaco de ferro, chaparia) e armazenada em locais específicos.

A sucata é devidamente preparada para utilização, sendo que as de menor densidade são enviadas para prensagem, aumentando, assim, seu peso específico e melhorando o rendimento energético do forno elétrico de fusão. Outras matérias-primas utilizadas durante o processo são:

- Ferro gusa, que é um produto siderúrgico obtido através da redução do minério de ferro, e tem a função de adicionar carbono, ferro e silício ao produto. O carbono e o silício são importantes fontes de energia para o processo, através de sua oxidação gerada após o sopro de oxigênio. O ferro-gusa é produzido em reator conhecido como Alto-forno, através da fusão redutora de minério de ferro em presença de carvão vegetal ou coque e fudentes, os quais são carregados pelo topo e, na descida, são transformados pela ação dos gases ascendentes obtendo-se escória e o ferro-gusa, depositados no cadinho e as poeiras e os gases no topo. O ponto final do trajeto do ferro-gusa através dos canais da casa de corrida, que “despeja” o ferro-gusa para um nível inferior, onde se encontra estacionado um carro-torpedo ou carreta de panela de gusa (Figura 5). Estes equipamentos são recipientes revestidos com tijolos refratários em seu interior e devido a sua geometria, tem reduzida perda de calor para o meio ambiente, permitindo o armazenamento de ferro-gusa líquido em seu interior por períodos prolongados [2].

**Figura 5 – Carreta de panela de gusa**



Fonte: Autor, 2011.

- Ferroligas: (ferro manganês, ferro silício-manganês, ferro silício etc.) utilizados para ajuste da composição química do aço e conferir as características mecânicas necessárias.

- Cal: atua como escorificante, retendo as impurezas do metal e formando a escória, e também atuando na proteção do refratário do forno contra ataques químicos. Nos fornos elétricos a arco, adicionam-se fundentes como a cal calcítica, a qual se apresenta rica em CaO (aproximadamente 94 %) e cal dolomítica com um percentual de 35% de CaO e cerca de 32% de MgO. Os fundentes fornecem óxidos básicos, para escorificar os óxidos formados e as impurezas exógenas que acompanham a carga metálica. O consumo de escorificantes no FEA é fortemente dependente do tipo de aço produzido. Assim, na produção de aços comuns, a quantidade típica de cales consumida no FEA é aproximadamente de 25 a 35 kg/t de cal calcítica e 10 a 15 kg/t de cal dolomítica.

Os fundentes apresentam um custo considerável no processo de fusão, pois são inseridos no cestão de sucata como pelotas, necessitando de uma parcela de energia elétrica para fundi-las. O uso da cal é importantíssimo para o processo, pois contribui para uma melhor qualidade da escória espumante, acarretando, redução de perda de calor para as paredes do FEA, incremento na transferência de energia do arco para o banho, decréscimo das flutuações de energia e voltagem, redução do consumo de eletrodos, dessulfuração, desfosforação e diminuição da agressão do material refratário do forno (cal dolomítica).

Adiciona-se a cal no FEA de acordo com a basicidade binária da escória coletada no forno e essa escória é analisada em um espectrômetro de fluorescência de raios-X, no laboratório da aciaria, o qual fornece resultados da composição química (percentagens de óxidos) e basicidade.

- Oxigênio: utilizado para reduzir o teor de carbono do aço e diminuir o tempo de fusão, sendo esta uma fonte de calor para o processo. O crescimento de emprego de oxigênio combinado à injeção de coque e de outros gases combustíveis tem permitido importantes reduções no consumo de energia elétrica.

Dentre diversos dispositivos de injeção de oxigênio citam-se: manipulador de lanças, lanças supersônicas móveis, injetores supersônicos fixos de jato coerente, ventaneiras submersas, injetores para pós-combustão e outros. Neste trabalho, trataremos da tecnologia envolvida em manipuladores de lanças e injetores supersônicos conhecidos como VLB. [4]

### 2.3.3 PROGRAMA DE POTÊNCIA

Existem vários tipos de reguladores para um sistema de programação de potência, através do auxílio de computadores, controladores lógicos programáveis (CLP's) e softwares inteligentes de regulação que podem se adaptar às condições de mudança utilizando as diretrizes e interpretações que alteram os comprimentos de arco para a otimização de fusão. Então, de acordo com Cândido [7] a automação em fornos elétricos a arco visa basicamente ao perfeito controle de fusão através do cálculo e a distribuição correta da energia a ser fornecida à carga, fazendo com que a fusão complete se processe em menor tempo possível. Cada cesto de sucata carregado no forno tem seu próprio programa de fusão em função do tipo e composição da carga, o que possibilita prever com precisão o montante de energia requerida, evitando falta ou excesso que resulte em perdas.

### 2.3.4 FORNOS ELÉTRICOS

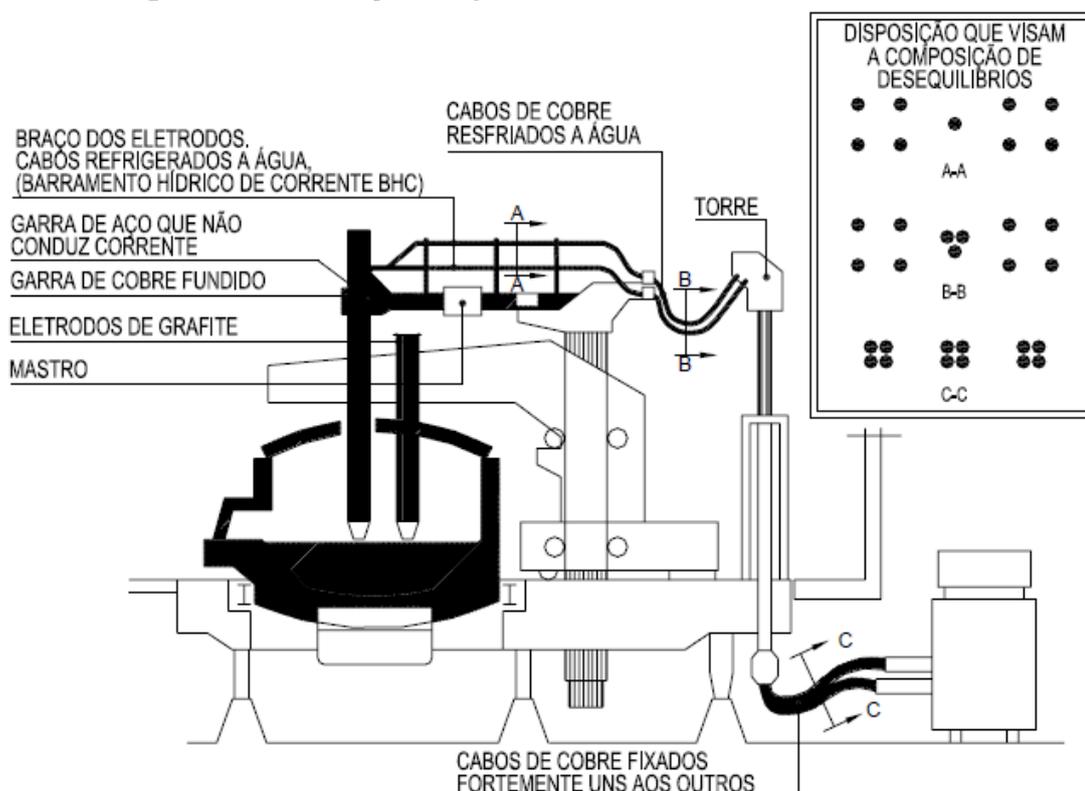
Em 1878, Wilhelm Siemens, fundiu aço num pequeno cadinho pela primeira vez, por meio de um arco voltaico. O forno já dispunha de um sistema de auto regulação do eletrodo. Suas experiências, na época, tiveram apenas caráter científico, devido ao custo elevado da energia elétrica.

Em 1888, Paul Louis Toussaint Héroult obteve uma patente para um forno elétrico a arco.

Em 1898, Emilio Stassano experimentou utilização do arco indireto para a redução de minério de ferro. Pela possibilidade de controlar a temperatura do banho e as condições de oxidação e redução da escória, ou seja, bem cedo se reconheceu as vantagens do forno elétrico na elaboração dos aços de qualidade, sendo hoje o seu campo de aplicação, que também se estendeu para os aços comuns com o desenvolvimento das mini-usinas, sendo assim responsável por mais de 30% da produção mundial.

Nos fornos elétricos a arco voltaico, há transformação da energia elétrica em térmica. A corrente elétrica alternada passa por transformadores que abaixam a voltagem para os limites desejados e é levado aos eletrodos de grafita ou de carbono amorfo, por meio de terminais e cabos flexíveis de cobres, ver Figura 6.

**Figura 6** Constituição esquemática de um forno elétrico a arco



Fonte: JOSÉ AUGUSTO DE CASTRO CALDAS, 2011.

No forno Héroult, a temperatura e a energia necessárias á fusão da carga são obtidas pelo arco voltaico trifásico que se produz entre os três eletrodos e a carga, que constitui o ponto neutro.

Os eletrodos de grafita (ou de carvão amorfo) penetram no forno através de aberturas na abóbada e podem ser movimentados verticalmente, para cima e para baixo, graças a um sistema de regulação; o arco se forma entre o eletrodo e a carga, (a sucata ou banho líquido são incluídos no trajeto da corrente elétrica). Em consequência, durante a fusão da carga sólida, ocorrem fortes variações de corrente. Nos fornos elétricos a arco indireto, tal não acontece, pois nestes, a distância entre as pontas dos eletrodos, entre as quais se faz o arco, permanece praticamente constante.

O aquecimento num forno elétrico é feito por energia elétrica e as matérias-primas do FEA são ferrosos que consistem principalmente de sucata, ferro-gusa e DRI. Por esta razão, o forno elétrico desempenha um papel importante na recuperação e reciclagem de recursos de ferro residuais.

Nas áreas em que há um fornecimento abundante de sucata e de energia elétrica disponível, há uma maior proporção de produção de aço pela via do forno elétrico, porque o consumo de energia e o investimento em equipamento é substancialmente menor do que por via integrado utilizando um BF e BOF para produzir aço a partir do minério. Fornos elétricos são classificados como fornos de arco ou fornos de indução, de acordo com o método de aquecimento[6].

O forno de arco é utilizado mais extensivamente no fabrico do aço, porque a sua capacidade e eficiência de produção são elevadas. Pois além da etapa fusão, o refino (através da oxidação e redução do aço) é possível, o primeiro é utilizado para descarburização, desidrogenação desfosforação, e, e este último para dessulfurização e desoxidação.

O forno a arco é também capaz de uma maior rapidez da fusão de sucatas de liga leve. Por esta razão, é freqüentemente utilizado para refinar aços de liga elevada, tais como o aço inoxidável. No entanto, com a introdução de processos de refinação secundários, tais como o oxigênio descarburização argon (AOD denotado daqui em diante) e descarburização oxigênio vácuo (VOD). Então, os processos que são utilizados exclusivamente para a refinação de aço inoxidável, o papel do forno elétrico a arco tem sido limitada a alta fusão e a eficiência no processo de fabricação de aço.

Com isso, mesmo com graus comerciais de aço carbono, devido à elevada eficiência de fusão e de descarburização no forno elétrico a arco e mais viável

terminar o processo com um forno de refinação secundário separado, conhecido como FP forno panela.

Atualmente eficiência do aquecimento, fusão e descarburização no forno de arco têm sido substancialmente aumentadas através da instalação de um transformador de potência ultra-alta e queimador de oxi-combustível, assim como por injeção de pó de carvão e gás oxigênio puro. Refrigeração, a sua função e proteger as paredes do forno e abobada com água refrigerada, também foi aprimorado, permitindo um aumento na eficiência de produção de 80-120 ton / h. As tendências recentes têm visto uma mudança do forno a arco de corrente alternada para o forno a arco de corrente contínua, a introdução de pré-aquecimento e equipamento de carga contínuo para a sucata. O forno a arco DC oferece menor consumo de unidade de energia, eletrodos e refratários, e tanto barulho e flicker também são menores.

O pré-aquecimento de carregamento contínuo da sucata, favorece a redução do consumo de energia, porque o pré-aquecimento é realizado por os gases de escape a alta temperatura, e a perda de calor através da abertura da tampa do forno, durante o carregamento da sucata convencional pode ser prevenida.

### 2.3.5 REFINO

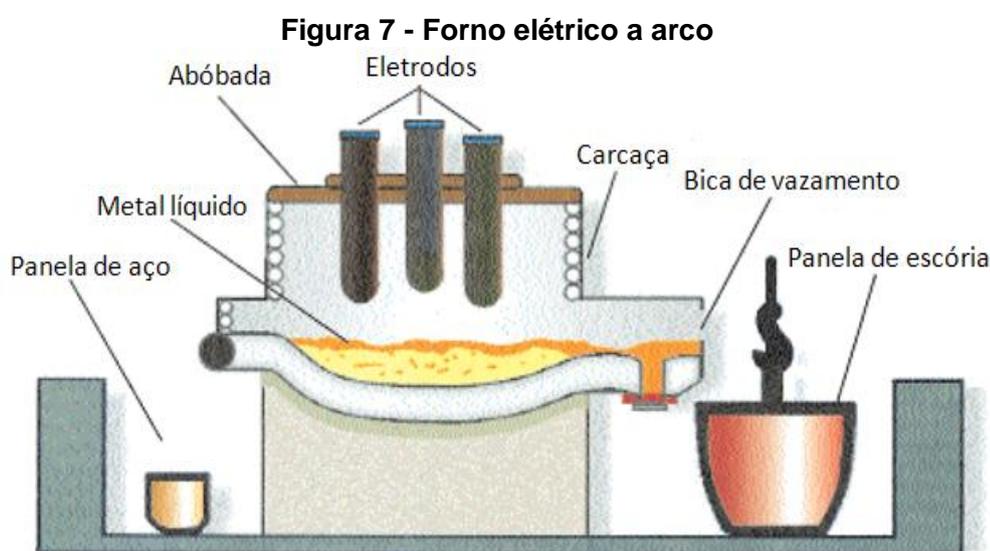
A transformação da sucata em aço, na forma de tarugos prontos para laminar, é feita na Aciaria onde estão localizados os equipamentos: Forno Elétrico e/ou Panela e Máquina de Lingotamento Contínuo. O forno elétrico (Figura 7), responde pela transformação das matérias-primas em aço líquido e lingotamento contínuo por transformar aço líquido em tarugos, também denominados de palanquilhas ou billets.

A primeira etapa de fabricação é o carregamento do forno. Sucata, gusa líquido e outras matérias-primas são colocadas em grandes recipientes denominados cestões.

A proporção dos materiais carregados está indicada no processo de fabricação para cada tipo de aço a ser fabricado. O carregamento é realizado através da abertura da abóboda do forno, com movimento no sentido horizontal, e da abertura inferior do cestão. É nesta etapa que é gerado o número da corrida que acompanhará o produto até o término de fabricação, cujo número serve para a sua rastreabilidade.

Terminada a operação de carregamento, a abóboda é fechada e o forno ligado. Os eletrodos de grafite, ligados à energia elétrica, são abaixados e se aproximam da sucata. Através da passagem de corrente elétrica é formado um arco elétrico que gera energia térmica e funde a sucata e os outros materiais. A temperatura do aço líquido atinge o valor aproximado de 1.600 °C.

Após a fusão é feito um primeiro acerto na composição química. O aço líquido é vazado para uma panela e enviado ao Forno Panela, equipamento este utilizado para homogeneizar temperatura e composição química do aço líquido e eliminar impurezas.



Fonte: PROCESSO DE FABRICAÇÃO BELGO 50 E BELGO 60, 2012.

### 2.3.6 REFINO SECUNDÁRIO.

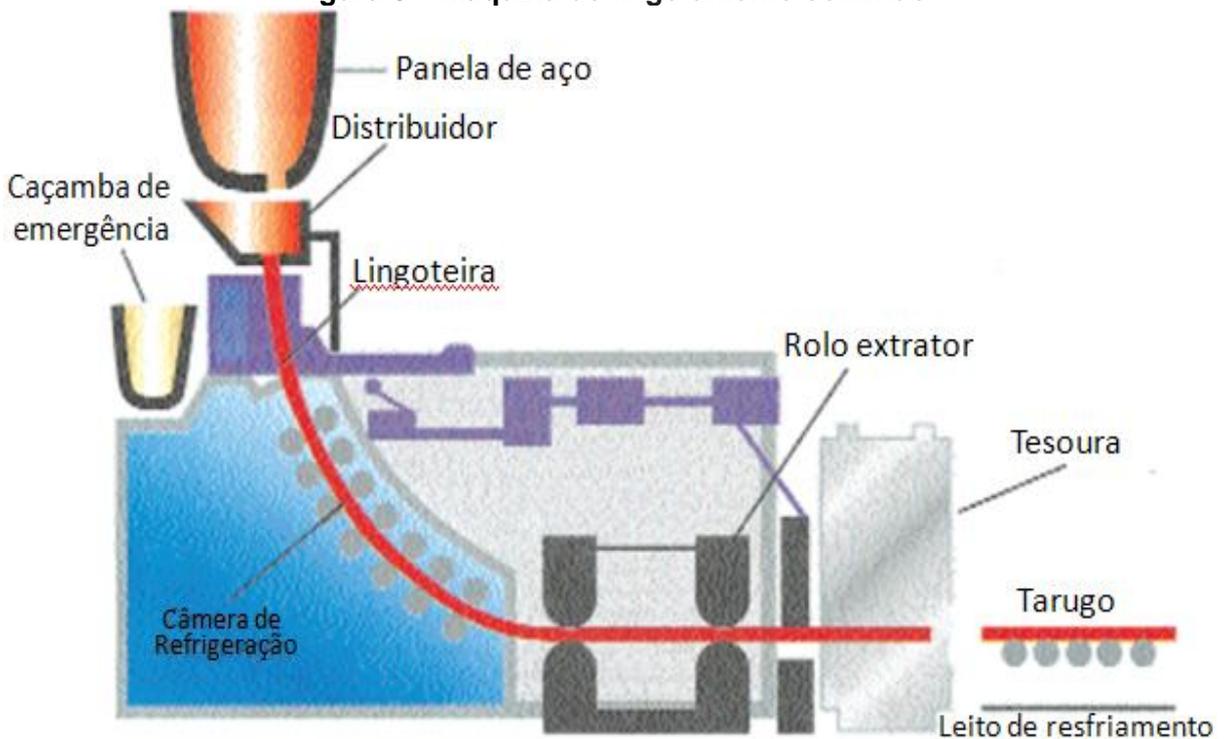
No Forno Panela são retiradas amostras e enviadas ao laboratório químico para análise. A amostra tem sua superfície lixada para torná-la plana, e é colocada em um Espectrômetro Óptico de Emissão. Este aparelho, acoplado a um computador, analisa a amostra e determina a composição química simultânea de, no mínimo, 14 elementos.

Do recebimento de cada amostra até a saída do resultado final da análise são gastos 3 minutos. Através de meio eletrônico o laboratório notifica os resultados da análise para o forno, onde os técnicos processam os ajustes necessários na composição química. Novas amostras podem ser enviadas para análise química até a obtenção de produto que obedeça às especificações químicas estabelecidas.

O aço líquido pronto é transferido para a etapa final do processo da aciaria, que é o lingotamento contínuo (Figura 8), onde são produzidos os tarugos, barras de aço com seção quadrada e comprimento de acordo com a sua utilização. A panela de aço líquido é içada sobre o lingotamento, e é aberta a válvula existente em sua parte inferior para a transferência do material para o distribuidor e deste para as lingoteiras de seção quadrada dos veios do lingotamento.

As lingoteiras são de cobre e refrigeradas externamente com água. Nelas tem início o processo de solidificação do aço, através da formação de uma fina casca sólida na superfície do material. Após a passagem pela lingoteira existe a câmara de refrigeração, onde é feita a aspersão de água diretamente sobre a superfície sólida e ainda rubra do material, auxiliando a solidificação do mesmo até o núcleo.

**Figura 8 – Máquina de lingotamento contínuo**

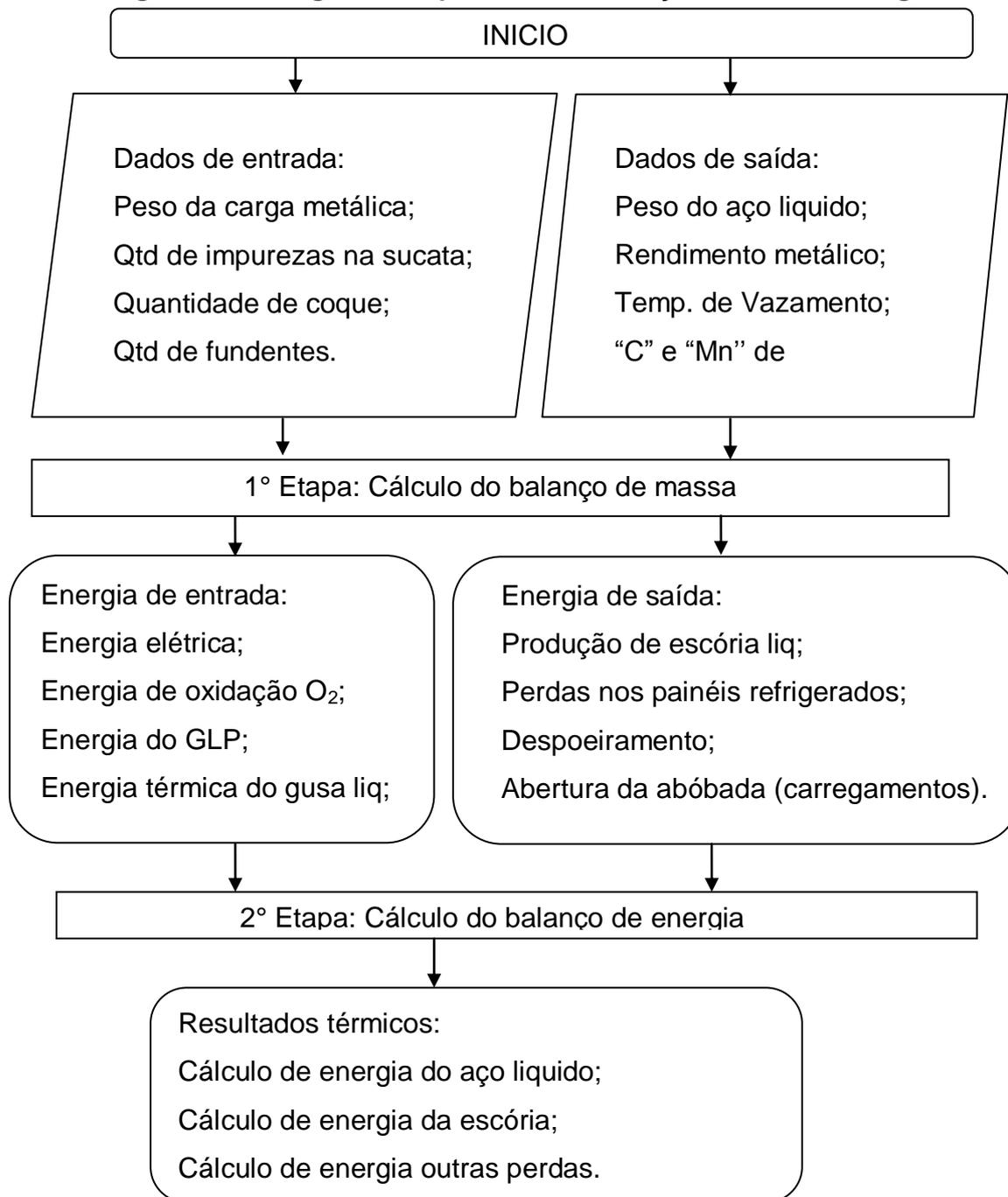


Fonte: PROCESSO DE FABRICAÇÃO BELGO 50 E BELGO 60, 2012.

### 3. METODOLOGIA

A Figura 9 mostra os principais parâmetros de uma corrida para a produção de aço e a metodologia para a execução dos cálculos do modelo proposto de balanço de massa e balanço energia.

**Figura 9 – Fluxograma simplificado do balanço de massa e energia.**



O fluxograma inicia com as informações dos dados de uma corrida, como a disponibilidade de aço produzido, composição química final e temperatura de vazamento. Os dados da carga de metálicos necessários para uma corrida são calculado na prática, através das informações do rendimento metálico (peso do aço líquido / peso da carga metálica), então, a partir dessa informação se faz o cálculo de metálicos carregado no forno (Capacidade do FEA / rendimento metálico) em seguida determina-se a proporção da carga de sucata, gusa sólido e gusa líquido, levando em consideração o volume e a capacidade de produção do FEA. Além disso, existe a necessidade de execução do cálculo da quantidade de fundentes para saturar a escória em MgO, para que esta não venha atacar o refratário do FEA (Caráter básico). Esses cálculos são realizados de acordo com a quantidade de impurezas e percentagens de silício no gusa líquido.

De acordo com a equação 1, considerou-se um sistema aberto, a qual a massa admitida no sistema durante um intervalo de tempo, deve ser igual à massa que sai.

$$\sum massa_{entrada} = \sum massa_{saida} \quad (1)$$

Com isso, essa primeira etapa conclui as características necessárias para calcular o balanço de massa do FEA, com os valores de massa e percentuais dos correspondentes insumos e produtos de acordo a equação 2.

$$\sum_{Entrada} (m_{metálicos} + m_{Cal} + m_{O_2} + m_{Ar} + m_{GLP} + m_C) = \sum_{Saída} (m_{Aço} + m_{Escória} + m_{Gases}) \quad (2)$$

A Figura 10 também mostra a energia de entrada, a qual ficou subdivida em energia elétrica, fornecida a carga metálica através do arco voltaico, e energia química, subdivida em energia de oxidação através do gás oxigênio, energia de combustão do gás GLP e constituintes de hidrocarbonetos da carga. Além dessas duas fontes de energias, o presente trabalho, também considera a energia térmica fornecida pelo gusa líquido, que é um parâmetro importante que se deve considerar para realizar o balanço térmico de um sistema e levantar as perdas que ocorrem durante o processo.

Neste estudo, considera-se as perdas que se dão através da energia necessária para a produção de escória líquida (devido a escória não possuir um valor agregado ao processo), no entanto, as perdas geradas nos painéis refrigerados, abertura da abóbada e despoejamento, são perdas térmicas constantes, pois as mesmas trabalham com parâmetros fechados de acordo com o tipo de sistema em operação.

O próximo tópico mostra os parâmetros do FEA, a execução dos cálculos e a descrição do sistema, a fim de se chegar aos resultados dos cálculos de balanço energético do FEA proposto neste trabalho.

### 3.1 PARÂMETROS, CÁLCULOS E DESCRIÇÃO DO SISTEMA DO FEA ANALISADO

As principais características técnicas do FEA para o qual foram desenvolvidos os balanços de massa e energia são.

Dados reais da corrida:

- Peso do aço líquido: 41 t;
- Rendimento metálico médio: 82,8 %;
- Temperatura de vazamento: 1.660 C;
- Composição química do aço de vazamento em percentual de massa de Carbono e Mangânes, em 0,1% e 0,08%, respectivamente.

Dados da carga:

- Peso da carga metálica: 49,5 t;
- Quantidades de impurezas na sucata: 5,0 %;
- Quantidade de coque adicionado: 4 t.
- A tabela 2 mostra os dados da carga metálica.

**Tabela 2: Dados da carga metálica.**

	SUCATA	GUSA SÓLIDO	GUSA LÍQUIDO	TOTAL
Proporção na Carga (%)	56	10	34	100
Composição Química	%	%	%	MÉDIA
C =	0,1	4	4	2,70
Mn =	0,5	0,5	0,5	0,5
Si =	0,17	1	1	0,54
Temperatura Estimada (°C)	70	70	1280	481,4

FONTE: Autor, 2011.

Dados reais da escória:

- Peso da escória: 181 kg/t;

- A tabela 3 mostra os dados da composição química da escória.

**Tabela 3: Composição química da escória.**

Escória	PM	%	kg Óxido/t	Mols Óxido/t
CaO	56,08	40	72,4	1291,0
SiO <sub>2</sub>	60,09	20	36,2	602,4
FeO (l)	71,85	30	54,3	755,7
MgO	40,32	10	18,1	448,9
Total		100	181	

FONTE:Autor, 2011.

Cálculo de energia elétrica para os Fundentes:

O cálculo de Fundentes foi realizado através de um teste de parâmetros, ver tabela 4, ao qual foram verificadas 10 corridas com carregamento de gusa líquido, com um intervalo de carregamento de cal no FEA de 50 a 70 kg/t, tendo o objetivo de analisar a variação da quantidade de cal carregada com o consumo de energia elétrica,

**Tabela 4: Energia Elétrica X Carregamento de Cal.**

Nº Cor.	DATA	CAL (kg/t)	ENG. ELÉT.(kwh)
112162	02/05/11	51	379
112161	02/05/11	51	360
112173	02/05/11	55	361
112168	02/05/11	56	359
112174	02/05/11	56	354
112178	03/05/11	57	351
112164	02/05/11	57	360
112163	02/05/11	58	362
112175	02/05/11	59	384
112171	02/05/11	60	398
MÉDIAS		56	367

FONTE: Autor, 2011.

Portanto, para calcular a quantidade equivalente de energia para fundir 1 kg de fundente por tonelada de aço, utilizou-se a fórmula de Kohle [10], equação 6, (Onde os termos são: GE =Peso da carga metálica carregada; GA = Peso do aço líquido vazado (não inclui ligas); GZ = Peso dos formadores de escória (CaO e CaO.MgO); Ta = Temperatura de vazamento em C; PON = Power on (Forno ligado em minutos); Mg = Queimador a gás em Nm<sup>3</sup>/t e MI = Consumo de oxigênio por lança em Nm<sup>3</sup>/t).

$$\frac{\text{kWh}}{\text{t}} = 300 + 900 \times \frac{\text{GE}}{\text{GA}} - 1 + 1600 \times \frac{\text{GZ}}{\text{GA}} + 0,7 \times (\text{Ta} - 1600) + 0,85 \times \text{PON} - 8 \times \text{Mg} - 4,3 \times \text{MI} \quad (6)$$

A equação 6 considera todos os parâmetros do FEA, entretanto nesse trabalho, foi utilizado apenas da parte que corresponde ao cálculo de energia elétrica para os fundentes, de acordo com a equação 7.

$$\text{Energia dos Fundentes (kWh/t)} = 1600 \times \frac{\text{GZ}}{\text{GA}} \quad (7)$$

A tabela 5, mostra que a cada 1 kg/t de fundentes adicionados no Forno Elétrico, o consumo de energia elétrica sobe em média de 1,76 kWh/t.

**Tabela 5: Cálculo de Energia Elétrica X Carregamento de Cal.**

CAL (kg/t)	En. dos Fundentes (kWh/t)	Diferença (kWh/t)
56	89,76	1,95
57	91,71	0,39
58	92,10	2,73
59	94,83	1,95
60	96,78	
Média da diferença (kWh/t)		1,76

FONTE: Autor, 2011.

Dados gerais FEA:

- FEA com três injetores distribuídos em pontos frios e duas lanças de oxigênio na porta de escória;
- Injeção de coque pela porta;
- Três eletrodos de 450 mm,  $I_{\text{max}} = 60 \text{ kA.}$ ;
- Painéis refrigerados a água com uma vazão de 270 m<sup>3</sup>/h;
- Consumo de energia elétrica: 364 kwh ( por tonelada de aço SI 1024)

- Transformador FEA: WEG S = 30/36 MVA; V = 33 KV / 700- 450 V; tap's 15;
- Transformador FP : MAG S = 7,8 MVA; V = 33 kV / 243-192 V; tap's 8;
- Consumo de O<sub>2</sub>: 60 Nm<sup>3</sup> (por tonelada de aço SI 1024);
- Consumo de gás GLP: 2,2 kg (por tonelada de aço SI 1024).

O presente trabalho irá considerar apenas a energia de calores ativos, que são aqueles que fornecem energia térmica ao sistema, como a energia elétrica e química. Pois, a metodologia proposta tem o intuito de verificar a influência dos calores passivos (que são aqueles que recebem calor do sistema, como as reações endotérmicas, calores necessários para o aquecimento, fusão da sucata e outras) em relação aos calores ativos, ver equação 3.

$$\sum_{Ativos} [q_{Elétrica} + q_{GN} + q_{oxidação}] = \sum_{Passivos} [q_{Aço} + q_{Escória} + q_{Gases} + q_{Perdas}] \quad (3)$$

Então, no período compreendido entre os dias 01/09/2011 e 31/10/2011, foram levantados dados da energia elétrica e química (Consumo de Oxigênio e GLP) do processo produtivo da aciaria.

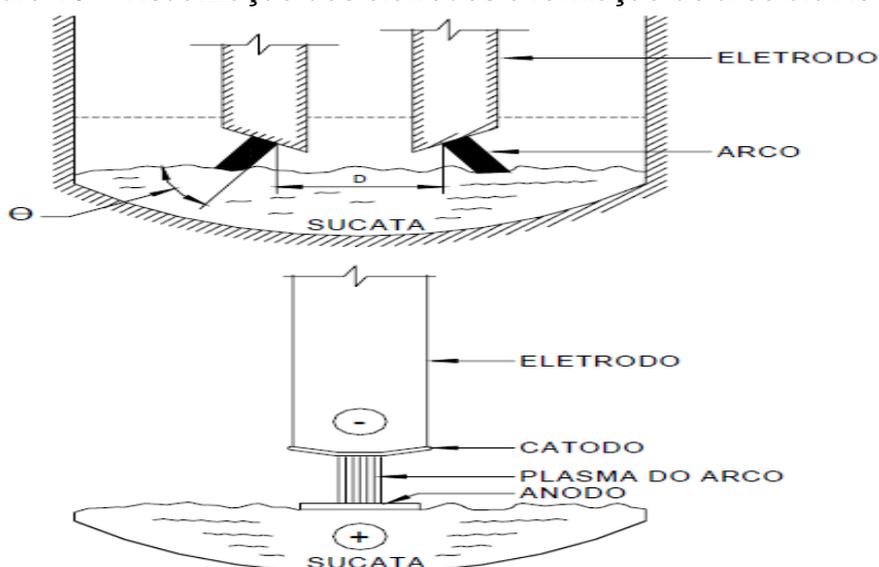
### 3.2 ENERGIA ELÉTRICA (CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA)

A energia elétrica é medida no circuito primário em kWh, o FEA em estudo é alimentado por corrente alternada, no qual a corrente elétrica passa de um eletrodo através do arco elétrico para a carga, e da carga sobe através do arco para outro eletrodo. A polaridade destes dois pontos quentes se inverte a cada semi-ciclo da corrente com a frequência da rede (60 ciclos/segundos). Os eletrodos são três e os mesmos estão instalados na abóboda do FEA, ver figura 10.

A principal utilização da energia elétrica no processo é para fundir a sucata através do arco elétrico que é gerado pela passagem da corrente elétrica através do ar ionizado (plasma) que separa os dois pontos entre os quais o arco é formado. Neste caso um dos pontos é o eletrodo e o segundo é a sucata que está sendo aquecida, devido ao arco saltar entre esses dois pontos, desta forma a transferência de calor ocorre diretamente para a carga. A corrente elétrica também flui através da carga metálica, gerando aquecimento adicional devido à inerente resistência a sua passagem. Este aquecimento é em menor proporção do que o oferecido pela

formação do arco voltaico. A temperatura do arco corresponde á temperatura de ebulção do material que constitui o eletrodo. No caso do FEA em estudo utiliza-se um eletrodo fabricado de carbono/grafite, o qual a temperatura gira em torno de 3012 C.

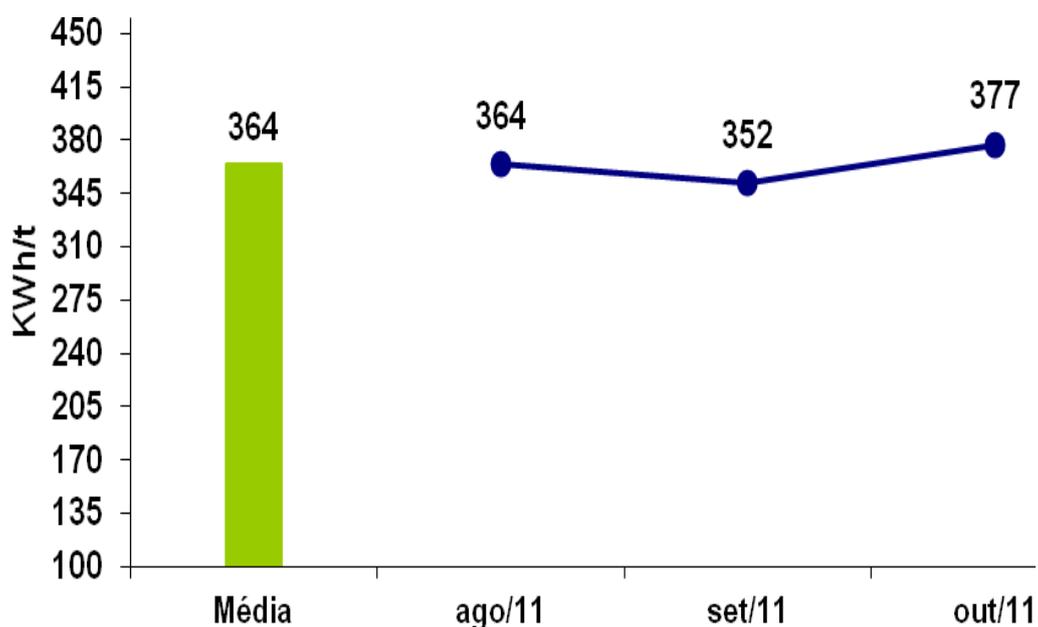
**Figura 10 – Visualização dos eletrodos e formação do arco elétrico.**



FONTE: CÍCERO ZANONI, 2004.

Na figura 11, o gráfico representa o consumo de energia elétrica em kWh/t em um período de três meses de forno em operação.

**Figura 11 – Consumo de energia elétrica**



FONTE: Autor, 2011.

### 3.3 ENERGIA QUÍMICA.

A energia química é obtida da oxidação (injeção de oxigênio) exotérmica do carbono, metais e combustíveis de hidrocarbonetos (injeção de GLP) e do perfil de energia alternativa, através da utilização de queimadores para reduzir o tempo de fusão da carga.

#### 3.3.1 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO (CONSUMO DE OXIGÊNIO).

O objetivo da injeção de oxigênio via lanças, (Figura 12), ou injetores é a reação de oxidação com os materiais carregados, principalmente carbono, ferro e pequenas porcentagens de manganês e silício, contidos na sucata.

A principal carga do FEA é constituída de sucata, carbono e formadores de escória. Portanto, a composição química da sucata deve ser considerada de forma a fornecer uma saída térmica para utilização de oxigênio via lanças e injetores. Por outro lado, o forno, é completado parte da sucata com gusa ou ferro fundido, pré reduzidos ou metal liquido (gusa), para agilizar as diferentes formas de reação química realizadas.

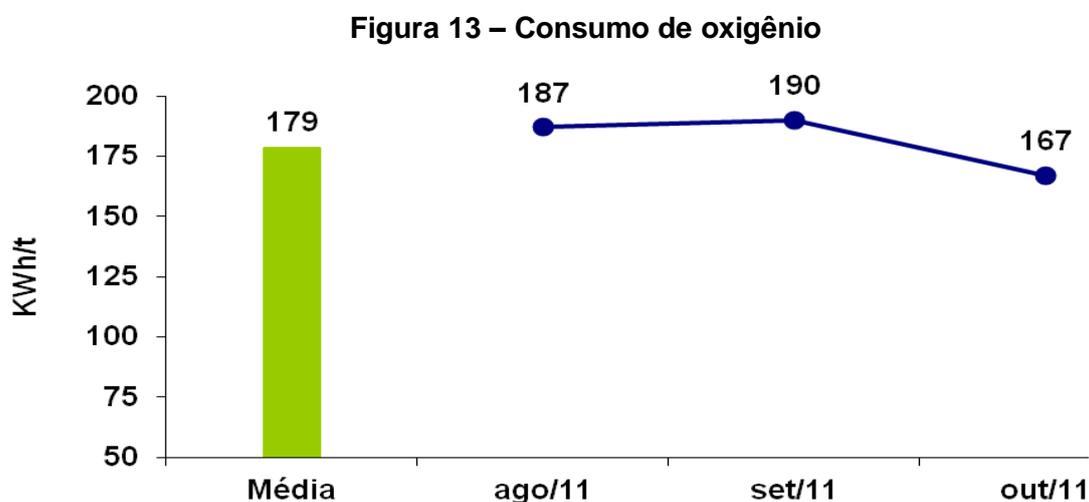
**Figura 12 – Manipulador de lanças**



FONTE: Autor, 2011.

A energia equivalente do oxigênio é calculada abaixo da teórica de 3,6 kWh/m<sup>3</sup>. Em nosso caso utilizamos o valor de 3,0 kWh/m<sup>3</sup>. Esta diferença esta ligada a eficiência da injeção do oxigênio modo lança e queimador.

Na Figura 13, o gráfico representa o consumo de energia do oxigênio em kWh/t em um período de três meses de forno em operação.



FONTE: Autor, 2011.

### 3.3.2 INJEÇÃO DE GLP (CONSUMO DE GLP).

O GLP é injetado via queimadores (Figura 14) com o objetivo de acelerar a fusão da sucata nos pontos frios, direcionando a energia adicional para uma fusão mais rápida da sucata, evitando-se a queda de carga e as reações no FEA.

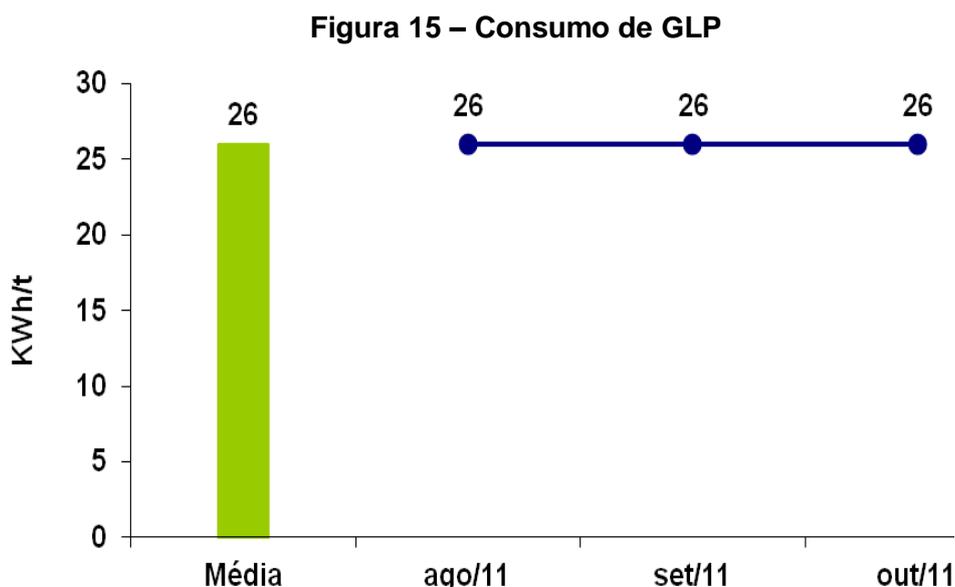
A energia equivalente do GLP é a quantidade de energia gerada por uma unidade de massa de gás e considera-se que a eficiência térmica dos queimadores seja 50 - 60%, decrescendo rapidamente durante a fusão de maneira que haja uma economia de eletricidade de até 60 - 70 kWh/t.

**Figura 14 – Injetores modo queimador**



Fonte: CURSO DE ACIARIA ELÉTRICA ABM, 2010.

Então, 1 kg de GLP gera uma energia equivalente teórica de 13,66 kWh no FEA. Em nosso caso utilizou-se o valor de energia equivalente de 11 kWh/kg. Esta diferença está ligada a eficiência da injeção de GLP modo queimador. A figura 15 representa o consumo de energia do GLP em kWh/t em um período de três meses de forno em operação.



FONTE: Autor, 2011.

### 3.4 ENERGIA TOTAL FEA (CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA + QUÍMICA )

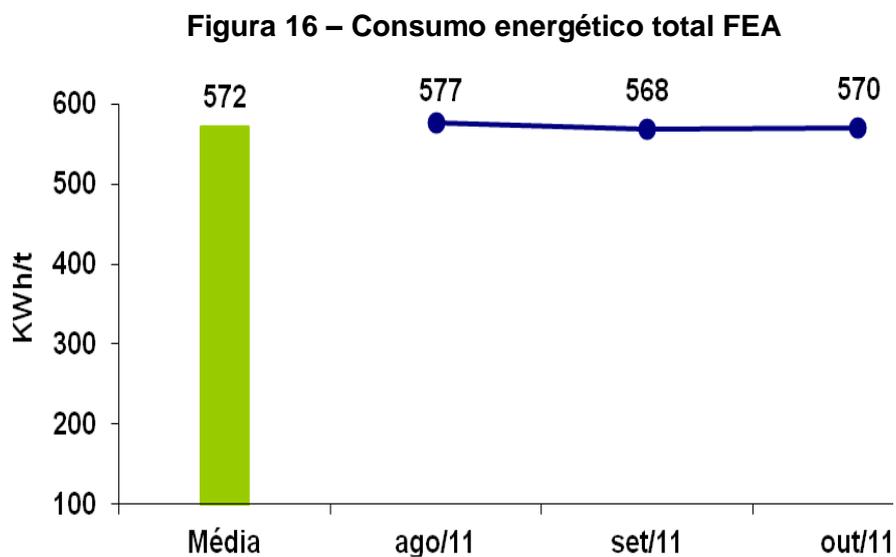
A energia total consumida no FEA provém de duas fontes a elétrica que é a maior fonte utilizada no forno em estudo e a química mostrado na equação 4.

$$\sum_{Energia\ Total\ FEA} = \sum_{Energia\ Elétrica} + \sum_{Energia\ Química} \quad (4)$$

Então, desde que as aciarias escolheram usar diferentes proporções de energias elétricas e química, obtida da oxidação (Injeção de oxigênio) exotérmica do carbono, metais e combustíveis de hidrocarbonetos (Injeção de GLP), então é mais significativo discutir o consumo de energia total de acordo com a equação 5.

$$\sum_{En.\ Total\ FEA} = \sum_{Energia\ Elétrica} + \sum_{En.\ Oxigênio} + \sum_{En.\ GLP} \quad (5)$$

A figura 16, apresenta os resultados do consumo energético em kWh/t total do FEA durante os 3 meses.

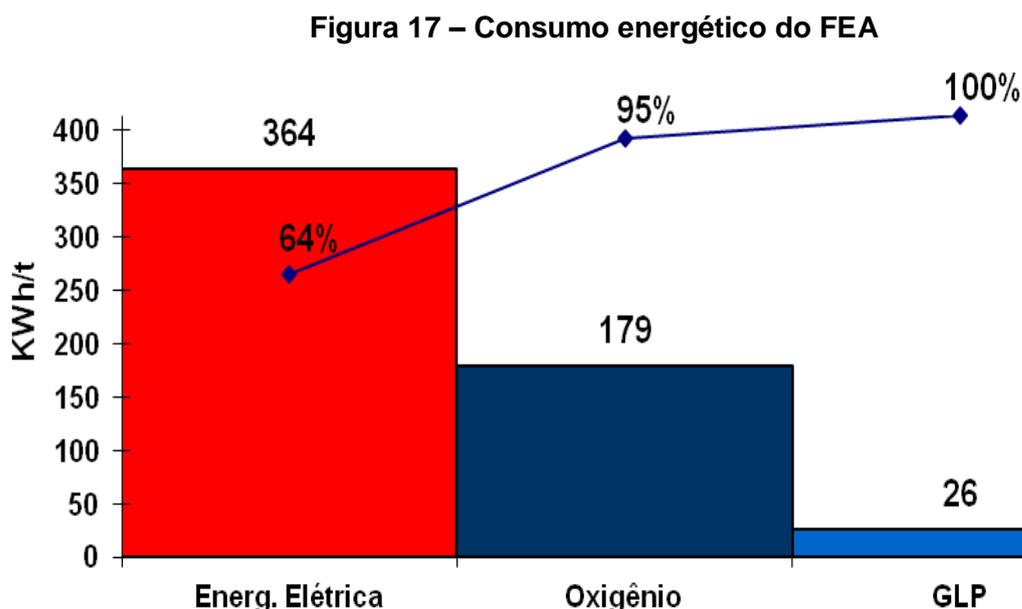


FONTE: Autor, 2011.

O próximo capítulo irá mostrar a discussão da metodologia proposta para balanço térmico de energia de calores ativos de um FEA, distribuindo-se de acordo com utilização de energia, para aplicação de cada etapa de transformação do processo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 17 apresenta um gráfico de Pareto relacionado à energia total do FEA, mostrando que 64% da energia inserida no FEA é proveniente da elétrica e 36% da energia química.



FONTE: Autor, 2011.

A partir do gráfico de Pareto do balanço térmico discutir-se-á cada etapa, na qual a energia foi distribuída de acordo com o processo de fabricação do aço líquido.

### 4.1 ENERGIA ELÉTRICA

Os dados práticos de outros fornos que trabalham com gusa líquido, apontam um consumo de energia elétrica mensal variando de 350 a 360 kWh/t de acordo com a capacidade nominal do FEA. Observou-se que a entrada de energia elétrica do FEA em valores reais foi de 364 kWh/t, e esta energia elétrica distribuiu-se de acordo com a utilização em cada etapa de transformação do processo, como a quantidade de cal carregado, carregamento de metálicos, carregamento de gusa líquido, peso médio de aço vazado e programa de potência, e finalmente analisou-se a influência desses parâmetros no consumo de energia elétrica.

#### 4.1.1 QUANTIDADE DE CAL CARREGADA

O consumo elevado da cal se deve principalmente, ao teor elevado de sílica na sucata mal processada, utilização de sucata de gusa, corridas de gusa líquido com alto percentual de silício e formação da escória de caráter básico. Outro fator importante é a eficiência dos fundentes, pois em alguns casos os fabricantes de cal fornecem matérias primas com baixa reatividade, devido à cal apresentar um percentual de calcário, necessitando de um aquecimento acima de 1200 °C, para que ocorra a reação de calcinação ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) para liberar o CaO, com isso aumentando o consumo de energia elétrica.

#### 4.1.2 QUANTIDADE DE CARREGAMENTO DOS METÁLICOS

O carregamento de metálicos no FEA em estudo, por ser rota de processo de usina integrada, normalmente utiliza de 2 a 3 carregamentos por corrida de aço. Então, existem dois tipos de carregamento de metálicos, o que é realizado através de cestões, preparados no pátio de sucata e o carregamento de gusa líquido, o qual é armazenado no interior de painéis refratários e transportado por carreta de painel de gusa.

Para analisar a influência de carregamentos de metálicos *versus* energia elétrica no FEA de 40 t, realizaram-se dois testes de parâmetros em um total de 10 corridas, para cada tipo de carregamento de gusa. A tabela 06, que trabalha com dois carregamentos (um de sucata e outro de gusa líquido) apresenta uma energia elétrica média de 325 kWh /t e comparando-se com a tabela 07, que trabalha com 03 carregamentos, a qual apresenta o terceiro carregamento conhecido como recarga, resulta em uma energia elétrica em média de 380 kWh/t, com isso a energia consumida é cerca de 55 kWh/t pôr cesto adicional. Conclui-se que o número de carregamentos tem grande influência na energia elétrica, pois cada vez que a abobada é aberta, há uma perda de energia, principalmente pôr irradiação do interior do forno e da cobertura de escória da abobada.

**Tabela 6: Energia Elétrica para dois carregamentos de metálicos**

Nº Cor.	DATA	ENERGIA ELÉTRICA.(kwh/t)
112155	1/5/2011	293
112144	1/5/2011	306
112154	1/5/2011	311
112145	1/5/2011	313
112140	1/5/2011	318
112139	1/5/2011	325
112148	1/5/2011	338
112147	1/5/2011	342
112153	1/5/2011	346
112138	1/5/2011	354
Média de Energia Elétrica		325

FONTE: Autor, 2011.

**Tabela 07: Energia Elétrica para três carregamentos de metálicos**

Nº Cor.	DATA	ENERGIA ELÉTRICA.(kwh/t)
112164	2/5/2011	360
112173	2/5/2011	361
112163	2/5/2011	362
112162	2/5/2011	379
112172	2/5/2011	384
112175	2/5/2011	384
112171	2/5/2011	398
112165	2/5/2011	404
112166	2/5/2011	412
112180	3/5/2011	414
Média de Energia Elétrica		380

FONTE: Autor, 2011.

#### 4.1.3 CARREGAMENTO DE GUSA LÍQUIDO

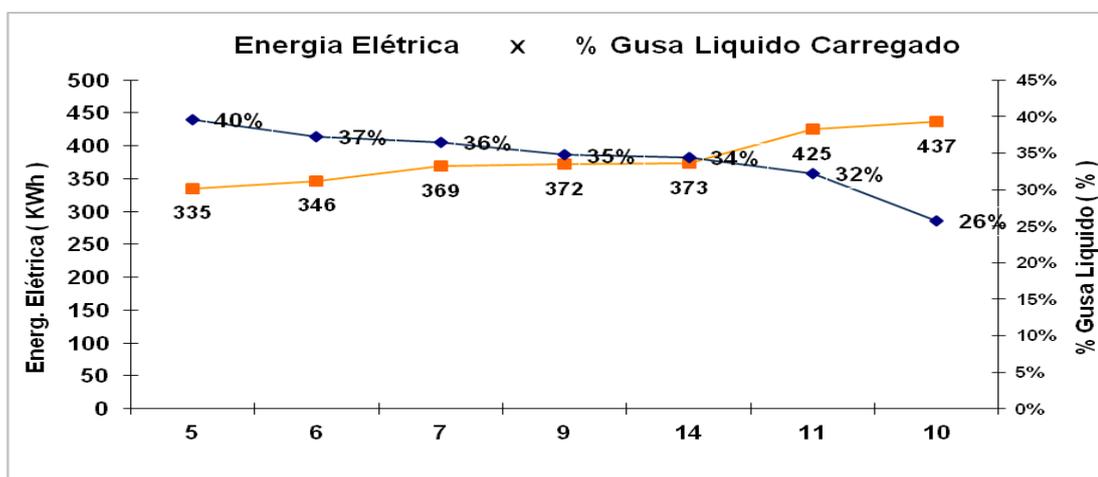
Atualmente, estima-se que de 30 a 35% da carga de ferrosos do FEA são constituídos por gusa, no estado sólido ou líquido. A grande vantagem de se utilizar gusa é o efeito diluidor das impurezas não removíveis contidas nas sucatas de aço, como também aumento do rendimento metálico e seu conteúdo térmico, devido à

oxidação de Si e C, ou seja, permite economizar energia elétrica. Esta economia é ainda maior quando se carrega gusa líquido, o que é feito na usina semi-integrada em estudo que recebe gusa líquido em painéis transportadas por caminhões.

A figura 18 apresenta o resultado prático, através de dados coletados no sistema de gestão da empresa em estudo, relativo a 07 dias do mês de janeiro de 2011. O consumo de energia elétrica foi plotado em função da utilização de gusa líquido na carga do FEA. Os resultados foram analisados em duas etapas de acordo com a porcentagem de gusa líquido carregado. A primeira análise foi de um percentual de 34 a 40 % de metal líquido carregado, apresentando um retorno em economia de energia elétrica em média de 7,5 kWh/t para a cada 1% de gusa líquido adicionado a mais no FEA de 40 t.

Logo após, observou-se que abaixo de 34 % não é muito viável a utilização de gusa líquido relacionado a ganho em energia elétrica, porém as empresas integradas trabalham com o máximo de utilização de gusa líquido no FEA, devido o alto forno ser exclusivo ao FEA em operação, com isso são realizados trabalhos de aumento de sincronismo e quantidade de gusa fornecido para o FEA, com objetivo de reaproveitar o máximo da energia térmica e química do gusa líquido, resultando em um menor Power-on no FEA, e conseqüentemente uma maior produção. Então, não foi observada a queda do consumo de energia elétrica nos carregamentos de gusa líquido abaixo 34%, pois os mesmos foram realizados em três carregamentos, resultando em uma maior perda térmica devido o tempo em média 2,5 min de Power-off de carregamento no FEA.

**Figura 18 – Redução do consumo Energia elétrica em função da porcentagem de gusa líquido carregado no FEA**

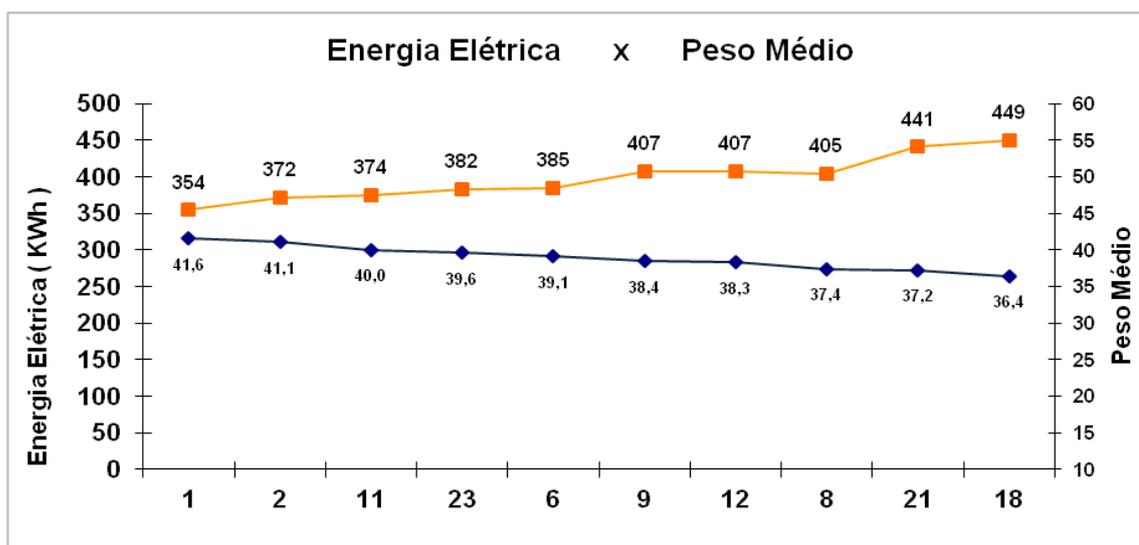


FONTE: Autor, 2011.

#### 4.1.4 PESO MÉDIO

O peso médio é a quantidade de aço vazado do canal EBT do FEA para a panela de aço. O forno em estudo foi projetado para vaziar corridas com um peso médio de 41 t, este peso é muito importante para a produção mensal e para o rateio dos consumos específicos do forno, pois todos os consumos são divididos pelo peso médio, por exemplo, a energia elétrica (kWh/t). Então, no mês de Agosto foram analisados em 10 dias a energia elétrica *versus* peso médio, ver figura 19. Pode-se afirmar que o aumento da energia elétrica esta relacionado com as corridas com peso abaixo de 40 t. Conclui-se que na faixa do peso médio menor em 1t, aumenta o consumo de energia elétrica em média de 18,6 kWh/t.

**Figura 19 – Redução do consumo energia elétrica em função do peso médio do FEA**



FONTE: Autor, 2011.

#### 4.1.5 PROGRAMA DE POTÊNCIA

Com intuito de adequar um novo programa de potência para carregamento de gusa sólido e líquido e, obter uma maior potência média permitida pela capacidade do transformador com um menor consumo de energia elétrica, realizou-se duas modificações em dados reais no programa de potência durante 20 dias, a qual a primeira resolveu iniciar o segundo carregamento utilizando o tap 10 de tensão (substituindo o tap 12) e a segunda alteração testar o tap 04 tensão (substituindo o tap 5), mostrando de que forma o programa pode influenciar no consumo de energia elétrica.

Então, comparando o programa de potência antigo (tabela 8) com o programa atual (tabela 9), para o programa de potência gusa líquido obteve-se um ganho de 26,5 kWh/t de energia elétrica com um Power on de 33,7 min./cor e para o programa de potência gusa sólido obteve-se um ganho de 44,1 kWh/t de energia elétrica com um Power on de 44,5 min./cor, pois de acordo com Jaccard [8] a redução de energia do FEA através dos parâmetros elétricos, só é possível pelo aumento da potência (MW) o que irá reduzir o tempo Power on e conseqüentemente reduzir o consumo de energia elétrica.

**Tabela 8: Programa de potência Antigo**

Gusa Líquido					Gusa Sólido			
Data	Power On	Potência	Energia	cor.	Power On	Potência	Energia	cor.
	min./cor.	MW	kWh/t	no.	min./cor.	MW	kWh/t	no.
20/ago	31,9	24,7	348,7	23	46,6	24,8	469,3	4
21/ago	33,7	23,8	337,9	23	45,4	23,7	465,3	3
22/ago	34,7	24,7	366,3	12	49,9	24,1	562,7	5
23/ago	33,3	23,8	339,6	24	40,7	23,9	415,5	2
25/ago	35,7	24,4	374,3	19	40,3	24	438	3
29/ago	32,7	24,7	333,4	21	50,3	24,5	497,8	1
30/ago	32,4	25,4	347,3	23	44,1	25,1	438,1	2
31/ago	31,7	24,3	320,9	12	51,1	25,3	599	2
1/set	31,9	23,8	317,7	20	47,7	26,2	525,3	4
2/set	34,6	24,8	355,0	20	34,8	25,2	347,2	3
Média	33,7	24,52	354,4		45,09	24,68	475,8	

FONTE: Autor, 2011.

**Tabela 9: Programa de potência Atual**

Gusa Líquido					Gusa Sólido			
Data	Power On	Potência	Energia	cor.	Power On	Potência	Energia	cor.
	min./cor.	MW	kWh/t	no.	min./cor.	MW	kWh/t	no.
6/set	30	25,5	318,3	19	44	24,7	446,3	2
7/set	30,7	26	341,0	23	43,4	26	429	1
8/set	30,7	25,3	343,0	19	CORRIDA. FORA DO PADRÃO			
9/set	36,6	25,5	371,0	14	46,3	24,9	462	3
10/set	32,7	24,9	330,9	23	26,5	24,5	416	2
11/set	30,2	24,3	299,0	13	NÃO HOUVE G. S.			
16/set	35	25,7	345,0	13	39,7	24,8	413	8
17/set	31,2	25,1	310,0	26	46,5	24,7	418	2
18/set	31,7	25,1	313,0	22	45,4	24,9	426,6	2
19/set	31,6	24,5	308,1	9	41,4	25,8	416	1
Média	32,04	25,19	327,9		44,5	25,17	431,7	

FONTE: Autor, 2011.

## 4.2 ENERGIA QUÍMICA

A energia química é a segunda maior fonte de energia do FEA, obtida da oxidação (Injeção de oxigênio) exotérmica do carbono, metais e combustíveis de hidrocarbonetos (Injeção de GLP).

O valor médio obtido de energia química mensal foi de 205 kWh/t no FEA, e esta energia química foi subdividida em duas fontes, a de oxigênio e GLP.

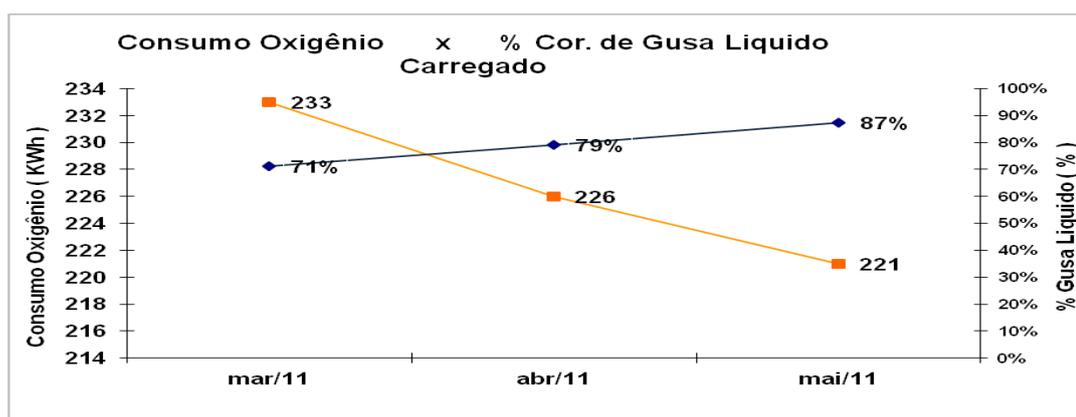
### 4.2.1 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO.

A figura 20, apresenta uma análise de dados reais de processo em um período de 3 meses. Com o aumento do percentual de corridas de gusa líquido carregado no FEA, ocorre a redução no consumo de oxigênio do FEA, bem como a redução do consumo de gusa sólido. Portanto, uns dos motivos da substituição do gusa sólido pelo líquido e a aceleração da etapa de fusão, devido ao gusa estar no estado líquido, acrescentando-se ao processo uma energia de aquecimento da sucata e a formação de um pé líquido de carburante, que após o primeiro

carregamento do forno, é comum o emprego das lanças de oxigênio para o corte e compactação da sucata próxima à porta de escória, diminuindo a tendência a ocorrências de sucata alta na seqüência dos demais carregamentos, melhorando-se a eficiência e o rendimento do oxigênio na etapa de descarburização devido ao crescimento do fundo úmido (pé líquido), inicia-se uma injeção de oxigênio mais eficiente, uma vez que já há contato direto com o banho, acelerando o processo de descarburização.

Wandekoken [9], em seu trabalho de desenvolvimento e utilização de gusa líquido verificou que o carbono fornecido pelo gusa líquido está instantaneamente disponível, em volume e em massa, para as reações de descarburização, ao passo que, quando utilizado gusa sólido (carbono disperso em fase sólida) as reações de descarburização acontecem a medida em está sendo fundido, resumindo, a eficiência de reação das interfaces gás-líquido é maior que nas interfaces gás-sólido, tendo o início da formação de uma primeira escória. Portanto, é fundamental importância à imersão das lanças de Oxigênio para a descarburização e desfosforização, pois os tubos precisam ser molhados por escória para aumentar sua resistência refratária ao aço líquido.

**Figura 20 – Redução do consumo de oxigênio em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA**



FONTE: Autor, 2011.

A energia gerada com a oxidação dos elementos da carga fria através do manipulador de lanças e injetores varia de usina para usina. A principal razão está nos diferentes empregos de Gusa sólido e líquido. Algumas (20-40%) têm mais Gusa e as demais menos Gusa (5-15%), portanto, estas últimas tem menos potencial energético.

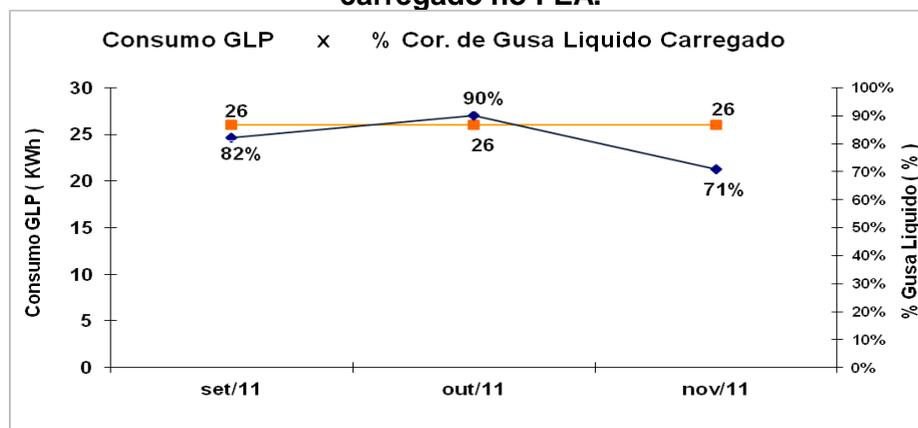
Outras ainda, que empregam sucata de gusa, que é um produto que também vem do reaproveitamento do gusa, entretanto tem pouco potencial energético, devido ao seu elevado nível de oxidação.

No entanto, deve-se sempre procurar o equilíbrio entre oxigênio, carbono e a oxidação do Fe (ferro) do banho líquido ( $\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}$ ), caso não ocorra poderá causar a perda de rendimento metálico, o que é extremamente indesejável. Portanto, devemos visar a geração de mais energia pela oxidação do carburante, o suficiente que compense ou supere o consumo de menor energia para a redução do Fe ( $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ) preservando assim o rendimento metálico.

#### 4.3 INJEÇÃO DE GLP (CONSUMO DE GLP)

O FEA em estudo utiliza três injetores supersônicos convencionais e queimadores oxi-combustíveis, sendo distintos os dois equipamentos. Observa-se em dados reais na figura 21 que a percentagem de corridas de gusa líquido carregado não influencia com o consumo de GLP, pois a maior eficiência de injeção de gases deste equipamento é quando opera-se com a carga mais fria possível, favorecendo a transferência de calor por radiação, ou seja, pela temperatura da chama ser maior que a da carga metálica. Também, quanto maior for a proximidade da sucata com a chama, maior será a eficiência dos queimadores é por isso que são instalados em pontos frios do FEA, para possibilitar a redução no consumo de energia elétrica na etapa de fusão.

**Figura 21 – Influência do consumo de GLP em função da percentagem de gusa líquido carregado no FEA.**



FONTE: Autor, 2011.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho foi realizado sob a expectativa de mostrar, comparar e avaliar os fatores que mais influenciam na Matriz Energética do FEA de 40 t, através de dados reais de balanços de massa e balanços térmicos estáticos, identificando modernas tecnologias utilizadas na indústria siderúrgica e as principais etapas do processo responsável pelos maiores consumos energético.

Durante o trabalho foi verificado que os fundentes apresentam um custo considerável no processo de fusão, pois é necessária uma parcela de energia elétrica para fundir-los. Dados práticos neste estudo mostram que o carregamento da cal no FEA em um intervalo de 50 a 70 kg/t, resulta em um consumo de energia elétrica médio de 1,76 kWh/t para cada 1 kg/t de fundente adicionado a mais no forno elétrico. O consumo elevado da cal se deve principalmente ao teor elevado de sílica na sucata mal processada, utilização de sucata de gusa, corridas de gusa líquido com alto percentual de silício e a baixa reatividade dos fundentes.

O estudo possibilitou verificar que a quantidade de carregamento de metálicos no FEA, influencia no consumo de energia elétrica aproximadamente em 55 kWh/t por cesto adicional, pois cada vez que a abobada é aberta, há perda de energia, principalmente por irradiação do interior do forno e da cobertura de escória da abobada.

Ficou comprovada que um percentual de 34 a 40 % de metal líquido carregado no FEA de capacidade de 40 t, é viável para a redução no consumo de energia elétrica, pois os resultados mostram que 1% de gusa líquido adicionado a mais no forno, resulta em um retorno em economia média de 7,5 kWh/t de energia elétrica.

Em termos econômicos a empresa em estudo apresenta um processo integrado, objetivando o máximo de utilização de gusa líquido no FEA, devido ao alto forno ser exclusiva da aciaria, com isso o processo se beneficia ao máximo da energia térmica e química do gusa líquido, resultando em um menor power-on e conseqüentemente uma maior produção do FEA.

Conclui-se que o peso médio é um parâmetro muito importante para o volume de produção e rateio dos consumos específicos do forno, pode-se afirmar que na faixa do peso médio menor em 1 t, aumenta o consumo de energia elétrica em média 18,6 kWh/t.

Verifica-se que o programa de potência pode influenciar na redução do consumo de energia elétrica do FEA através dos parâmetros elétricos e que possível pelo aumento da potência (MW), que irá reduzir o tempo de forno ligado e conseqüentemente reduzir o consumo de energia elétrica.

Foi comprovado que o aumento do percentual de corridas de gusa líquido carregado no FEA, proporciona uma redução no consumo de oxigênio, devido ao carbono fornecido pelo gusa líquido está instantaneamente disponível, para as reações de descarburização (reação das interfaces gás-líquido é maior que nas interfaces gás-sólido), antecipando o início da formação da primeira escória. Portanto, é de fundamental importância à imersão das lanças de oxigênio na escória, para promover uma melhor eficiência de injeção, descarburização e desfosforação.

De acordo com o trabalho a percentagem de corridas de gusa líquido carregado não influencia no consumo de injeção GLP, pois a maior eficiência de injeção de gases deste equipamento e quando operamos com a carga mais fria possível

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Realizar um balanço energético e massa na prática de todas as energias envolvida no FEA;
- Desenvolver um trabalho de perdas de energias envolvendo todas as etapas de fabricação de aço;
- Elaborar um programa de balanço térmico e massa para o FEA;
- Fazer um estudo de análise de sucata de gusa;
- Estudar o efeito da reatividade da cal no FEA;
- Implementar os teste de hipóteses, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos;
- Analisar a influência do tempo de vazamento do aço para a panela de aço.

## REFERÊNCIAS

- [1] KATSUJIRO, S. **NT Fundentes e escorificantes – situação atual com tendências 2025**. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Brasília: Centro de Gestão e Estudo Prospectivo, Brasília, 2008.
- [2] RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos**, ABM., São Paulo, 2005.
- [3] IBS. **Instituto Aço Brasil**. Disponível em: [http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio\\_sustentabilidade\\_2012.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf)>. Acesso em 02 Set. 2012
- [4] BELGO.Grupo ArcelorMitall. **Processo de Fabricação Belgo 50 e Belgo 60** Disponível em: [https://www.belgo.com.br/solucoes/artigos/pdf/belgo\\_50\\_60.pdf](https://www.belgo.com.br/solucoes/artigos/pdf/belgo_50_60.pdf)>. Acesso em 01 Out. 2012.
- [5] ARAUJO, Luiz Antonio de. **Manual de Siderurgia** – São Paulo: Editora Arte& Ciência, v.1. 2005.
- [6] JFE, 21st. Century Foundation. **Chapter 2 Smelting, Refining and Continuous Casting**. H EAF (Electric Arc Furnace). Disponível em: [http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter\\_2/2h\\_1.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2h_1.html) Acesso em 26 Set. 2012.
- [7] CÂNDIDO, F. S., PASSOS, S. R. M., ALBUQUERQUE, B. T. S., GOMES, N. H. G., COELHO, E. S., Modelo de Carga Fria do FEA – UHP – 50T., Anais do 42º Seminário de Aciaria Internacional. ABM. Salvador, Brasil. Mai. 2010.
- [8] JACCARD, L.R. Principios básicos para definición de los parámetros eléctricos operacionales de los hornos de arco, diferenciación según la etapa de fusión, efectos sobre el flicker la productividad y el consumo de electrodos – IAS – Conferencia 2005 – San Nicolás de los Arroyos – Argentina.
- [9] WANDEKOKEN, T. P.; MAIA, B.T; HOPPERDIZEL. P. Desenvolvimento e utilização de um modelo matemático de balanço térmico de um FEA como ferramenta de avaliação de parâmetros técnicos e econômicos no uso de gusa líquido, 43º Seminário de Aciaria Internacional, Belo Horizonte, Minas Gerais, Maio de 2012.
- [10] KÖHLE, S. Stahl und Eisen, Vol. 112, 1992, No. 11, pp. 59-67.