UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOSÉ AUGUSTO DE CASTRO CALDAS

ANÁLISE DE DUAS ROTAS TECNOLÓGICAS NA SIDERURGIA BRASILEIRA COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

JUIZ DE FORA
2011

JOSÉ AUGUSTO DE CASTRO CALDAS

ANÁLISE DE DUAS ROTAS TECNOLÓGICAS NA SIDERURGIA BRASILEIRA COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: D. Sc., Marcos Martins Borges

JUIZ DE FORA

2011

Caldas, José Augusto de Castro

Análise de Duas Rotas Tecnológicas na Siderurgia Brasileira com Foco na Eficiência Energética / José Augusto de Castro Caldas. – 2011.
47 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)—Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

1. Eficiência Energética. 2. Siderurgia e Tecnologia. I. Título.

CDU 621.3

JOSÉ AUGUSTO DE CASTRO CALDAS

ANÁLISE DE DUAS ROTAS TECNOLÓGICAS NA SIDERURGIA BRASILEIRA COM FOCO NA EFIÊNCIA ENERGÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 16 de novembro de 2011.

BANCA EXAMINADORA

_____

D. Sc., Marcos Martins Borges (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

D. Sc., Roberta Cavalcanti Pereira Nunes

Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Pedro Roberto Monken Kronemberger

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por sempre me guiar nos momentos certos.

Agradeço a minha mãe Marli por ter me incentivado e me ajudado durante toda minha graduação, me apoiando nos momentos que mais precisei. Sem ela com certeza não conseguiria essa grande conquista em minha vida.

Agradeço ao meu irmão Vitor Castro e Caldas por todo companheirismo e amizade em toda minha vida.

Agradeço ao meu orientador Marcos Martins Borges pelo apoio e auxílio durante o desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço ao meu amigo Pedro Roberto pela participação na banca de avaliação.

Agradeço a todos da turma A.A. Esterco por terem me proporcionado momentos de alegria durante toda minha graduação, fazendo com que esse tempo fosse um dos melhores da minha vida.

RESUMO

A intenção deste trabalho é realizar um estudo para comparar os níveis de eficiência energética do parque siderúrgico brasileiro com os melhores níveis de eficiência praticados pela indústria mundial de aço. A partir da apresentação de tais níveis de eficiência, será possível analisá-los e compará-los com o objetivo de identificar as etapas com maiores níveis de consumo de energia no processo de produção do aço, de acordo com as tecnologias de processos siderúrgicos utilizadas atualmente. O estudo considera duas tecnologias utilizadas atualmente, detalhando os seus processos em níveis operacionais como forma de entender como os recursos energéticos são utilizados. Poderá então chegar-se a identificação dos processos com maior consumo de energia e a oportunidades de melhorias na eficiência energética de determinados processos ou etapas, conforme comparações e análises do trabalho.

Palavras-chave: Siderurgia, Eficiência Energética, Tecnologia.

ABSTRACT

The intention of this work is to make a study to compare the energetic efficiency of the Brazilian steel park, with the best efficiency levels practiced by the world steel industry. From presenting such levels of efficiency, it will be possible to analyze and compare them, aiming to identify the steps with the higher energy consumption levels in the steel producing process, according to the steel manufacturing technology currently utilized. The study considers two kinds of technology currently utilized, detailing its processes, in an operational level, as a form of understanding the way the energetic resourcing are used. The processes with the highest levels of energy consumption and opportunity of improvement on processes or steps will be possibly identified by the study´s comparisons and analysis.

Keywords: Steel Mill, Energy Efficiency, Technology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema Energético Genérico 19
Figura 2: Processo Integrado x Processo Semi-Integrado 21
Figura 3: Rota Integrada 21
Figura 4: Rota Semi-Integrada 22
Figura 5: Fluxo Simplificado do Processo de Produção de Aço 25
Figura 6: Produção Mundial de Aço 29
Figura 7: Consumo per capita do Brasil em relação a países mais desenvolvidos 32
Figura 8: Produtos obtidos na coqueificação 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores Energéticos 20
Tabela 2: Produção de Aço por País (10^6t/ano) 30
Tabela 3: Produção de Aço por Processo 31
Tabela 4: Intensidade Energética Total da Siderurgia por rota e por processo (Estado da Arte). 33
Tabela 5: Intensidade Energética para rota: Alto-forno + Forno a Oxigênio (Estado da Arte). 34
Tabela 6: Intensidade Energética para rota: Redução Direta + Forno Elétrico a Arco (Estado da Arte). 35
Tabela 7: Balanço de Energia em Aciaria com Forno Elétrico a Arco 39
Tabela 8: Valores médios Brasil para Rota Integrada: Alto-Forno (Coque) + Forno a Oxigênio 40
Tabela 9: Valores médios Brasil para Rota Semi-Integrada: Redução Direta + Forno Elétrico a Arco 41
Tabela 10: Comparação do consumo energético – Rota Integrada 42
Tabela 11: Comparação do consumo energético – Rota Semi-Integrada 43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional

EPE – Empresa De Pesquisa Energética

GJ – Gigajoule

IBS – Instituto Aço Brasil

WSA – World Steel Association

PIB – Produto Interno Bruto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 11
1.2 JUSTIFICATIVA 11
1.3 ESCOPO DO TRABALHO 12
1.4 FORMULAÇÃO DE HIPÓTESES 12
1.5 OBJETIVOS 12
1.6 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 12
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO 13

2. REVISÃO DE LITERATURA 14

2.1 HISTÓRIA DO AÇO 14
2.1.1 AS PRIMEIRAS APLICAÇÕES 14
2.1.2 O USO DO COQUE 16
2.1.3 OUTRAS EVOLUÇÕES 17
2.1.4 A EXPERIÊNCIA NO BRASIL 18
2.2 CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 18
2.3 USINA INTEGRADA X USINA SEMI-INTEGRADA 21
2.4 PROCESSO SIDERÚRGICO 24
2.4.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS 25
2.4.2 REDUÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO 26
2.4.3 REFINO 26
2.4.4 LINGOTAMENTO 27
2.4.5 LAMINAÇÃO 27

3. DESENVOLVIMENTO 29

3.1 CENÁRIO MUNDIAL 29
3.2 CENÁRIO BRASILEIRO 30
3.3 DESCRIÇÃO DOS MELHORES NÍVEIS DE EFIÊNCIA ENERGÉTICA NA SIDERUGIA NOS SEUS PROCESSSOS 32

4. RESULTADOS.....42

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS ROTAS TECNOLÓGICAS DA SIDERURGIA.....42

5. CONCLUSÕES.....44

REFERÊNCIAS 45

ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE.....47

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido ao crescimento econômico do Brasil e do mundo, a demanda por aço tem apresentado crescimento constante. Por isso a indústria siderúrgica tem buscado novos métodos nos processos produtivos e realizado investimentos cada vez maiores para melhoria na sua eficiência operacional. Por exemplo, a adoção de novos equipamentos e instalações sucessivamente maiores em suas plantas industriais são fatos ocorridos nos últimos anos. A indústria siderúrgica tem papel fundamental no desenvolvimento do país, uma vez que o aço é usado na construção civil, ferrovias, automóveis, plataformas de petróleo, etc.

A tecnologia nos processos produtivos é um fator de suma importância para ganhos tanto de ordem financeira como em produtividade, o que acaba gerando reduções de custo ao longo do tempo para indústria siderúrgica.

Será realizado um estudo comparativo do consumo energético da siderurgia brasileira com as melhores práticas internacionais da indústria do aço, no quesito eficiência energética.

A partir desse estudo será possível avaliar e analisar os níveis de eficiência energética das usinas siderúrgicas presentes no país, de acordo com suas respectivas tecnologias de processo de produção.

1.2 JUSTIFICATIVA

O tema escolhido para ser desenvolvido, se deve à importância dos processos siderúrgicos no contexto da economia brasileira, sendo que a crescente demanda por aço reflete o desenvolvimento do país. Além disso, é de suma importância o conhecimento de tais processos para um engenheiro de produção. O autor também tem interesse no conhecimento detalhado dos processos, visto que será um conhecimento a mais para carreira profissional do mesmo.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O estudo será realizado sobre duas rotas tecnológicas: Alto-Forno + Forno a Oxigênio (usina integrada) e Redução Direta (100% Sucata) + Forno Elétrico a Arco (usina semi-integrada). Os objetos de estudo serão os processos produtivos adotados pela siderurgia e seus respectivos consumos energéticos.

1.4 FORMULAÇÃO DE HIPÓTESES

Devido à crescente demanda mundial por aço, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, a eficiência energética tem papel importante na produção do aço, visto que, níveis de produção com menores gastos energéticos são importantes para competividade das siderúrgicas brasileiras, tanto no contexto que atenda a demanda interna quanto para atender demandas externas.

A hipótese a ser confirmada no trabalho é verificar se os níveis de eficiência energética das siderúrgicas brasileiras estão próximos aos melhores níveis praticados pela indústria mundial.

1.5 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é verificar como os níveis de eficiência energética do parque siderúrgico brasileiro estão em relação aos melhores níveis praticados pela indústria mundial, analisando-se os respectivos processos de duas tecnologias (processo integrado e processo semi-integrado). Os objetivos específicos serão: (i) identificar os principais processos da siderurgia com maiores consumos energéticos (ii) comparar os níveis de consumo de energia de cada rota estudada com os níveis praticados pela indústria mundial.

1.6 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia utilizada no trabalho foi conforme a descrição abaixo:

Pesquisa e embasamento teórico sobre o tema através de artigos, publicações nacionais e internacionais, dissertações de mestrado, além de sites, livros e trabalhos acadêmicos.

Após a pesquisa e o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho, foram coletados dados necessários, por meio de documentos e artigos, para verificação dos níveis de eficiência de cada rota tecnológica a ser estudada (integrada e semi-integrada).

Em uma terceira fase serão comparados e analisados os resultados para identificar os principais processos com os maiores níveis de consumo de energia e posteriormente serão comparados os níveis de eficiência do parque siderúrgico brasileiro com os melhores níveis de eficiência praticados pela indústria mundial.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este tópico apresenta a estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso denominado: Análise de Duas Rotas Tecnológicas na Siderurgia Brasileira com Foco na Eficiência Energética. Será descrito de forma sucinta, o conteúdo de cada capítulo.

Capítulo I – Introdução

Traz uma breve explicação sobre do que será abordado durante o desenvolvimento do trabalho. Apresentando também o objetivo, justificativa, estrutura do trabalho e escopo do mesmo.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Neste capitulo são apresentados a revisão bibliográfica sobre a história do aço, o conceito de eficiência energética e as principais tecnologias difundidas na produção do aço.

Capítulo III – Desenvolvimento

Serão descritos neste capítulo os melhores níveis de eficiência energética praticados pela indústria mundial, o detalhamento dos processos siderúrgicos visando identificar os principais elementos de que fornecem energia ou consomem energia. Posteriormente serão mostrados os níveis de eficiência energética do parque siderúrgico nacional.

Capítulo IV – Comparação dos dois principais processos de produção do aço

Serão comparados os níveis de eficiência energética descritos no Capítulo III, identificando, sobre as tecnologias utilizadas na siderurgia, quais os principais processos responsáveis pelos maiores consumos energéticos.

.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O aço é muito importante na vida moderna. Automóveis, aviões, navios, linhas de transmissão de energia elétrica, tubulações de água, redes integradas de telefonia, etc., são feitos de aço. Nas casas o aço está presente em larga escala, dos talheres às panelas, passando pelos vergalhões que garantem a estabilidade das construções. Ainda, além da presença direta nos bens duráveis, o aço é vital na construção das máquinas e equipamentos que tornam possível à humanidade, gozar dos benefícios e facilidades conferidos pelos bens de consumo modernos. Desta maneira, fica inconcebível qualquer tentativa de imaginar o mundo moderno sem a presença do aço. E ainda, pode-se dizer que o poderio econômico de uma nação está direta e intimamente ligado com o consumo per capita de aço.

2.1 HISTÓRIA DO AÇO

2.1.1 As Primeiras Aplicações

A primeira vez que o homem fez contato com elemento ferro, foi sob a forma de meteoritos, daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino *sider* significa estrela ou astro (JÚNIOR, 2002).

Muitos anos transcorreram até que o ferro vindo das estrelas fosse também o ferro vindo da terra. Evidências arqueológicas indicam que, o know-how do beneficiamento de minério de cobre ajudou acidentalmente no desenvolvimento das técnicas antigas de redução de minério de ferro. Acredita-se que algumas fogueiras construídas a base de pedras de minério de ferro, promoviam o contato de partículas suficientemente quentes de carbono com partículas de óxido de ferro, dando início ao processo de redução, resultando em uma massa escura, não fundida, mas em contrapartida permitindo a sua deformação plástica através de técnicas de forjamento, produzindo utensílios de diferenciadas propriedades mecânicas. O registro mais antigo de um processo de redução de minério de ferro foi encontrado na parede de uma tumba egípcia, datando de aproximadamente 1500 A.C. (WAKELIN, 1999).

A simplicidade do processo chama a atenção: um simples buraco no solo, contendo minério e um combustível desconhecido, onde a chama era controlada através de foles acionados com o movimento dos pés.

Segundo Júnior (2002) outros avanços ocorreram, apesar da falta de registros, mas acredita-se que a grande difusão dos utensílios de aço ocorreu por volta do século XIII A.C., quando no Império Hitita, região onde hoje se situa a Turquia, o ferro foi introduzido em utilizações militares em detrimento ao uso do bronze. Após localizarem um grande depósito de minério de ferro, os Hititas desenvolveram técnicas de forjamento, transformando seus armamentos e construindo um verdadeiro império mantido por várias décadas.

No século VI A.C., Nabucodonosor fez construir os portões da Babilônia com pilares e vigas cobertas de cobre e reforçadas com estruturas de ferro. Por volta do século V A.C. os chineses, que já haviam inventado a roda, começaram a fabricar o ferro carburado, mais tarde chamado ferro-gusa. Em 221 A.C, o império chinês foi capaz de dominar praticamente todos os reinos circundantes, graças às suas apuradas técnicas de produção de ferro. Estas são provas irrefutáveis de como o uso do ferro tem alterado a história ao longo dos tempos (ARAÚJO, 1997).

Vários processos de obtenção do ferro foram desenvolvidos ao longo do tempo e usados longamente nas distintas regiões, como o forno de redução africano (século VI A.C.), o buraco de redução, usado em vários países do mediterrâneo, o forno de exaustão natural, desenvolvido pelos gregos, entre outros. Estes tipos de fornos foram utilizados ao longo dos séculos e na idade média até o século VIII, quando uma pequena forjaria da Catalunha criou a forja Catalã, um conceito que pode ser considerado como um dos maiores avanços na tecnologia de redução de minério de ferro. A primeira forja Catalã tinha uma cúpula feita de pedras, de seção circular, de aproximadamente 1 metro de altura por 0,76 metros de diâmetro conhecida como cuba, com um bocal inferior conectado a um fole para o suprimento de ar aquecido. O minério era alimentado sobre uma camada de carvão, e sobre ele outra camada de carvão era alimentada, em procedimento muito semelhante ao atualmente usado. A forja Catalã produzia cerca de 160 kg de ferro em cinco horas, enquanto que as técnicas anteriores produziam neste mesmo intervalo de tempo, no máximo 23 kg. A forja Catalã dominou a produção de ferro até o século XV(ARAÚJO, 1997).

Estes fornos foram sendo continuamente melhorados, dando origem sempre a novos processos. Os grandes avanços puderam ser sentidos nos aumentos das alturas de chaminé e colunas de carga, provavelmente como consequência de possíveis aumentos de pressão de sopro através da utilização de foles hidráulicos. Estas melhorias deram origem aos fornos *wolf oven, blasofen, stuckofen, blauofen* e finalmente o *flussofen*, considerado como o primeiro

alto-forno, que evoluiu gradativamente para o processo que vem dominando o cenário da produção de ferro gusa nos últimos séculos, o moderno alto-forno.

A partir da segunda metade do século XV, começa-se a produzir ferro pelo 'refino' do ferro-gusa, e com a crescente utilização da força motriz da água, se difundiu o uso de cilindros laminadores e trefilações a fio. No início do século XVIII, o consumo de aço conhece um grande avanço, começando também os problemas ecológicos. Dentro das minas, o trabalho era feito à luz de velas e o minério de ferro era retirado em cestas puxadas por cordas (ARCELOR MITTAL TUBARÃO, 2010).

A partir de 1600, várias leis no Reino Unido foram criadas visando à preservação das florestas, obrigando a retirada de operação de vários altos-fornos. Concomitante a isto, a produção de ferro nas colônias norte americanas fora fortemente apoiada, devido a abundância de madeira e minério de ferro. O primeiro alto-forno construído em 1622 na América do Norte, em Falling Creek, Virginia, nunca chegou a entrar em operação, pois os índios nativos americanos massacraram o chefe de obras John Berkeley e todos os trabalhadores, além de destruírem todo o trabalho realizado. Somente em 1645, um novo alto-forno nos Estados Unidos foi construído, e daí efetivamente operado (JÚNIOR, 2002).

2.1.2 O Uso do Coque

O coque é o material resultante do processo de coqueificação do carvão, que consiste basicamente no aquecimento a altas temperaturas, em ausência de ar, de uma massa de carvão com características aglutinantes, liberando assim certo número de produtos voláteis e gerando um resíduo sólido, poroso, carbonoso e de alta resistência mecânica. No processo de redução de minério de ferro via alto-forno, o coque é responsável pelo fornecimento de carbono e energia necessários para reduzir quimicamente, direta ou indiretamente o minério, e produzir o ferro gusa. Devido à sua resistência, o coque é responsável por sustentar a coluna de carga do forno e gerar a permeabilidade necessária para os gases fluírem no leito.

A utilização de coque como combustível deu-se no início do século XVIII com o inglês Abraham Darby, que após alugar um alto-forno a carvão vegetal em 1708, começou a produzir o ferro-gusa a partir do coque em 1709. Durante 10 anos, coque era misturado a carvão vegetal, numa proporção crescente, até que em 1718 o gusa era totalmente produzido a partir do coque como combustível. Inicialmente, o uso de coque como combustível não se difundiu significativamente por dois motivos: devido ao alto enxofre (o ferro produzido era

quebradiço) e a não publicação por Darby de seu uso durante muitos anos, apesar de não tentar fazer segredo sobre a utilização de coque. O resultado foi que até 1750 somente três fornos utilizavam este material como combustível, e não por coincidência, todos os três fornos eram operados pela família Darby. Somente a partir de 1784, graças aos bons resultados dos trabalhos de pudlagem feitos por Henry Cort, houve uma ampla difusão da utilização do coque.

O uso de coque permitiu aumentos significativos de produção. Por ser mais resistente, o coque permitia carregar maior quantidade de minério, resultando na construção de fornos maiores, além do que o leito formado pelo coque, otimizou a permeabilidade do leito para os gases, permitindo-se soprar mais e melhorar os índices de produção.

2.1.3 Outras Evoluções

A partir das primeiras utilizações com sucesso dos altos-fornos à coque, as maiores evoluções, que resultaram em saltos de escala de produção, economia de combustível, índices de produtividade, podem ser consideradas (JÚNIOR, 2002)

- ✓ 1780 – Os foles passaram a ser acionados por engrenagens movidas a vapor;
- ✓ 1828 – Uso de ar pré-aquecido nas ventaneiras;
- ✓ 1832 – Aproveitamento do poder calorífico dos gases de topo no pré-aquecimento do ar;
- ✓ 1857 – Desenvolvimento dos trocadores de calor tipo *Cowpers*;
- ✓ 1870 – Otimização dos sistemas de carregamento através do uso de elevadores à água, skips, etc;
- ✓ 1880 – Primeiro sistemas de limpeza de gases com a utilização de um *dustcatcher*;
- ✓ 1880 – Difusão de técnicas para proteção do revestimento interno dos fornos (refratários, tubos de refrigeração, painéis refrigerados, etc.);
- ✓ 1910 – Utilização de sopradores tipo turbo, ao invés de foles;
- ✓ 1910 – Primeira máquina de sinterização;
- ✓ 1917 – Primeira máquina para construção de tijolos refratários de qualidade;
- ✓ 1944 – Primeira patente para a injeção de finos pelas ventaneiras;
- ✓ 1950 – Otimização do sistema de controle dos fornos;
- ✓ 1951 – Enriquecimento de ar com oxigênio puro.

2.1.4 A experiência no Brasil

No Brasil, a produção de ferro iniciou logo após o descobrimento. Em 1554, o Padre Anchieta reportava à corte a ocorrência de ferro e prata. Em 1587, Afonso Sardinha iniciou a industrialização de ferro no Brasil. A produção aumentava até que, em 5 de janeiro de 1785, D. Maria, rainha de Portugal, proibiu terminantemente qualquer existência de fábricas na colônia, devido à febre do ouro, que exigia a dedicação exclusiva de todos os recursos ao enriquecimento da Metrópole. Somente após a ascensão de D. João VI ao trono, é que as fábricas seriam novamente permitidas.

Mas o grande passo foi dado por força da Carta Régia de 4 de dezembro de 1810. Por ordem de José Bonifácio de Andrada e Silva - o 'Patriarca da Independência', o geólogo e metalurgista Wilhelm Von Eschwege, que havendo trabalhado sob as ordens dele na fábrica de Foz D'Alge em Portugal, de 1803 a 1807, chegou ao Brasil em 1810. Eschwege construiu perto de Congonhas do Campo, MG, na 'Fábrica de Ferro' de propriedade da Sociedade Patriótica, organizada pelo Conde de Palma, então governador de Minas Gerais, um baixo forno tipo Sueco e obteve aos 17 de dezembro de 1812, a primeira corrida de ferro gusa (ou ferro coado como era chamado à época) no Brasil (JÚNIOR, 2002).

Em 1905 o Brasil possuía 2 altos-fornos, 1 deles inoperante devido à concorrência internacional, produzindo 2100 toneladas anuais de gusa e cerca de 100 forjas produzindo mais 2000 toneladas de ferro em barras (ARAÚJO, 1997).

2.2 CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética tem se tornado um assunto cada vez mais discutido na agenda mundial, principalmente quando se observou os impactos econômicos e ambientais que os recursos fósseis vêm causando no mundo. Logo, se reconhece que um mesmo serviço ou produto pode ser obtido com menores gastos de energia, consequentemente menos impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais. Produtos, processos de produção, maneiras de se viver e hábitos de consumo, passaram a ser analisados em termos da conservação da energia mostrando que muitas mudanças que resultam em uma maior eficiência energética, são economicamente viáveis, ou seja, o custo de implementação é menor do que o custo de produzir ou adquirir a energia cujo consumo é evitado.

A perspectiva de elevação dos custos de combustíveis de origem fóssil e a preocupação com a questão das mudanças climáticas em decorrência do aquecimento global do planeta trouxeram mais argumentos que justificam o destaque da eficiência energética.

Por definição o termo "eficiência" representa a capacidade de equipamentos ou processos que operam de forma cíclica, produzirem os resultados almejados. Em uma visão física, o conceito de "eficiência" estaria ligado aos processos onde há conservação da energia e em que as formas inicial e final são visíveis ou perceptíveis – energia elétrica, potencial, cinética, térmica. (HORDESKI[1] *apud* EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2010).

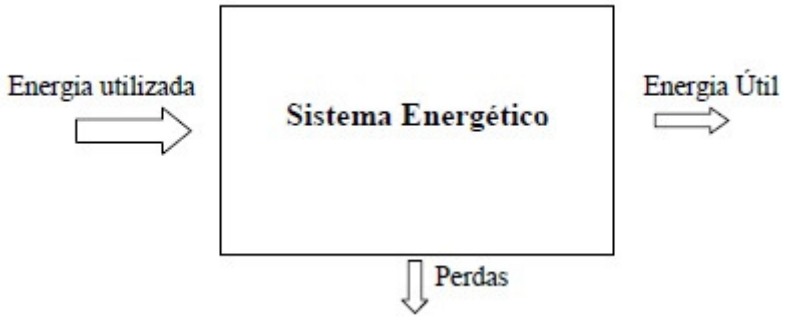

Figura 1: Sistema Energético Genérico
Fonte: Godoi, 2011.

Segundo Godoi (2011), a dificuldade da definição da eficiência energética se ressalta quando ela é definida de forma mais ampla como trabalho útil/energia de entrada requerida. Essa interpretação, que é baseada na primeira lei da Termodinâmica, torna-se fraca quando as saídas ou produtos finais não são medidos em termos de trabalho, como por exemplo, podem ser medidos como preços de mercado ou razão da utilização total de energia de uma nação pelo seu PIB.

Outra definição seria que a eficiência energética é obtenção de energia, como produção, transporte e calor, por unidade de energia utilizada, como carvão, coque, gás natural, combustíveis ou eletricidade. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY[2] *apud* EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2010).

De acordo com Empresa de Pesquisa Energética (2010), o conceito de eficiência energética é "a relação entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado".

---

[1] HORDESKI, **M. Dictionary of Energy Efficiency Technologies**. Lilburn, GA (Estados Unidos): The Fairmont Press, 2005.
[2] IEA – International Energy Agency. **Mind the Gap: Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency**. Paris (França): IEA, 2007.

Dentro dessa última conceituação a eficiência está ligada à quantidade efetiva a ser utilizada para se realizar um serviço.

Segundo Patterson[3] (1996 *apud* EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2010) o entendimento da eficiência energética se dá verificando o uso da energia por cada unidade de produção. Isso torna mais relevante a apuração de indicadores que expressem a variação da eficiência energética. Geralmente eles são agrupados nos seguintes grupos:

1. **Termodinâmico**: indicam a relação entre o processo real e o ideal em termos de necessidade de energia;
2. **Físicos-termodinâmicos**: considera a energia necessária em unidades termodinâmicas, mas as saídas são unidades físicas (produto);
3. **Econômicos-termodinâmicos**: considera a energia necessária em unidades termodinâmicas, mas os produtos são considerados em unidades econômicas;
4. **Econômicos**: tanto a energia como as saídas são considerados em unidades monetárias.

Tomando como base este último conceito em relação à eficiência energética, alguns indicadores podem expressar tal conceito levando-se em conta o desempenho de países, setores industriais ou atividades econômicas. Isso pode possibilitar a comparação entre países e o acompanhamento da evolução da eficiência ao longo do tempo.

Tabela 1: Indicadores Energéticos

Tema	Indicador	Componentes
Uso total	Uso de energia por habitante	Uso de energia (oferta total, consumo final total)
		População total
Produtividade total	Uso de energia por unidade de produto interno bruto	Uso de energia (oferta total, consumo final total)
		Produto interno bruto
Eficiência do suprimento	Eficiência na conversão e distribuição	Perdas nos centros de transformação
		Perdas nos sistemas de transmissão e distribuição
Uso final	Intensidade energética – setor industrial	Uso de energia por setor industrial
		Valor adicionado por setor

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2010.

[3] PATTERSON, M. What is **Energy Efficiency? - Concepts, Indicators and Methodological Issues**. Energy Policy v. 24, n.5, p. 377-390, 1996.

2.3 USINA INTEGRADA X USINA SEMI-INTEGRADA

Para a produção de aço, existem duas rotas tecnológicas alternativas: usinas integradas e semi-integradas (mini-usinas). As usinas integradas consistem na transformação do minério de ferro em aço e deste em produtos finais (laminados). Já as usinas semi-integradas começam seu processo na aciaria, utilizando sucata ferrosa como insumo básico. A figura 2 traça esquematicamente as principais características dos dois processos.

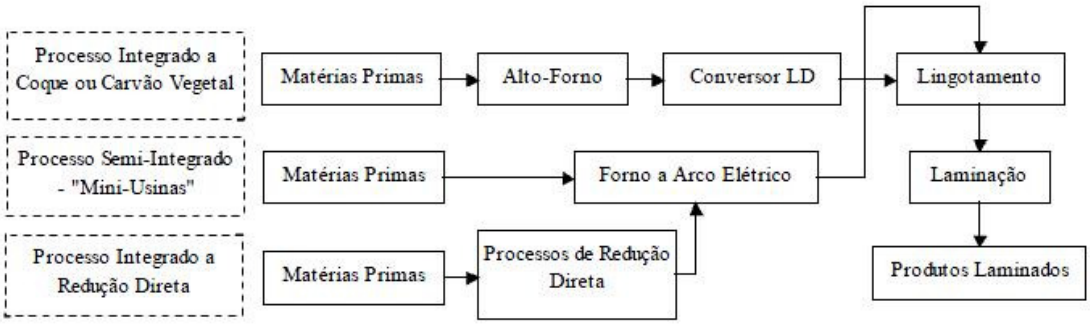

Figura 2: Processo Integrado x Processo Semi-Integrado
Fonte: Ferreira, 1993.

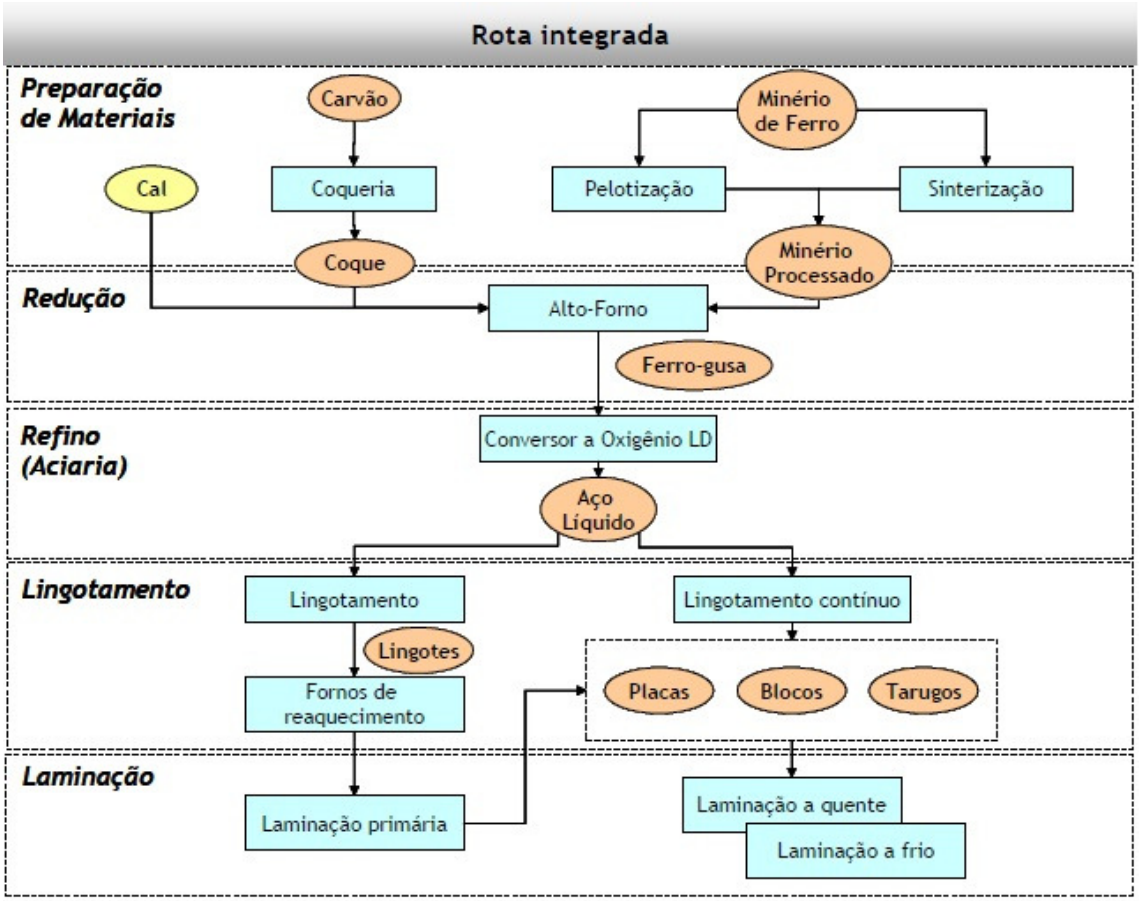

Figura 3: Rota Integrada
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009.

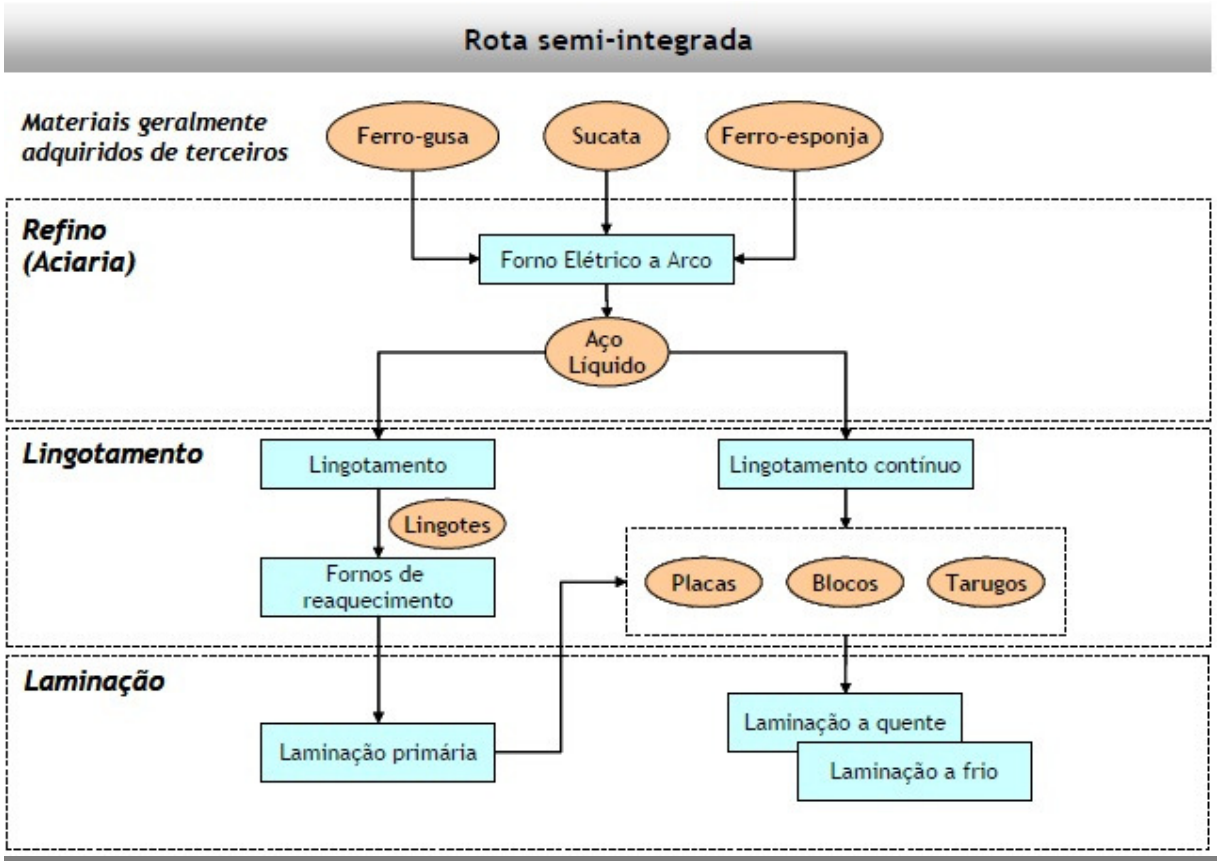

Figura 4: Rota Semi-Integrada
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009.

Como demonstrada nas figuras 3 e 4, a principal diferença entre as usinas integradas e semi-integradas é a ausência da etapa de redução do minério de ferro pelas mini-usinas. A etapa de redução consiste na transformação do minério de ferro em ferro-gusa, ferro-esponja (DRI) ou ferro briquetado a quente (HBI), sendo utilizados para isso, altos-fornos (a coque ou a carvão vegetal) ou instalações de redução direta. Cerca de 95% das usinas integradas, em todo mundo, possuem altos-fornos, enquanto as demais contam com unidades de redução direta (PAULA[4] *apud* BORGES *et al*, 1998).

Os anos 50 e 60 foram responsáveis por um grande boom na produção mundial de aço. Nesta época, a demanda por aço crescia a uma taxa de aproximadamente 6% ao ano, devido principalmente ao crescimento da procura por bens de consumo em geral, como eletrodomésticos, carros, etc. Para suprir esta demanda, a melhor opção econômica e tecnológica, eram os 'grandes' altos-fornos, construídos com capacidades de produção da ordem de 4 a 6 milhões de toneladas de ferro gusa líquido/ano. Estas usinas, conhecidas como

[4] PAULA, G.M. **Privatização e Estrutura de Mercado na Indústria Siderúrgica Mundial**. Rio de Janeiro, 1998. Tese de Doutorado – Instituto de Economia, UFRJ.

integradas, apresentam todas as etapas de produção e de beneficiamento do aço, ou seja, redução do minério, refino do aço e laminação. Ainda hoje as usinas são chamadas de integradas, quando apresentam este esquema de produção. O processo utilizado para o refino do aço, em 1950, era principalmente os fornos Siemens-Martin, processo desenvolvido por Karl Wilhelm Siemens em 1868. Porém, uma inovação radical aconteceu no início da década de 50, quando a siderúrgica austríaca Voest-Alpine desenvolveu os conversores a oxigênio, também conhecido como conversores LD, nome ligado à primeira planta que operou com este tipo de equipamento em 1952, a Linz e Donavitz na Áustria.

Os conversores a oxigênio são até hoje técnica e economicamente atraentes para largas escalas de produção. A carga dos fornos LD é basicamente constituída de gusa líquida, complementada por carga sólida (10 a 30%), como sucata ou gusa sólido.

Com o aumento das aciarias a oxigênio, um excedente gradual de sucata foi sendo gerado, tendo em vista que os conversores a oxigênio aceitam menos carga sólida do que os antigos fornos Siemens-Martin, fazendo com que o preço da sucata tivesse quedas significativas. Esta queda de preço da sucata chegou a níveis em que o custo de refusão se mostrava muito mais atraente do que o custo da redução de minério de ferro via alto-forno.

Este fator aliado a uma maior flexibilidade de produção dos fornos elétricos, menores custos de investimento, variáveis ambientais, e mais importantes, margens achatadas de lucro, fizeram surgir o conceito das mini-usinas. As mini-usinas são assim chamadas por não apresentarem a etapa de redução do minério de ferro, fabricando o aço a partir da rota forno elétrico-forno panela.

Credita-se o desenvolvimento dos fornos elétricos a Sir Humphrey Davy no ano de 1800, mas é mais apropriado creditar-se este feito a Sir Willian Siemens, que em 1878 patenteou, construiu e operou os fornos de acordo com os princípios de arcos diretos e indiretos. Nesta época, a disponibilidade de energia elétrica era escassa, o custo elevado e a tecnologia dos eletrodos de carbono estavam apenas engatinhando. Assim, fornos elétricos acabaram sendo incubados por algumas décadas até que a indústria de energia, assim como a de eletrodos de carbono, evoluísse o suficiente.

Atualmente, a produção de aço pelas mini-usinas continua crescendo em relação às aciarias a oxigênio, ainda que em países como o Brasil esta tendência não seja seguida. Como a quantidade de sucata disponível não é suficiente para atender à demanda de aço, estima-se que por mais 30 anos, a rota alto-forno/conversores LD deverá sobreviver.

Outro aspecto importante, surgido devido ao voraz advento das mini-usinas, à oferta limitada de sucata de baixa contaminação química e à baixa atratividade econômica e ambiental dos altos-fornos, foi a busca de alternativas para a produção de ferro primário. Neste contexto, pode-se evidenciar o desenvolvimento dos processos comercias de redução direta, como o HYL I e III, Midrex, SL-RN, etc. Estes processos procedem a redução parcial do óxido de ferro, na forma de pelotas ou granulado, através da utilização de um redutor sólido ou gasoso. O produto final, conhecido como DRI, sigla em inglês para ferro diretamente reduzido ou *Direct Reduced Iron*, é disponibilizado aos fornos elétricos para a produção de aço de alta qualidade, como os produtos planos, com baixos teores de enxofre, nitrogênio e contaminantes, mas com perdas de produtividade, rendimento e aumento no consumo de eletricidade.

2.4 PROCESSO SIDERÚRGICO

O aço é uma liga de ferro carbono, sendo o primeiro elemento encontrado na natureza combinado com oxigênio, formando assim o "minério de ferro". Já o carbono é obtido a partir do carvão mineral ou vegetal, elementos esses que são ricos em carbono. Os aços possuem menos de 2% de carbono em sua composição, isso lhes dão propriedades como: boa resistência, possibilidade de ser forjado, laminado, moldado, perfurado e modificado em suas propriedades por meio de tratamentos térmicos, mecânicos e químicos (ARAÚJO, 1997).

Para obtenção do aço em seu estado final, são necessárias várias fases até que ele esteja pronto para ser expedido e distribuído. A primeira fase consiste na preparação das matérias-primas, principalmente o minério de ferro e o carvão. Nessa fase é realizada a aglomeração do minério de ferro que tem por objetivo dar uma conformação adequada à carga metálica (sínter) que alimenta os altos-fornos, melhorando seu rendimento, e é feita através da sinterização. Já o carvão mineral é transformado em coque nas coquerias. A segunda fase consiste em obter o ferro do minério, por meio da redução, para o qual existem basicamente três maneiras: alto-forno, redução direta e fusão redutora. O processo de fusão redutora utiliza diretamente o minério de ferro e o carvão vegetal, não passando pelas etapas de sinterização e coqueificação. A terceira fase é realizada nas aciarias, onde ocorre o refino do produto que sai do alto-forno, levando-o a concentrações menores de carbono, dando origem ao aço propriamente dito. Os principais tipos de aciaria são o conversor a oxigênio e o forno elétrico

a arco (aciaria elétrica). As fases seguintes são o lingotamento e a laminação. A figura 5 mostra de forma simplificada o processo de produção do aço.

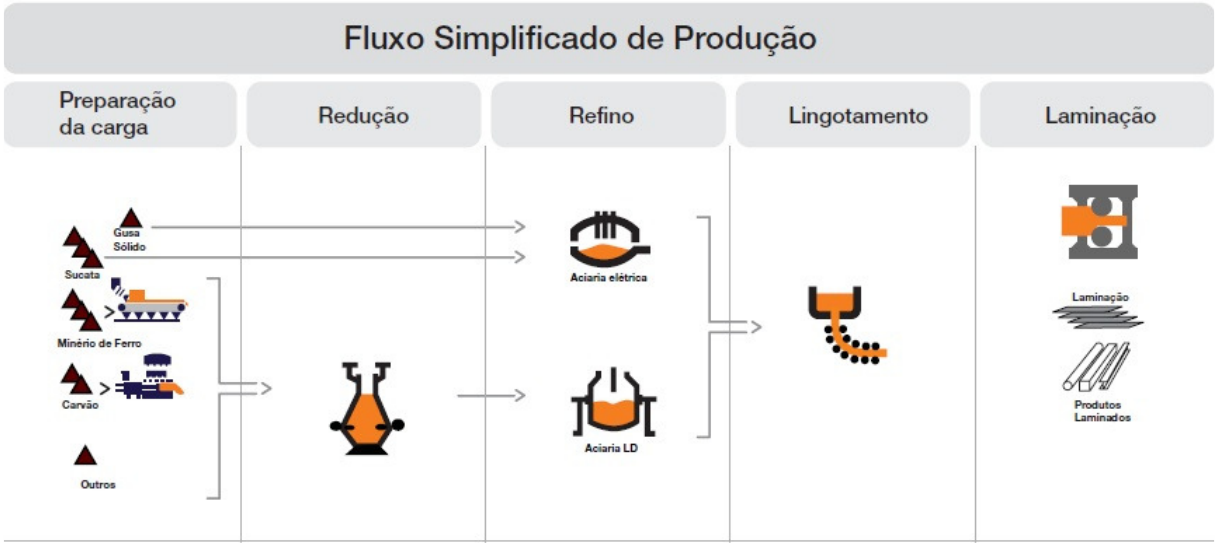

Figura 5: Fluxo Simplificado do Processo de Produção de Aço
Fonte: IBS, 2011.

2.4.1 Preparação dos Materiais

A etapa de preparação de materiais é responsável por preparar o carvão mineral, o minério e outros materiais para alimentaram os altos-fornos, onde se dá a redução do minério, dando uniformidade a carga e consequentemente aumentando o rendimento do processo.

O processo mais comumente usado é chamado de sinterização, processo este que irá gerar o sínter que alimentará o alto-forno. A sinterização é um processo realizado a alta temperatura, em torno de 1200ºC, que aglomera finos de minério de ferro, finos de coque, fundentes e adições, gerando o sínter, que é um material sólido, poroso e com granulometria necessária para os altos-fornos (ARAÚJO, 1997).

A coqueificação é um processo de beneficiamento do carvão mineral que ocorre na coqueria, responsável por transformá-lo em carvão metalúrgico ou coque. Essa transformação é realizada por destilação em fornos de coqueificação a altas temperaturas e na ausência de ar, evitando a combustão do carvão mineral e separando a matéria volátil do resíduo sólido com alto teor de carbono que é o coque.

Segundo Araújo (1997) o escopo dessa etapa de preparação de materiais é aumentar a permeabilidade da carga metálica e o contato entre os sólidos e o gás redutor, além do aumento da velocidade de redução.

2.4.2 Redução do Minério de Ferro

A principal função desta fase é a retirada do oxigênio do óxido de ferro, por isso denominada de redução. Este processo é realizado no alto-forno, que é alimentado por minério de ferro, combustível redutor (carvão metalúrgico ou carvão vegetal) e adições, que se transformam em: ferro-gusa, escória, gases e poeira. Através da introdução de ar pré-aquecido, dá-se a gaseificação do coque e esse gás rico em monóxido de carbono que é utilizado tanto como redutor como combustível para redução dos óxidos de ferro, reage com o minério de ferro, gerando o ferro-gusa. Este material, por sua vez, ainda contém muitas impurezas e teor de carbono relativamente elevado (>2%), para se obter as propriedades desejadas dos aços comercializados.

Desta maneira, a redução do minério de ferro dá-se no interior do alto-forno, acompanhada de fluxos de materiais e gases, resultantes de diferentes reações químicas que ocorrem simultaneamente em diversas partes do alto-forno.

2.4.3 Refino

A produção do aço propriamente dita é realizada nas chamadas aciarias, onde o ferro-gusa terá seu teor de carbono diminuído a níveis desejáveis (<2%). O refino é realizado em fornos especiais (chamados de conversores) a oxigênio, dos quais o mais utilizado é o chamado conversor LD, no caso de rotas integradas, e o forno elétrico a arco, no caso da rota semi-integrada.

O objetivo principal dessa fase é ajustar as quantidades de carbono a proporções necessárias para obtenção das propriedades desejadas, além da redução para níveis aceitáveis de elementos como: fósforo, enxofre, nitrogênio, entre outros.

No caso da rota integrada, a carga dos conversores a oxigênio, composta por gusa-líquido, ferro fundido, sucata ferrosa, cal e outras adições, sofre uma mudança na sua composição química, com diminuição do teor de carbono, através da injeção de oxigênio e adição de ferro-ligas, resultando no aço. Geralmente a proporção dentro do conversor é de 65 a 90% de gusa-líquido e o restante da carga é essencialmente sucata ferrosa reciclada. Com o objetivo de alcançar determinadas propriedades, o aço passa por uma etapa chamada de refino secundário, ou também chamado de “metalurgia de panela” que tem por objetivo remover

impurezas prejudiciais às características do aço, que não puderam ser retiradas no processo de fusão, e ajustar a temperatura.

Na rota semi-integrada, as aciarias são constituídas por fornos elétricos a arco. A carga metálica utilizada nesses fornos é composta por ferro-gusa sólido e sucata ferrosa.

2.4.4 Lingotamento

Depois de completado todo o trabalho de refino, o aço já possui a composição química desejada e é em seguida submetido a um processo de conformação mecânica, antes de passar para a fase de laminação.

No lingotamento convencional, aço é vazado nas chamadas lingoteiras, sendo resfriado até tomar formas de lingotes, que depois passam por locais de reaquecimento que os preparam para serem posteriormente laminados.

Já no lingotamento contínuo o aço sai diretamente da aciaria para uma fase de laminação, não precisando passar pelos fornos de reaquecimento.

2.4.5 Laminação

De acordo com a figura 3 essa é a última fase do processo siderúrgico, a laminação, onde o aço é submetido a tratamentos físicos e químicos com o intuito de conformá-lo mecanicamente de acordo com a realidade de suas aplicações. Nessa fase serão produzidos os produtos siderúrgicos como bobinas, tarugos, arames, vergalhões, perfilados, barras, fios, etc. Produtos estes que serão utilizados na construção civil, indústria automobilística, indústria naval, agropecuária, etc.

Os laminadores, em relação às condições operacionais, podem funcionar a frio ou a quente. De acordo com a forma dos produtos produzidos, eles podem ser classificados como planos ou longos, que podem incluir trilhos, perfis, arames, entre outros.

O processo de laminação de tiras a quente consiste basicamente em passar as placas de aço em estações de reaquecimento, fazendo com que o as placas possam ser processadas de acordo com as necessidades requeridas.

O aço ainda pode receber tratamento de galvanização, que tem por finalidade revestir a camada superior da bobina com uma fina camada de zinco, aumentando assim a resistência à corrosão, ou receber um revestimento de cromo ou estanho para a produção de folhas

cromadas ou folhas-flandres, respectivamente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 CENÁRIO MUNDIAL

A produção de aço representa um forte indicador para o estágio de desenvolvimento de um país, devido a sua utilização na construção civil, na instalação em meios de comunicação e produção de vários equipamentos.

Os anos compreendidos entre 1950 a 1973 foram caracterizados por uma forte expansão na indústria do aço chegando a patamares cada vez mais elevados de produção da indústria siderúrgica. Entre os anos 70 e 90 houve uma estagnação da indústria siderúrgica mundial, devido à crise do petróleo e à fragmentação da União Soviética, elevando os custos da indústria e diminuindo a demanda mundial por aço. A partir de 1998 a indústria começa a se recuperar impulsionada principalmente pelo crescimento da economia chinesa, chegando ao montante de 1,4 bilhões de toneladas em 2010 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

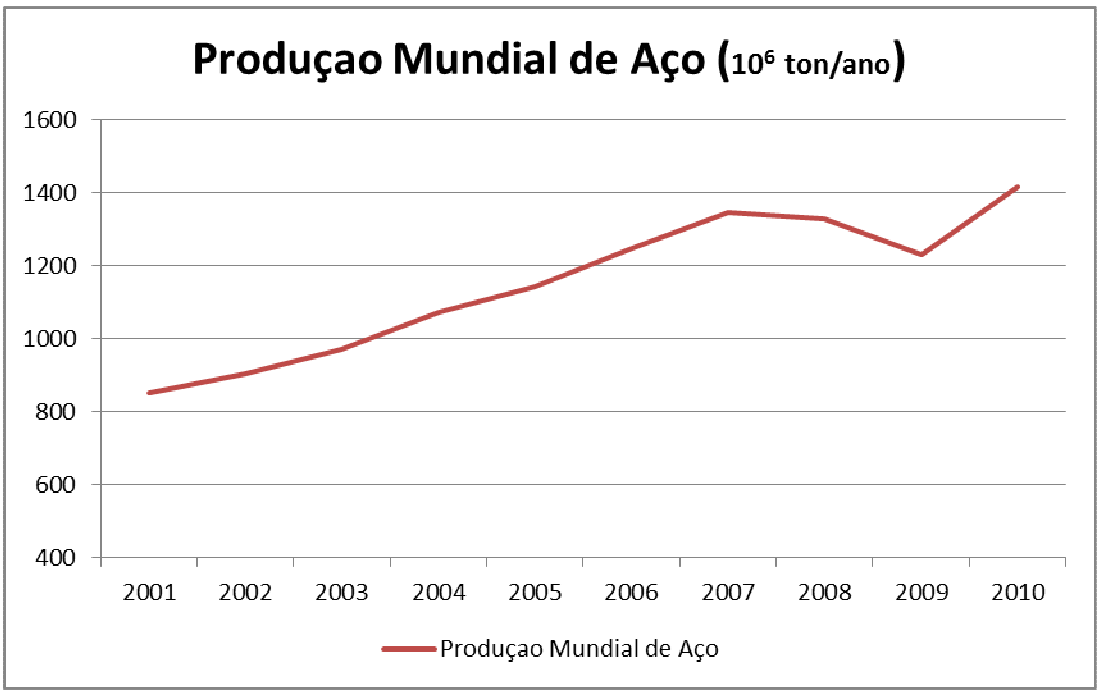

Figura 6: Produção Mundial de Aço
Fonte: WSA, 2011 (Adaptado).

Observando a figura 6, em 2008 e 2009 verifica-se uma queda na produção mundial, devido à crise mundial ocorrida em tais anos, desaquecendo a demanda mundial de aço.

Porém, de acordo com a figura 6 no de 2010, a indústria se recupera e bate o recorde de produção anual.

Analisando a tabela 2 no ano de 2010, observa-se que os maiores produtores de aço do mundo são: China, Japão e Estados Unidos. A China é o país que mais contribui para o crescimento mundial da produção de aço, sendo responsável por em torno de 44% da produção mundial de aço em 2010.

Tabela 2: Produção de Aço por País (10^6t/ano)

País	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**
China	151,6	182,4	222,3	282,9	353,2	419,1	489,3	500,3	573,6	626,6
Japão	102,9	107,7	110,5	112,7	112,4	116,2	120,2	118,7	87,5	109,6
EUA	90,1	91,6	93,7	99,7	94,9	98,6	98,1	91,4	58,2	80,5
Ìndia	27,2	28,8	31,8	32,6	45,8	49,45	53,5	57,8	63,6	68,3
Rússia	58,9	59,7	61,5	65,6	66,1	70,8	72,4	68,5	60	66,9
Coréia do Sul	43,8	45,4	46,3	47,5	47,8	48,5	51,5	53,6	48,5	58,4
Alemanha	44,8	45	44,8	46,4	44,5	47,2	48,5	45,8	32,7	43,8
Ucrânia	33,1	34,05	36,9	38,7	38,6	40,9	42,8	37,3	29,8	33,4
Brasil	26,7	29,6	31,1	32,9	31,6	30,9	33,7	33,7	26,5	32,9
Itália	26,5	26	27	28,6	29,3	31,6	31,5	30,6	19,8	25,7
Demais Países	245,4	253,75	263,1	283,4	279,8	293,75	304,5	291,3	231,8	270,9
Produção Mundial	**851**	**904**	**969**	**1071**	**1144**	**1247**	**1346**	**1329**	**1232**	**1417**
% China	17,8%	20,2%	22,9%	26,4%	30,9%	33,6%	36,4%	37,6%	46,6%	44,2%
% Japão	12,1%	11,9%	11,4%	10,5%	9,8%	9,3%	8,9%	8,9%	7,1%	7,7%
% EUA	10,6%	10,1%	9,7%	9,3%	8,3%	7,9%	7,3%	6,9%	4,7%	5,7%
% 3 Maiores	40,5%	42,2%	44,0%	46,2%	49,0%	50,8%	52,6%	53,5%	58,4%	57,6%
% Demais Países	59,5%	57,8%	56,0%	53,8%	51,0%	49,2%	47,4%	46,5%	41,6%	42,4%
% Total	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**

Fonte: WSA, 2011 (Adaptado).

3.2 CENÁRIO BRASILEIRO

Grande parte da produção nacional de aço está aglomerada em poucos grupos privados, são eles: CSN, Gerdau, Arcelor Mittal e Usiminas/Cosipa.

Nos últimos anos o Brasil vem diminuindo sua participação na produção mundial de aço, devido à estagnação de sua produção, aliado ao incremento acelerado da produção

chinesa. O Brasil, em 2010, 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.

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 40 milhões de toneladas de aço por ano, capacidade essa que está divida em 27 usinas espalhadas pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Pernambuco, Pará, Paraná, São Paulo e Rio Grande do Sul. São 12 usinas integradas e 15 usinas semi-integradas (IBS, 2011).

De acordo com a tabela 3, a produção brasileira está mais concentrada em usinas que possuem aciarias a oxigênio (76%). Já o restante provém de quase totalmente de aciarias elétricas, ou seja, forno a arco elétrico. Com relação ao processo de conformação, o lingotamento contínuo corresponde a cerca de 96% da produção nacional e o restante responde pelo lingotamento convencional.

Tabela 3: Produção de Aço por Processo

PRODUTOS	2010	% Percental
- ACIARIA		
OXIGÊNIO(LD)/EOF	25.088,6	76%
ELÉTRICO	7.834,1	24%
TOTAL	32.922,7	100%
- LINGOTAMENTO		
CONVENCIONAL	1.110,2	3,4%
CONTÍNUO	31.779,6	96,5%
- AÇO P/FUNDIÇÃO	32,9	0,1%
TOTAL	32.922,7	100%

Fonte: IBS, 2011 (Adaptado).

Outra característica da produção brasileira é que se produz mais aço no país do que a demanda interna, logo assumindo um papel de exportador deste insumo importante para indústria mundial. A maior parte dessas exportações é destinada a países da América, sendo o maior montante para países da América Latina e o restante para América do Norte. Outras localidades importantes são a Europa e a Ásia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

Em relação ao desenvolvimento econômico dos países, um importante indicador é o consumo per capita de aço por ano que mostra o grau de desenvolvimento e o avanço econômico. Conforme a figura 7, o Brasil apresenta índices muito inferiores a países com economias mais desenvolvidas como Japão, Alemanha e Coréia do Sul. Isso representa oportunidades de investimentos no Brasil para o avanço da economia, visto o cenário de otimismo e crescimento do país.

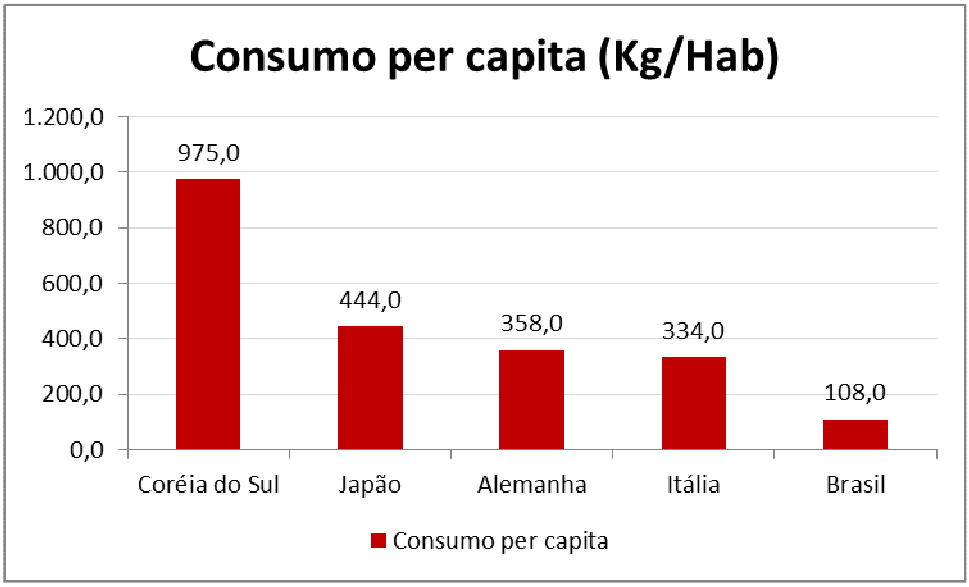

Figura 7: Consumo per capita do Brasil em relação a países mais desenvolvidos
Fonte: IBS, 2011 (Adaptado).

3.3 DESCRIÇÃO DOS MELHORES NÍVEIS DE EFIÊNCIA ENERGÉTICA NA SIDERUGIA NOS SEUS PROCESSSOS

Neste capitulo serão apresentados os consumos energéticos que correspondem aos melhores níveis de eficiência energética, que são praticados pela indústria mundial da siderurgia. Os indicadores representam o estado da arte atual em termos de eficiência energética (WORREL[5] *et al apud* EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2009).

Os valores da intensidade energética, em cada fase do processo de produção da siderurgia, serão apresentados para duas rotas tecnológicas:

- Alto Forno + Aciaria a oxigênio (usina integrada);
- Redução Direta (Sucata) + Aciaria elétrica (usina semi-integrada).

[5]Worrell, E.; Neelis. M. **World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors**. LBNL-62806, Rev.1. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.

Além disso, serão detalhados os processos e seus respectivos consumos para cada fase do processo siderúrgico. Os valores apresentados serão em GJ por tonelada de aço (GJ/t).

Tabela 4: Intensidade Energética Total da Siderurgia por rota e por processo (Estado da Arte).

Fase	**Processo**	**Alto Forno + Aciaria a oxigênio GJ/t**	**Redução Direta + Forno Elétrico GJ/t**
Preparação de materiais (minério e carvão)	Sinterização	1,9	
	Coqueificação	0,8	
Redução (fabricação de ferro)	Alto Forno	12,2	
Refino - Aciaria (fabricação do aço)	Forno a oxigênio	-0,4	
	Forno elétrico		2,4
Lingotamento e laminação	Lingot. Contínuo	0,1	0,1
	Lamin. a quente	1,8	1,8
Total		**16,4**	**4,3**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009 (Adaptado).

Observa-se na tabela 4 que a rota mais energointensiva é o alto forno combinado com a aciaria a oxigênio, sendo que o processo com maior gasto energético é a redução (alto forno). A rota com menos consumo de energia corresponde à produção secundária do aço (redução direta combinada com a aciaria elétrica), na qual não existem as fases de preparação de materiais e redução, pois sua fabricação é a partir da sucata.

Detalhando cada fase do processo de produção, na tabela 5, com seu respectivo consumo energético, podem ser verificados os gastos energéticos ideais para cada processo e sua fonte de energia. Segue abaixo, o detalhamento para cada rota apresentada:

Tabela 5: Intensidade Energética para rota: Alto-forno + Forno a Oxigênio (Estado da Arte).

ROTA TECNOLÓGICA: Alto-forno + Forno a oxigênio

Fase	Processo	Tipo de Energia	GJ/t
Preparação de materiais (minério e carvão)	Sinterização	Combustível	2,0
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,1
		Total	**1,9**
	Coqueificação	Combustível	0,6
		Vapor	0,1
		Eletricidade	0,1
		Total	**0,8**
Redução (fabricação de ferro)	Alto Forno	Combustível	11,4
		Vapor	0,4
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,2
		Total	**12,2**
Refino - Aciaria (fabricação do aço)	Forno a oxigênio	Combustível	-0,7
		Vapor	-0,2
		Eletricidade	0,1
		Oxigênio	0,4
		Total	**-0,4**
Lingotamento	Lingot. Contínuo	Combustível	0,03
		Vapor	0,03
		Total	**0,1**
Laminação a quente	Planos	Combustível	1,3
		Eletricidade	0,3
		Total	**1,6**
	Longos	Combustível	1,6
		Eletricidade	0,3
		Total	**1,9**
	Arames	Combustível	1,7
		Eletricidade	0,4
		Total	**2,1**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009 (Adaptado).

Na tabela 5, somando-se todos os consumos energéticos referentes ao elemento combustível, pode-se verificar que o mesmo corresponde ao elemento com maior consumo energético total, sendo o maior em quase todas as fases.

Tabela 6: Intensidade Energética para rota: Redução Direta + Forno Elétrico a Arco (Estado da Arte).

ROTA TECNOLÓGICA: Redução Direta (100% sucata) + Forno Elétrico a Arco

Fase	Processo	Tipo de Energia	GJ/t
Refino - Aciaria (fabricação do aço)	Forno Elétrico a Arco	Combustível	0,6
		Eletricidade	1,5
		Oxigênio	0,3
		Total	**2,4**
Lingotamento	Lingot. Contínuo	Combustível	0,03
		Vapor	0,03
		Total	**0,1**
Laminação a quente	Planos	Combustível	1,3
		Vapor	0,02
		Eletricidade	0,3
		Total	**1,6**
	Longos	Combustível	1,6
		Eletricidade	0,3
		Total	**1,9**
	Arames	Combustível	1,7
		Eletricidade	0,4
		Total	**2,1**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009 (Adaptado).

De acordo com a tabela 6, o combustível também representa, na rota tecnológica Redução Direta + Forno Elétrico a Arco, o maior consumo energético em relação aos demais elementos. A eletricidade está com valores bem altos, chegando próximo aos valores do consumo de combustível.

Em relação ao processo de sinterização o consumo energético possui valor de 1,9 GJ/t, que segundo Araújo (1997) tem a finalidade de aproveitar e recuperar os finos naturais ou de britagem e manuseio, além de recuperar poeiras, escórias, etc. As partículas minerais são aglomeradas em uma massa porosa, através da queima de um combustível a ela adicionada. Há então a colagem das partículas em condições com alta temperatura em um período curto de tempo sem ocorrer a fusão. O fortalecimento das ligações entre as partículas se dá através do amolecimento superficial, fusão parcial e formação de escória. O calor para as reações provém da queima do carbono que está junto à carga. Logo após, o sínter é resfriado e reduzido a dimensões adequadas para ser utilizado no alto-forno. O combustível utilizado na sinterização pode ser o coque, porém com uma granulometria adequada para que se obtenha uma distribuição uniforme na mistura e evitar elevadas temperaturas localizadas.

Segundo Araújo (1997) a sinterização envolve basicamente três processos:

1. Preparação da carga;

2. Queima desta carga numa grelha (em instalações maiores é contínua);
3. Resfriamento, britagem e peneiramento visando obter: o sínter de alto forno e os finos de retorno para reciclagem na própria instalação.

Na sinterização os principais gastos energéticos seriam na utilização do coque como combustível para manter o calor das reações necessárias em tal processo.

A coqueificação (consumo energético ideal no valor de 0,8 GJ/t), processo este presente em usinas integradas, tem o objetivo de retirar materiais voláteis e aumentar a concentração de carbono no carvão, dando origem ao coque. Para isso o carvão é colocado em um forno a uma temperatura de 1100ºC a 1300ºC sem oxigênio, isso faz com que toda a umidade do carvão seja retirada quando se atinge a temperatura de 100ºC a 150ºC. Ao atingir temperaturas maiores, substâncias mais voláteis passam a fase gasosa.

Segundo Araújo (1997) nas condições operacionais brasileiras uma tonelada de mistura de carvão proporciona 750 kg de coque e ocorre também a liberação de gás, que é chamado de gás de coqueria.

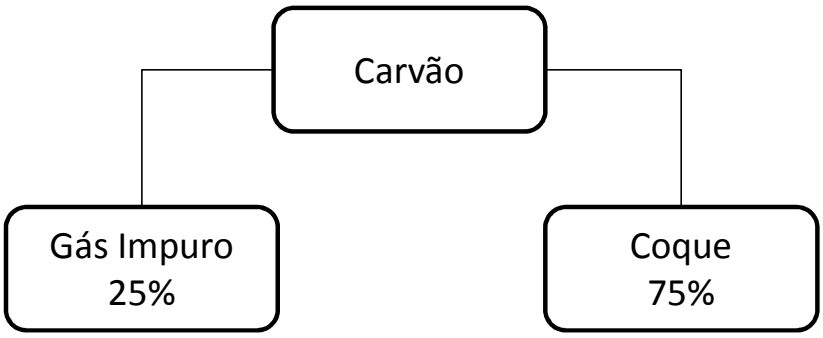

Figura 8: Produtos obtidos na coqueificação
Fonte: Araújo (1997).

O processo mais energointensivo, ou seja, o que tem o maior consumo energético é a redução (fabricação de ferro), processo existente na rota: Alto-Forno + Forno a Oxigênio. Possui o valor de consumo de 12,2 GJ/t representando em torno de 75% do consumo energético em relação ao total, para os melhores níveis de eficiência.

Tal processo ocorre no alto-forno, onde são misturados o sínter, coque e calcário ou dolomito.

A redução ocorre à medida que o minério, coque e os fundentes descem em contracorrente aos gases, oriundos da queima do carbono com oxigênio do ar aquecido que é soprado dentro do alto-forno. Durante este processo a carga desce no interior do forno, enquanto que os gases resultantes da combustão do coque (ou carvão vegetal) ao ascenderem

reduzem o minério e pré-aquecem os materiais. Durante o aquecimento ocorrem as reações de redução, quando o oxigênio combinado com óxidos de ferro passa, sob a forma de óxidos de carbono, para o estado gasoso. No processo de redução ocorrem outras reações químicas que dão origem a escória (ARAÚJO, 1997).

O minério, sínter e o coque, ao serem carregados, entram em contato com gases quentes a 150ºC-250ºC e logo é aquecida até 600ºC – 800ºC. A primeira transformação é de natureza física e consiste na secagem da carga, sendo removida junto com gases. Após a temperatura de 450ºC começa a ocorrer a redução através dos gases de monóxido de carbono e presença de carbono, e em seguida vai atingindo temperaturas ainda maiores. O material começa a se tornar plástico até chegar ao estado líquido, fazendo com que o gusa e a escória se depositem na parte mais inferior do alto-forno.

O movimento de ascensão dos gases em sentido contrário do material é muito importante para o processo de redução. Os gases devem ceder seu calor sensível para os materiais carregados maximizando o poder de redução, no interior do alto-forno. Uma forma de se verificar alta produção e baixo consumo de combustível no alto-forno, é quando os gases que o deixam possuem altas taxas de concentração de CO_2 e baixas temperaturas.

Segundo Araújo (1997) os mecanismos de redução são realizados por reações do tipo:

$$Fe_nO_m + m\ CO \longrightarrow n\ Fe + m\ CO_2$$

ou,

$$Fe_nO_m + m\ H_2 \longrightarrow n\ Fe + m\ H_2O$$

A principal fonte de energia para o alto forno é o coque que tem a função de dar calor necessário para as reações de redução e fornece o elemento redutor para a remoção do oxigênio combinado com o ferro. Além disso, outras fontes são energia elétrica, oxigênio, entre outros. A operação do alto-forno resulta na formação de consideráveis gases, que é geralmente utilizado na própria usina, seja no próprio alto-forno, fornos de laminação ou para aquecimento de caldeiras.

O processo de fabricação do aço propriamente dito ocorre na aciaria, onde serão acertados os níveis ideias de teor de carbono do ferro gusa.

Para a rota Alto-Forno + Forno a Oxigênio o processo consiste na injeção de oxigênio sob pressão, atravessando o banho de gusa líquido. O ar combina-se com o ferro, gerando o FeO que por sua vez, combina-se com outros elementos, como: silício, manganês e

o carbono; logo, essas impurezas são eliminadas, em forma de escória(SiO_2, MnO) ou em forma de gás (CO) que inflama na boca do conversor. Segue abaixo algumas reações que ocorrem nesta fase:

$$2\,Fe + O_2 \longrightarrow 2\,FeO \quad \text{(Oxidação do ferro)}$$

$$\left.\begin{array}{l} 2\,Fe + Si \longrightarrow SiO_2 + 2\,Fe \\ FeO + Mn \longrightarrow MnO + Fe \end{array}\right\} \text{Formação Escória}$$

$$\left.\begin{array}{l} 2\,C + O_2 \longrightarrow 2\,CO \\ FeO + CO \longrightarrow Fe + CO_2 \end{array}\right\} \text{Oxidação Carbono}$$

$$2\,C + O_2 \longrightarrow 2\,CO_2 \quad \text{(Queima do carbono)}$$

A carga metálica é composta em maior proporção de ferro gusa, porém são adicionadas pequenas quantidades de sucatas e rejeitos de aço do processo de produção. Esta etapa não requer nenhum aporte de energia, desconsiderando a energia para a produção do oxigênio. Além disso, pode ser exportadora de energia na forma de gás de aciaria e vapor.

Para a rota Redução Direta + Forno Elétrico a Arco, o processo tem o mesmo objetivo que na rota Alto-Forno + Forno a Oxigênio, porém a carga metálica é composta de sucata que é fundida por eletrodos que transformam energia elétrica em energia térmica. No início do processo os eletrodos fundem a carga em contato direto com a carga metálica, até que eles ficam próximos ao fundo, aonde, vai se formando uma poça de metal líquido. Para acelerar a fusão da carga usa-se oxigênio o qual representa uma fonte adicional, além da energia elétrica, tornando-se imprescindível na produção. Como forma de diminuir o consumo de energia elétrica e de acelerar a fusão podem ser adicionados queimadores auxiliares no forno elétrico.

Comparando-se o consumo energético da fase Refino-Aciaria da tabela 6 com a mesma fase na tabela 5, verifica-se no processo de produção de aço (Aciaria) para a rota Redução Direta + Forno Elétrico a Arco um maior consumo energético (2,4 GJ/t em relação a -0,4 GJ/t), sendo a eletricidade o tipo de energia mais consumida com 1,5 GJ/t da do processo de aciaria (fabricação do aço).

Tabela 7: Balanço de Energia em Aciaria com Forno Elétrico a Arco

Entradas:	**%**	**Saídas:**	**%**
Energia Elétrica	71	Aço Líquido	57
Combustão e reações	29	Escória	10
		Sistema de resfriamento	10
		Preaquecimento da sucata	10
		Gases	7
		Outras perdas	6

Fonte: Araújo (1997).

O processo de lingotamento contínuo é o que possui o menor consumo energético (0,1 GJ/t, tabela 5 e tabela 6) em comparação com os demais, pois neste recebe-se o aço ainda em estado líquido para ser lentamente solidificado até atingir o formato desejado. O aço chega em panelas, e é derramado em um distribuidor que irá alimentar os moldes e a partir daí, iniciar o processo de solidificação. Durante a passagem do aço pelo molde, solidifica-se uma crosta periférica e o núcleo ainda permanece em estado líquido. Este núcleo é solidificado depois de deixar o molde, pelos jatos de água pulverizados contra o tarugo. O lingotamento contínuo é, portanto, um processo no qual o metal sai da lingoteira sob a forma de uma barra, já sólida externamente.

No processo de lingotamento contínuo, 80% da energia são oriundos do próprio aço líquido e apenas 20% são supridas sob a forma de eletricidade, combustíveis, etc. Do total de energia disponível nesse processo, 46% são utilizados no tarugo ou placa e o restante é levado na água de resfriamento, vapor, etc. (ARAÚJO, 1997).

O processo de laminação consiste na conformação mecânica do aço, mudando-o de forma de acordo com a passagem dele por cilindros esmagadores. Em relação às rotas analisadas a laminação tem um percentual maior de consumo de energia em relação ao total, na rota Redução Direta + Forno Elétrico a Arco, representando em torno de 40% a 45% do consumo total. Já na rota Alto-Forno + Forno a Oxigênio a laminação representa em torno de 10% a 12,5%. Isso é claro de se observar, devido à ausência das etapas de sinterização, coqueificação e produção de ferro-gusa.

Após a apresentação dos melhores níveis internacionais de eficiência energética para indústria mundial de aço e o detalhamento dos processos para identificar quais os principais elementos responsáveis pela energia consumida e qual o tipo da fonte energética para cada fase do processo siderúrgico, serão também apresentados, nas tabelas 8 e 9, estimativas para os consumos unitários de energia para o parque siderúrgico brasileiro. Tais consumos

representam consumos médios estimados com base em amostras das usinas siderúrgicas representativas de cada uma das rotas estudadas no trabalho. Os valores serão expressos em GJ por tonelada de aço bruto.

Tabela 8: Valores médios Brasil para Rota Integrada: Alto-Forno (Coque) + Forno a Oxigênio

Rota Integrada: Alto-Forno (Coque) + Forno a Oxigênio

Tipo de Energia	Coqueria	Sinterização	Alto Forno a coque	Aciaria a oxigênio (LD)	Laminação	Outros	Consumo por Energético (GJ/t aço)
	Coque	Sínter	Gusa	Aço	Laminados	Aço	
Carvão Mineral	15,35						**15,35**
Carvão Vegetal							
Finos de Carvão			4,10				**4,10**
Coque			10,60				**10,60**
Moinha / Antracito		1,75					**1,75**
Gás de Coqueria	0,67	0,07	0,63	0,18	0,75	0,51	**2,81**
Gás de Alto-Forno	0,67		1,41		0,37	1,78	**4,23**
Gás de Aciaria					0,03	0,40	**0,43**
Energia Elétrica	0,06	0,13	0,17	0,17	0,42	0,44	**1,39**
Oxigênio				0,39		0,21	**0,60**
Nitrogênio				0,22			**0,22**
Gás Natural				0,08	0,58		**0,66**
Outras Fontes	0,12		1,09	0,22	0,19		**1,62**
Consumo total (A)	**16,87**	**1,95**	**18**	**1,26**	**2,34**	**3,34**	**43,76**
Gás Gerado Coqueria	3,28						**3,28**
Gás Gerado AF			5,14				**5,14**
Gás Gerado Aciaria				0,49			**0,49**
Coque para AF	10,91						**10,91**
Eletricidade gerada						1,01	**1,01**
Geração Total (B)	**14,19**		**5,14**	**0,49**		**1,01**	**20,83**
(A) - (B)	**2,68**	**1,95**	**12,86**	**0,77**	**2,34**	**2,33**	**22,93**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2009).

Tabela 9: Valores médios Brasil para Rota Semi-Integrada: Redução Direta + Forno Elétrico a Arco

Rota Semi- Integrada: Redução Direta + Forno Elétrico a Arco

Tipo de Energia	Aciaria elétrica	Laminação	Outros	Consumo por Energético (GJ/t aço)
	Aço	Laminados	Aço	
Carvão Mineral				
Carvão Vegetal				
Finos de Carvão				
Coque				
Moinha / Antracito				
Gás de Coqueria				
Gás de Alto-Forno				
Gás de Aciaria				
Energia Elétrica	1,69	0,85	0,60	**3,14**
Oxigênio	0,38			**0,38**
Nitrogênio				
Gás Natural	0,74	1,19	0,97	**2,90**
Outras Fontes	0,58	0,27	1,50	**2,35**
Consumo total (A)	**3,39**	**2,31**	**3,07**	**8,77**
Gás Gerado Coqueria				
Gás Gerado AF				
Gás Gerado Aciaria				
Coque para AF				
Eletricidade gerada				
Geração Total (B)				
(A) - (B)	**3,39**	**2,31**	**3,07**	**8,77**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2009).

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DAS ROTAS TECNOLÓGICAS DA SIDERURGIA

Neste capítulo serão analisados os níveis de eficiência energética do parque siderúrgico brasileiro em relação aos melhores níveis de eficiência praticados pela indústria mundial de aço.

Analisando primeiramente a rota tecnológica Alto-Forno + Forno a Oxigênio, de acordo com a tabela 10, os valores de consumo por tonelada de aço das usinas mais eficientes do mundo são de 1,9 GJ/t na sinterização, 0,8 GJ/t na coqueria e 12,2 GJ/t no alto-forno. Comparando com os valores médios apresentados na tabela 10 para a siderurgia brasileira, os valores para os processos de sinterização e redução são próximos das melhores práticas internacionais. Isso mostra a eficiência das usinas nos processos sinterização e redução (alto-forno).

Observa-se na tabela 10 que aparentemente existe espaço para alguma melhoria de eficiência energética nas coquerias (coqueificação), bem como nas aciarias e nos processos de laminação das siderúrgicas brasileiras. Vale ressaltar, que devido a não coincidência perfeita de processos, como por exemplo, etapas da laminação orientadas para produtos com características distintas podem ter consumos energéticos bastante diferentes.

Tabela 10: Comparação do consumo energético – Rota Integrada

Processo	Melhores práticas internacionais (GJ/t)	Média Siderurgia Nacional (GJ/t)
Sinterização	1,90	1,95
Coqueificação	0,80	2,68
Alto-Forno	12,20	12,86
Aciaria	-0,40	0,77
Lingot. e Laminação	1,90	2,34
Total	**16,4**	**20,6**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009 (Adaptado).

Dessa forma, enquanto a melhor prática internacional para a rota: Alto-forno + Forno a oxigênio apresenta um consumo total em torno de 16,4 GJ/t de aço bruto, a média da siderurgia brasileira para esta rota registra um consumo de 20,6 GJ/t de aço para os processos da tabela 10.

Agora analisando a rota Redução Direta (100% Sucata) + Forno Elétrico a Arco, chamada também de produção secundária (carga metálica é a sucata), devido à inexistência das fases de preparação de materiais (sinterização e coqueificação) e a redução (alto-forno), verifica-se um consumo de energia muito reduzido em relação à rota Alto-Forno + Forno a oxigênio, ou seja, 8,77 GJ/t (tabela 9) contra 22,93 GJ/t da rota Alto-Forno + Forno a Oxigênio (tabela 9).

Realizando outra comparação, entre as duas rotas analisadas e o seu respectivo consumo médio (tabela 8 e 9), pode-se verificar que o consumo da aciaria elétrica (3,39 GJ/t) é significativamente maior que consumo da aciaria a oxigênio (0,77GJ/t).

Comparando com as melhores práticas internacionais para esta rota (tabela 11) verifica-se um alto consumo por parte das siderúrgicas brasileiras enquadradas nesta rota, principalmente no processo de aciaria, havendo espaço para melhoria na eficiência energéticas das aciarias. Entretanto, coincidências não perfeitas de processos na rota Redução Direta (100% Sucata) + Forno Elétrico a Arco, podem justificar a diferença entre os valores de consumo.

Tabela 11: Comparação do consumo energético – Rota Semi-Integrada

Processo	Melhores práticas internacionais (GJ/t)	Média Siderurgia Nacional (GJ/t)
Aciaria	2,40	3,39
Lingot. e Laminação	1,90	2,31
Total	**4,3**	**5,7**

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2009 (Adaptado).

Dessa maneira, enquanto a melhor prática internacional para a rota: Redução Direta (100% Sucata) + Forno Elétrico a Arco apresenta um consumo total em torno de 4,3 GJ/t de aço bruto, a média da siderurgia brasileira para esta rota registra um consumo de 5,7 GJ/t de aço para os processos da tabela 11.

5. CONCLUSÕES

O trabalho foi realizado sob a expectativa de mostrar e comparar o consumo energético do setor siderúrgico brasileiro, identificando, sobre as tecnologias utilizadas na siderurgia, quais os principais processos responsáveis pelos maiores consumos energéticos.

O estudo possibilitou verificar, de acordo com os objetivos propostos, em quais processos ocorrem os maiores consumos em níveis operacionais. Isso possibilitou também verificar quais elementos fornecem ou são responsáveis pelo consumo de energia de cada setor, sejam eles na forma de eletricidade, combustível, etc

Logo, pode-se dizer que o setor siderúrgico brasileiro possui oportunidades para melhorias de eficiência energética em determinadas fases ao longo do processo produtivo do aço. O que foi mostrado na comparação com as melhores práticas internacionais da indústria mundial de aço. Entretanto, pode-se dizer que em determinadas fases da rota Alto-Forno + Forno a Oxigênio, como no caso das fases alto-forno (a coque) e sinterização, a siderurgia nacional mostra-se competitiva em relação a sua eficiência energética. Já na rota Redução Direta + Forno Elétrico a Arco o consumo energético apresenta-se abaixo dos melhores níveis praticados pela indústria mundial, o que mostra oportunidades de melhoria para essa rota estudada.

Durante o trabalho foi verificado que coincidências não perfeitas nos processos podem justificar diferenças nos consumos energéticos, principalmente em relação à fase de laminação que pode ser bem diferente de acordo com tipo de aço produzido em determinadas usinas. Por exemplo, usinas que fabricam aços planos (placas, bobinas, etc.) terão consumo energético diferente na etapa de laminação ao se comparar com usinas que fabricam aços trefilados (arames, cercas, etc.).

Para trabalhos futuros sugere-se verificar, em maiores detalhes operacionais, um determinado processo siderúrgico com intuito de propor e realizar melhorias para o aumento da eficiência energética ou diminuição do consumo energético, considerando os principais processos consumidores de energia no setor siderúrgico.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. A., **Manual de Siderurgia**, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 1.

ARCELOR MITTAL TUBARÃO. **História do aço.** Disponível em: <http://www.cst.com.br/usina/historia_aco/historia_aco.htm>. Acesso em: 13 nov. 2010.

BORGES, R. X.; PEDRINI D. C.; SOARES A. B. **Análise dos sistemas de planejamento e controle da produção em uma empresa do setor siderúrgico**. In: II EMEPRO - Viçosa, MG, Brasil, 20 a 22 de abril de 2006.

CARDOSO, P. A.; MORAES, M. A. C. Uma análise da cadeia de suprimentos da indústria siderúrgica: **Estudo de caso no grupo ARCELOR BRASIL**. In: XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR450302_8558.pdf >. Acesso em 22 out 2010.

DE ARAUJO, J. B.; PINHO, M. S. **Economias de escala em duas tecnologias alternativas: um estudo do setor siderúrgico.** In: XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção - Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de nov de 2004. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0703_0708.pdf>. Acesso em 22 out 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Eficiência energética na indústria e nas residências. Rio de Janeiro, RJ: EPE, 2010. (Estudos da Demanda). Disponível em < http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_4.pdf >. Acesso em: 7 nov 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Energia no Setor Siderúrgico Brasileiro 2009 – Ano base: 2008. Rio de Janeiro, RJ: EPE, 2009. (Estudos Setoriais). Disponível em <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20090430_2.pdf >. Acesso em: 1 nov 2011.

FERREIRA, C.G. A Evolução das Normas Técnicas de Produção na Siderurgia – Principais Tendências Históricas. **Nova Economia**, Belo Horizonte: v. 31, n. 11, setembro, 1993.

GODOI, J. M. A. **Eficiência Energética Industrial: Um Modelo de Governança de Energia para a Indústria Sob Requisitos de Sustentabilidade.** 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - USP – São Paulo, São Paulo, 2011.

IBS. **Instituto Aço Brasil**. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>. Acesso em 02 nov. 2011.

JÚNIOR, J. H. N. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores.** 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Puc - Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

WAKELIN, D. H.; RICKETTS, J. A. The nature of ironmaking. In:__**The making, shaping and treating of steel.** Chapter 1, 11th Edition. AISE, USA, 1999. pp. 01-35.

WSA. **Worl Steel Association**. Disponível em: <http://www.worldsteel.org/>. Acesso em 02 nov. 2011.

ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

_____	_____
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
_____	_____
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.