

PATRÍCIA HELENA DE ASSIS DINIZ

**Análise do consumo energético de forno elétrico a arco voltaico utilizado em
Indústria Metalúrgica Nacional**

**Guaratinguetá
2018**

Patrícia Helena de Assis Diniz

**Análise do consumo energético de forno elétrico a arco voltaico utilizado em
Indústria Metalúrgica Nacional**

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

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá - SP
2018

D585a	<p>Diniz, Patrícia Helena de Assis Análise do consumo energético de forno elétrico a arco voltaico utilizado em indústria metalúrgica nacional / Patrícia Helena de Assis Diniz – Guaratinguetá, 2018. 74 f : il. Bibliografia: f. 70-74</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias</p> <p>1. Custos. 2. Produtividade. 3. Fornos elétricos. 4. Indústria siderúrgica. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 657.471</p>
-------	--

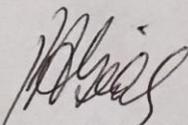
Luciana Máximo
Bibliotecária –CRB-8/3595

PATRÍCIA HELENA DE ASSIS DINIZ

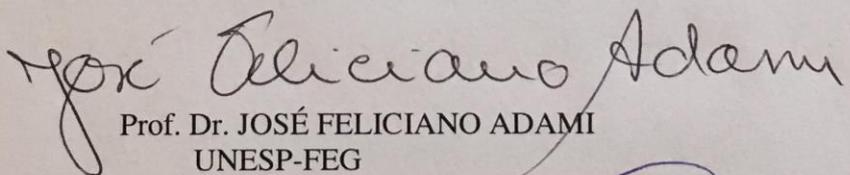
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

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

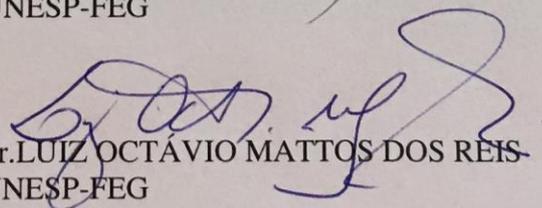
Profa. Dra. PALOMA MARIA SILVA ROCHA RIZOL
Coordenadora



Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/ UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG



Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS
UNESP-FEG

Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a meu papai do céu por todas as bênçãos que me concedeu e tem me concedido diariamente, pela força para lutar todos os dias contra as adversidades e por me abençoar com familiares e amigos tão especiais.

Dedico este trabalho aos meus avós paternos e avô materno, “In Memoriam”, e a minha amada avó Judith, pela existência de meus pais Luiz e Silvia, pois graças ao incentivo e amparo deles, obtive tantas conquistas e pude realizar tantos sonhos.

Agradeço as minhas irmãs, Andresa e Mirian pelo ombro e abraço amigo de todas as horas.

Agradeço a meu namorado Rafael, por estar ao meu lado, apoiando e me ajudando ao longo desse ano e da execução desse trabalho. Obrigada por todo o incentivo, encorajamento, e por todos almoços que fazia enquanto eu estudava.

Dedico também esse trabalho a minha grande e especial amiga Francelly, pela amizade e por todas as conversas, conselhos e ajuda, até mesmo altas horas da madrugada.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

Isaac Newton

RESUMO

A necessidade de permanecer em condições de competitividade, mediante a redução dos custos e do aumento da produtividade com a simultânea melhoria da qualidade, tem feito com que as indústrias siderúrgicas buscassem transformações que objetivam a melhoria contínua do processo de fabricação do aço líquido. Nesse contexto, o conceito de consumo de energia e consumo de insumos têm sido muito estudados nos últimos anos, essencialmente em trabalhos que evidenciem avanços tecnológicos do processo de fabricação do aço em Fornos Elétricos a Arco (FEA). Existe grande variação de energia total consumida em FEAs, sendo medida no transformador primário, por processos utilizando diferentes tecnologias. A utilização da ingestão de oxigênio no processo, traz grande benefício tanto na remoção de alguns elementos químicos indesejáveis quanto na redução do consumo de energia elétrica. Portanto, desde que as aciarias utilizam de diferentes proporções de energias elétricas e químicas, é relevante discutir o consumo de energia. O presente trabalho considerou a influência de parâmetros no circuito elétrico afetando no consumo de insumos e no consumo energético, além da comprovação de que a quantidade de carregamentos e fundentes no FEA influencia no aumento do consumo de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Redução dos Custos. Aumento da produtividade. Forno Elétrico a Arco. Fabricação do Aço.

ABSTRACT

The necessity of remaining competitive, by reducing costs and increasing productivity while simultaneously improving quality, has led the steel industry to seek transformations aimed at continuously improving the manufacturing process of liquid steel. In this context, the concept of energy consumption and consumption of inputs has been studied in recent years, mainly in papers that demonstrate technological advances in the steelmaking process in Electric Arc Furnaces (EAF). There is a large variation of total energy consumed in EAFs, being measured in the primary side of the transformer, the reason is the use of different technology processes. The use of oxygen in the process brings great benefits both in the removal of some disposable chemical elements and in the reduction of the consumption of electric energy. Therefore, since the steel mills use different proportions of electrical and chemical energies, it is relevant to discuss energy consumption. The present final paper considered the influence of parameters in the electric circuit affecting the consumption of inputs and in the energy consumption, besides the proof that the quantity of loads and fluxes in the EAF influences in the increase of the electric energy consumption.

KEYWORDS: Cost Reduction, Productivity Increase, Arc Electric Furnace, Steel Fabrication,

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Evolução da histórica do aço	15
Figura 1 – Distribuição da Produção de Aço Mundial de 2015 entre os principais países.....	18
Figura 2 – Principais produtores mundiais de aço.....	20
Figura 3 – Produção de aço por Estado no Brasil	23
Figura 4 – Produção de aço empresa localizada no Brasil.....	23
Figura 5 – Esquema de produção independente	24
Figura 6 – Consumo específico de energia das rotas tecnológicas (MWh/t).	25
Figura 7 – Fluxograma simplificado de uma Usina Siderúrgica Integrada.....	28
Figura 8 – Fluxograma simplificado de uma Usina Siderúrgica Semi-Integrada.....	29
Figura 9 – Participação dos diversos tipos de fornos na produção de metais.....	33
Figura 10 – Forno de aquecimento direto.....	35
Figura 11 – Forno de indução a canal.....	37
Figura 12 – Forno de indução a cadinho	38
Figura 13 – Correntes indutivas e agitação do banho.....	38
Figura 14 – Subestação de alimentação de um forno a arco submerso.....	40
Figura 15 – Subestação de alimentação de um forno a arco indireto	40
Figura 16 – Subestação de alimentação de um forno a arco direto	41
Figura 17 – Arranjo padrão de um FEA trifásico.....	42
Figura 18 – Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco.....	43
Figura 19 – Representação esquemática do Forno Elétrico a Arco	45
Figura 20 – Desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA	48
Figura 21 – Classificação das variáveis - exemplos.....	53
Figura 22 – Diagrama unifilar da subestação principal de siderúrgica.....	55
Figura 23 – Diagrama unifilar dos transformadores principais.....	56
Figura 24 – Diagrama unifilar dos fornos à arco em uma instalação siderúrgica.....	57
Figura 25 – Gráfico de consumo e produção do FEA 81 no ano de 2017.....	59
Figura 26 – Gráfico de consumo e produção do FEA 82 no ano de 2017	60
Figura 27 – Gráfico de consumo e produção do FEA 81 no ano de 2018.....	62
Figura 28 – Gráfico de consumo e produção do FEA 82 no ano de 2018.....	63
Figura 29 – Gráfico de produção do forno 82 e total de produção	64
Figura 30 – Gráfico de consumo específico do forno 81 dos anos 2017 e 2018.....	65
Figura 31 – Gráfico de consumo específico do forno 82 dos anos 2017 e 2018.....	66

Figura 32 – Gráfico de produção dos fornos ao longo dos anos 2017 e 2018.....	66
Figura 33 – Gráfico de consumo específico dos fornos 81 e 82 nos anos 2017 e 2018.....	67

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	JUSTIFICATIVA	14
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1.	HISTÓRIA DO AÇO	15
4.1.1.	Indústria do Aço no Mundo.....	17
4.1.2.	Indústria do Aço no Brasil.....	21
4.2.	PRODUÇÃO DO AÇO	25
4.3.	CONSUMO DE ENERGIA EM SIDERÚRGICAS	25
4.4.	MINI-MILLS	26
4.5.	RECICLAGEM DE SUCATA	30
5.	ASPECTOS CONCEITUAIS	33
5.1.	FORNO ELÉTRICO	34
5.1.1.	Forno Elétrico Resistivo	35
5.1.1.1.	Fornos a resistência de aquecimento direto	35
5.1.1.2.	Fornos a resistência de aquecimento indireto	36
5.1.2.	Forno Elétrico Indutivo.....	36
5.1.3.	Forno Elétrico à Arco (FEA)	39
5.1.3.1.	Forno a arco submerso	39
5.1.3.2.	Forno a arco indireto.....	40
5.1.3.3.	Forno a arco direto	40
5.2.	FORNO ELÉTRICO À ARCO	41
5.2.1.	Constituição física de um FEA	41
5.2.2.	Diagrama unifilar de um FEA.....	43
5.2.3.	Processo de Produção de aço em um FEA.....	44
5.2.3.1.	Preparação do cestão e carregamento	46
5.2.3.2.	Perfuração e fusão.....	47
5.2.3.3.	Refino	49
5.3.	NORMAS DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA	50
6.	METODOLOGIA.....	52

7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
7.1.	DIAGRAMA UNIFILAR DOS FORNOS	54
7.2.	CONSUMO DOS FEAS	58
7.3.	COMPARATIVO FEA 81 VS FEA 82.....	64
8.	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

Mediante dados do Balanço Energético Nacional de 2018, ano base 2017, fornecido pelo Ministério de Minas e Energia (2018), o Brasil registrou um crescimento médio no segundo ano consecutivo na participação de energia renovável de 43,2%, se posicionando entre as mais elevadas do mundo. Em relação à oferta interna de energia, ou seja, o total de energia disponibilizada no país atingiu 4,6 TWh representando 0,7% em relação ao ano anterior, mediante às condições hidrológicas desfavoráveis, ocasionando uma redução de 3,4% da energia hidráulica disponibilizada. No entanto, apesar da oferta hídrica ter caído em relação ao ano anterior, a participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 80,4%, mediante ao crescimento da oferta interna de energia eólica.

Em relação ao consumo final de energia, energético e não energético houve um aumento de 1,2% em relação ao ano anterior, havendo um significativo destaque para a expansão de 2,3% e 1,0% nos consumos dos setores de transporte e industrial, respectivamente. A indústria respondeu com um acréscimo de 0,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) em valores absolutos, registrando o segundo maior aumento da demanda energética, esse fator se deve em razão do crescimento dos consumos de carvão mineral (8,4%) no setor siderúrgico. O consumo final de eletricidade no país apresentou uma progressão de 0,9%, em que os setores que proporcionaram esse aumento foram o comercial com 1,5% e o industrial com 1,1% em relação ao ano anterior. As indústrias são responsáveis pelo consumo energético de 32,9% em relação ao país.

Ainda de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2018) o Brasil registrou em 2017 uma demanda de 292, 1 Mtep equivalente a 465.130 GWh de energia elétrica. Existe um grupo de segmentos industriais que respondem por importante parcela do consumo industrial de eletricidade, englobando segmentos industriais que são na sua maioria eletrointensivos. Os maiores consumidores da energia no segmento, são os que contemplam a cadeia do alumínio, incluindo a produção de alumina e a extração de bauxita, siderurgia (produção de aço bruto), ferro, ligas, entre outros. O consumo de energia elétrica pelas indústrias em 2017 totaliza em 85,1 Mtep.

A produção de aço no Brasil em 2017 mediante ao auxílio do setor automobilístico obteve um crescimento de 9,2% produzindo 34,15 milhões de toneladas de aço bruto. Um dos segmentos industriais que geram resíduos passíveis de utilização como coproduto em outras áreas é representado pelas aciarias da siderurgia. A indústria do aço no Brasil é uma das mais

competitivas do mundo, produzindo anualmente mais de R\$ 45 bilhões em valor adicionado para o país, sendo responsável por um saldo comercial além de US\$ 4 bilhões, o que constitui aproximadamente 18% do total do país. Ademais, admite atualmente cerca de 110 mil pessoas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

A busca por processos de fabricação menos impactantes, a flexibilidade nos tipos de carga e o aumento na produtividade nos Fornos Elétricos à Arco (FEA) são os principais agentes responsáveis pelo sucesso de carregamento contínuo. Concebido com os objetivos de reduzir o consumo de energia elétrica e os custos de produção, equilibrado às necessidades ambientais, com a redução de emissões e ruído (PAULA, 2017).

A produção de aço no Brasil pode ser dividida basicamente em duas grandes rotas: a rota Alto-Forno - Convertedor LD e a rota Sucata – Forno elétrico a arco. Especificamente no caso brasileiro, 23% de todo ferro-gusa foi produzido em Altos-Fornos a Carvão Vegetal. Cerca de 6% desta produção em 2017, foi produzida por usinas integradas, bem como, a Acesita, V&M, Gerdau, sendo este metal primário, no estado líquido, direcionado para aciaria para produção de aço. O restante, ou seja, 17% de todo o ferro gusa produzido no país proveem de usinas não integradas, que normalmente não dispõem de grandes desenvolvimentos tecnológicos, nem de investimentos em tecnologias de ponta, o que não acontece nas usinas siderúrgicas integradas a carvão ou a coque (OLIVEIRA, 2013).

O processo do Forno Elétrico a Arco (FEA) consome uma quantidade muito grande de recursos tais como, energia elétrica, energia química e altos volumes de água de refrigeração para fundir a carga metálica e aquecê-la até sua temperatura de vazamento. Pode-se dizer que é um processo intensamente energético. Dessa forma, um dos maiores desafios dentro de aciarias elétricas é fazer com que, dentro de determinadas condições, consiga-se aperfeiçoar o processo de um forno para que tenha alta produtividade e baixo custo, utilizando a menor quantidade possível de recursos (OPFERMANN, 2008).

Definir as condições para garantir eficiência energética em um FEA e reduzir de custos de produção, requer elevado conhecimento e controle do processo. As melhorias nestas áreas permitem reduzir os custos, aumentar a produtividade e melhorar a estabilidade do processo, e aprimorar o processo de fabricação dos aços longos de forma a manter o produto competitivo no mercado, garantido a lucratividade do negócio, e mais que isso, a sobrevivência em períodos de crise (GOULART *et. al*, 2016).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Pesquisar sobre cenário atual do mercado da indústria siderúrgica no Brasil e no exterior.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre funcionamento de fornos elétricos a arco, sobre instalações elétricas utilizadas em indústrias metalúrgicas e sobre seu consumo de energia elétrica;
- Levantamento dos circuitos e características de dois fornos elétricos utilizados em indústria metalúrgica nacional;
- Obtenção de dados de consumo de energia de dois fornos elétricos utilizados para fundição de sucata;
- Analisar dados de consumo e desempenho dos fornos elétricos, obtidos através de base de dados histórica da empresa;
- Estudar as Normas Técnicas Nacionais das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (NTs);
- Pesquisa sobre eficiência energética em fornos, o que se utiliza no mercado nacional e internacional;
- Desenvolver um possível diagnóstico do cenário atual de consumo dos fornos da empresa, identificar e propor possíveis soluções para redução de desperdícios e consumo, implicando no aumento da eficiência energética.

3. JUSTIFICATIVA

Sabe-se que o Brasil, é um país em desenvolvimento e está entre os 10 maiores produtores de aço no mundo, produzindo em média 30 milhões de toneladas por ano. E as previsões do Instituto Aço Brasil (2018) para indústria brasileira do aço, apontam para 2018 um aumento das vendas internas de aço em 6,6%.

No caso da siderurgia que é considerada indústria de base, pois fornece matéria-prima para demais indústrias, como por exemplo indústria automobilística, é também chamada de indústria energointensiva, pois tem um alto consumo de energia.

Além do fato de competitividade de mercado atual, com crescimento do mercado chinês, o Brasil deverá se deparar com elevação nos preços de energia elétrica. Adicionalmente, outros fatores são importantes em termos de impacto no desempenho competitivo do setor, com destaque para a taxa de câmbio e a tributação.

Tornando o avanço dos processos e das tecnologias uma questão ainda mais urgente para a sustentabilidade das usinas nacionais e do setor como um todo, sendo, portanto, induzida a buscar processos mais eficientes e a reciclar produtos e subprodutos do processo.

Desde o início da utilização de fornos elétricos a arco voltaico, diversas melhorias foram implementadas, buscando o aumento da eficiência destes. Como exemplo pode-se citar adição de oxigênio para auxiliar na fusão e oxidação, eliminação ou redução dos pontos frios com o uso de queimadores e uso da escória espumante nas três últimas etapas.

Tendo em vista o atual cenário com previsão de crescimento de produção de aço e as implicações financeiras causadas por perdas inerentes ao processo e ao alto consumo energético, é válido realizar um diagnóstico de possíveis causas de perdas em instalações elétricas e avaliar uma proposta de redução de consumo e desperdícios, podendo trazer grandes benefícios financeiros a empresa siderúrgica que gentilmente irá fornecer dados e permitir pesquisa em campo possibilitando a concretização do estudo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. HISTÓRIA DO AÇO

A matéria prima que dá origem ao aço é o ferro, e sua história determina a evolução deste processo, para ter o devido conhecimento sobre o assunto aço, deve-se atentar para sua história.

Mediante Marriot (2015) os primeiros povos que utilizaram o minério de ferro, que primordialmente se encontrava sob a forma de pedras sobre a terra foram os Hititas, na região de Cáucaso, em que eles aqueciam com carvão formando então massa ferrosa que era forjada a seguir e usada para fabricação de ferramentas e utensílios embora de forma rudimentar. E foi a partir do uso contínuo do ferro que sua produção evoluiu ao longo dos tempos.

Os primeiros objetos de ferro são encontrados no Egito, por volta de 2900 a.C. Em que fogueiras eram produzidas a base de rochas de minério de ferro, no intuito de promover o contato de partículas quentes de carbono com partículas de óxido de ferro, iniciando o processo de redução, resultando em uma massa escura não fundida, mas possibilitando sua deformação plástica através do método de forjamento, para a produção de objetos de variadas propriedades mecânicas (NOLDIN JÚNIOR, 2002).

O Quadro 1 expressa em ordem cronológica a evolução história do aço, bem como seu descobrimento e sua fabricação.

Quadro 1 – Evolução da histórica do aço

(continua)

Período	Evento
1500 a.C	O marco primitivo do processo de redução do minério de ferro foi encontrado no Egito, sendo um buraco no solo, contendo minério e um combustível não identificado.
Século XIII a.C	A maior difusão dos objetos de ferro aconteceu nesse período, quando no Império Hitita, região onde se situa a Turquia, o ferro foi introduzido para fins militares em detrimento ao uso do bronze. Após encontrarem uma grande reserva de minério de ferro, os Hititas criaram procedimentos de forjamento, transformando seus armamentos, construindo então império colossal mantido por várias décadas.
Século VI a.C.	Os portões da cidade da Babilônia foram construídos com colunas e vigas cobertas de cobre reforçadas com estruturas de ferro.
Século V a.C	Início da fabricação de ferro carburado pelos chineses, em que posteriormente foi denominado ferro-gusa.
221 a.C.	Desenvolvimento de variados processos para obtenção do ferro e utilização em diferentes regiões no mundo, tais como o forno de redução na África, o buraco da redução utilizado nos países do mediterrâneo, o forno de exaustão natural desenvolvido na Grécia, e outros.

Quadro 1 – Evolução histórica do aço

(conclusão)

Período	Evento
1444	O minério de ferro passou a ser difundido em altos fornos, processo utilizado até o momento atual. As temperaturas atingidas esses fornos eram ainda maiores, possibilitando maior absorção do carbono do carvão vegetal, tornando o ferro e as ligas de aço mais duros e resistentes. Nesta época, a produção diária do forno era de aproximadamente 1500 kg.
1600	Deste ano em diante, foram criadas e documentadas várias diretrizes no intuito de preservar as florestas, determinando o fim da operação de vários altos-fornos. Simultaneamente, a produção de ferro nas colônias norte americanas tiveram relevante apoio, mediante a abundância de madeira e minério de ferro.
1622	Construção do primeiro alto-forno na América do Norte, estado da Virgínia, no entanto, o alto-forno nunca entrou em operação, devido aos índios americanos terem massacrado o chefe de obras John Berkeley e os trabalhadores envolvidos no projeto, além de destruírem o trabalho realizado.
1645	Nos Estados Unidos foi construído um novo alto-forno em que este foi efetivamente operado.
Século XVIII	No início do Século XVIII, o consumo de aço passa por um grande avanço, dando origem aos problemas ambientais. No interior das minas, o trabalho era feito à luz e o minério de ferro era retirado em cestas puxadas por cordas. A Revolução Industrial iniciada no final deste século tornou a produção de ferro ainda mais importante para a humanidade. Neste mesmo período, as comunidades agrária e rural que começaram a perder força para as sociedades urbanas e mecanizadas.
1779	Inicia-se a utilização de estruturas metálicas na construção civil, em que a primeira obra foi a Ponte “ <i>Iron Bridge</i> ” construída na Inglaterra.
1795	Foi permitida a construção de novas fundições.
1856	Um grande marco nessa época, pois foi descoberto como produzir o aço, pois o aço é mais resistente que o ferro fundido e pode ser produzido em grandes escalas, servindo de matéria prima para muitas indústrias.

Fonte: Noldin Júnior (2002); INABA (2014); Instituto Aço Brasil (2015).

O uso do ferro proporcionou grandes mudanças na sociedade. A agricultura teve um crescente desenvolvimento mediante aos utensílios fabricados. A confecção de armas mais modernas proporcionou a expansão territorial de diversos povos, mudando a face da Europa e do mundo. Dessa forma, a fronteira entre o ferro e o aço foi determinada na Revolução Industrial, com a invenção de fornos que possibilitavam corrigir impurezas do ferro e adicionar-lhes propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão e entre outras vantagens. E através dessas propriedades e do seu baixo custo o aço passou a representar aproximadamente

90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

A importância do aço para o desenvolvimento e para a sociedade é tão relevante que no atual cenário de desenvolvimento socioeconômico torna-se impossível imaginar o mundo sem a utilização do aço, sua produção é um significativo indicador do desenvolvimento econômico de um país, em que seu consumo aumenta proporcionalmente ao crescimento de um país, por meio da construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos, tornando-se materiais de uso cotidiano. No entanto, sua fabricação requer técnica, conhecimento que deve ser reciclado constantemente, com base nisso pode-se justificar os elevados investimentos das siderúrgicas em pesquisas. O processo de otimização da utilização do ferro denota grandes desafios e conquistas para a sociedade (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015; INABA, 2014).

A China é considerada o maior produtor de aço mundial na atualidade, produzindo 48,5% de aço comparado com a produção mundial, em que sua produção chega a ser sete vezes maior do que a produção de aço no Japão, considerado o segundo maior produtor de aço no mundo e os Estados Unidos é considerado o terceiro maior produtor de aço mundial, o Brasil ocupa a nona posição do ranking de produção de aço (OLIVEIRA; SOLLERO, 2014).

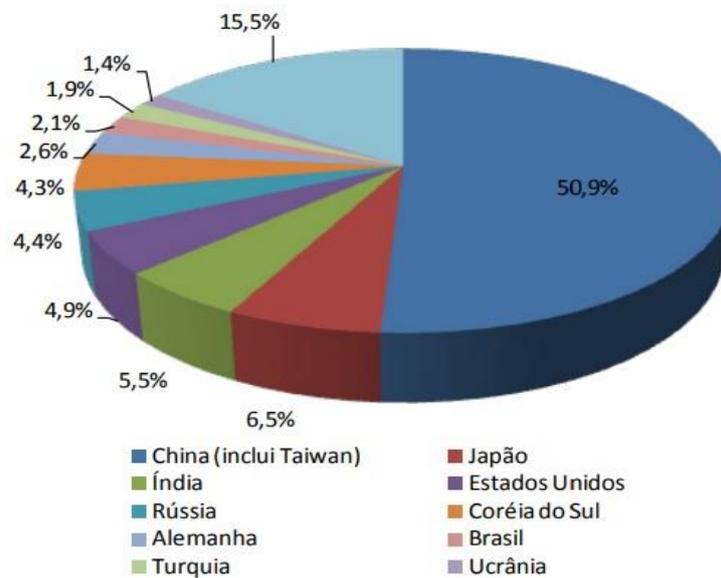
4.1.1. Indústria do Aço no Mundo

A indústria de siderurgia é uma importante fornecedora de insumos para diversos setores da indústria de transformação, se tratando de uma indústria caracterizada pela presença de grandes empresas, em geral verticalizadas, que operam em variadas fases do processo produtivo, desde a transformação do minério em ferro bruto, até a produção de bobinas laminadas a quente, a frio ou galvanizadas, para aplicação em produtos na indústria automotiva, de bens de capital, naval, linha branca, entre outras. Os laminados longos, produtos siderúrgicos, tendo como principal exemplo o vergalhão, são de grande utilização nos setores de habitação e infraestrutura (CARVALHO; MESQUITA, ARAÚJO, 2015).

Mediante a Worldsteel Association (2018), uma das maiores associações industriais do mundo, a produção de aço bruto em julho do ano corrente foi em torno de 151,7 milhões de toneladas referente informações coletadas de 64 países, representando um aumento significativo de 2,6% em relação ao mesmo período do ano anterior. A China lidera o mercado com a marca de 80,3 milhões de toneladas representando um aumento de 2,7%. No entanto, o Japão obteve uma queda de 0,9% produzindo 8,8 milhões de toneladas. A produção de aço na

Coréia do Sul foi de 6,1 milhões de toneladas se mantendo estável em sua produção. Na União Europeia, a Espanha produziu 1,2 Mt de aço bruto, apresentando uma alta de 6,6%. A Itália produziu 1,2 Mt, representando alta de 6,0%, e a França produziu 0,9 Mt tendo uma expressiva alta de 16,8%. A produção da Turquia para agosto foi de 3,0 Mt, representando uma queda de 5,7% relacionado ao mesmo mês do ano anterior. A produção de aço na Ucrânia foi de 1,8 Mt, também representando uma queda de 3,7%. Os EUA por sua vez produziram 7,5 Mt, representando um aumento de 5,1%. Segue representação gráfica na Figura 1 da distribuição de produção de aço em 2015, entre os principais países.

Figura 1 - Distribuição da Produção de Aço Mundial de 2015 entre os principais países



Fonte: Wordsteel (2018)

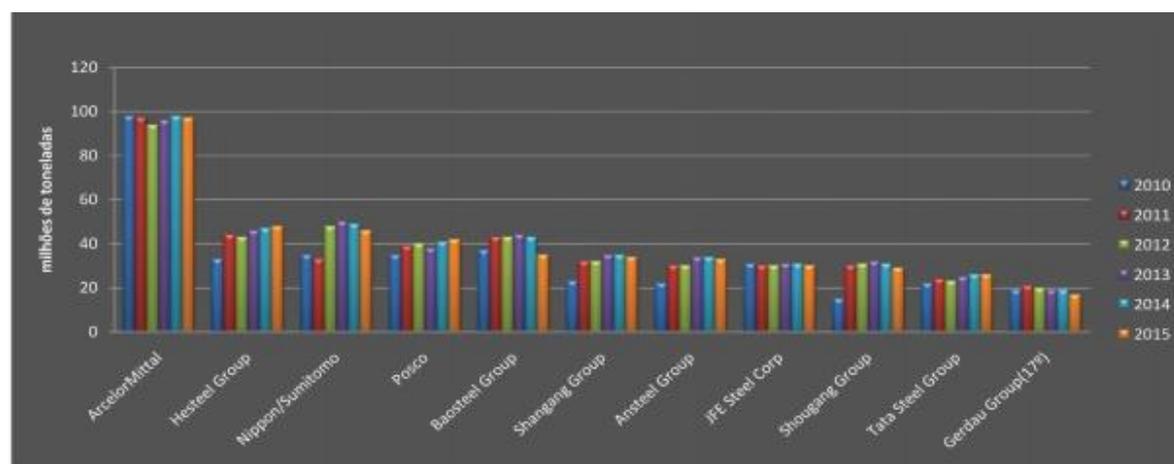
De acordo com o Sindicato Nacional de Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos (SICETEL, 2016), nos últimos quatro anos o consumo de aço mundial não teve um aumento expressivo, no entanto, houve um considerável aumento da oferta. Atualmente, existe no mundo um excedente de capacidade de produção de aço superior a 700 milhões de toneladas. A indústria do aço hoje atua com um índice de ocupação abaixo de 70% da capacidade instalada. Existem organizações que atuam para a mitigação de no mínimo 500 milhões de toneladas de capacidade, no entanto, acredita-se que as chances de que isso ocorra seja insignificante. A expectativa do segmento é que grande parte dessa redução ocorra da China, por concentrar mais de 60% do excedente mundial e possui uma grande capacidade de produção em usinas consideradas ineficientes e poluidoras. Embora o Governo tenha intenção de reestruturar o segmento, o mesmo encontra forte resistência por parte dos governos das províncias. Fazer a manutenção do excedente dessa importância mantém os preços do aço comprometendo a

rentabilidade do setor, apesar da rigorosa redução dos preços do minério de ferro, ocorrida no período de 2016.

A China é o maior produtor mundial de aço, representando pouco mais de 50% da produção mundial, sua produção é oito vezes maior do que a produção da segunda colocada no ranking mundial de produção. A China um país que era referência no mercado para as siderúrgicas ocidentais, tornou-se o maior produtor de aço com um excedente altamente expressivo, excedente esse capaz de desestabilizar o mercado mundial de produtos siderúrgicos. Os fabricantes de aço do ocidente perderam o seu maior mercado e ganharam um concorrente de peso, com ativos atualizados, elevada escala, câmbio depreciado e uma forte participação do estado. Atualmente estima-se que mais de 50% da siderurgia chinesa seja estatal. Por se tratar de um país comunista, com intensiva participação do estado, os investimentos são feitos permeados no planejamento de longo prazo. Os planos quinquenais são avaliados mais pela geração de emprego e de maior agregação de valor para a economia do país do que pela maximização do lucro de uma empresa ou de um setor, isoladamente (VIANA, 2017).

Em 2015, a Índia foi o único país, entre os dez maiores produtores mundiais, que aumentou a produção de aço tornando-se o terceiro produtor mundial, superando os Estados Unidos. A Ásia tem nove das dez maiores siderúrgicas do mundo, sendo que cinco delas são chinesas. A AcelorMittal, grupo indiano, que é a maior produtora mundial de aço, tem fábricas instaladas ao redor do mundo, inclusive no sudeste asiático. A Figura 2 retrata os principais produtores mundiais de aço (SICETEL, 2016).

Figura 2 - Principais produtores mundiais de aço



Produtores	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ArcelorMittal	98	97	94	96	98	97
Hesteel Group	33	44	43	46	47	48
Nippon/Sumitomo	35	33	48	50	49	46
Posco	35	39	40	38	41	42
Baosteel Group	37	43	43	44	43	35
Shougang Group	23	32	32	35	35	34
Ansteel Group	22	30	30	34	34	33
JFE Steel Corp	31	30	30	31	31	30
Shougang Group	15	30	31	32	31	29
Tata Steel Group	22	24	23	25	26	26
Gerdau Group(17ª)	19	21	20	19	19	17

Fonte: Adaptado de SICETEL(2016)

As mais conhecidas siderúrgicas ocidentais que sempre atuaram em ambiente de economia de mercado em sistemas capitalistas, estão encontrando dificuldades para se manterem competitivas, com um país que detém uma forte participação do estado. Com o aumento de participação da China no comércio global de aço, vem acarretando fortes reações de diversos países na defesa de suas indústrias e uma crescente abertura de processos *antidumping* (maneira de equiparar o preço do produto a ser importado com o produto local) contra o aço chinês, o Brasil também está entre esses países (SICETEL, 2016).

A Coréia do Sul, que possui o maior consumo per capita de aço mundial 1.160 kg/ hab., contra 116 kg/ hab. do Brasil, acredita-se que pouco mais de 50% desse consumo seja resultante da exportação de produtos que contêm aço. A exportação chinesa é cada vez mais elevada, apesar de representar uma pequena participação, em outras palavras, apenas aproximadamente 15% de sua produção é exportado, ainda assim uma marca significativa se comparado à produção do Japão e mais de seis vezes o consumo do Brasil (SICETEL, 2016).

A produção siderúrgica em 2015 na América Latina teve queda de 3% comparada ao exercício do ano de 2014. O Brasil é responsável por mais de 50% dessa produção regional, representando quase o dobro do segundo produtor, que é o México. No Brasil, um produtor de

aço é o Grupo Gerdau e entre os vinte maiores grupos siderúrgicos do mundo considerados, é o décimo sétimo, porém grande parte dessa produção é realizada em plantas fora do país (VIANA, 2017).

A siderurgia é reconhecida como uma indústria intensiva em capital e recursos naturais, como minério de ferro, carvão e também de insumos processados como a sucata e a energia elétrica (PINHO; LOPES, 2000). No início de sua evolução, vários países consideraram imprescindível a implantação de uma indústria siderúrgica nacional que viesse a servir de base e suporte para a construção de seu próprio parque industrial e, conseqüentemente, torná-la uma robusta ferramenta para o desenvolvimento econômico. Portanto, a indústria siderúrgica foi direcionada para o atendimento dos mercados internos tornando-se uma indústria fragmentada entre as mais variadas nações ao redor do mundo.

Desta forma, é notória a importância da indústria siderúrgica primordialmente na indústria de transformação, participando ativamente do PIB e da geração de empregos.

4.1.2. Indústria do Aço no Brasil

Criada a Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, em 1920, a indústria siderúrgica brasileira teve seu início efetivo ganhando escala nacional, no entanto, até a inauguração da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, em 1941, a produção de aço no Brasil ainda era significativamente restrita (PALATINIK, 2011).

Em 1953, foi criada a Fábrica de Estruturas Metálicas – FEM, pertencente à CSN, sua principal atividade se deu do período de 1960 a 1970, contribuindo para a difusão da tecnologia da construção de aço no Brasil, com construções relevantes em estrutura metálica, bem como: o Edifício Avenida Central, em 1957 de Henrique Mindlin, o Edifício Montepio dos Empregados do Estado e o Edifício Garagem da nova sede do Jockey Club, de Lucio Costa, no Rio de Janeiro. E ademais, o Brasília Palace Hotel em 1958 e o Palácio do Desenvolvimento em 1973, ambos de Oscar Niemeyer, em Brasília (DIAS, 1999).

No Brasil até a metade da década de 1960, boa parte da produção siderúrgica era consumida pelo próprio país, fundamentalmente devido às inúmeras construções do governo nesta época. Foi então, neste período, que o parque industrial nacional se expandiu de tal forma, que em 1966, o Brasil foi considerado o maior produtor de aço da América Latina. Com isso, em 1969 houve a implantação do primeiro Plano Siderúrgico Nacional, proporcionando uma alavancada na siderurgia, graças aos empreendimentos estatais e privado (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2015).

A indústria brasileira se firma a partir de 1970 mediante ao crescimento da demanda de aços planos, sendo criada dessa forma pelo governo federal, em 1973 a Siderurgia Brasileira S.A. – Siderbrás, empresa holding estatal, integrando a Aços Finos Piratini – AFP, a Companhia Ferro e Aço de Vitória – Cofavi, a Companhia Siderúrgica de Mogi das Cruzes – Cosim, a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, a Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa, a Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST, a Usina Siderúrgica da Bahia – Usiba, uma empresa coligada a Mendes Júnior – SMJ, e a Aço Minas Gerais – Açominas, inteiramente construída utilizando a tecnologia nacional (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2015).

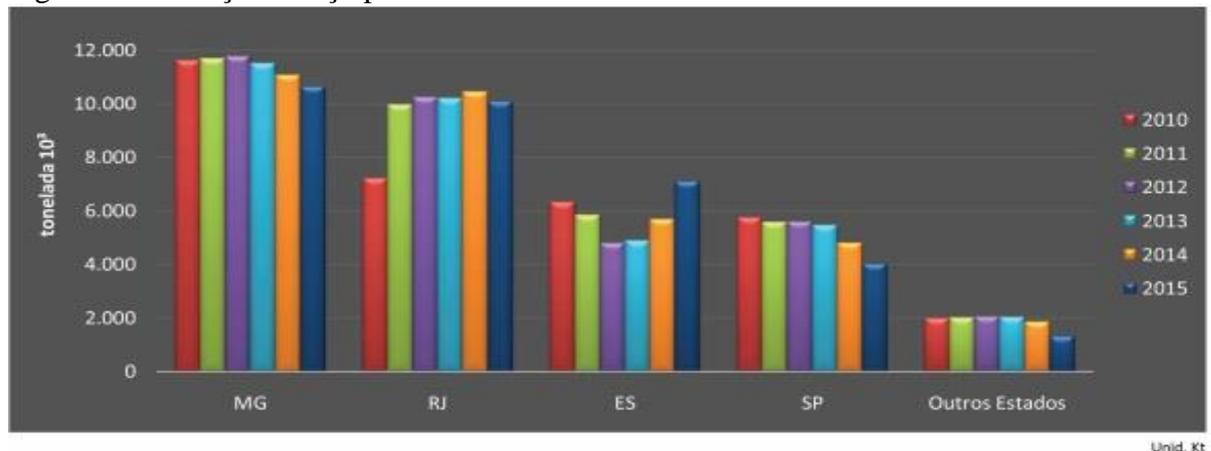
Mediante a privatização do segmento siderúrgico em 1990 foi possível para o setor uma modernização e uma alavancada e diversificação produtiva. Atualmente o Brasil tem uma forte importância na indústria siderúrgica, mas apenas em 2008 que o setor de construção civil se tornou o maior consumidor de produtos siderúrgicos, consumindo aproximando 30% do consumo total, seguindo o setor automotivo em segundo lugar, bens de capital, máquinas e equipamentos e por fim utilidades domésticas e comerciais (PALATNIK, 2011).

No entanto, de acordo com o Centro Brasileiro da Construção em Aço, CBCA (2014), mediante ao lento desenvolvimento da utilização do aço na indústria da construção civil ocorrido no Brasil nos últimos cinquenta anos, as construções em aço não completam os 5% do total, no entanto, há um forte potencial de crescimento frente às necessidades de maximização da infraestrutura brasileira e de redução do déficit habitacional.

Referente a produção de aço, nos últimos dez anos a produção nacional teve estagnação entre 33 e 35 milhões de toneladas/ ano, em que o Brasil apresentou um decréscimo na participação da produção mundial de 3% para 2%, mantendo sua posição de nono maior produtor de aço mundial. A baixa rentabilidade do setor siderúrgico, acompanhado ao crescente excedente de capacidade, interna e externa, tem atrasado os investimentos do setor no Brasil, o total de investimentos adiados no setor chegam a 3 bilhões. Em 2015, a siderurgia brasileira atuou com capacidade menor que 70% da ocupação instalada e nos primeiros meses do ano de 2016 a ocupação caiu para 60%. Contudo as siderúrgicas brasileiras estão relevantemente em crescimento, focando a redução de custos e do endividamento.

O estado de Minas Gerais se mantém no ranking nacional de produção de aço, sendo responsável por 32,7% de produção de aço anual, seguido do Rio de Janeiro com 30,9%, conforme evidencia a Figura 3 que demonstra a produção por estado no Brasil.

Figura 3 - Produção de aço por Estado no Brasil

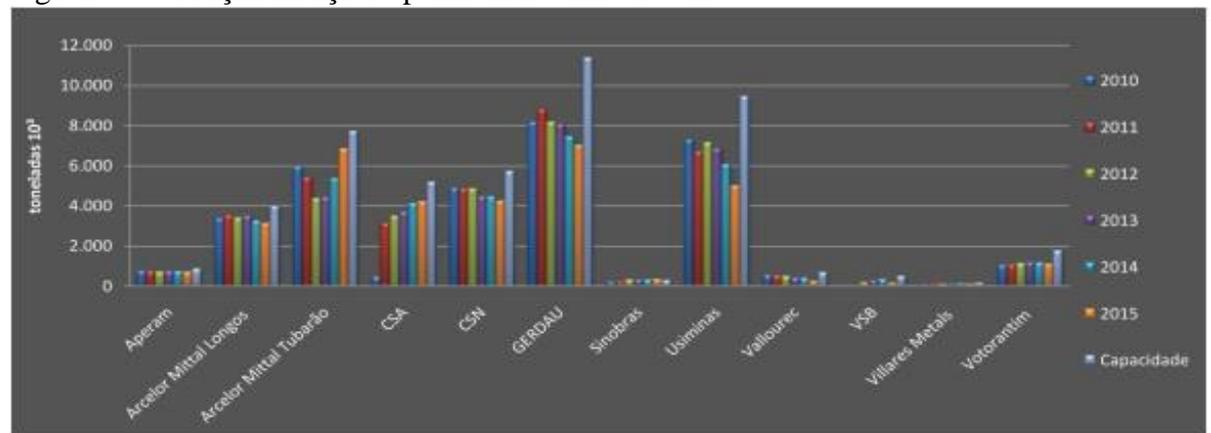


Estados	2010	2011	2012	2013	2014	2015
MG	11.634	11.704	11.780	11.522	11.086	10.668
RJ	7.221	9.980	10.261	10.225	10.459	10.101
ES	6.335	5.858	4.809	4.896	5.699	7.118
SP	5.765	5.586	5.607	5.480	4.800	4.036
Outros Estados	1.993	2.013	2.067	2.040	1.853	1.333
Total	32.948	35.141	34.524	34.163	33.897	33.256
Total	26.506	32.948	35.220	34.524	34.163	33.897

Fonte: SICETEL (2016)

A Figura 4 que apresenta as principais indústrias de aço localizadas no Brasil.

Figura 4 - Produção de aço empresa localizada no Brasil

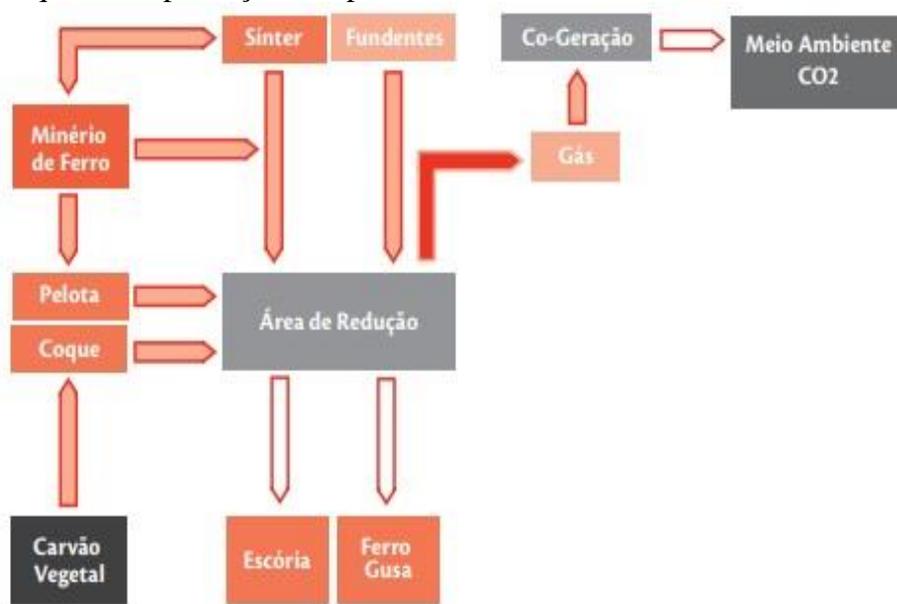


Empresa	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Capacidade(1
Aperam	771	739	728	739	745	709	868
Arcelor Mittal Longos	3.394	3.538	3.423	3.510	3.273	3.146	3.970
Arcelor Mittal Tubarão	5.956	5.405	4.390	4.430	5.368	6.843	7.740
CSA	478	3.147	3.510	3.721	4.134	4.235	5.200
CSN	4.902	4.874	4.847	4.457	4.458	4.255	5.750
GERDAU	8.177	8.777	8.181	8.063	7.458	7.031	11.400
Sinobras	239	243	319	314	331	351	300
Usiminas	7.298	6.698	7.157	6.859	6.054	5.007	9.457
Vallourec	573	537	511	421	404	260	700
VSB	0	39	192	304	352	176	500
Villares Metals	119	137	121	141	140	119	165
Votorantim	1.041	1.086	1.145	1.204	1.180	1.124	1.790
Total	31.907	35.220	34.524	34.163	33.897	33.256	47.840

Fonte: SICETEL (2016)

O parque siderúrgico nacional é bem diversificado, principalmente no que tange às configurações produtivas, possuindo os seguintes tipos de usinas: integradas a coque, semi-integrada, integrada à redução direta, integrada a carvão vegetal e produtos independentes de ferro-gusa à base de alto forno a carvão vegetal. Vale ressaltar que o uso do carvão vegetal como redutor é uma peculiaridade da siderurgia brasileira. A Figura 5 demonstra essa configuração esquemática do produtor independente de ferro-gusa, em grande parte direcionada ao mercado externo (CGEE, 2010).

Figura 5 - Esquema de produção independente



Fonte: CGEE (2010)

No cenário atual, tem-se a produção brasileira crescendo novamente se comparada ao mesmo período no ano 2017, e isso reflete na indústria siderúrgica, uma vez que a produção nacional de aço bruto alcançou 26,1 milhões de toneladas no acumulado até setembro 2018, representando uma expansão de 2,5% frente ao mesmo período do ano anterior (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

O Brasil possui a quinta maior reserva de minério de ferro do mundo, no entanto, quando se leva em consideração os contaminantes, as reservas brasileiras situam-se em lugar de absoluto destaque, configurando-se como as mais puras. Em termos da siderurgia brasileira até 2025 pode-se dizer, baseando-se na demanda de minério de ferro atual e projetada, assim como nas reservas do país, pode-se afirmar que as empresas desse setor estarão seguras quanto ao suprimento, em quantidade e qualidade, com benefícios para sua competitividade (CGEE, 2010).

4.2. PRODUÇÃO DO AÇO

O aço atualmente é produzido através de dois processos básicos, entre eles: a partir de matérias primas, bem como o minério de ferro, o calcário e o coque, em alto forno ou a partir de sucata em forno elétrico a arco. Aproximadamente 60% do aço produzido mediante matérias primas, comumente conhecidas como processo integrado. A produção de aço em alto forno utiliza cerca de 25% a 35% de aço reciclado enquanto que na produção do aço em forno de arco elétrico esse percentual é próximo de 95%. A produção em forno de arco elétrico é significativamente mais fácil e rápida (GOMI, 2006).

A indústria siderúrgica é uma indústria muito intensiva, tanto em termos de materiais como de energia. Mais de metade da grande quantidade de materiais e energia que entra no processo resulta na produção de efluentes gasosos e de resíduos sólidos/ subprodutos. As emissões mais relevantes são as emissões para a atmosfera, principalmente no que respeita à missão de CO₂ e outros gases com efeito estufa (FREITAS, COELHO, 2018).

4.3. CONSUMO DE ENERGIA EM SIDERÚRGICAS

De acordo com CGEE (2010), um dos fatores primordiais da siderurgia moderna é sua intensividade em termos de matéria-prima, energia, capital, conhecimento e elementos ambientais. Em termos de energia é de suma importância ressaltar que o consumo específico varia consideravelmente de acordo com a rota tecnológica empregada. A Figura 6, evidencia que a rota de usina integrada a coque necessita aproximadamente de 4,7 a 5,3 MWh (Mega watt hora) por tonelada produzida. Para as usinas semi-integrada o padrão de consumo é de 2,2 a 2,8 MWh/t.

Figura 6 - Consumo específico de energia das rotas tecnológicas



Fonte: Adaptado de CGEE (2010)

As etapas de matérias-primas e redução das usinas integradas a coque correspondem de 80% a 85% do consumo total de energia nesta configuração produtiva. Para as usinas semi-integradas, o consumo corresponde de 70% a 75% da energia total (CGEE, 2010).

De acordo com Abhilash e Joseph (2008) e São Paulo (2013) o consumo energético médio de referência num FEA nos dias de hoje, considerando fornos de 50 a 150 t, é de 0,5 MWh/t, porém é possível encontrar fornos no exterior com tecnologia mais avançada, com consumos inferiores a 0,44 MWh/t.

Uma forma de minimizar o consumo de energia na indústria de siderurgia é a difusão de tecnologias mais compactas. A adoção do processo NNSC – *Near- Net- Shape- Casting*, processo de lingotamento para casos de aços longos, em que o formato do produto é gerado mais próximo do produto final, seu potencial de economia gira em torno de 20% a 50% sobre o total de energia consumida para a produção total, utilizadas em usinas integradas a coque ou semi-integradas (PAULA, 2012).

A siderurgia é apontada como uma atividade de alto consumo de energia, em que seu consumo corresponde de 5% a 9% da energia consumida no Brasil (CGEE, 2010).

Sendo o fornecimento de energia através das linhas de transmissão, das concessionárias para o consumidor final, o consumidor final sendo um polo industrial, diferentemente de uma residência, utilizará de um acordo com a concessionária, por meio de um contrato de demanda, ou seja, este utilizará de demanda contrata.

Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga, **seja ou não utilizada durante o período** de faturamento, expressa em quilowatts (kW) (ANEEL, 2010, grifo do autor)

4.4. MINI-MILLS

As *mini-mills* são comumente identificadas como usinas siderúrgicas que operam aciarias elétricas e tem a sucata como principal matéria prima, caracterizando uma rota tecnológica semi-integrada. No entanto, o termo *mini-mill*, que ainda suscita algumas confusões de interpretação, não se refere ao seu tamanho ou escala de produção. A denominação *mini-mill* se refere à rota tecnológica – uma combinação de aciaria a forno elétrico a arco e processos compactos como o lingotamento contínuo, aliado à utilização de modernas práticas gerenciais. As *mini-mills* diferenciam-se das usinas integradas não apenas pelas fases iniciais de elaboração

do aço, mas principalmente pela mínima escala eficiente de produção, pelo baixo capital investido, pela maior adaptabilidade ao mercado e pelo estilo gerencial próprio (ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2000).

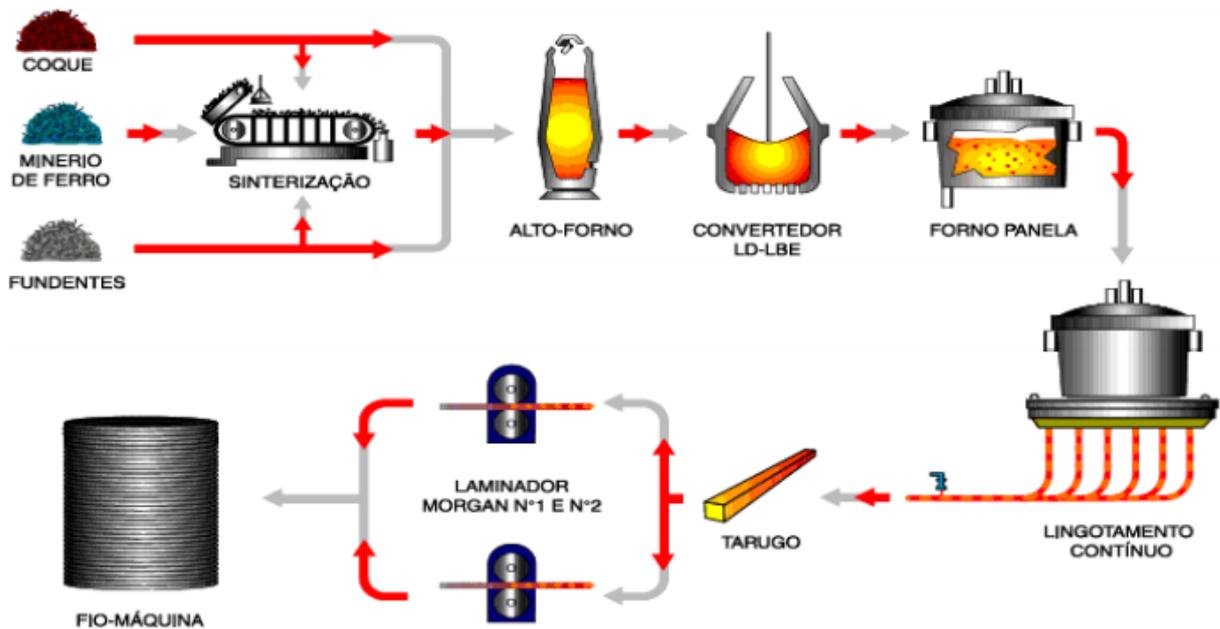
Com origem na França em 1899, o forno elétrico – base da rota semi integrada e das *mini-mills* - é uma tecnologia bem antiga. Em 1909, foi instalado pela US Steel, o primeiro forno elétrico de uso comercial nos Estados Unidos, mas a oferta de energia impediu sucesso da alternativa. Aproximadamente na década de 30, voltou a ser utilizado na produção de aço pela empresa norte-americana Northwestern Steel and Wire Company, de forma mais perene. No entanto, a oferta de sucata constituía um complicador que limitava a expansão da tecnologia. Apenas nos anos 60 a tecnologia do forno elétrico, teve uma difusão significativa, fazendo emergir a nova rota tecnológica semi integrada. Os Estados Unidos foram os pioneiros desse movimento (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

A efetiva origem das *mini-mills* está relacionada ao aproveitamento da inovação tecnológica que possibilitou expressivos ganhos de eficiência e custo na produção de aço: o lingotamento contínuo, em substituição do lingotamento convencional, proporcionando uma operação mais simplificada, eliminando equipamentos e atividades como lingoteiras, fornos-poço e laminação de desbaste primária, além de requerer menos energia e mão de obra produtiva (AHLSTROM, 2017).

A combinação aciaria elétrica mais lingotamento contínuo possibilitou as condições físicas para a obtenção de vantagens competitivas a partir de um processo siderúrgico mais compacto. No entanto, foram as inovações gerenciais, principalmente as proporcionadas pela Nucor, maior produtora de aço nos Estados Unidos, que consolidaram essas vantagens potencializando os ganhos de eficiência e complementando o perfil das *mini-mills* (ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2000).

Posteriormente, o lingotamento contínuo foi também adotado pelas usinas integradas, a Figura 7 representa um fluxograma simplificado de uma usina siderúrgica integrada que utiliza de lingotamento contínuo no processo produtivo, sendo definitivamente absorvido pela indústria siderúrgica e tornando-se inclusive um indicador de modernização tecnológica (AHLSTROM, 2017).

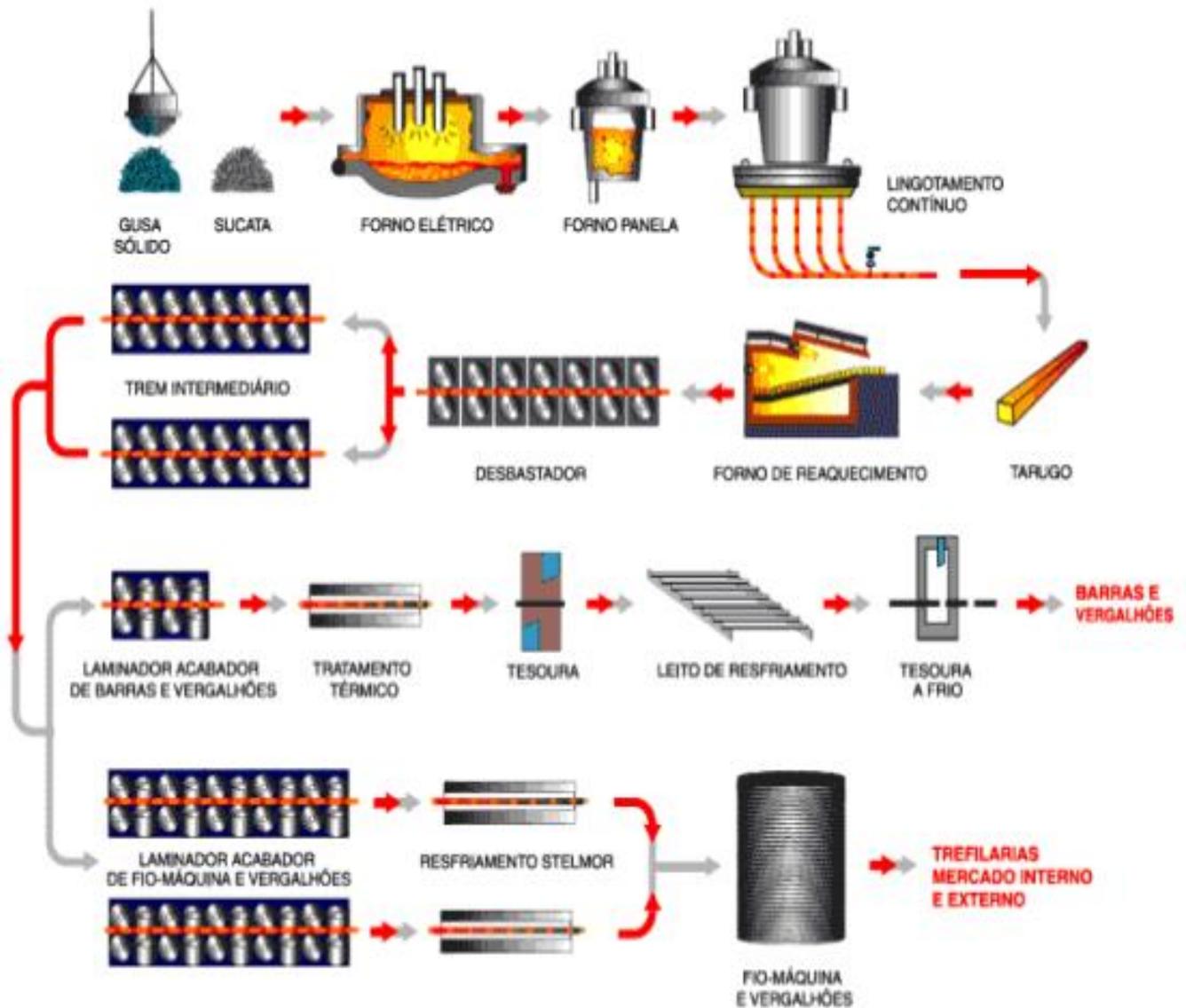
Figura 7 - Fluxograma simplificado de uma Usina Siderúrgica Integrada



Fonte: Trindade Jr. (2013)

As *mini-mills* evidenciam uma configuração básica caracterizada por aciaria com fornos elétricos à arco (FEA ou EAF – *Electric Arc Furnace* – do inglês) e lingotamento contínuo. A estrutura de uma usina siderúrgica desta configuração, pode ser observada na Figura 8. Como principal insumo utilizam a sucata, que também pode ser substituída em parte por ferro-gusa ou ferro-esponja, na forma de *direct reduced iron* (DRI) ou *hot briquetted iron* (HBI), possuindo um fluxo de produção mais curto que as tradicionais usinas integradas por não realizarem atividades de preparo do coque, sinterização e redução do minério, representando, dessa forma, uma rota tecnológica semi integrada. Sua escala de produção é inferior, o que determina o direcionamento ao atendimento de mercados locais. Pelo baixo grau de pureza de seu insumo, as empresas inicialmente atingiam um mercado restrito, oferecendo um *mix* limitado de produtos longos menos elaborados. Finalmente, outro importante elemento de identificação era a modificação do senso gerencial, com a introdução de maior cultura de eficiência operacional (SULL, 2009).

Figura 8 - Fluxograma simplificado de uma Usina Siderúrgica Semi-Integrada



Fonte: Trindade Jr. (2013)

Além de ser uma importante vantagem competitiva sobre as convencionais usinas integradas, a redução do custo de capital pelas *mini-mills* proporcionou outros três relevantes efeitos à siderurgia (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008):

- O enfraquecimento de um paradigma da indústria, historicamente conhecida como intensiva em capital;
- A diminuição das barreiras de entrada ao negócio siderúrgico;
- O fortalecimento e viabilização da intensificação da internacionalização dos grupos siderúrgicos, que buscam atuação global.

4.5. RECICLAGEM DE SUCATA

A recuperação ou reciclagem de resíduos ou sucatas podem ser executadas com poucos e simples processos, usando menor quantidade de energia e gerando menor quantidade de resíduos poluentes possível se comparados a produção primária. As matérias primas secundárias, recuperadas de sucatas ou resíduos, na maior parte das vezes são mais concentradas e mais puras do que a matéria prima primária. A matéria prima secundária já foi processada e necessita apenas de purificação (VEIT, 2005).

O *upstream* das tradicionais usinas integradas não somente é a fase mais intensiva em capital, como também a mais poluidora do processo de elaboração do aço, devido à movimentação de minério de ferro, carvão e calcário e à própria produção do coque. Além de serem menos agressivas ao meio ambiente, as usinas semi-integradas operam com a reciclagem da sucata, o que possui um forte apelo ecológico. Ao longo das últimas décadas, é crescente a pressão das sociedades e governos, principalmente nos países desenvolvidos, quanto à conscientização das questões que envolvem a preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida. Desse modo, a questão ambiental também foi um dos catalisadores desse crescimento da rota do forno elétrico. Esse aspecto influencia ainda a matriz de custos, desfavorecendo mais uma vez as usinas integradas, que realizam pesados investimentos em equipamentos e sistemas de controle ambiental (SULL, 2009).

A questão dos insumos é simplesmente fundamental não só para a decisão de implantação de um projeto *Green Field* de uma *mini-mill*, como também para todo o desenvolvimento futuro desse segmento na indústria siderúrgica mundial. A sucata é o principal insumo das *mini-mills*, correspondendo historicamente a quase 100% da carga de fornos elétricos, as usinas integradas também podem utilizá-la na alimentação do forno LD, mas de forma limitada. Sua oferta sempre foi um fator determinante para o desenvolvimento de *mini-mills*, tanto regionalmente como globalmente. Os Estados Unidos, que com a forte ascensão das *mini-mills*, tornaram-se os maiores consumidores de sucata no mundo, contam com uma indústria sucateira desenvolvida e bem organizada, que totaliza aproximadamente 3500 processadores e posiciona o país também como maior exportador mundial de sucata de aço. O Brasil mantém integrada a maior parte de sua produção, pois experimenta uma situação inversa, com dificuldades na organização do mercado sucateiro e abundância na oferta de minério (ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2000).

A *Nippon Steel*, uma siderúrgica japonesa, adotou uma abordagem diversa para o reaproveitamento de sucata plástica, usando-a na forma de material coqueificável. As

siderúrgicas produzem o coque necessário para uso em seus altos fornos processando carvão mineral em coquerias. Essas instalações têm como finalidade extrair todo o material volátil presente nesse insumo, o qual é separado em gás combustível, mais conhecido como gás de coqueria e produtos carboquímicos, tais como o tolueno, xileno e benzeno. O resíduo sólido remanescente, o coque, é carbono em estado puro e é usado nos altos fornos como um dos reagentes fundamentais para se extrair o ferro de seu minério. Esse processo ocorre através do aquecimento do carvão mineral a altas temperaturas, promovendo sua destilação na ausência de ar (GOMI, 2006).

Para Trindade Jr. (2013) a reciclagem de ferro e aço é uma das formas mais antigas de reaproveitamento de matérias-primas. À medida que foi aumentando a utilização do ferro, a sua reciclagem igualmente foi crescendo. Hoje, as empresas e profissionais que trabalham nesse segmento são chamados de recicladores. No entanto, eles são os antigos sucateiros. As empresas de sucatas começaram a surgir no Brasil na década de 40 do século XX, quando a indústria brasileira se consolidava. É, ainda hoje, um mercado razoavelmente pulverizado, mas o maior contingente está mesmo concentrado na região sudeste.

A lista dos insumos que podem ser usados em um programa de reciclagem de aço: carcaças de eletrodomésticos, chassis de automóveis, autopeças, latinhas de produtos alimentícios, grades, esquadrias, ferragens de alicerces de construção. No entanto, o mercado brasileiro de reciclagem de sucata ferrosa é, de modo geral, em empresas de porte pequeno ou onde o uso não é profissional, com alto grau de informalidade e baixa capacitação técnica das pessoas envolvidas no ramo (GOMI, 2006).

O reaproveitamento de sucatas ferrosas, evita tanto custos ambientais intratemporais (poluição) da disposição deste rejeito como também os custos intertemporais (esgotamento) dos recursos naturais. Ainda não há percepção da sociedade em relação ao aço como material reciclável. O aço é totalmente reciclável e também o mais reciclado do mundo, sem perda de qualidade em seu processo de reciclagem. Diminui os níveis de poluentes, devido ao menor consumo de combustíveis fósseis utilizados nos processos siderúrgicos, ressaltando o alto poder poluidor da indústria siderúrgica, também reduz a poluição causada pela extração e beneficiamento das matérias primas necessária ao processo siderúrgico. O uso de sucata ferrosa como matéria prima principal também reduz o consumo energético total do processo (OLIVEIRA, 2013).

A Gerdau é a maior recicladora de sucata ferrosa da América Latina, possui 10 “*Shredders*”, equipamento utilizado para cortar sucata em pedaços menores, e recicla

aproximadamente 2 milhões de toneladas de sucata ferrosa por ano. A sucata ferrosa representa 70% da matéria prima da Gerdau (TRINDADE JR, 2013).

Em relação à classificação dos resíduos sólidos, tem sua legislação regida pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004/2004. Esta norma classifica os resíduos quanto a sua potencialidade de causarem riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

Os resíduos são classificados em perigosos e não perigosos:

- Resíduos classe I – Perigosos: ou seja, aqueles que em função de suas propriedades químicas, físicas ou infectocontagiosas apresentam alguma periculosidade;
- Resíduos classe II – Não Perigosos: esta subdividido em:
 - Resíduos Classe II – A- Inertes: ou seja, quaisquer resíduos que, quando amostrados segundo a norma NBR 10007 (ABNT) e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, mediante NBR 10006 (ABNT), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de nível de água potável, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT);
 - Resíduos Classe II – B – Não Inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II A – Inertes. Os resíduos classe II B podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (SILVA, 2006)

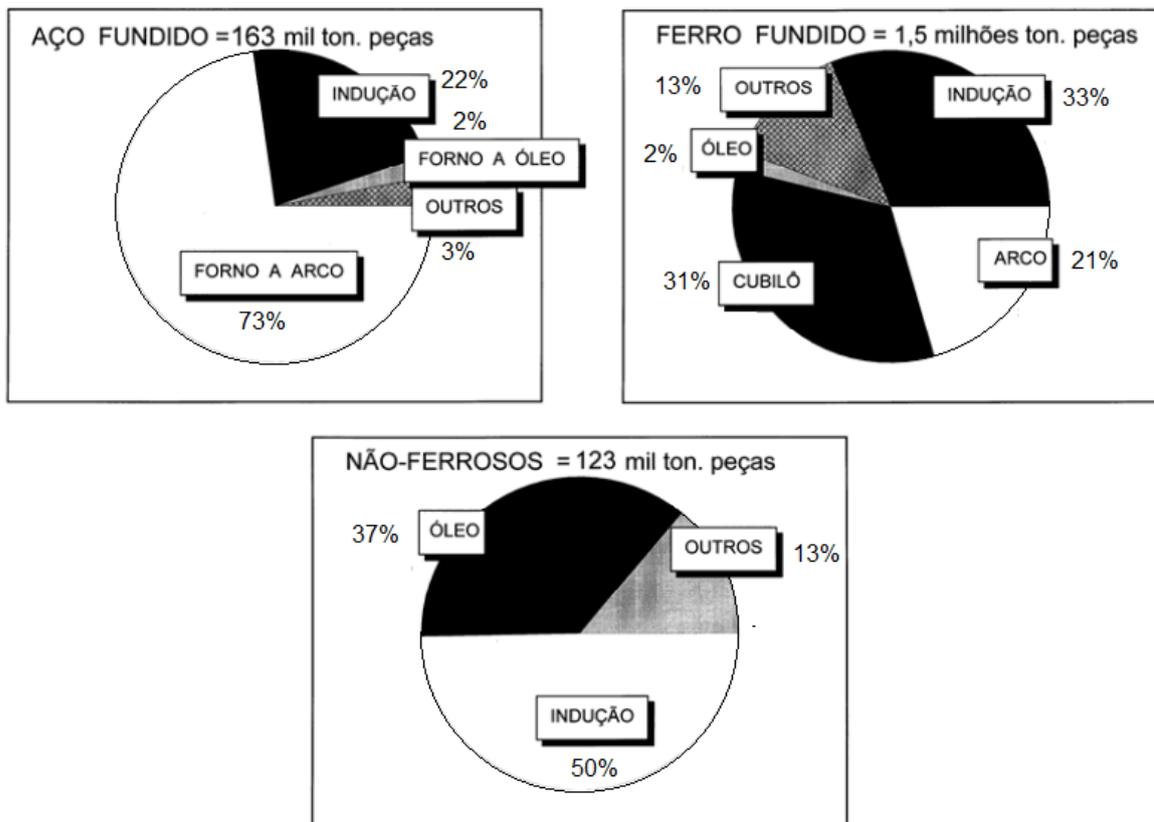
5. ASPECTOS CONCEITUAIS

Segundo Soares (2000), fornos que são utilizados para fundição, ou seja, para a fusão de metais e suas ligas, dependem do tipo de aquecimento a ser empregado, da eficiência e do resultado desejados. Existem duas principais categorias fornos elétricos e fornos a combustível, e podem-se citar exemplos de ambos:

- Fornos elétricos: a arco (direto e indireto), de indução (a canal e a cadinho) e de resistência elétrica.
- Fornos a combustível: carvão/coque; óleo combustível; G.L.P.; gás natural, entre outros.

A Figura 9 representa dados de uma pesquisa feita na década de 80, a respeito da performance do setor de fundição, como os diversos tipos de fornos participavam da produção dos metais.

Figura 9 – Participação dos diversos tipos de fornos na produção de metais



Fonte: Soares (2000)

5.1. FORNO ELÉTRICO

Os fornos são utilizados para fusão de metais, tanto ferrosos não ferrosos, os fornos elétricos apresentam diversas vantagens se comparados aos fornos a combustível. Se a análise feita for pela questão do custo de energia, a energia térmica obtida quimicamente pela combustão de combustíveis é geralmente mais barata do que a obtida por meio de energia elétrica, mesmo quando esta é proveniente de hidroelétricas (mais barata). No entanto, é importante analisar o contexto todo, pois em aplicações que exigem temperaturas elevadas, como fusão de metais, o rendimento da transferência da energia do forno para a carga metálica é superior para fornos elétricos, mesmo quando os fornos a combustíveis são equipados com recuperadores de elevado custo de instalação e de manutenção, a Tabela 1, mostra a comparação de fornos a combustível e elétricos, quanto a consumo e rendimento. (ABM, 1978)

Tabela 1 – Valores energéticos de diversos fornos de fusão

Tipo de forno	Fonte de energia	Consumo p/t	Rendimento %
Forno cubilô – ar frio	Coque	150 kg	29 – 32
Forno cubilô – ar quente	Coque	100 kg	38 – 45
Forno à arco	Elétrico	610 – 600 kWh	59 – 65
Forno de indução – B. F.	Elétrico	590 – 630 kWh	62 - 66
Forno de indução – M. F.	Elétrico	600 – 650 kWh	60 – 65
Forno de resistência com grafita	Elétrica	780 – 870 kWh	45 - 50

Fonte: ABM (1978)

Segundo ABM (1978) podem-se citar como vantagens dos fornos elétricos sobre os a combustível:

- Pode atingir temperaturas mais elevadas, estas são limitadas apenas pela resistência ao calor do refratário que reveste o forno;
- Carga metálica sem contato com os gases combustíveis e, portanto, não há contaminação de elementos prejudiciais presentes nos mesmos;
- É possível controlar todas as fases de operação com regulação precisa, e manter sua estabilidade de funcionamento;
- O forno elétrico oferece a possibilidade de ser operado com ou sem escória conforme conveniência da operação – refino ou simples fusão;
- Apresenta resultados de maior rendimento metálico devido à redução das perdas de fusão (oxidação, etc.) e devido à possibilidade de redução de refugos.

Os fornos elétricos utilizados para a fusão de metais podem ser classificados em três diferentes categorias, com aplicação, processo e operação definidas.

- Fornos a resistência elétrica;
- Forno de indução eletromagnética;
- Forno a arco – direto ou indireto.

Os quais são parte fundamental da carga de projetos e plantas industriais (MAMEDE FILHO, 2001).

5.1.1. Forno Elétrico Resistivo

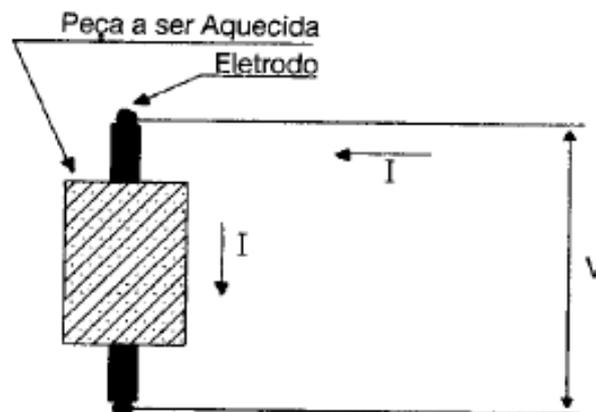
De acordo com Mamede Filho (2001), fornos elétricos resistivos são aqueles construídos utilizando-se de resistência elétrica, material que ao ser atravessado por uma corrente elétrica libera calor, este efeito é conhecido como efeito Joule. Estes fornos além de não prejudicarem a rede de fornecimento de energia causando oscilações na tensão, como outros tipos de fornos, melhoram o fator de potência do sistema de suprimento.

Estes podem ser constituídos de duas maneiras a aproveitar esse calor gerado, de maneira indireta ou direta.

5.1.1.1. Fornos a resistência de aquecimento direto

Neste forno utiliza-se dois eletrodos e a carga a ser aquecida deve ser posicionada entre eles. De modo que a corrente que circula pelos eletrodos atravesse a carga também, como pode-se observar o circuito na Figura 10.

Figura 10 - Forno de aquecimento direto



Fonte: Mamede Filho (2001)

Segundo Mamede Filho (2001) este tipo de forno não é muito comum, sendo de uso bastante específico. Alguns exemplos de aplicação que podem ser citados são o uso para aquecimento de água afim de gerar vapor, manutenção de temperatura de fusão, fabricação de eletrodos de grafite que são utilizados em fornos a arco.

5.1.1.2. Fornos a resistência de aquecimento indireto

Diferentemente do forno de aquecimento direto, neste forno o material a ser aquecido não é atravessado pela corrente e sim se encontra em uma câmara isolada termicamente, e recebe o calor gerado pelo efeito Joule sobre a resistência, por meio de transferência térmica, ou seja, por condução, convecção ou irradiação.

Alguns cuidados devem ser tomados na construção física deste forno, tanto com a resistência a ser projetada quanto com o material isolante que será utilizado para revestir a câmara térmica. Pode-se mencionar os seguintes cuidados como básicos: o material deve possuir uma elevada temperatura de fusão, sendo pelo menos 25% superior a temperatura de fusão do material a ser aquecido, o material deve ser resistente a corrosão em sua temperatura de trabalho, deve possuir alta resistividade e possuir elevado grau de dureza.

É o tipo de forno a resistência mais comum. Alguns exemplos de aplicação que podem ser citados são fusão de chumbo e alumínio, secagem e cozimento de produtos, tratamento térmico, entre outros (MAMEDE FILHO, 2001).

5.1.2. Forno Elétrico Indutivo

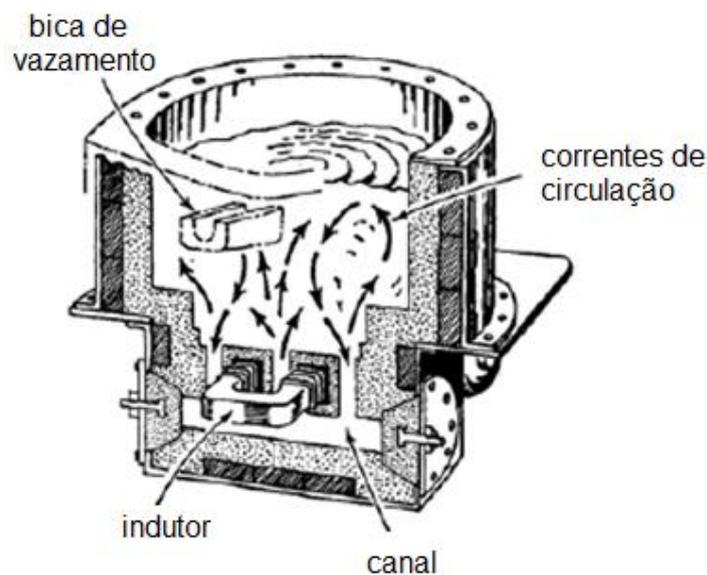
O forno elétrico indutivo utiliza também, assim como o resistivo, de dissipação térmica causada pelo efeito Joule, porém empregando o uso do eletromagnetismo. Uma vez que utiliza da propriedade das correntes de Foucault, que são correntes induzidas em um material condutor que está sob efeito de um campo magnético variável. Por meio do movimento desses elétrons no material, tem-se a dissipação térmica.

Sua forma construtiva pode ser resumida a um recipiente isolado termicamente compreendido dentro de uma enorme bobina indutora. Assim, estes fornos podem ter seu funcionamento comparado a um transformador, sendo a bobina indutora operando como o primário e a carga metálica a ser fundida como o secundário em curto-circuito.

No forno indutivo a canal, na parte inferior do recipiente é onde se localiza o canal de forma circular e o material fundido. Sendo que no interior do canal estão as bobinas de indução, ilustradas por meio da Figura 11, envolvendo um núcleo magnético (MAMEDE FILHO, 2001).

Porém de acordo com Soares (2000), há uma ressalva quanto a este forno, pois o canal deve conter metal líquido para facilitar a fusão e evitar entupimento do mesmo. Portanto, sendo necessária a existência de um forno de partida, reduzindo sua flexibilidade e limitando alterações constantes na composição química.

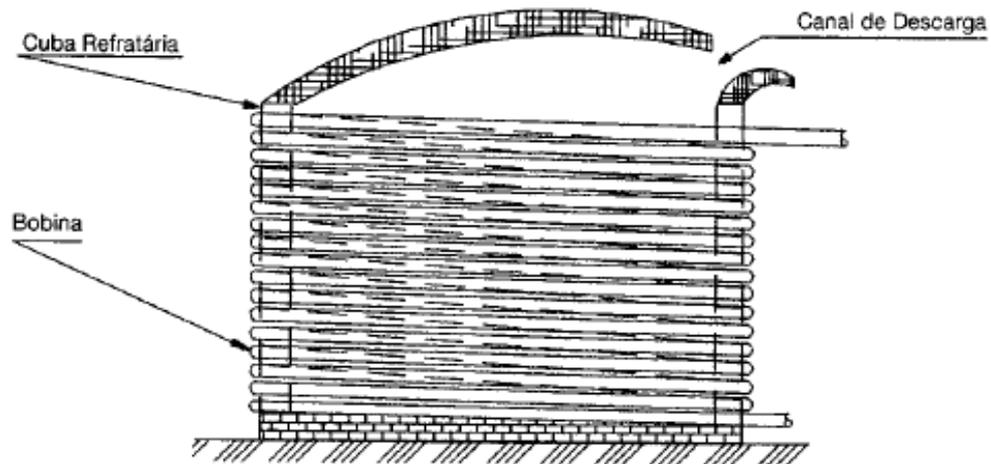
Figura 11 – Forno de indução a canal



Fonte: Soares (2000)

O forno indutivo a cadinho também é conhecido como forno de indução sem núcleo. Este um possui formato redondo como de um cadinho, ausência de núcleo magnético, e é envolto pela bobina de indução, como pode-se observar na Figura 12, dentro o qual se deposita o próprio metal que se deseja fundir.

Figura 12 – Forno de indução a cadinho

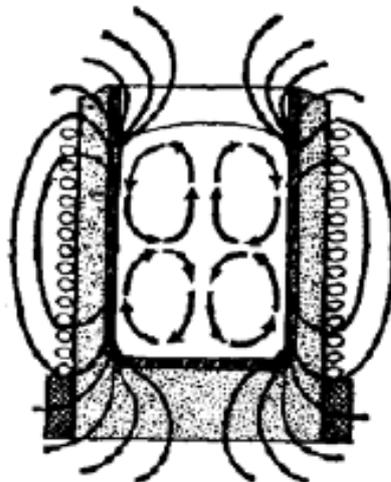


Fonte: Mamede Filho (2001)

Uma boa prática na utilização desse tipo de forno é realizar a operação em baixas frequências, uma vez que produz uma intensa movimentação no metal fundido graças às forças eletrodinâmicas, homogeneizando o banho, a Figura 13, ilustra as linhas de campo da bobina de indução e o metal fundido reage em movimento dentro do forno (MAMEDE FILHO, 2001).

Um outro fator importante que se deve considerar, é potência máxima que pode ser aplicada, uma vez que esse valor é limitado pela agitação que provoca no banho. Uma vez que o movimento do banho tem vantagem e desvantagem, como por exemplo, é positivo no sentido de garantir uma homogeneização da massa líquida, porém, se excessivo leva a um desgaste acentuado do refratário (SOARES, 2000).

Figura 13 – Correntes indutivas e agitação do banho



Fonte: Soares (2000)

5.1.3. Forno Elétrico à Arco (FEA)

São fornos que operam através da utilização de arco voltáico para fundir a carga metálica que está contida dentro de um reservatório isolado termicamente por material refratário. Sendo que formação do arco é dada através do rompimento de um dielétrico, geralmente o ar, presente entre dois condutores que apresentam uma diferença de potencial, gerando assim uma descarga elétrica, que é a passagem de corrente elétrica, e no forno esse fenômeno ocorre entre os eletrodos. Podendo o forno a arco ser de três diferentes características, variando conforme operação e aplicação do forno, e estas são arco submerso, arco indireto ou arco direto (MAMEDE FILHO, 2001).

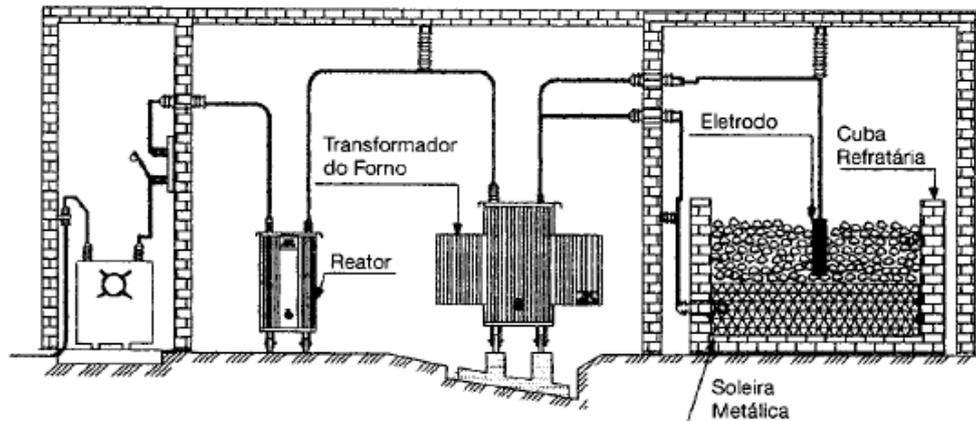
Segundo Silva (2011), atualmente, é amplamente utilizado em siderúrgicas e é o mais versátil na produção de aço. Podendo ser encontrados fornos de corrente contínua e de corrente alternada, porém no Brasil, é predominante a utilização de fornos a arco de corrente alternada. Podendo elencar quatro principais vantagens da utilização desse forno.

- Alta eficiência energética;
- Através do controle de aquecimento virtual e independente de reações químicas, permitindo se assim a produção de uma gama variedade de tipos de aço;
- Flexível quanto a carga aplicada, este forno pode ser operado com toda a carga sólida, apesar de não ser economicamente viável;
- Possibilita que se tenha operações intermitentes durante o processo de fundição, além de rápidas alterações na produção, caso necessário;
-

5.1.3.1. Forno a arco submerso

Neste tipo de forno os eletrodos operam submergidos na carga metálica, como ilustra Figura 14, que está contida num recipiente isolado termicamente por refratários. Sua operação é na maior parte das vezes destinada à produção de diversas ligas de ferro, e além disso também é utilizado na manutenção do estado líquido da gusa ou de aço vindo de outros fornos. Uma vantagem do emprego deste forno, é a não inclusão de perturbações na rede de alimentação (MAMEDE FILHO, 2001).

Figura 14 – Subestação de alimentação de um forno a arco submerso

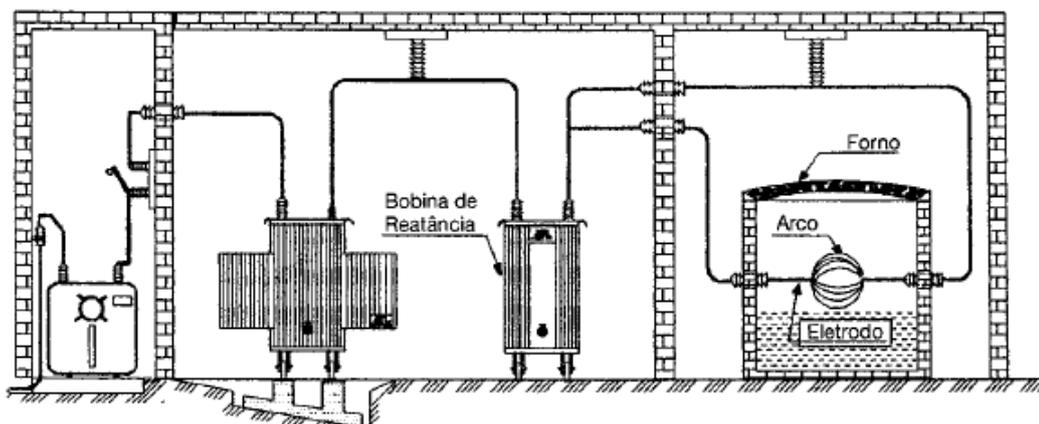


Fonte: Mamede Filho (2001)

5.1.3.2. Forno a arco indireto

Segundo Mamede Filho (2001) neste forno, o aquecimento de sua carga se dá por meio de irradiação e convecção, uma vez que o arco permanece entre os eletrodos e não toca a carga, normalmente a posição dos eletrodos é horizontal como ilustra a Figura 15. Uma vantagem desse forno é a não perturbação da rede de alimentação, visto que o arco formado entre os eletrodos é constante.

Figura 15 – Subestação de alimentação de um forno a arco indireto



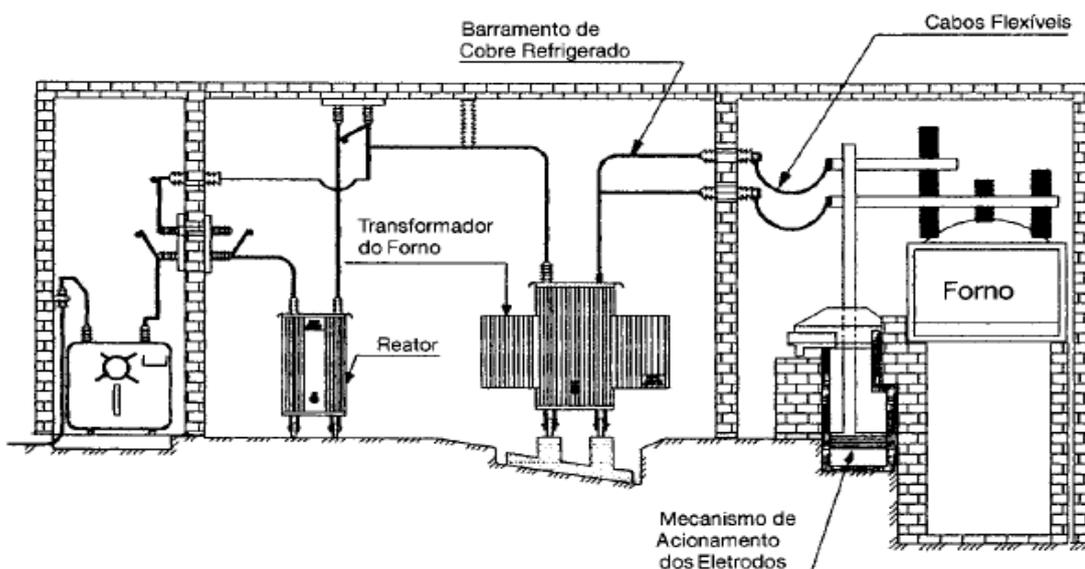
Fonte: Mamede Filho (2001)

5.1.3.3. Forno a arco direto

Diferentemente do forno a arco indireto, neste forno os eletrodos operam de forma vertical sobre a carga. Sua aplicação é majoritariamente para fusão de sucata de ferro e aço, porém também são encontrados sendo utilizados para manutenção de temperatura de banhos de metais líquidos.

Por meio da Figura 16, tem-se visão dos principais componentes de uma instalação de forno elétrico a arco. O principal elemento, o forno, é o componente final, e está localizado no canto mais à direita, e antes estão os mecanismos de controle dos eletrodos, os cabos flexíveis (que são cabos refrigerados), o barramento que também é refrigerado, o transformador, o reator e o sistema de alimentação e proteção (MAMEDE FILHO, 2001).

Figura 16 – Subestação de alimentação de um forno a arco direto



Fonte: Mamede Filho (2001)

Deve-se cuidado e atenção ao projeto elétrico desse forno para aplicação de fundição de metais, por causa da qualidade de energia, devem ser previstas soluções para mitigação de flicker, harmônicos e correção do fator de potência, conforme previsto nas normas das concessionárias.

Forno elétrico a arco opera em um período que pode ser dividido em dois ciclos, fusão e refino. Durante a fusão, o arco é muito instável, portanto gera grandes variações na corrente implicando em maior poluição a rede de alimentação.

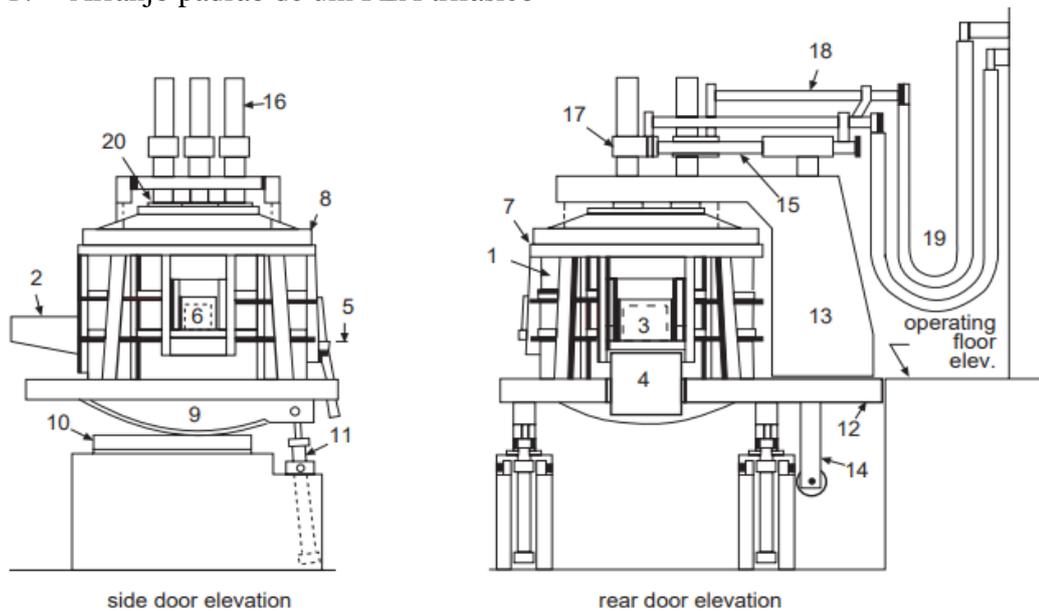
5.2. FORNO ELÉTRICO À ARCO

5.2.1. Constituição física de um FEA

Segundo, Jones, Bowman e Lefrank (1998) a configuração e constituição física de um FEA mais utilizada, na década de 70, era constituída de 3 andares, sendo na base sala hidráulica, no meio da sala de controle do braço do eletrodo e no topo a sala do transformador.

Atualmente, existem opções mais modernas, que oferecem maior produtividade e eficiência, ao utilizar outra configuração e característica de forno, ao invés de forno com basculamento na dianteira para vazamento da corrida de aço e na parte traseira para vazamento da escória. Por causar muitas interferências e atrasos, este não é recomendado para produção de grande escala. Na Figura 17, está um esquemático com as partes de um forno a arco (JONES, BOWMAN E LEFRANK, 1998).

Figura 17 – Arranjo padrão de um FEA trifásico



Fonte: Jones, Bowman e Lefrank (1998)

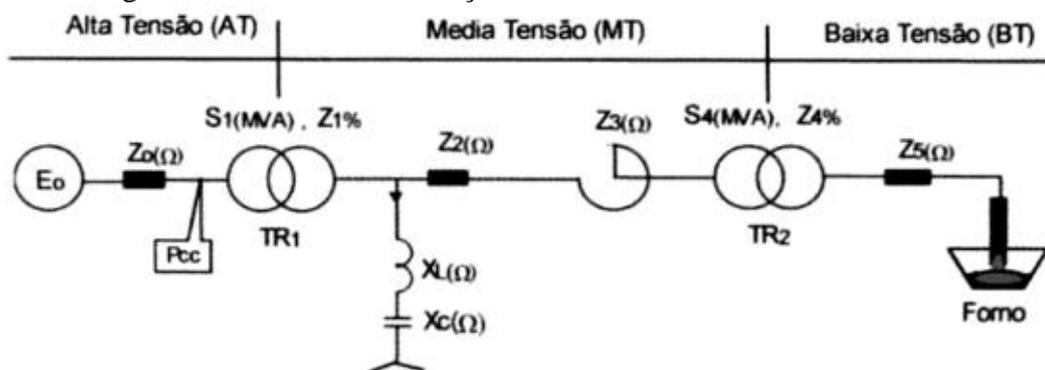
Pode-se identificar as partes do forno quanto segue:

- | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| (1) Carcaça | (9) e (10) Trilho para basculamento | (15) Braço do eletrodo |
| (2) Bica Vazamento | (11) Pistão para basculamento | (16) Eletrodo |
| (3) Porta | (12) Plataforma principal basculante | (17) Porta eletrodo |
| (4) Porta de escória | (13) Estrutura de abertura da abóboda | (18) Barramento |
| (5) Linha de peitoril | (14) Coluna de elevação do eletrodo | (19) Cabos elétricos secundários |
| (6) Porta Lateral | | (20) Glande do eletrodo |

5.2.2. Diagrama unifilar de um FEA

Segundo Ries (2001), devido a necessidade de se ter maior potência de curto-circuito que seja compatível com as potências instaladas, a fim de que não perturbe a rede de alimentação e a outros consumidores, os pontos comuns de consumo (PCC – Ponto numa rede de fornecimento de energia, eletricamente próximo a uma carga em particular, sendo que outras cargas podem ou não estar conectadas) possuem tensões mais elevadas. Sendo recomendado utilizar no mínimo 138 kV na alimentação de fornos elétricos a arco. Para maior confiabilidade econômica e de segurança, utiliza-se no circuito dois transformadores abaixadores, circuito do esquema elétrico está representado na Figura 18, sendo os transformadores, um de alta tensão para uma tensão intermediária (S1) e o outro de tensão intermediária para tensão do forno (S4). No Brasil as tensões intermediárias mais comuns são de 13,8kV, 23 kV e 33kV.

Figura 18 - Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco



Fonte: Ries (2001)

Na representação do sistema de alimentação do forno na Figura 18 pode-se listar os seguintes componentes:

E_0 e Z_0 : Fonte de tensão e sua impedância interna no PCC;

S_1 e Z_1 : Potência aparente e impedância de curto circuito do transformador (TR1) abaixador de tensão da subestação principal;

Z_2 : Impedância da linha de transmissão entre subestação principal e a subestação de alimentação do forno a arco instalada junto ao mesmo;

Z_3 : Impedância do reator série destinado a completar a reatância a completar a reatância total do sistema para uma operação estável do forno;

S_4 e Z_4 : Potência aparente e impedância de curto circuito do transformador (TR2) abaixador de tensão de alimentação do forno a arco;

Z_5 : Impedância de todos os condutores que vão desde o secundário do transformador de alimentação do forno até o arco, incluindo os eletrodos;

Uma resistência elétrica, representando o arco do forno dissipando energia;

X_C : Reatância total do banco de capacitores para compensação do fator de potência;

X_L : Reatância da bobina que em série com o banco de capacitores forma um filtro para harmônicos de corrente (RIES, 2001).

De acordo ABM (1978), os transformadores utilizados para alimentar fornos, são transformadores que trabalham com alta potência, geralmente de 250 a 35000 kVA, e que apresentam altíssima relação de transformação e fornecem voltagens secundárias múltiplas e afastadas.

Devido às intensidades elevadas da corrente no secundário, uma vez que sua potência de operação é muito alta e sua tensão de saída baixa, implica em um alto consumo de eletrodos e remete a necessidade de cuidados especiais no dimensionamento e instalação do barramento. Portanto, para a redução do consumo de eletrodos, é essencial a redução da corrente do arco, porém sem comprometer sua potência. Dessa forma, requer o aumento do comprimento do arco, ou seja, aumento na relação tensão/corrente, levando a estudos para fossem aplicadas elevadas tensões de arco, o que hoje só é possível, por meio da utilização de escórias espumantes, que blindam o arco e protegem os refratários (ABM, 1978).

5.2.3. Processo de Produção de aço em um FEA

Para o Instituto Aço Brasil (2018) a produção de aço ocorre, essencialmente, a partir de duas rotas: alto-forno/ aciaria a oxigênio (LD e suas variantes) e aciaria elétrica (FEA). No cenário mundial a produção de aço via aciaria elétrica corresponde a valores próximos a 29% enquanto que, no Brasil, os fornos elétricos a arco são responsáveis por aproximadamente 24% do total de aço bruto produzido. No entanto, com o passar dos anos e segundo projeções já realizadas, verifica-se uma tendência de aumento da produção de aço via FEA no Brasil à medida que a reciclagem de sucata aumenta com o processo de industrialização do país.

O aço produzido no FEA oferece diversas vantagens a serem consideradas quando se comparam as distintas rotas. Alguns dos aspectos importantes que justificam a tendência de crescimento dessa alternativa de produção de aço são:

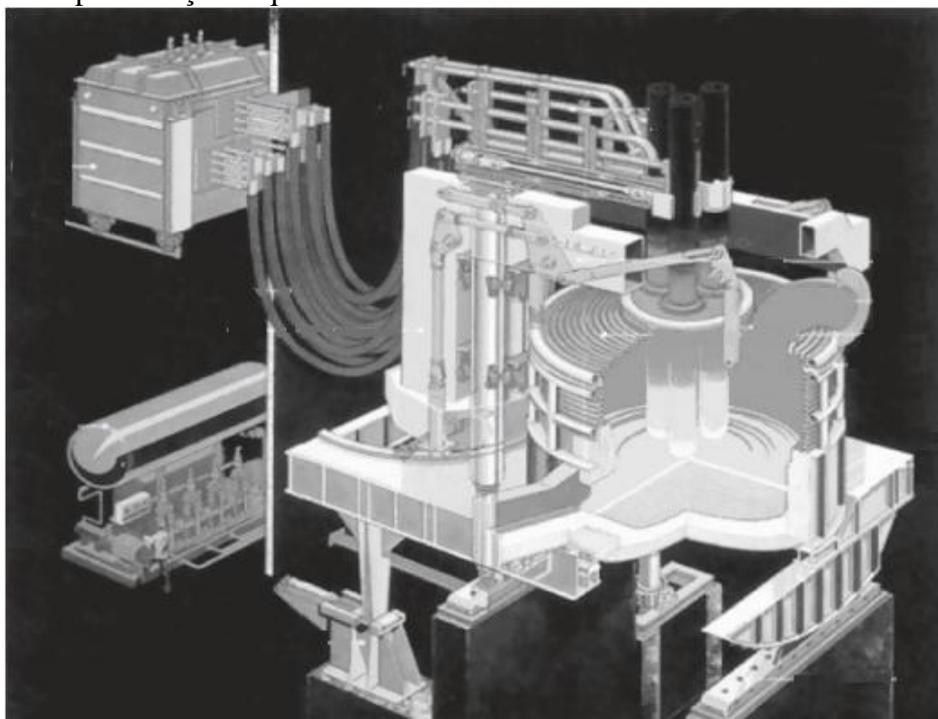
- Maior quantidade de sucata pode ser reciclada via FEA, o que é muito importante quando se tem um excedente de sucata gerado;

- A emissão de CO₂ é quatro vezes menor;
- Quantidades elevadas de DRI (ferro-esponja) e outros substitutos de sucata podem ser consumidos no FEA;
- Dependendo do preço da energia elétrica e devido aos custos de investimentos menores, o aço poderá ser produzido de forma mais econômica (MOURÃO *et. al*, 2008).

Estudos realizados através de Vargas, Masuero e Vilela (2004) com três tipos de poeiras geradas em forno elétrico a arco (FEA) mostraram que são de granulometria muito fina, com partículas esféricas e de composição muito complexa, apresentando como elementos principais o Fe, Zn, Mn.

É nos fornos elétricos a arco, representação na Figura 19, que ocorre a fusão e refino a carga do cestão. Estes equipamentos possuem uma carcaça metálica coberta por uma abóbada e tem seu interior revestido com material refratário e painéis refrigerados. No caso de fornos de corrente alternada, possuem três colunas de eletrodos de grafita que servem como meio condutor da corrente elétrica para promover a fusão da carga (ROSSI, 2014).

Figura 19 – Representação esquemática do Forno Elétrico a Arco



Fonte: Adaptado de Madias (2014)

A operação em um forno elétrico a arco pode ser subdividida nas seguintes etapas: preparação do cestão, carregamento, fusão, refino e vazamento.

5.2.3.1. Preparação do cestão e carregamento

A preparação do cestão é uma operação muito importante, não apenas para garantir a composição química do aço, mas também para proporcionar boas condições de fusão da carga e garantir maior segurança operacional e baixo custo no FEA. A sucata deve ser estratificada dentro do cestão de acordo com sua densidade e tamanho para promover uma fusão rápida no centro do forno enquanto protege os painéis e a abóbada de irradiação do arco elétrico (ROSSI, 2014).

Na camada inferior do cestão recomenda-se utilizar sucata leve (densidade entre 0,25 e 0,55 t/m³) para servir como suporte para as sucatas pesadas que são colocadas acima, protegendo o material refratário da carcaça inferior do forno e os painéis refrigerados de danos causados por impacto mecânico (FONSECA, 1989).

Acima dessa camada devem ser colocadas as sucatas pesadas (densidade acima de 1,1 t/m³), diminuindo o risco de quebra de eletrodos por queda de sucata, que podem ocorrer quando elas são colocadas acima do cestão. Há um efeito positivo na compactação da carga gerado pelo amassamento da sucata leve pela sucata pesada acima. Com a rápida fusão da carga da base do cestão, a sucata de maior densidade logo entra em contato com o fundo úmido, fazendo com que sua taxa de fusa seja acelerada significativamente. Esse tipo de sucata muitas vezes tem seu emprego limitado no forno, pois possui taxas de fusão tão baixas quando comparado com sucatas mais leves, que é comum encontrar peças que ficam sólidas ao longo de todo refino até o final da corrida, gerando riscos de rebotes por oxigênio que causam danos aos painéis refrigerados (FORTES; D'ABREU; AVILLETZ, 2011).

Na terceira camada é colocado o ferro-gusa e carburantes. Em seus trabalhos analisando taxas de fusão de diversos materiais utilizados no cestão, Fortes, D'Abreu e Avilletz (2011), observaram que apesar de ponto de fusão do ferro-gusa ser mais baixo que o da maior parte das sucatas, sua taxa de fusão é equivalente às taxas de sucatas pesadas pela sua alta densidade e pela possibilidade do fenômeno de encapsulamento. Nesse fenômeno, cria-se uma casca sólida ao redor da peça de gusa, fazendo com que ao final da corrida a parte interna esteja fundida enquanto a casca sólida permanece intacta. Nesse momento, em que já se trabalha a altas temperaturas, quando houver o extravasamento desse líquido interno encapsulado que possui alto teor de carbono para o banho, podem ser geradas reações muito fortes em função da sua rápida reação com o oxigênio. Dessa forma, para teores de ferro-gusa sólido na carga acima de 20% em massa, o fundo úmido exerce papel fundamental na taxa de fusão do mesmo, portanto seu controle é muito importante.

Vargas, Masuero e Vilela (2004) ressaltam que acima do ferro-gusa recomenda-se utilizar sucatas de densidade média e pacotes envoltos nas mesmas, para que evitem seu deslocamento durante a fusão. Não se recomenda utilizar os pacotes no topo dessa camada, uma vez que apresentam risco de quebra de eletrodos. No topo do cestão utilizam-se sucatas leves, que facilitem a rápida penetração dos eletrodos durante a perfuração, minimizando a exposição da abóbada ao arco elétrico e posteriormente, servindo como proteção para a abóbada durante o período de fusão. Nessa camada não deve haver presença de materiais isolantes, tais como, madeira e borracha, pois esses podem causar quebra de eletrodos por isolamento elétrico.

Os fundentes são normalmente carregados acima da sucata leve da camada da base do cestão, para que rapidamente atinjam o fundo úmido e acelerem sua dissolução. Essa sequência de carregamento irá aumentar a densidade de carga devido à penetração de pequenos pedaços de sucata leve nos intervalos da sucata média, e essa, nos intervalos da sucata pesada, favorecendo a redução do número de cestões e aumentando a estabilidade do arco elétrico (MOURÃO *et. al.*, 2008).

Depois de confeccionados o cestão os eletrodos são levantados, a abóbada é aberta e o forno é carregado por meio de pontes rolantes. O número de cestões necessários para produzir uma corrida de aço é função principalmente do volume do forno, volume do cestão e densidade da sucata. Alguns fornos modernos já são projetados para operar com apenas um carregamento, aumentando significativamente sua produtividade e reduzindo perdas energéticas. Neste processo, o forno opera com a abóbada fechada, sem a necessidade de utilizar carregamento com cestões. A sucata é carregada através de esteiras que estão localizadas dentro do túnel do sistema de despoeiramento, pelo qual passam os gases quentes oriundos do forno. Esta combinação garante alta produtividade e custos reduzidos, além de diminuir os impactos ambientais (ROSSI, 2014).

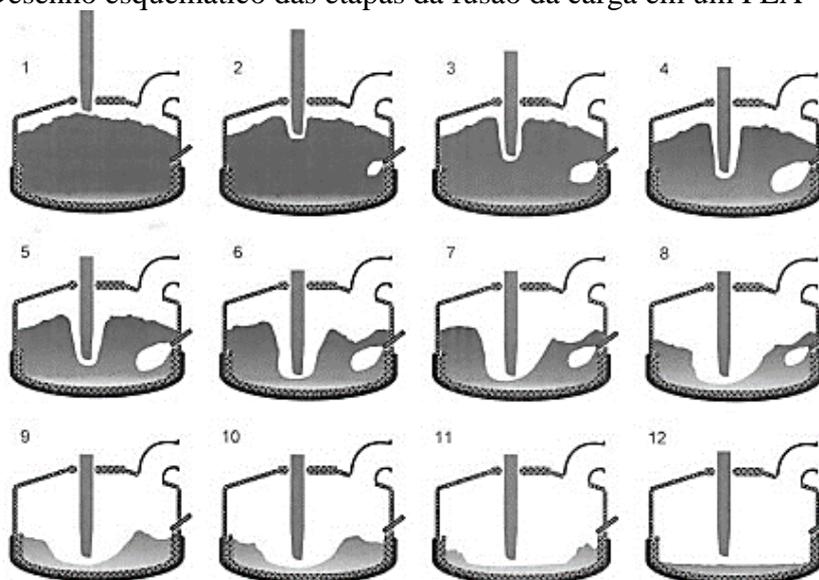
5.2.3.2. Perfuração e fusão

Após o carregamento, a etapa de perfuração se inicia quando os eletrodos são baixados e o arco elétrico é aberto. Essa etapa é caracterizada por intenso ruído devido à instabilidade do arco, sendo então realizada com potência reduzida e arco curto, obtido com a redução da tensão no secundário do transformador do forno ajustando o reator para limitar a corrente (JOHN, 2009). O tempo de perfuração raramente ultrapassa três minutos e corresponde às etapas de 1 a 4 no desenho esquemático da Figura 20.

Após suficiente penetração dos eletrodos na sucata, inicia-se o período de fusão e pode-se aumentar o comprimento do arco e sua potência sem gerar danos às paredes do forno e a abóbada, devido a utilização de escória espumante que blinda o arco. Com um arco mais longo e vertical, o calor pode ser irradiado horizontalmente e a sucata é fundida mais rapidamente. Essa é a etapa da corrida onde é utilizada a potência máxima permitida pelo transformador do forno. Cada um dos eletrodos forma uma pequena poça líquida, que gradativamente aumenta ao longo da fusão até que a poça única seja formada, estabilizando o arco e aumentando a potência média. Essa evolução do período de fusão é mostrada entre as etapas 5 e 10 da Figura 20.

Uma vez que a sucata do carregamento foi suficientemente fundida para acomodar a carga do próximo cestão, o forno é carregado novamente e o processo se repete até que o último cestão seja fundido e atinja-se uma condição de banho plano, que é quando se inicia a etapa de refino, que corresponde às etapas 11 e 12 da Figura 20.

Figura 20 – Desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA



Fonte: Gerdau (2013)

Mediante John (2009), se for escolhido carregar o cestão seguinte com toda a carga fundida, de acordo com o nível de sucata sólida vai sendo reduzido a um aumento da exposição das paredes e abóbada à irradiação do arco. Neste caso, é necessário reduzir o comprimento do arco, que leva a redução na taxa de fusão e na produtividade. Se a escolha for realizar o carregamento seguinte com alguma sucata ainda não fundida, não há necessidade da redução da potência e podem ser obtidos ganhos importantes em produtividade, desde que este

procedimento não exija o carregamento de um cestão adicional ou a utilização de sucatas de maior densidade.

Ao longo de toda a corrida, paralelamente à fusão gerada pelo arco elétrico, ocorre o aquecimento e fusão da carga através de aporte de energia química proveniente da injeção de gases, que pode ser feita por diversos dispositivos em um forno elétrico.

5.2.3.3. Refino

O refino processa a produção do aço propriamente dito em aciarias e realiza sua solidificação. O refino do aço é realizado em conversores a oxigênio por meio de transformações químicas endotérmicas que utilizam como fonte de energia o próprio calor proveniente do gusa líquido. Os objetivos precípuos desta etapa de refino são: o ajuste da quantidade de carbono ou outros elementos de liga à proporção necessária para a obtenção das propriedades desejadas e a redução para quantidades aceitáveis de elementos residuais, como enxofre, nitrogênio e oxigênio (CÂNDIDO, 2008).

O processo mais difundido de solidificação é o lingotamento contínuo, desenvolvido na década de 50, que desde então vem substituindo o lingotamento convencional. O lingotamento contínuo propicia um grande aumento na econômica de energia e sensível aumento de rendimento do material entre as etapas de refino e laminação, pois elimina um ou mais estágios de reaquecimento de materiais semiacabados (JOHN, 2009).

O processo produtivo das usinas semi-integradas compreende apenas as etapas que seja o refino e a laminação e utiliza sucata ferrosa como insumo básico. Nestas usinas, a depuração química da carga metálica é realizada em fornos elétricos a arco, tendo a eletricidade como fonte de energia preponderante. Considerando-se que a matéria-prima empregada, a sucata ferrosa, já conta com o carbono em sua constituição, nem mesmo do ponto de vista da composição química é necessária a utilização do carvão mineral (ROSSI, 2014).

Os resíduos de aciaria têm um papel essencial nas reações de refino, determinando tanto na cinética das reações quanto na composição final do tarugo. A evolução de sua composição ao longo de uma corrida varia e deve seguir um caminho adequado para que possibilite a correta formação da espuma e seja capaz de absorver as impurezas envolvidas no processo de fabricação do aço (GUMIERI, 2002).

Os fatores fundamentais da etapa do refino são a adequação dos teores de fósforo e carbono de vazamento do tipo de aço a ser fabricado e o aquecimento do aço até sua temperatura de vazamento (GUMIERI, 2002). Após cada vazamento, há uma quantidade de aço líquido e

resíduos remanescentes (fundo úmido) que permanecem dentro do FEA intencionalmente. Mediante John (2009) os principais benefícios dessa prática são:

- Agilidade da oxidação do carbono;
- Agilidade da desfosforação;
- Agilidade da taxa de dissolução das cales;
- Melhora nas condições de transferência de calor durante a fusão;
- Aumento na taxa de fusão dos materiais, especialmente sucatas pesadas de ferro-gusa;
- Proteção da soleira do forno o impacto da sucata durante o carregamento e a da irradiação do arco elétrico durante a fusão da carga.

5.3. NORMAS DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA

Em meados da década de 80 surgem os programas nacionais de conservação de energia elétrica (PROCEL) e de derivados de petróleo (CONPET).

Em 1990 é apresentado um projeto de Lei que procura remunerar as concessionárias de energia elétrica por seus investimentos em conservação de energia e estabelecer índices mínimos de eficiência energética em equipamentos comercializados no país. Esse projeto de Lei somente foi efetivamente aprovado, após necessárias atualizações, no auge da crise de energia, no ano de 2001, dando origem a mencionada Lei 10.925 sobre eficiência energética (JANUZZI, 2000).

O principal programa nacional de conservação de eletricidade foi criado em 1985, tendo a ELETROBRAS como sua secretaria-executiva e principal órgão implementador de suas atividades.

O PROCEL passou por várias discontinuidades, tendo inclusive sido cogitada a sua extinção em meados de 1998. Durante o período de 1986- 97 foram aprovados um total de R\$235,5 milhões, mas nem todos esses recursos puderam ser realizados devido a dificuldades de gerenciamento. O próprio PROCEL estimou que durante esse período foi possível evitar um total de 1.113 MW de capacidade instalada.

A introdução das reformas no setor elétrica provocou mudanças significativas na condução das atividades relacionadas com eficiência energética no país. A partir de 1998 houve uma forte retração nas atividades do PROCEL, ao mesmo tempo em que a ANEEL instituía novas resoluções tornando compulsória a aplicação de recursos das concessionárias em eficiência energética em P & D. Desde o início das privatizações, em 1994 constavam dos

contratos de concessão algumas cláusulas que tentavam assegurar essas atividades nas empresas. A Resolução 242/98 veio dar uma redação mais clara e uniforme e estabelecer rituais para submissão e aprovação das atividades das empresas, o que era até aquele momento muito vago (JANUZZI, 2000).

No que se refere ao fornecimento de energia elétrica em tensão das classes de 69, 138 e 230kV, durante os atendimentos iniciais de ligação do consumidor, dentre as informações solicitadas, o consumidor deve informar a existência de cargas especiais, ou seja, providenciar os equipamentos que introduzem perturbações indesejáveis no sistema elétrico da CELPE e que são prejudiciais aos demais e ao próprio consumidor. Tais cargas devem ser objeto de análise especial da CELPE. O consumidor deve fornecer os dados técnicos e condições de operação, indispensáveis à citada análise. Entre tais cargas incluem-se fornos a arco, grandes motores síncronos e de indução, informando potência e tipo de partida grandes unidades retificadoras e inversoras (ANEEL, 2014).

No que refere o fornecimento de energia elétrica em Alta Tensão, a ligação de máquinas elétricas, tais como motores síncronos e assíncronos (especialmente aqueles utilizados em laminadores e elevadores de carga, etc.), fornos a arco e equipamentos geradores de harmônicos, cujo funcionamento em regime transitório possa causar perturbações no suprimento total de energia elétrica a outros consumidores, para o caso de fornos a arco (ANEEL, 2014):

- O limite padrão de flutuação de tensão no ponto de entrega de energia dado pelo método inglês (ERA) é de 0,25%;
- A apuração do valor do padrão de flutuação de tensão deve ser considerada quando os três eletrodos do forno estão em curto-circuito e o transformador do forno está ajustado no tap que permita o maior valor desta corrente;
- Quaisquer outros critérios adotados para a apuração do nível de “*flicker*” devem ser submetidos previamente a CESP para análise.

6. METODOLOGIA

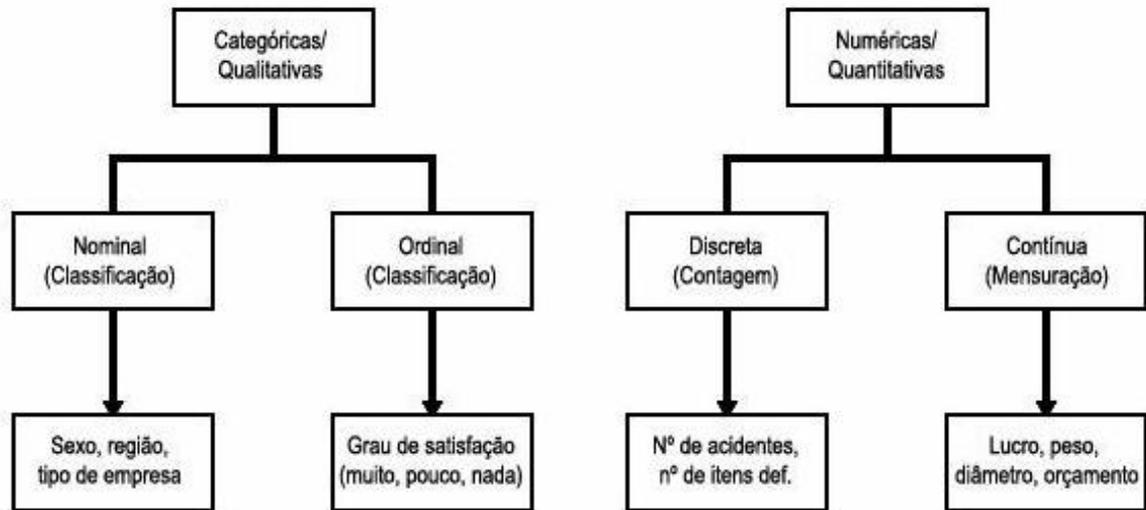
Consistindo na apresentação técnica acerca do forno a arco elétrico, bem como suas vantagens e desvantagens de consumo de energia e demanda de produção, podendo ser classificada como uma pesquisa exploratória, no intuito de possibilitar a viabilidade de maior familiaridade com o estudo do consumo energético de dois fornos a arco elétrico de uma empresa siderúrgica nacional, localizada no Vale do Paraíba (LAKATOS; MARCONI, 2012).

Esta pesquisa delimita dois fornos a arco elétrico, ambos pertencem à mesma empresa localizada na região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo. A empresa especializada em aços longos nas Américas e uma das principais fornecedoras de aços longos especiais do mundo.

A pesquisa bibliográfica aborda fundamentalmente acerca do forno a arco elétrico bem como o seu consumo de energia e demanda de produção.

Inicialmente pretende-se aplicar um levantamento de dados abordando um forno a arco elétrico situada em uma empresa nacional, onde mediante Miguel *et al* (2012) são considerados pesquisa avaliação, onde o pesquisador aborda uma amostra de um problema específico a fim de extrair conclusões acerca da temática, neste caso pretende-se fazer um levantamento de um forno a arco elétrico. No intuito de gerar dados qualitativos a respeito dos fornos e os benefícios para a empresa e para os colaboradores e dados quantitativos a respeito do consumo energético, bem como o retorno do ativo para a indústria, nesse conceito Miguel *et al* (2012), ainda ressalta que é importante a identificação do tipo dados será gerado com a pesquisa, podendo os dados quantitativos serem contínuos, ou seja, dados gerados através de medição pertencentes aos conjuntos dos números reais ou discretos, ou seja, gerados mediante contagens. Para o caso dos dados qualitativos, eles podem ser nominais, ou seja, as respostas não podem ser ordenadas ou ordinais, o próprio nome sugere, ou seja, é qualificado o grau de satisfação por exemplo. É muito comum os dados contínuos serem transformados em dados qualitativos ordinais ou nominais, no intuito de gerar respostas de dados quantitativos partindo de respostas qualitativas. A Figura 21 abaixo demonstra alguns exemplos:

Figura 21 - Classificação das variáveis - exemplos



Fonte: Adaptado de Miguel *et al* (2012)

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

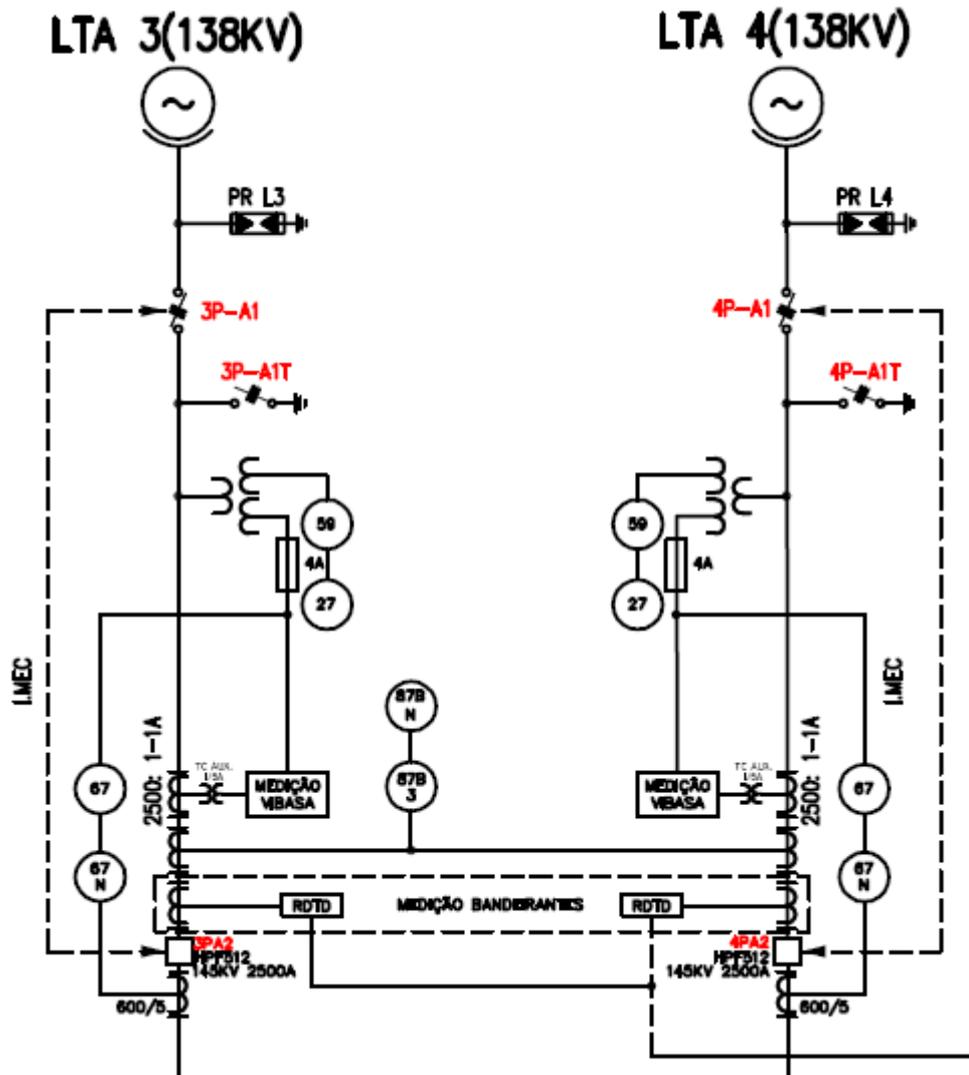
Os dados de consumo de energia elétrica e de produção de dois fornos elétricos a arco foram gentilmente concedidos por uma empresa do ramo siderúrgico, porém os dados foram modificados em prol da preservação dos reais dados obtidos e de forma a evitar a descaracterização a pesquisa. Na subestação principal da empresa, existem novos medidores de energia e de qualidade de energia que foram instalados, permitindo que possam ser elaborados relatórios internos de consumo e alimentar uma sólida e confiável base de dados. A respeito da produção, há também controles confiáveis na aciaria, da quantidade de sucata, cal e ligas metálicas utilizadas para alimentar o forno para fundição e o quanto de aço se obtém na saída da corrida, sendo possível calcular a eficiência e as perdas do sistema.

Com efeito, serão apresentados os circuitos elétricos dos fornos, seus respectivos dados de produção e consumo, com a finalidade de discutir se houve diferença nos níveis de produção e consumo específico, quais fatores poderiam levar a uma pior ou melhor eficiência energética do sistema, além de comparar o desempenho dos dois fornos.

7.1. DIAGRAMA UNIFILAR DOS FORNOS

Com a intenção de uma melhor demonstração a respeito dos fornos utilizados pela empresa local, serão ilustrados os circuitos de alta e média tensão dos fornos por meio de Diagramas Unifilares. A Figura 22 e a Figura 23 representam o circuito de alta tensão, sendo a chegada da alimentação da concessionária para a usina na Figura 22 e os transformadores de alta para média tensão na Figura 23. Como pode-se observar, o circuito da usina é alimentado por meio linha dupla de 138 kV fechada em anel, caracterizadas pelas linhas 3 e 4, estas alimentam os três transformadores principais da usina.

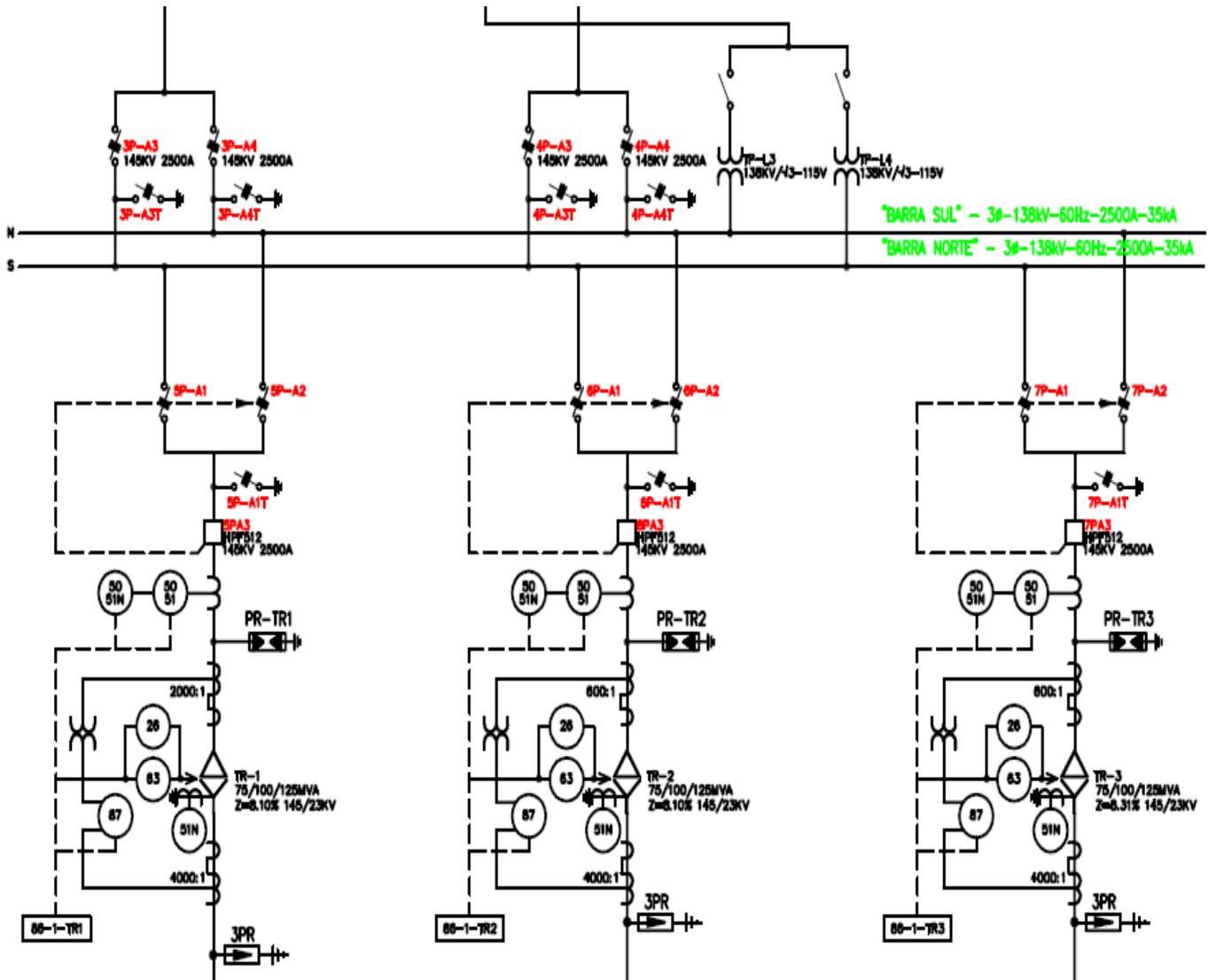
Figura 22 – Diagrama unifilar da subestação principal de siderúrgica



Fonte: Concedido por empresa do ramo siderúrgico

A Figura 23, ilustra os transformadores principais que são denominados TR1, TR2 e TR3 de 125 MVA cada. A tensão de saída desses transformadores que constitui a rede de média tensão de distribuição interna de energia é de 23 kV, que alimentam os transformadores dos fornos da aciaria, ilustrados na Figura 24, e toda a usina siderúrgica.

Figura 23 – Diagrama unifilar dos transformadores principais



Fonte: Concedido por empresa do ramo siderúrgico

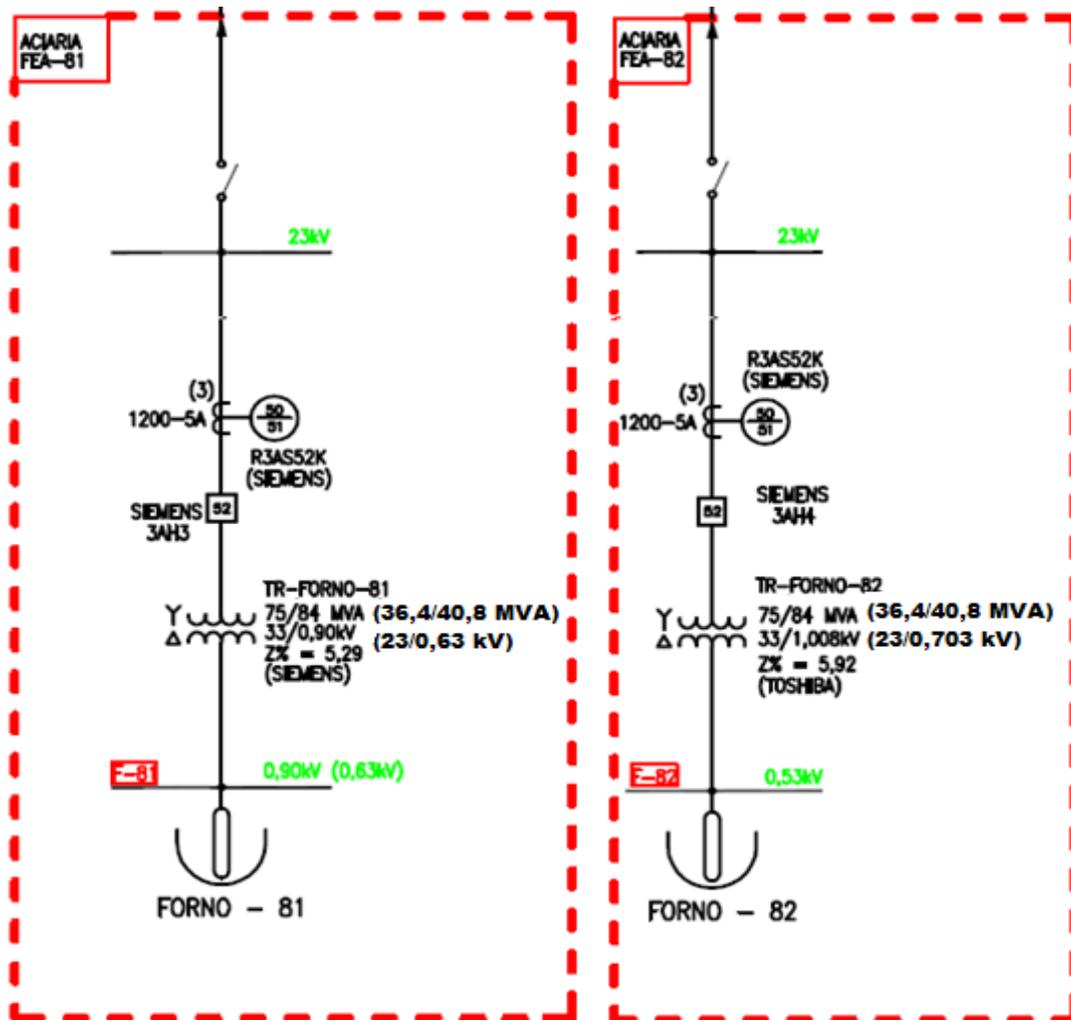
O circuito da usina, foi projetado para que dois dos transformadores principais operem ao mesmo tempo, e o outro exerça a função de sobressalente, aumentando a confiabilidade do sistema e, portanto, este deverá atuar quando ocorrer alguma falha no sistema que impossibilite um dos outros transformadores a operar.

As responsabilidades dos transformadores em operação podem ser descritas como, um atua para suprir dos transformadores dos fornos da aciaria e o outro para suprir todo o restante da usina. Propiciando dessa forma, ter noção da dimensão da carga de uma aciaria, se comparada a todo restante da usina como carga, como processos de laminações, acabamento, utilidades e outros.

A aciaria local atualmente apresenta quatro fornos a arco instalados e aptos a serem utilizados, sendo dois aplicados para fundição e dois para refino. Na Figura 24 ilustra apenas os

fornos de fundição estão identificados como Forno 81 e Forno 82 e os de refino como Forno Panela 1 e Forno Panela 2, estes quatro fornos são alimentados pelo transformador TR1, não estão representados na imagem.

Figura 24 – Diagrama unifilar dos fornos à arco em uma instalação siderúrgica



Fonte: Concedido por empresa do ramo siderúrgico

Contudo, apesar de os dois fornos para fundição estarem em plenas condições operacionais, ou seja, ambos fornos podem ser utilizados para produção do aço, atualmente o forno 82 é o maior responsável pela produção na usina, e isso se deve a alguns fatores, como, a posição física do forno 82, que está localizado ao lado do silo de ligas metálicas, aumentando a produtividade durante a corrida, pois é menor o tempo gasto para adição de ligas, pode-se citar também as condições operacionais e físicas das pontes rolantes que por vezes inviabilizam carregamentos e vazamentos de corridas ao mesmo tempo, já que um das pontes necessita de

reparos e portanto não está sendo utilizada, atrasando o processo, além de características do próprio forno, que é fisicamente maior e tem maior tensão de saída.

Ambos transformadores, tanto do FEA 81 quanto do FEA 82 são de tensão nominal 33 kV, porém a rede de distribuição interna da empresa é de 23 kV, ou seja, ambos estão trabalhando com potência abaixo de sua capacidade máxima de potência. Além de serem de fabricantes distintos, apresentam configurações distintas e diferentes relações de transformação.

Dados:

- **FEA 81:**

- Relação de transformação: 33 kV/0,90 kV e potência 75 MVA
- Relação de transformação: 23 kV/0,63 kV e potência 36,43 MVA

- **FEA 82:**

- Relação de transformação: 33 kV/1,01 kV e potência 75 MVA
- Relação de transformação: 23 kV/0,70 kV e potência 36,43 MVA

Quanto menor a tensão no secundário para a mesma potência de saída, no caso 36,4 MVA, implica em uma corrente maior no secundário, aumentando consumo energético e desgaste dos eletrodos. O forno 81 trabalha com corrente de 57,8 kA, enquanto no forno 82 circula uma corrente de 52 kA, diferença de 5,8 kA causada pela diferença de tensão resultante no secundário do transformador.

7.2. CONSUMO DOS FEAS

Os dados de produção, consumo e rendimento que foram levantados são do período de aproximadamente dois anos, de janeiro de 2017 a setembro de 2018, pela razão de ter demanda de produção mais parecidos, pois devido à crise em anos anteriores é inferior.

Dentro do período selecionado salientam-se alguns valores, por serem discordantes, estes são pontuais nos meses de janeiro e dezembro de 2017 e janeiro e setembro de 2018, apresentam os menores valores de produção e consumo, em virtude das grandes paradas para manutenção que foram feitas na aciaria nessas datas, incluindo os fornos.

A Tabela 2 apresenta sucintamente os dados a respeito do forno 81 no ano de 2017. No início do ano, o forno não estava sendo utilizado, toda a produção da usina era suportada por apenas um forno operando, o forno 81 atuava apenas quando havia algum impedimento na

atuação do outro forno, por exemplo, manutenção programada. No período desse ano este apresentou produção média mensal de 4.308 t e consumo médio mensal de 1.813 MWh. Portanto, seu consumo específico, ou seja, o quanto de energia foi consumido para produção de uma tonelada de aço em média foi de 0,421 MWh/t.

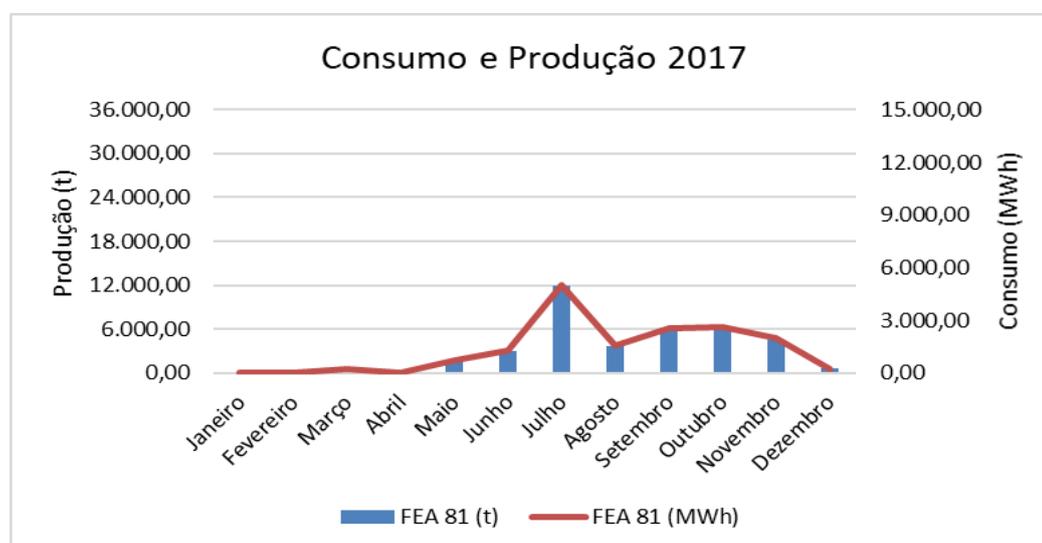
Tabela 2 – Dados de consumo e produção do FEA 81 em operação em 2018

2017	Produção (t)	Consumo (MWh)	Consumo esp. (MWh/t)
Janeiro	-	-	-
Fevereiro	-	-	-
Março	513,69	246,64	0,480
Abril	-	-	-
Maió	1.841,44	759,93	0,413
Junho	2.986,90	1.294,07	0,433
Julho	12.016,90	5.000,87	0,416
Agosto	3.694,61	1.590,20	0,430
Setembro	6.287,62	2.574,29	0,409
Outubro	6.162,39	2.601,16	0,422
Novembro	4.544,18	1.984,20	0,437
Dezembro	730,17	268,84	0,368

Fonte: Produção do próprio autor

O gráfico da Figura 25 ilustra de forma sucinta o ano de 2017 do forno 81, de acordo com a Tabela 3. Neste ano, foi quando o cenário das siderúrgicas estavam voltando a melhorar, crescendo novamente a produção, e este forno que estava sem operar, voltou a ser religado e a auxiliar na produção, quando o forno 82 estava em manutenção.

Figura 25 – Gráfico de consumo e produção do FEA 81 no ano de 2017



Fonte: Produção do próprio autor

A Tabela 3 apresenta resumidamente os dados para o estudo de consumo do forno 82 no ano de 2017, com produção média mensal de 21.880 t, consumo médio mensal de 10.540 MWh, resultando em um consumo específico médio de 0,482 MWh/t.

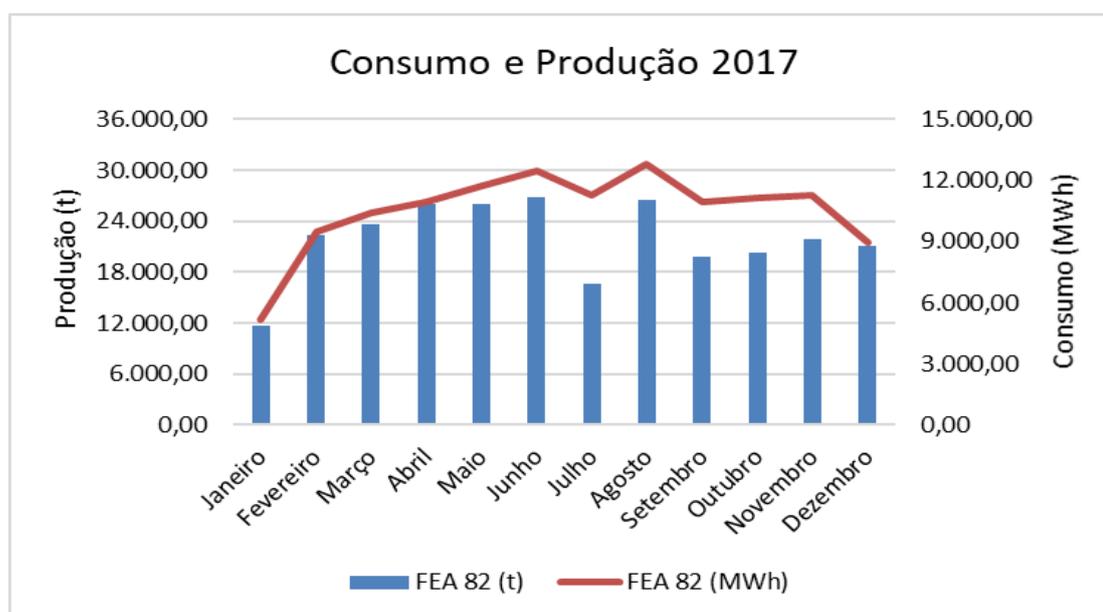
Tabela 3 – Dados de consumo e produção do FEA 82 em operação em 2017

2017	Produção (t)	Consumo (MWh)	Consumo esp. (MWh/t)
Janeiro	11.908,44	5.153,37	0,433
Fevereiro	23.010,75	9.492,13	0,413
Março	24.246,77	10.408,93	0,429
Abril	26.508,00	10.937,89	0,413
Mai	26.742,37	11.730,16	0,439
Junho	27.592,89	12.449,58	0,451
Julho	23.048,50	11.294,97	0,705
Agosto	27.268,72	12.770,89	0,468
Setembro	22.444,44	10.908,87	0,534
Outubro	27.335,70	11.145,84	0,408
Novembro	27.331,11	11.240,78	0,411
Dezembro	22.332,37	8.962,56	0,401

Fonte: Produção do próprio autor

Através do gráfico na Figura 26 tem-se a visão mensal relativa a produção do forno 82 ao longo do ano de 2017.

Figura 26 – Gráfico de consumo e produção do FEA 82 no ano de 2017



Fonte: Produção do próprio autor

A partir das informações obtidas de ambos os fornos por meio dos gráficos presentes na Figura 25 e Figura 26, pode-se observar que em tratando-se de produção, o forno 82 possui números notavelmente superiores aos do forno 81, produzindo em média cerca de dez vezes mais ao longo do ano.

Os dados mensais dos fornos para o ano de 2018 foram dispostos nas Tabelas 4 e Tabela 5, ilustrando sua atividade produtiva ao longo desse ano, e traçando seus respectivos consumos, ilustrados nas Figura 27 e Figura 28.

Neste ano o forno 81 produziu mensalmente em média 15.160 t, com consumo médio mensal de 9.150 MWh, por conseguinte seu consumo específico em média foi de 0,604 MWh/t

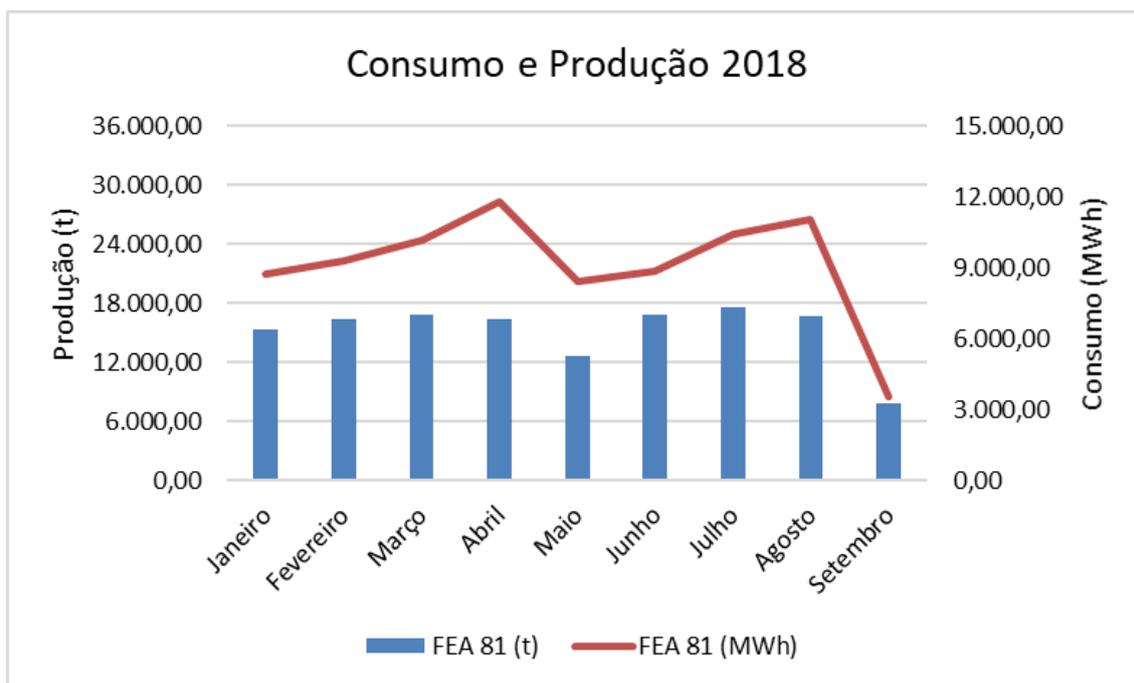
Tabela 4 – Dados de consumo e produção do FEA 81 em operação em 2018

2018	Produção (t)	Consumo (MWh)	Consumo esp. (MWh/t)
Janeiro	15.354,76	8.750,75	8.750,75
Fevereiro	16.397,94	9.300,96	9.300,96
Março	16.842,48	10.158,79	10.158,79
Abril	16.356,59	11.817,27	11.817,27
Maio	12.590,55	8.412,76	8.412,76
Junho	16.768,96	8.879,97	8.879,97
Julho	17.593,95	10.439,60	10.439,60
Agosto	16.686,22	11.033,87	11.033,87
Setembro	7.834,05	3.553,73	3.553,73
Outubro			
Novembro			
Dezembro			

Fonte: Produção do próprio autor

Ao se comparar o perfil produtivo do forno 81 nos anos 2017 e 2018, observa-se um crescimento considerável na quantidade de aço produzida neste ano.

Figura 27 – Gráfico de consumo e produção do FEA 81 no ano de 2018



Fonte: Produção do próprio autor

Semelhantemente ao forno 81, obteve-se os dados do forno 82 para o ano de 2018, estes estão dispostos na Tabela 5 e sua representação gráfica se encontra na Figura 28. O desempenho do forno 82 foi com produção média mensal de 20.460 t e consumo médio mensal de 9.080 MWh. Dessa forma, seu consumo específico, ou seja, o quanto de energia foi consumido para produção de uma tonelada de aço em média foi de 0,444 MWh/t.

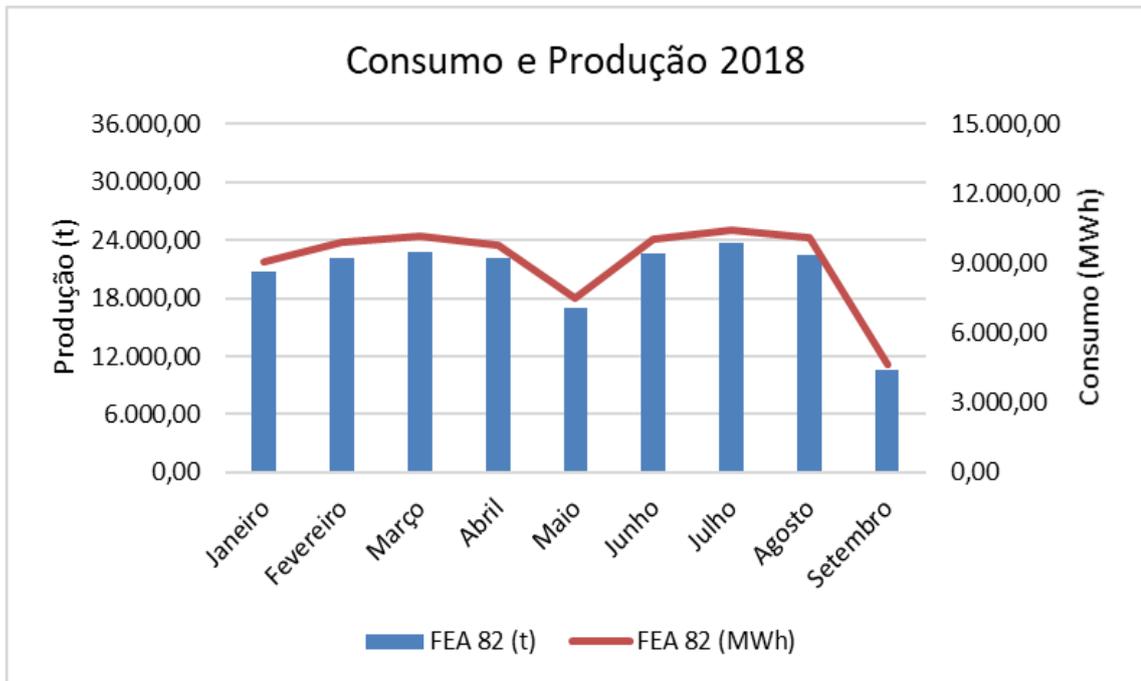
Tabela 5 – Dados de consumo e produção do FEA 82 em operação em 2018

2018	Produção (t)	Consumo (MWh)	Consumo esp. (MWh/t)
Janeiro	21.436,07	9.840,18	0,459
Fevereiro	29.368,30	12.690,24	0,432
Março	31.581,50	14.581,67	0,623
Abril	34.491,63	14.789,22	0,429
Maio	25.973,85	11.119,60	0,428
Junho	32.309,11	13.917,09	0,431
Julho	35.234,59	14.918,07	0,423
Agosto	34.320,22	14.960,42	0,436
Setembro	13.398,59	5.794,73	0,432
Outubro	-	-	-
Novembro	-	-	-
Dezembro	-	-	-

Fonte: Produção do próprio autor

Igualmente aos gráficos anteriores, a Figura 28 contém o acompanhamento mensal da quantidade de aço produzida e o consumo de energia elétrica do forno no ano de 2018, ilustrando de forma mais clara o cenário anual e facilitando uma possível comparação destes dados com o do ano anterior.

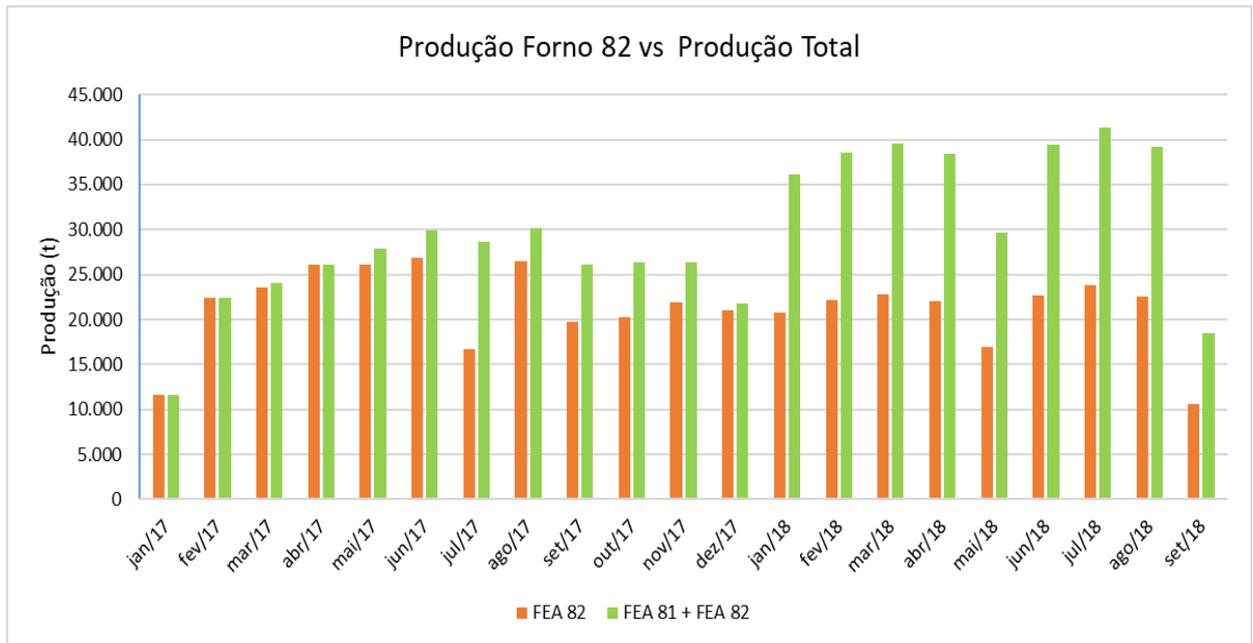
Figura 28 – Gráfico de consumo e produção do FEA 82 no ano de 2018



Fonte: Produção do próprio autor

Inicialmente, pode-se interpretar como uma provável queda de produção, se for levar apenas em consideração o cenário de produção do forno principal, o forno 82 e não for analisado o total de produção, pois a produção do forno 82 caiu em torno de 8,2% em relação ao mesmo período no ano anterior. Porém, a produção do forno 81 foi muito mais significativa no ano de 2018, e assim, no total tem-se em 2018, um cenário produtivo muito melhor, com mais de 100 toneladas a mais no acumulado do mesmo período do ano anterior, como pode-se observar na Figura 30, a produção da planta e do forno na linha do tempo 2017/2018.

Figura 29 – Gráfico de produção do forno 82 e total de produção



Fonte: Produção do próprio autor

Portanto, percebe-se que enquanto no ano de 2017 a produção total da usina é praticamente de responsabilidade do forno 82, no ano de 2018 isso deixa de ser verdade. Sendo de igual importância os resultados de produção da planta.

7.3. COMPARATIVO FEA 81 VS FEA 82

Considerando os dados individuais de consumo específico dos dois anos, que foram obtidos de forma indireta, por meio das informações de consumo e produção, assim foram extraídas essas informações das Tabelas 2 e 3, com a finalidade de serem apresentados de forma resumida, para facilitar a comparação de seus desempenhos produtivos ao longo desses anos, os dados se encontram na Tabela 6 e sua forma gráfica na Figura 30 e Figura 31.

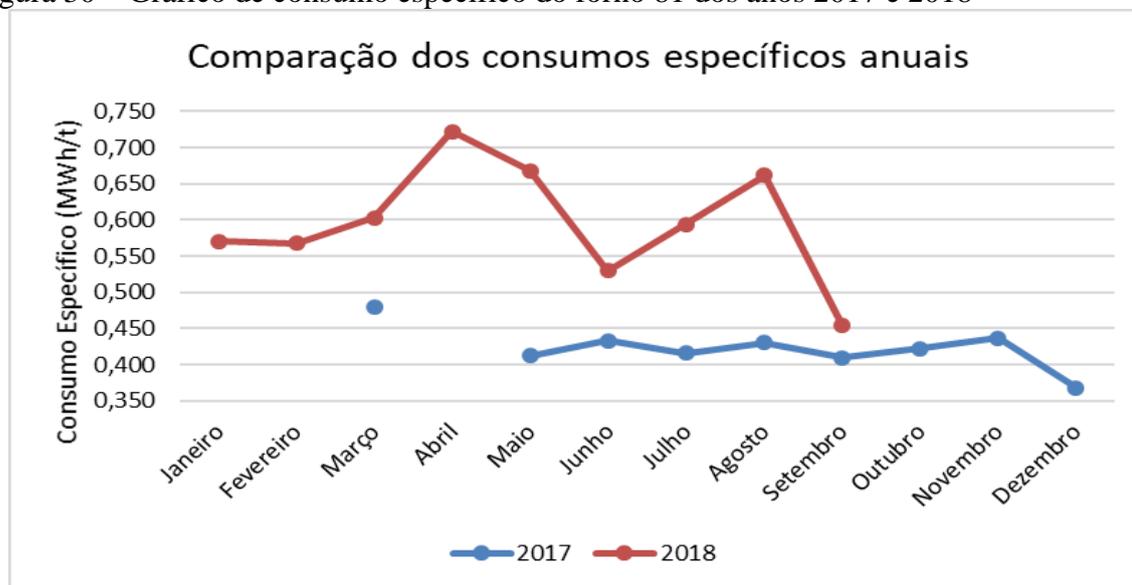
Tabela 6 – Consumo específico do FEA 81 e 82 em 2017 e 2018

	2017		2018	
	FEA 81 (MWh/t)	FEA 82 (MWh/t)	FEA 81 (MWh/t)	FEA 82 (MWh/t)
Janeiro	-	0,443	0,570	0,439
Fevereiro	-	0,424	0,567	0,448
Março	0,480	0,442	0,603	0,448
Abril	-	0,420	0,722	0,444
Mai	0,413	0,450	0,668	0,442
Junho	0,433	0,463	0,530	0,442
Julho	0,416	0,679	0,593	0,439
Agosto	0,430	0,483	0,661	0,449
Setembro	0,409	0,552	0,454	0,441
Outubro	0,422	0,551		
Novembro	0,437	0,514		
Dezembro	0,368	0,426		

Fonte: Produção do próprio autor

Com o propósito de comparação do desempenho dos dois fornos com eles mesmos em anos distintos, traçaram-se as curvas da Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 – Gráfico de consumo específico do forno 81 dos anos 2017 e 2018

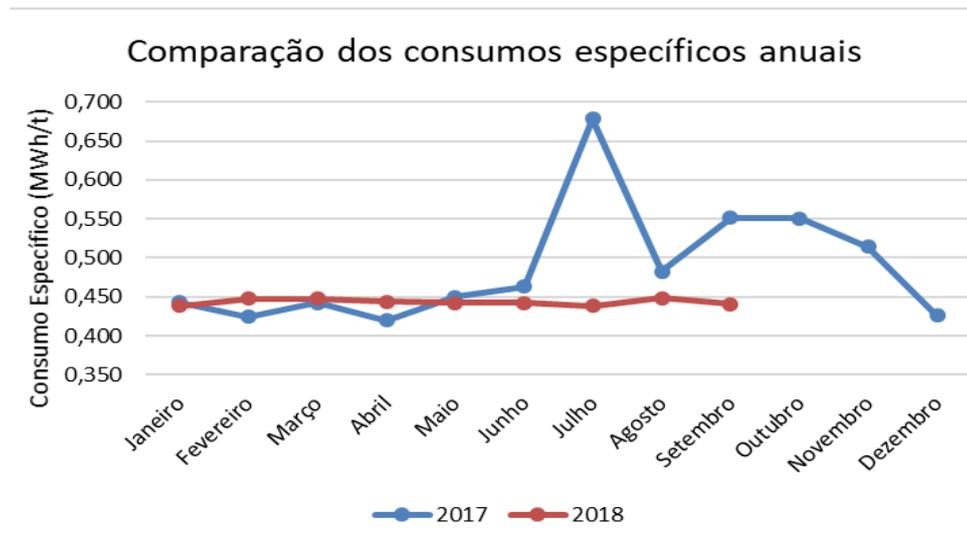


Fonte: Produção do próprio autor

Durante o período de maio/17 a dezembro/17 o consumo do forno 81 por tonelada produzida foi excelente, porém para o ano 2018, seu perfil de consumo modificou, representando um desempenho ruim, que interfere diretamente ao custo do aço e na competitividade da empresa.

O forno 82 já apresenta uma constância maior em seus valores de consumo, apenas com um pico no mês de julho de 2017, em síntese o forno 82 tem melhores respostas de consumo de energia elétrica que o forno 81. As variações ao longo do ano do consumo específico podem ser causados por utilização de diferentes tipos de sucata, o tipo de sucata, tamanho e como o forno foi carregado, afeta diretamente o valor de consumo por tonelada.

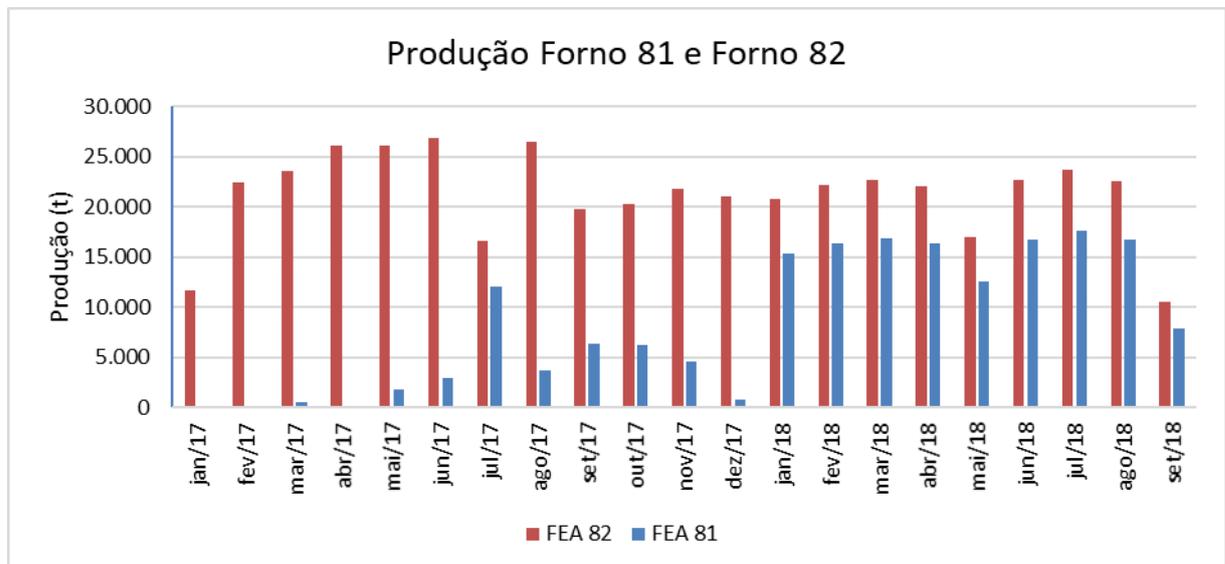
Figura 31 – Gráfico de consumo específico do forno 82 dos anos 2017 e 2018



Fonte: Produção do próprio autor

A fim de ilustrar e comparar os perfis produtivos e de consumo dos fornos, traçou-se os gráficos das Figura 32 e Figura 33.

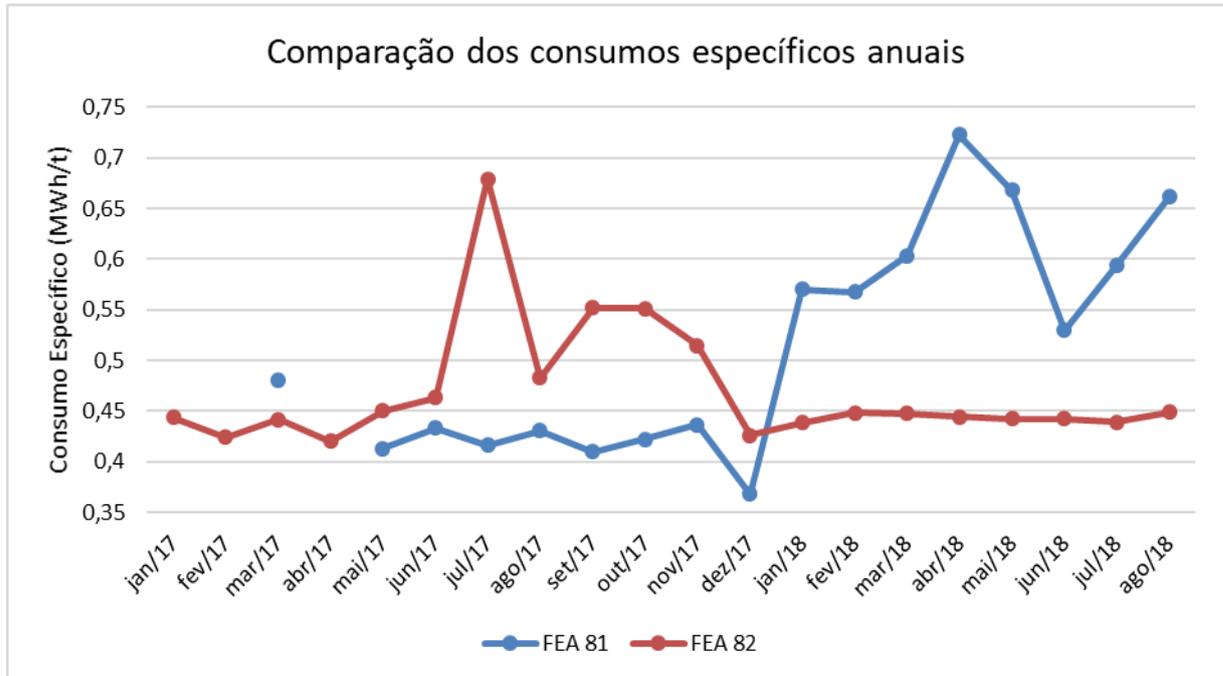
Figura 32 – Gráfico de produção dos fornos ao longo dos anos 2017 e 2018



Fonte: Produção do próprio autor

Considerando os dados individuais de consumo específico dos fornos nos dois anos, retirados da Tabela 6, dispôs esses dados no gráfico da Figura 33, com a finalidade de comparar o desempenho de ambos fornos na linha do tempo 2017/2018.

Figura 33 – Gráfico de consumo específico dos fornos 81 e 82 nos anos 2017 e 2018



Fonte: Produção do próprio autor

Ao ser analisada a linha do tempo do consumo específico dos fornos percebe-se duas situações distintas, a primeira que em julho, setembro e outubro de 2017 o consumo específico do forno 82 ficou acima do adequado, e segunda que com o aumento da produção no forno 81, no ano de 2018, seu consumo por tonelada aumenta significativamente. Alguns fatores podem influenciar e justificar esse resultado de consumo, como por exemplo, os cabos refrigerados desgastados antes de realizar troca, pois devido ao efeito *skin* com o passar do tempo estes aumentam sua resistência, havendo assim a necessidade de sua troca periódica, desempenho do transformador do forno 81, tipo de sucata utilizada, experiência do forneiro nas etapas do processo de fundição, o tempo de atuação das pontes rolantes para realizar carregamento do cestão, remover escória e permitir vazamento da corrida, entre outros.

8. CONCLUSÃO

A ideia de estudar o consumo de energia elétrica dos fornos veio por meio do alerta do cenário nacional quanto ao aumento da produção de aço neste ano e seu contínuo crescimento. Ao abordar a reação da indústria siderúrgica globalmente, durante ainda cenário de crise, percebe-se que a indústria siderúrgica está voltando ao mercado com bom crescimento. Porém com o aumento da tarifa de energia elétrica, é necessário devida atenção ao seu consumo, pois representa um custo significativo para a empresa, a energia necessária para alimentar fornos elétricos à arco, e afeta diretamente o custo final do produto.

Verificou-se através do estudo do panorama de produção da empresa siderúrgica, esta possui instalados dois fornos à arco para fundição do aço, e um deles é o principal na produção, sendo seu volume de produção maior. E há alguns motivos que nortearam a empresa a tomar essa decisão na escolha de qual forno utilizar, já que pelo volume de demanda, durante os anos de 2015, 2016 e 2017 apenas um forno operando era o suficiente. A escolha pelo forno 82 foi devido aos diversos fatores que afetam diretamente na produção e o custo final do aço, podendo interferir diretamente em sua competitividade no mercado.

Concluiu-se que a empresa adotou uma boa estratégia, ao assumir o forno 82 como maior produtor, uma vez que este tem capacidade de produção maior por corrida que o forno 81, atuando com maior eficiência energética, ou seja, ele produz mais gastando menos. O consumo energético por tonelada foi verificado através dos dados e gráficos, dos dois fornos. Apresentando consumo específico final acima do desejado, principalmente devido a utilização dos transformadores abaixo da sua tensão nominal, com transformadores sendo utilizados de forma subdimensionada. Em suma, devido a tensão de secundário ser maior no forno 82, tem-se menor consumo de eletrodos e uma fundição mais estável, além de estar localizado ao lado do silo de ligas, aumentando sua produtividade, pois é reduzido o tempo de adição de ligas, e inclusive está mais próximo aos fornos panela, perdendo menos temperatura ao longo do processo de vazamento e ida ao refino.

Porém num cenário com crescimento da indústria e do mercado de aço, com apenas um forno produzindo não é suficiente para suprir a demanda, sendo necessário utilizar os dois fornos, e o desejável é que estes possam atuar a plena capacidade. Atualmente a empresa não pode contar com os dois fornos atuando simultaneamente em máxima potência. Sendo necessárias algumas melhorias para que isso se torne viável. Entre as melhorias que necessitam de projeto e investimento que devem ser implementadas para garantir melhor consumo estão: o aumento da tensão de alimentação dos transformadores possibilitando operarem em sua tensão

nominal e em máxima potência; se necessário plicar refrigeração forçadas nos transformadores; a troca do forno por um modelo mais moderno implicando na redução de perdas inerentes ao forno atual; reformas nas pontes rolantes visando uma maior eficiência logística e a diminuição dos riscos à segurança e ao processo em si; troca do transformador do forno 81 com a finalidade de aumentar a sua tensão de saída; investimento na capacitação de forneiros; padronização em todo o processo de produção; dentre outras melhorias.

REFERÊNCIAS

- ABHILASH, E.; JOSEPH, M.A.. **Studies on Energy Consumption of Melting Furnaces and Energy Conservation Options in Foundries**. In: ENERGY 2008, Calicut - India. **Conference Paper**. Instituto Nacional de Tecnologia de Calicut, 2008. p. 307 - 314. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/292616091_Studies_on_Energy_Consumption_of_Melting_Furnaces_and_Energy_Conservation_Options_in_Foundries>. Acesso em: 5 out. 2018.
- ABM, Associação Brasileira de Metais. **Fundição**. Florianópolis: Edição, 1978.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- AHLSTROM, D. **Innovation and growth**: How business contributes to society. Academy of Management Perspectives, v. 24, n. 3, 2017.
- ANDRADE, M. L. A. de; CUNHA, L. M. da S., GANDRA, G. T. **A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. BNDES Setorial, n. 12, Rio de Janeiro, 2000, p. 51-76.
- ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório Técnico 6/8**: Critério mínimos para conexão de acessantes potencialmente perturbadores ou sensíveis. 2014. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0105_SRD-Anexo%20I%20Relat%C3%B3rio_6_FINAL.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. ANEEL, 15 set. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. 2008. 151 p. Tese. (Doutorado em Engenharia de Energia e Automação Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-09022009-181024/pt-br.php>>. Acesso em: 20 ago. 2018
- CBCA, Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Construção em Aço**: Aços estruturais. 12 fev. 2014. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em: 01/10/2018
- CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira**: eficiência energética, emissões e competitividade. BNDES Setorial, v. 41, p. 181-236, 2015.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Siderurgia no Brasil – 2010-2025**. Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, Série Documentos Técnicos, Nov. 2010, n. 09

DIAS, L. A. de M. **Edificações de aço no Brasil**. São Paulo: Zigurate, 1999.

FONSECA, M. A. P. **Fornos Elétricos a Arco**. Belo Horizonte: Editora Tecno Vídeo Produções, 1989.

FORTES, R. A. F. O.; D'ABREU, J. C.; AVILLES, R. R. **Melting rates of ferrous materials in the EAF**. In: FRUEHAN SYMPOSIUM ON PHYSICAL CHEMISTRY OF SUSTAINABLE

FREITAS, D. R. F.; COELHO, M. F. O. A importância do aço na construção civil. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, Ed. 09, ano 03, v. 7, 2018, p. 5-10.

GERDAU. **Seminário de Aciaria Elétrica LUMAR**. Araçariguama: Gerdau São Paulo, 2013.

GOMI, A. A.. Aproveitamento de plástico pós-consumo na forma de combustível para altos-fornos e coqueiras. **Revista Plástico Industrial**, 2006, p. 84-100.

GOULART, L. L. de O. et al. **Avaliação da eficiência energética e da formação de FeO do FEA da VSBM**. 47º Seminário de Aciaria- Internacional, Rio de Janeiro, 2016.

GUMIERI, A. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 251 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil), PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2652>> Acesso em: 15 ago. 2018.

INABA, R. **O aço na construção civil**. São Paulo, 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **O aço: evolução**. 2015. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/siderurgia_mundo.html>. Acesso em: 18 set. 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística Preliminar: Nota (Dados setembro/2018)**. 42. ed. Brasil, 2018. 11 p.. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Outubro_2018_994469976\(1\).pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Outubro_2018_994469976(1).pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2018**. 2018. Disponível: <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/assets/pdfs/A%C3%A7o%20Brasil%20C2%B2%20Completo.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. **Os principais aços carbono utilizados na Construção Civil**. UNIFEBE – Centro Universitário de Brusque, 2015.

JANUZZI, G. M. **Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil**. Departamento de Energia. Universidade Estadual de Campinas, 2000. 14 p. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/unicamp-20anos.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2018

JOHN, A.L. **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. 2009. 105 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18597/000730827.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> . Acesso em: 20 set. 2018

JONES, J.A.T.; BOWMAN, B.; LEFRANK, P.A. **The Making, Shaping, and Treating of Steel: Steelmaking and refining volume: Electric Furnace Steelmaking**. Pittsburgh - Usa: Aise Steel Foundation, 1998. p.767 Disponível em: <<http://docshare01.docshare.tips/files/20085/200853363.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Metodologia do Trabalho Científico**. 7ª Ed, p.225. São Paulo: Atlas, 2012.

MADIAS, J. **Electric Furnace Steelmaking**. Buenos Aires - Argentina: Metallon, 2014. 31 p.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2001.

MARRIOT, E. **A História do mundo pra quem tem pressa**. Rio de Janeiro: Editora Valentina, 2015.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco energético Nacional 2018: Relatório síntese ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 03 jul. 2018

MOURÃO, M. B. et al. **Curso de Auto- redução Carbo-metalotérmica**. 7º Simpósio Brasil – Japão, 2008

NOLDIN JÚNIOR, J.H. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores**. 2002. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3667/3667_1.PDF>. Acesso em: 28 jul. 2018.

OLIVEIRA, F.N.de; SOLLERO, L.P.V. **Consumo de aço no Brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade do uso**. Brasília: Departamento de Estudos e Pesquisas do Banco Central do Brasil, jul.2014, n.214, p.1-66. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pec/wps/port/TD358.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

OLIVEIRA, T. L. **Análise energética e energética de biomassas como fonte energética sustentável em um forno elétrico a arco**”. 2013. 144 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais). Pós Graduação da REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais – UFOP- CETEC-UEMG, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3042/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_%20An%C3%A1liseEnerg%C3%A9ticaExerg%C3%A9tica.PDF>. Acesso em: 20 jul. 2018

OPFERMANN, A; RIEDINGER, D. **Energy efficiency of electric arc furnaces**. AISTech Proceedings, Pittsburgh, v. 1, 2008, p. 1-14

PALATINIK, S. **Ensino a distância de estruturas de aço**. 194.f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.usjt.br/biblioteca/mono_disser/mono_diss/2011/171.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2018

PAULA, M. S. de. **Método de carregamento de forno elétrico a arco: Consteel versus processo convencional**. 2017. 39 p. Monografia. (Graduação em Engenharia de Produção). Fundação Universitária Vida Cristã, 2017

PAULA, G. M. de. **Siderurgia**. EBC – Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono, Ribeirão Preto, 2012. Disponível em: <http://investimentos.mdic.gov.br/portalmDIC//arquivos/dwnl_1378402337.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2018.

PINHO, M.; LOPES, A. L. **Limites e possibilidade do Brasil nas configurações produtivas globalizadas: a cadeia siderúrgica**. São Carlos: FINEP, 2000. Disponível em: <<http://geein.fclar.unesp.br/atividades/pesquisaiepa/siderurgia.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2018.

RIES, W. **Fornos a Arco: Análise e Projeto do Sistema Elétrico**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2001. 208 p.

SÃO PAULO. João Wagner Silva Alves. Secretaria do Meio Ambiente. **EMISSÕES NO SETOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS E USO DE PRODUTOS 1990 a 2008**. São Paulo: CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2013. 318 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf>. Acesso em: 15 out. 2018.

ROSSI, D. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). 2014. 77 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/114957>>. Acesso em 04 ago. 2018.

SICETEL, Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos. **Análise do mercado do aço 2016**. São Paulo, 2016. 36 p. Disponível em: <<http://sicetel.org.br/antigo/sicetel2014/wp-content/uploads/2015/13/anuario-sicetel-2016.pdf>>. Acesso em: 01/10/2018.

SILVA, A. L. V. da C. **Refino dos Aços**. 2. ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2011. Disponível em: <https://www.equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo%207%20fea%20rev%202%20com%20indice%2028072013.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2018.

SILVA, M. C. da. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria prima na fábrica de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco.** Tese. 139 p. (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7155>> Acesso em: 15 set. 2018.

SOARES, G. de A. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. Disponível em: <<http://foundrygate.com/upload/artigos/Fundi%C3%A7%C3%A3o.%20Mercado%2C%20Processos%20e%20Metalurgia.pdf>> Acesso em: 03 out. 2018

SULL, D. **The upside of turbulence: seizing opportunity in an uncertain world.** USMix, 2009.

TRINDADE JUNIOR, J C N. **OBTENÇÃO, MERCADO E RECICLAGEM DE SUCATAS FERROSAS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA BRASILEIRA.** 2013. 47 f. TCC (Graduação em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.monografias.polit.ufrj.br/monografias/monopoli10010007.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na industria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, 2008, p. 67-85.

VARGAS, A. S. de; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Estudo microestrutural e determinação de calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, jun. 2004, p. 7-18.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso.** 115 p. Dissertação. (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005

VIANA, F. L. E. **Indústria siderúrgica.** Banco do Nordeste - Caderno Setorial ETENE, ano2, n.13, ago.2017. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2320766/caderno_setorial_siderurgica_14_2017_web%282%29.pdf/c964a87e-02a9-baf7-4554-298c9a5c9176> Acesso em: 20 ago. 2018.

WORLDSTEEL, Association. **August 2018 crude steel production.** Brussels, 25 set.2018. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2018/august-2018-crude-steel-production.html>>. Acesso em: 01 out. 2018.