

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CIRO PIRES RODRIGUES ALVES

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

VIÇOSA
2017

CIRO PIRES RODRIGUES ALVES

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2017

CIRO PIRES RODRIGUES ALVES

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08/10/2017.

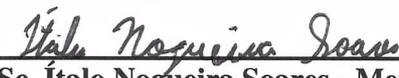
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos – Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa



M. Sc. Ítalo Nogueira Soares - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

“O pessimista vê dificuldade em cada oportunidade; o otimista vê oportunidade em cada dificuldade.”

(Winston Churchill)

Dedico este trabalho aos meus pais, José Raimundo e Terezinha, meus maiores incentivadores, e que nunca mediram esforços para me ajudar.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Jose Raimundo e Terezinha, ao meu irmão Denis, e a toda a minha família pelo auxílio, incentivo e compreensão, pois não mediram esforços para que eu chegasse ao fim desta jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos, que acompanhou e orientou-me na condução deste trabalho.

Agradeço também a todos os demais professores e funcionários da UFV que fizeram parte de minha vida durante a graduação, e que foram importantíssimos para o meu desenvolvimento como pessoa, aluno e profissional.

Ademais, agradeço aos meus amigos de curso, e a todas as outras pessoas que, de alguma forma, fizeram parte dos momentos especiais que vivi nesses anos morando em Viçosa.

Obrigado à Fundação Félix Chomé pelo apoio financeiro, e também à Capes pela oportunidade de participar do programa Ciências sem Fronteiras.

Resumo

O presente trabalho refere-se ao estudo da produção de aço pela fusão de sucatas metálicas em Fornos Elétricos a Arco que vem crescendo consideravelmente desde a década de 70. Maior oferta de energia, melhorias no processo siderúrgico e ganhos ambientais serviram como fatores de incentivo para a utilização desta tecnologia. No Brasil, os investimentos recentes nesta área estão focados na modernização das plantas existentes, visando maior competitividade com o mercado exterior, produtividade e qualidade dos produtos produzidos.

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise detalhada do consumo de energia elétrica do Forno Elétrico a Arco, FEA, instalado na aciaria na planta de uma grande usina siderúrgica nacional, elencar as variáveis que mais influenciam no consumo final, e, entender como a energia é utilizada de forma mais eficiente e econômica no processo.

Neste trabalho foram utilizados dados obtidos através do supervisório da subestação central e do sistema de gestão PIMS da aciaria sendo possível verificar uma ótima relação consumo de kWh por tonelada produzida e identificar que as perdas térmicas aumentam significativamente com o tempo e número de interrupções nas corridas.

Por fim, foi feita uma análise do fator de potência e das correções feitas pelos sistemas SVC e filtro de harmônicas. Constatou-se a possibilidade de melhoria na correção do fator de potência nos momentos em que há somente o forno panela ligado no barramento de 22kV.

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1. Objetivos Gerais	15
1.2. Objetivos Específicos	15
2. Revisão Bibliográfica.....	16
2.1. O Processo Siderúrgico.....	16
2.2. Um resumo da história do Forno Elétrico a Arco	17
2.3. O forno elétrico a arco	18
2.3.1. Introdução	18
2.3.2. Operação do forno a arco.....	20
2.3.3. Potência específica do forno.....	23
2.3.4. Potência média durante a corrida.....	25
2.3.5. O fator de utilização	25
2.3.6. Balanço energético	26
2.4. Sistema Elétrico	27
2.4.1. Introdução	27
2.4.2. O Arco Elétrico.....	29
2.4.3. Estabilidade do arco.....	30
2.4.4. Circuito Elétrico do Forno	31
2.4.5. Potência ativa, corrente e tensão de arco	31
2.4.6. Reatância Operacional	33
2.4.7. Perdas Elétricas.....	33
2.4.8. Consumo de Energia Elétrica	34
2.4.9. Fator de Potência e Correção do Fator de Potência.....	34
3. Materiais e Métodos	37
3.1. Introdução	37
3.2. Descrição dos Materiais e Equipamentos Utilizados.....	38
3.2.1. Transformadores	38
3.3. Parte prática	38
3.3.1. Sistema de regulação de eletrodos.....	39

3.3.2. Considerações de Caso	40
4. Resultados e Discussões	41
4.1. Análise do consumo de energia elétrica.....	41
4.2. Perdas elétricas	43
4.3. Análise da potência específica do forno	44
4.4. Análise do Fator de Potência	46
5. Conclusões	49
Referências Bibliográficas.....	50

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxo simplificado de produção do aço.....	17
Figura 2 - Arranjo típico de FEA Corrente Alternada.....	19
Figura 3 - Esquema simplificado FEA.....	19
Figura 4 - Classificação dos fornos elétricos a arco em função da potência nominal instalada por tonelada de aço.....	20
Figura 5 - Ciclos do processo de fusão.....	21
Figura 6 - Forno a arco no período de fusão.....	22
Figura 7 - Ciclos de fusão em uma corrida com dois carregamentos.....	24
Figura 8 - Balanço térmico de um forno elétrico de alta produtividade.....	26
Figura 9 - Balanço energético de um forno elétrico a arco.....	27
Figura 10 - Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco.....	28
Figura 11 - Circuito Elétrico do Forno.....	31
Figura 12 - Circuito equivalente e parâmetros elétricos.....	32
Figura 13 - Triângulo de Potência.....	35
Figura 14 - Banco de capacitores instalados em paralelo.....	35
Figura 15 - Forno elétrico a Arco.....	37
Figura 16 - Medidor de potência SIEMENS SIEMAS P – FEA.....	40
Figura 17 - Curvas de corrente por fase e energia consumida (corrida G952500).....	41
Figura 18 - Curvas de corrente por fase e energia consumida (corrida G964700).....	42
Figura 19 - Potência Ativa (Corrida com um carregamento).....	44
Figura 20 - Potência Ativa (Corrida com dois carregamentos).....	45
Figura 21 - Potência Ativa Aparente versus Fator de Potência (Ponto de medição da concessionária).....	46
Figura 22 - Fator de Potência- Forno elétrico a arco.....	47
Figura 23 - Fator de Potência - Forno Painel.....	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Produção de aço bruto por processo.	18
Tabela 2 - Energia teórica disponível nas reações de oxidação do Fe e do C.	26
Tabela 3 - Transformador de Forno - Trifásico.....	38
Tabela 4 - Dados das corridas.....	39
Tabela 6 - Tempo de forno ligado, produção e consumo de energia (Corridas com dois carregamentos).....	43
Tabela 7 - Tempo de forno ligado, produção e consumo de energia (Corridas com um carregamento).	43
Tabela 5 - Perdas elétricas por condução.	44

1. Introdução

Indústrias de todo mundo lutam para cortar seus custos e aumentar sua produtividade para competir em um mercado cada vez mais globalizado e dinâmico. A energia elétrica sempre foi e, continuará sendo, um dos principais custos presente na indústria de transformação. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia, o setor industrial é o maior consumidor de energia do país, respondendo por 33,9% de todo o consumo final. (AMBIENTE ENERGIA, 2015)

Determinadas indústrias, tais como siderurgia e metalurgia, necessitam de grandes quantidades de energia para seu funcionamento. Em uma aciaria elétrica, a transformação da sucata em aço líquido requer energia, que pode ser tanto elétrica, como de reações químicas. Precisamos saber de onde vem esta energia, como calculá-la, como otimizá-la, quanto necessitamos e onde podemos ter perdas.

A partir do desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias no processo, as siderúrgicas com aciaria elétrica vêm ganhando espaço como uma solução vantajosa, econômica e ambientalmente sustentável. Algumas das importantes vantagens do forno elétrico a arco são (SILVA, 2010):

- Alta eficiência energética.
- É um aparelho extremamente versátil.
- Produção de praticamente qualquer tipo de aço.
- Operação intermitente e mudanças rápidas na produção, em escalas de dezenas a centenas de toneladas.

O desenvolvimento tecnológico do forno elétrico a arco, FEA, pode ser medido em números. Durante a década de 1960 o consumo médio de energia para se produzir uma tonelada de aço era de 630kWh e o tempo necessário para se fundir um carregamento no forno girava em torno de 180 minutos. Hoje em dia, temos um consumo em torno de 300 kWh/t com a duração da corrida próxima dos 40 minutos.

O fato de serem equipamentos importantíssimos e muito utilizados na indústria de base não elimina o fato de que os fornos a arco, principalmente os de grande capacidade, afetam substancialmente a rede de transmissão elétrica e podem causar vários problemas de qualidade de energia como: harmônicos, flicker e flutuações de tensão.

1.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo estudar detalhadamente o funcionamento de um forno elétrico a arco, analisar as suas características gerais, ciclos de operação e eficiência energética. Serão buscados os parâmetros que mais impactam o consumo de energia elétrica por tonelada de aço produzida e estudados os diversos aspectos da operação, levando em consideração a confiabilidade e melhoria do processo.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar o estudo do funcionamento de um Forno Elétrico a Arco.
- Identificar as variáveis que influenciam diretamente no consumo final de energia elétrica do FEA.
- Através das análises dos dados, propor soluções e melhorias no processo.
- Fazer uma análise do fator de potência e sua correção para sistemas elétricos de um forno a arco.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. O Processo Siderúrgico

O ferro, extraído da natureza sob a forma de minério de ferro, é um elemento abundante na crosta terrestre e seu uso teve início na Ásia, cerca de 2000 a.C. O aço, liga metálica, formada principalmente por ferro e carbono, distingue-se do ferro fundido por possuir um baixo teor de carbono, entre 0,008% e 2,0%. Este possui resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão, tem boa condutividade térmica, maleabilidade e elasticidade. Tais características possibilitam um uso muito variado e permitem a produção de excelentes materiais e produtos para transformação. Assim, o aço é a mais importante liga metálica em utilização no mundo. (CHIAVERINI, 1986)

O aço possui um processo de produção que pode ser dividido em quatro etapas: preparação de carga, redução, refino e laminação. Na preparação de carga as matérias-primas, minério de ferro e carvão, são acondicionados e processados para um melhor aproveitamento no alto forno. O minério de ferro passa por um processo de sinterização e pelotização, já o carvão é destilado e transformado em coque. No processo de redução, as matérias-primas, já devidamente preparadas, são carregadas no alto forno, o carvão em contato com o oxigênio produz calor e funde a carga metálica dando início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido, ferro gusa. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2011)

Na etapa de refino, o gusa líquido ou sólido proveniente do processo de redução é utilizado junto com a sucata metálica na aciaria para produzir o aço, parte do carbono contido no ferro e outras impurezas são removidas em fornos a oxigênio ou elétricos. Por fim, a quarta e última parte do processo clássico de fabricação do aço é a laminação. Os lingotes, semiacabados e blocos provenientes da aciaria são deformados mecanicamente por equipamentos chamados laminadores e transformados em produto final, são utilizados na indústria de transformação e construção civil. Dentre os produtos finais da produção de aço podemos citar: vergalhões, bobinas, arames, perfilados, barras e pregos. (FELÍCIO, 2012)

As três fases básicas de operação, conforme podemos ver na Figura 1, caracterizam o processo produtivo de uma usina siderúrgica integrada.

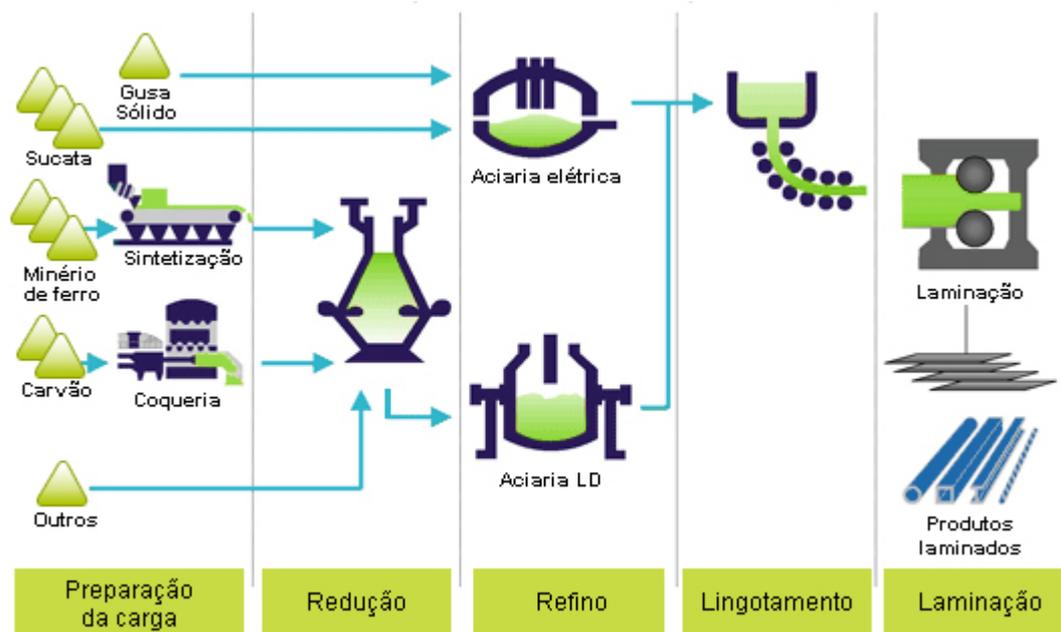


Figura 1 - Fluxo simplificado de produção do aço.

2.2. Um resumo da história do Forno Elétrico a Arco

No início do século XIX, uma série de experimentos foram realizados com o objetivo de empregar o arco elétrico no derretimento do ferro. Sir Humphry Davy conduziu demonstrações experimentais em 1810 e nos anos seguintes diversos cientistas se propuseram a desenvolver e implementar um forno elétrico a arco, porém sem sucesso. Foi somente no ano de 1906 que Paul Héroult, cientista francês, desenvolveu o primeiro forno elétrico a arco comercial que foi instalado nos Estados Unidos. Nos anos seguintes a “Siderúrgica Elétrica” começou a ser amplamente utilizada sendo que após a segunda guerra mundial a mesma se tornou altamente competitiva devido à grande disponibilidade de matéria-prima. (SARNA, 2016)

A produção mundial de aço ainda é dominada pela tradicional aciaria LD, porém os fornos elétricos a arco contam com uma participação maior a cada ano. Atualmente, cerca de um quarto do aço no mundo e mais de metade da produção nos Estados Unidos utiliza o forno elétrico a arco como fonte primária de transformação. Podemos ver na Tabela 1 a produção de aço bruto por processo e região.

Tabela 1 – Produção de aço bruto por processo.

	Milhões de toneladas	Oxigênio (%)	FEA (%)	Siemens-Martin (%)	Outros (%)	Total (%)
União Europeia	162	60,3	39,7			100
Europa (outros)	37,7	35,3	64,7			100
CIS	102,4	67,3	26	6,7		100
NAFTA	109,9	34	65,6			100
América Latina	40,9	67,5	31,3		1,2	100
África	13,1	38,5	61,4		0	100
Oriente Médio	31,5	6,9	93,1			100
Ásia	1125	84,6	15,4			100
Oceania	5,9	75,7	24,3			100
Total	1628,3	74,3	25,3	0,4	0	100

Fonte: World Steel Association

No Brasil foi durante a década de 40 que os primeiros fornos elétricos a arco foram instalados sendo atualmente responsáveis por 21,1% da produção nacional. (World Steel in Figures , 2017)

Nos últimos anos, melhorias no processo, implementação de novas técnicas como painéis refrigerados, sistemas de exaustão de fumos, vazamento sem escória e a utilização de refino secundário estão sendo feitos visando uma maior produtividade e qualidade do produto final. (CÂNDIDO, 2008)

A partir dos anos 70 houve um considerável crescimento do uso de Fornos Elétricos a Arco, na produção de aço. Muitos fatores foram responsáveis para esse crescimento, sendo que estes estão diretamente relacionados ao ganho ambiental, custo e produtividade. Pode-se, assim, compreender a importância desse equipamento no desenvolvimento mundial da Siderurgia.

2.3. O forno elétrico a arco

2.3.1. Introdução

Um forno elétrico de corrente alternada é constituído basicamente de uma carcaça metálica refrigerada, três eletrodos de grafite, abóboda, soleira e bica de vazamento protegidas por materiais refratários, sistema de basculamento e elevação. O arranjo típico de um FEA pode ser visto na Figura 2. (CÂNDIDO, 2008)

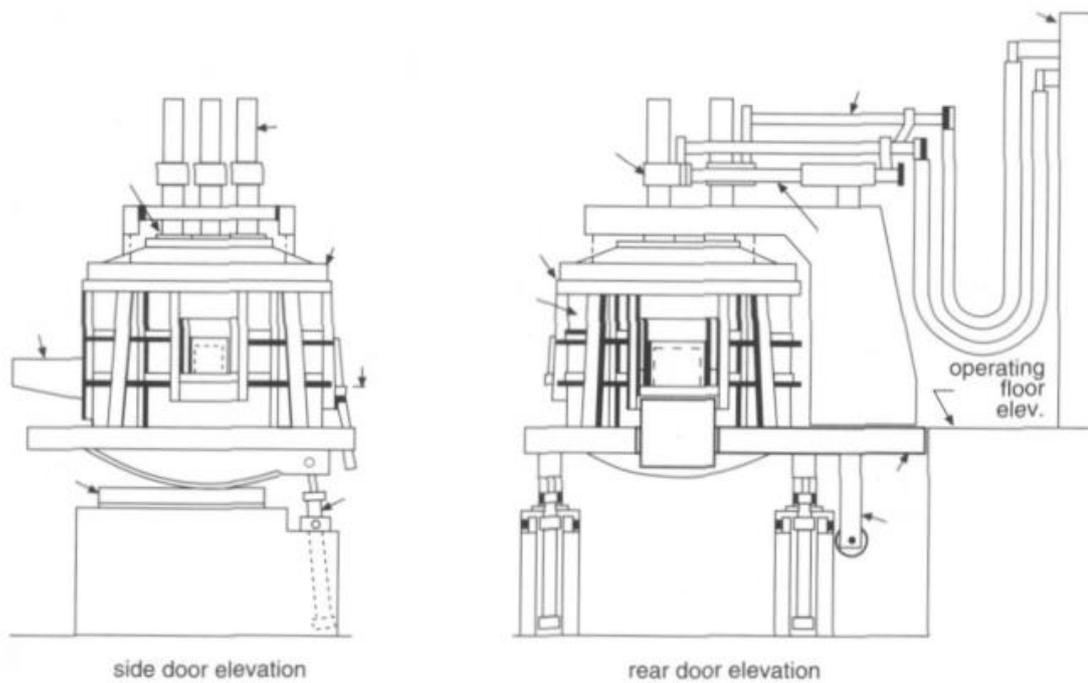


Figura 2 - Arranjo típico de FEA Corrente Alternada.

A Figura 3 reproduz um esquema simplificado do interior do forno onde podemos ver os seus principais componentes.

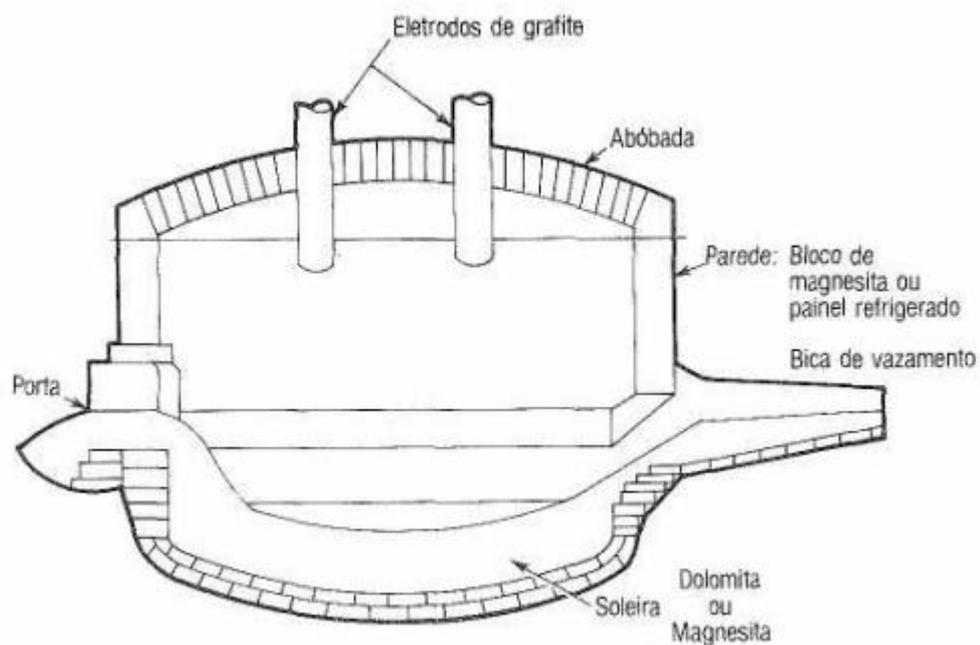


Figura 3 - Esquema simplificado FEA.

A classificação dos fornos elétricos a arco é feita, primordialmente, em função da potência nominal instalada por tonelada de aço (Figura 4), quanto maior é a potência instalada mais rápida é a corrida e conseqüentemente a produção, no entanto, a alta potência da energia irradiada pelo arco acelera o desgaste nas paredes internas compostas por painéis refrigerados e refratários. (CÂNDIDO, 2008)

Potencia Específica (KVA/t)	Classificação
<200	Baixa Potencia
200 - 400	Média Potencia
400 - 700	Alta Potencia
>700	Ultra Alta Potencia (UHP)

Figura 4 - Classificação dos fornos elétricos a arco em função da potência nominal instalada por tonelada de aço.

2.3.2. Operação do forno a arco

Segundo (RIES, 2001) o processo de produção do aço é composto, basicamente, pelas seguintes fases:

- Fusão
- Refino
- Solidificação

A operação de um forno elétrico a arco engloba as fases de fusão e refino do aço, e tal processo segue uma sequência de cinco etapas: carregamento, fusão, adição, remoção da escória e vazamento. No carregamento, antes do início da fusão, um cesto é carregado com sucata proveniente do pátio de metálicos e cuidadosamente transportado por uma ponte rolante e descarregado no interior do forno. Após o carregamento da sucata o teto do forno se fecha e os eletrodos de grafite são posicionados até a carga metálica, a energia elétrica é então acionada e transformada em calor através dos arcos que se formam entre os eletrodos e a carga sólida. Durante o processo de fusão, o banho líquido passa a ocupar um espaço menor no interior do forno, com um maior volume disponível um segundo carregamento é feito e o processo se

reinicia. O ciclo de operação e a movimentação dos eletrodos durante o processo de fusão podem ser vistos na Figura 5.

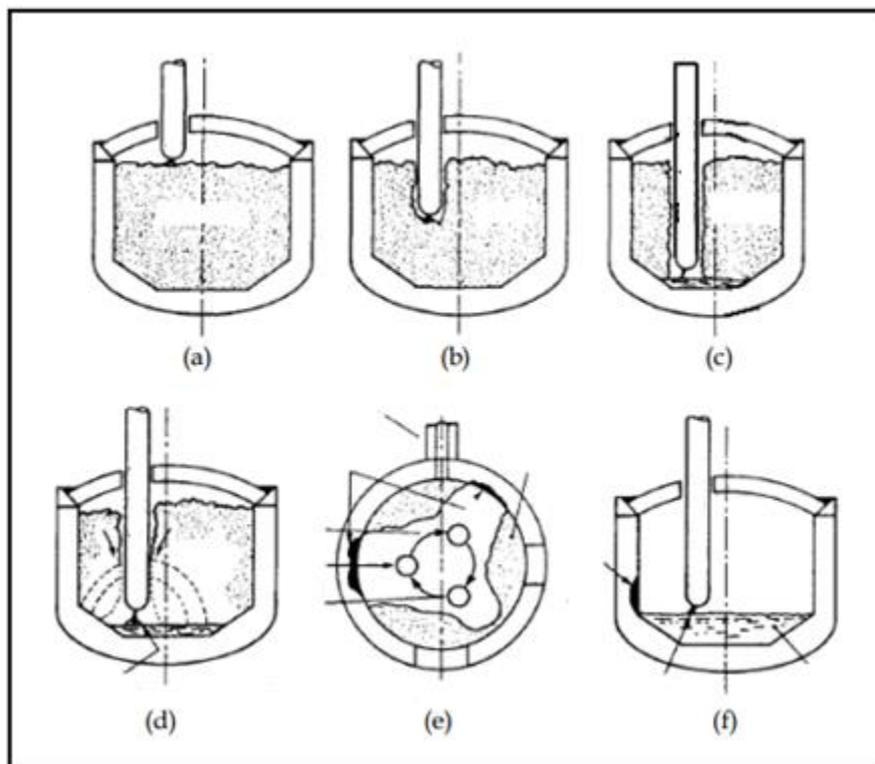


Figura 5 - Ciclos do processo de fusão.

Cada imagem na Figura 5, acima, representa uma etapa no ciclo de operação, onde ocorre:

- a) Período de ignição do arco e início do fornecimento de energia.
- b) Início da perfuração do eletrodo na carga metálica.
- c) Período de formação do metal fundido.
- d) Fusão principal.
- e) Finalização do período de fusão da sucata.
- f) Refino.

Os eletrodos são inicialmente colocados em uma posição logo acima da carga metálica, e então a corrente é acionada, com potência muito reduzida a fim de melhorar a estabilidade do arco e proteger o miolo da abóboda. Através do arco elétrico e da transferência de energia o

eletrodo perfura a sucata, funde a matéria sólida e o líquido resultante começa a depositar-se na parte inferior do forno. Durante esse processo a própria sucata protege as paredes internas e auxilia na prevenção do desgaste causado pela alta energia transferida do arco para a estrutura do forno. O tempo de perfuração é de aproximadamente 2 minutos, nesse período os arcos provenientes dos três eletrodos possuem comprimentos e direções variados, gerando elevadas cintilações “flicker” e distorções harmônicas. Sendo assim, a redução da potência nas fases iniciais minimiza estes efeitos. (HORIA ANDREI, 2011)

Com o banho líquido formado na etapa de perfuração o período de fusão, propriamente dito, inicia-se. Utiliza-se, então, a potência máxima do forno e o arco adquire uma melhor estabilidade. A sucata lateral remanescente passa a ser fundida através da energia irradiante do arco. O que ocorre, no entanto, é que um grande volume de sucata permanece amontado e demanda um tempo muito grande para ser derretida, conforme Figura 6. (RIES, 2001)

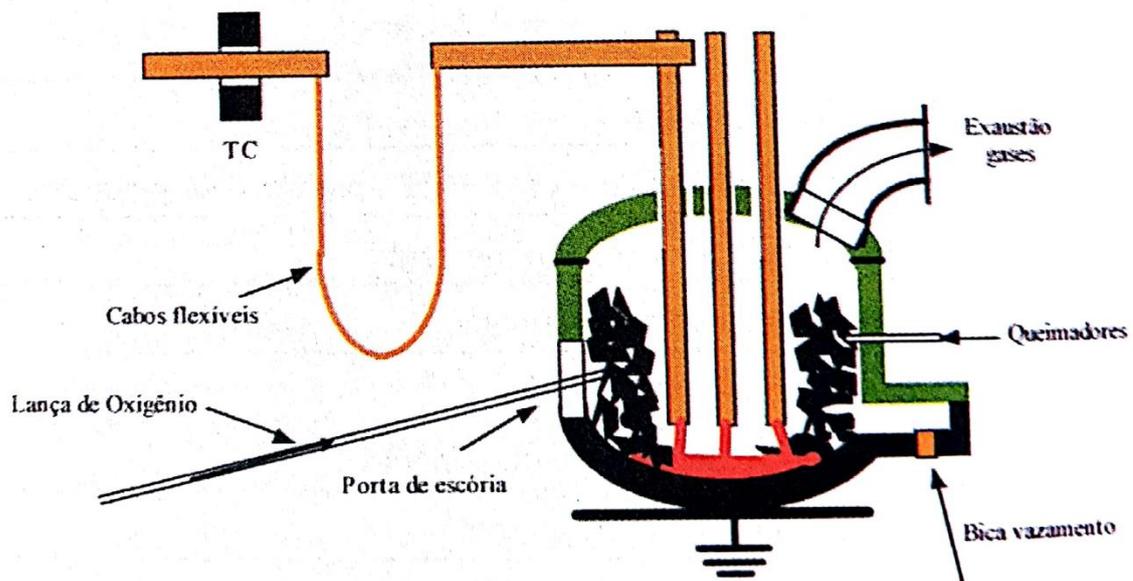


Figura 6 - Forno a arco no período de fusão.

Para auxiliar a movimentação da sucata lateral é normalmente feita uma injeção de oxigênio realizando uma operação de oxi-corte. À medida que a sucata vai se deslocando para a base do forno as paredes laterais passam a ficar expostas às radiações dos arcos. No final da fusão do último carregamento é novamente iniciada a injeção de oxigênio. Esse processo é uma importante fonte de energia, que minimiza a absorção de nitrogênio e permite também a formação da escória espumante que melhora a transferência de calor do arco para a sucata, reduz o desgaste de refratários e o consumo de eletrodos. (JONES, 1997) O final da fusão

também acompanha uma redução da tensão e potência do arco. Inicia-se, então, a primeira fase do refino (Figura 5 (f)).

2.3.3. Potência específica do forno

Um dos principais parâmetros de dimensionamento de um forno elétrico a arco é a sua potência instalada. Essa potência é determinada com base na capacidade volumétrica do forno e velocidade de produção. Os fornos podem ser classificados, então, de acordo com sua potência máxima por tonelada da corrida (kW/t) conforme visto anteriormente na Figura 4. É comum se pensar que quanto maior a potência instalada mais rápida é a produção e mais eficiente é o forno e existe, a princípio, um grande interesse em se ter um forno com alta potência. No entanto, correntes de arco muito elevadas proporcionam, também, um maior consumo de eletrodos e desgaste dos refratários e painéis refrigerados. É recomendável, portando, realizar um estudo detalhado antes de se determinar a potência e os modelos de operação em um FEA.

Os ciclos do processo de fusão em um forno a arco com dois carregamentos, processo que se denomina “corrida” pode ser visto na Figura 7, onde:

- P1: Potência no período de penetração dos eletrodos na sucata.
- P2: Potência na fase de refino, aquecimento do banho líquido até atingir a temperatura de vazamento.
- P3: Potência máxima solicitada pelo forno, ocorre na fusão.
- $P_{méd}$: Potência média solicitada pelo forno.

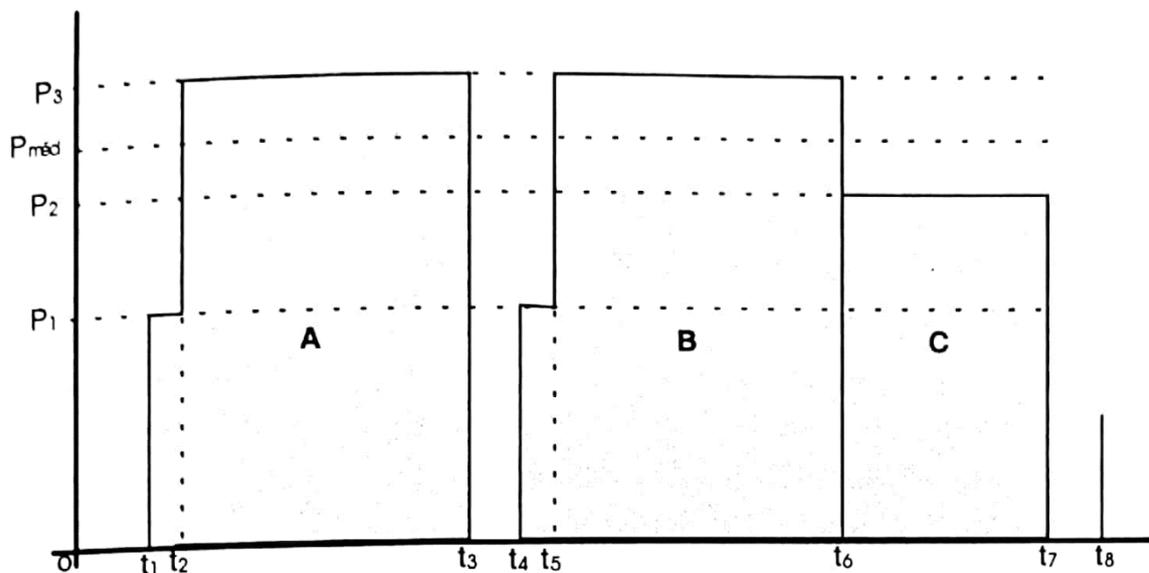


Figura 7 - Ciclos de fusão em uma corrida com dois carregamentos.

Uma corrida consiste no período de tempo entre o início da preparação do forno e o primeiro carregamento até o vazamento. Existem períodos de tempos em que o forno está solicitando energia e outros em que está desligado. O tempo total em que o forno está solicitando energia da rede é denominado de tempo de “power on” e o tempo em que o forno está desligado é denominado de “power off”. O tempo total de uma corrida, comumente chamado de “tap to tap”, é simplesmente a soma dos tempos de power on e power off.

Para aumentar a eficiência do forno sempre se busca minimizar os tempos mortos, a preparação de carga e o segundo carregamento devem ser feitos no menor período de tempo possível, de 2 a 5 minutos.

O intervalo entre t_2 e t_1 representa o primeiro estágio, perfuração do eletrodo na carga metálica do primeiro carregamento, como se pode ver na Figura 7. A potência entregue pelo forno é cerca da metade da potência utilizada nas fases de fusão. O período de fusão em si acontece no intervalo entre t_3 e t_2 .

O segundo carregamento apresenta períodos de operação semelhantes ao primeiro, sendo seguido pela etapa de refino, entre t_7 e t_6 . Na etapa de refino o banho líquido é aquecido até uma temperatura de vazamento que varia entre os 1550 e os 1650 graus Celsius.

2.3.4. Potência média durante a corrida

No diagrama mostrado na Figura 7 notamos valores muito constantes de potência. Na realidade, ela varia significativamente devido à instabilidade do arco. Para dimensionar a energia elétrica entregue durante o processo utilizamos a potência máxima solicitada pelo forno e a potência média durante o “power on”. Para isso necessitamos do conceito do “fator de demanda da corrida **fd**” definido pela expressão:

$$fd = \text{Potência Média} / \text{Potência na fusão} \quad (1)$$

Pode-se observar que durante a corrida são aplicados diversos níveis de potência, onde a potência média é obtida pela divisão da energia elétrica consumida na corrida e o tempo de forno ligado:

$$Pm = \text{Energia por corrida} / \text{Energia no forno ligado} \quad (2)$$

Os fatores que afetam diretamente o fator de demanda da corrida são o tempo de refino, a potência do forno que é reduzida para proteger as paredes do forno, e o número de carregamentos, mais período de perfuração. Quando a operação no forno estiver ocorrendo normalmente, o fator **fd** pode servir como fator de desempenho, quanto maior for este fator, a relação de potência por tempo, melhor será o aproveitamento da potência instalada no forno.

2.3.5. O fator de utilização

Um indicador muito utilizado para mensurar a eficiência na operação do forno a arco é o fator de utilização, ele relaciona o tempo útil de produção e o tempo programado para produção, isto é:

$$u \% = \frac{Tu}{Tp} \quad (3)$$

O tempo de utilização “Tp” é a soma do tempo útil mais o tempo das interrupções não previsíveis. O tempo útil “Tu” é o tempo gasto na produção, operando conforme um ritmo de produção padrão previamente definido. É impossível obter um fator de utilização igual a “1”,

pois sempre irão ocorrer interrupções imprevisíveis no processo. Estas paradas quebram o ritmo de produção e muitas vezes é necessário injetar uma potência maior do que a potência padronizada, a fim de reduzir o tempo das corridas.

2.3.6. Balanço energético

A produção de aço carbono em um forno elétrico utiliza diferentes fontes de energia, sendo estas divididas em energia elétrica e química. A energia elétrica, que é utilizada no forno, entra através da rede de alimentação e é o resultado entre a energia fornecida menos as perdas elétricas do sistema. A energia proveniente das reações químicas, Tabela 2, é a resultante das reações de oxidação de elementos como carbono, ferro, magnésio, silício e da queima de gás natural em conjunto com queimadores de oxi-combustível. (JONES, 1997) Os gráficos da Figura 8 apresentam o balanço térmico de um forno elétrico de alta produtividade com aproveitamento das reações químicas.

Tabela 2 - Energia teórica disponível nas reações de oxidação do Fe e do C.

$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}$	6,0 kWh/Nm ³ de O ₂
$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$	2,8 kWh/Nm ³ de O

Fonte: (SILVA, 2010)

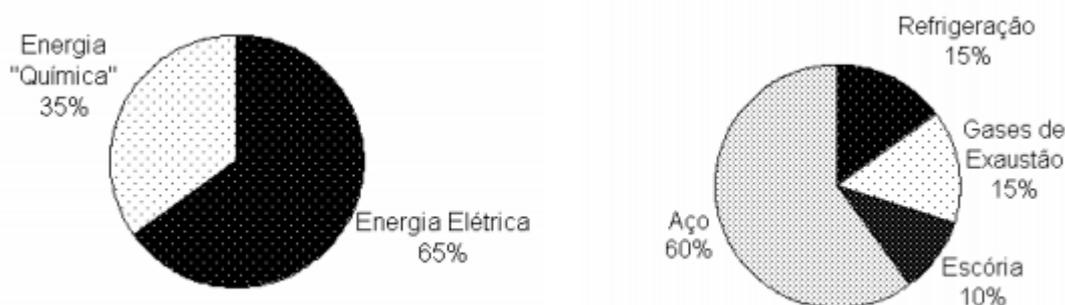


Figura 8 - Balanço térmico de um forno elétrico de alta produtividade.

Conforme (RIES, 2001), o diagrama da Figura 9 mostra um típico balanço de energia em um FEA utilizando principalmente sucata e cerca de 10% de gusa. A energia que é efetivamente utilizada na fusão do aço líquido é de 390 kWh/t para um vazamento a uma temperatura de 1620°C. O restante da energia é perdida, principalmente pelos gases de exaustão,

sistema de despoejamento e refrigeração, formação de escória além de outros fatores. As perdas por meio do sistema de refrigeração se dão por meio da água que circula nos cabos, nos painéis e na abóboda.

A escória formada no processo metalúrgico é o resultado de impurezas existentes na sucata e é composta de calcário e óxidos provenientes das reações exotérmicas. A entalpia da escória é cerca de duas a três vezes maior que a do aço, motivo pelo qual as perdas são elevadas. (RIES, 2001)

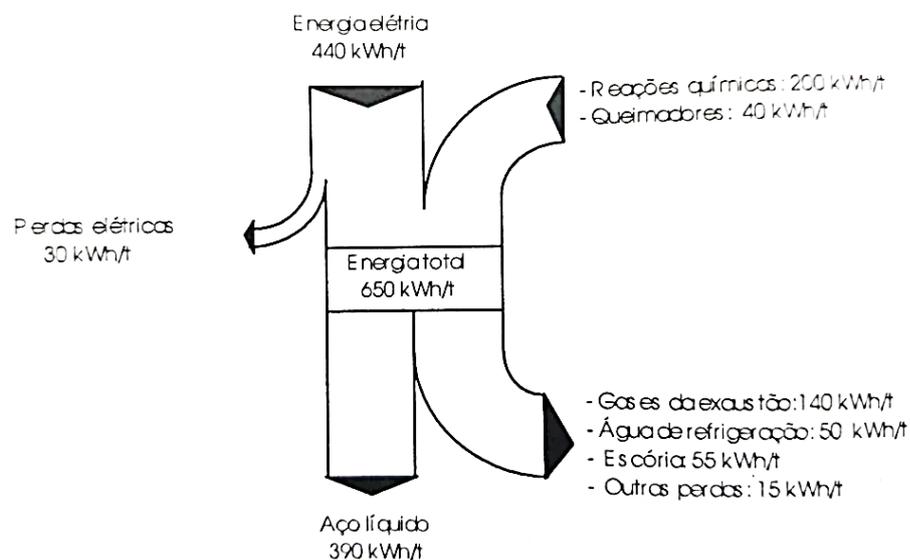


Figura 9 - Balanço energético de um forno elétrico a arco.

Aumentar o rendimento energético do forno é um benefício que todas as usinas siderúrgicas buscam. Novas tecnologias vão surgindo e novos processos são implementados visando atingir este objetivo.

2.4. Sistema Elétrico

2.4.1. Introdução

Os fornos elétricos a arco operam com uma demanda extremamente variável, principalmente durante o processo de fusão. É comum e recomendado que se tenha uma alimentação exclusiva para o FEA desde o Ponto Comum de Consumo, PCC, onde deverá existir uma potência de curto circuito compatível com as potências instaladas de modo a não

perturbar outros consumidores. (RIES, 2001) A configuração típica de alimentação e ligação de um forno elétrico a arco trifásico é representada na Figura 10.

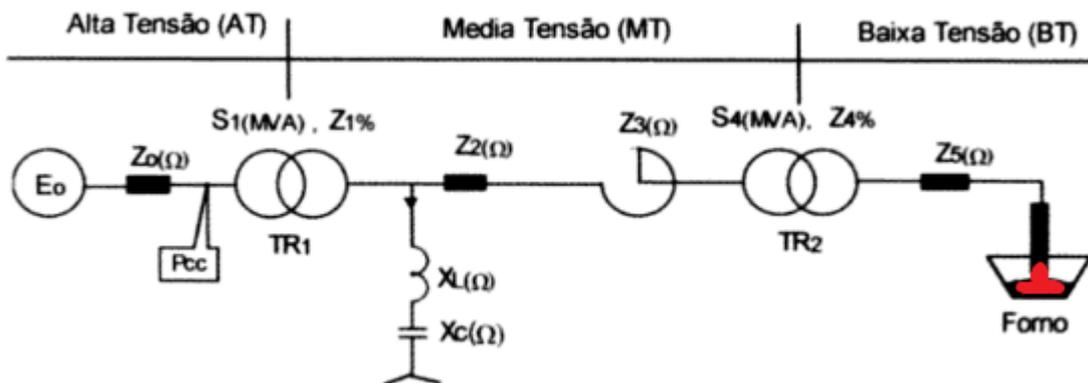


Figura 10 - Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco.

Tendo como base o diagrama unifilar acima, podemos identificar os principais componentes do sistema:

- E_0 e Z_0 : Fonte de tensão e sua impedância interna no Ponto Comum de Consumo.
- S_1 e Z_1 : Potência aparente e impedância de curto circuito do transformador abaixador de tensão TR1.
- Z_2 : Impedância da linha de transmissão entre a subestação principal e a subestação de alimentação do forno a arco.
- Z_3 : Impedância do reator série destinado a complementar 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 abaixador de tensão TR2.
- Z_5 : Impedância de todos os condutores que vão do secundário do transformador até o arco.
- X_C : Reatância total do banco de capacitores para a correção do fator de potência.
- X_L : Reatância da bobina dos filtros de harmônicos.

As subestações das usinas siderúrgicas com aciarias elétricas são geralmente supridas por alimentadores de alta tensão, iguais ou maiores que 138kV. As tensões para alimentação do arco, no entanto, giram em torno de 1.200 volts, entre fases, sendo normais os valores entre 400 a 1.000 volts. O uso de tensões intermediárias, tipicamente 13,8 kV, 23kV e 33kV, é utilizado

como medida de segurança e economia para a instalação de disjuntores de operação do forno, dos reatores e dos bancos de capacitores. Assim sendo, na subestação de entrada da usina, um ou mais transformadores abaixam a tensão do alimentador da planta para a tensão intermediária e outro transformador, próximo ao forno, abaixa a tensão para valores apropriados de alimentação do arco. (RIES, 2001)

Os bancos de capacitores para a correção do fator de potência e filtros de harmônicos também estão geralmente localizados na subestação de entrada da usina e interligados no barramento de média tensão do circuito do forno. Deste barramento origina-se o alimentador do reator série, o mesmo deve ser utilizado apenas quando a reatância do circuito do forno, para a condição necessária de tensão e corrente, é insuficiente para reduzir o fator de potência até valores que permitam a estabilização do arco no início da fusão. (HORIA ANDREI, 2011)

2.4.2. O Arco Elétrico

O arco elétrico é uma descarga elétrica na mistura de gases e vapores que compõem a atmosfera do forno e fornece uma coluna plasmática de grande intensidade luminosa entre dois pontos, um na extremidade do eletrodo e outro na superfície de incidência do arco no metal. Em fornos de corrente alternada a polaridade desses pontos trocam de posição a cada meio ciclo da tensão da rede. Estima-se que a energia liberada de um arco elétrico seja de aproximadamente 30kW/cm^3 , com a temperatura dentro do forno variando entre 10.000°C a 18.000°C . A transferência de energia se faz mediante a radiação do arco que é resultante da chama do arco é refletida desde as paredes até a abóboda do forno, radiação do extremo dos eletrodos e dissipação da energia elétrica na interfase arco versus metal. (RIES, 2001)

A carga metálica é fundida, principalmente, pela energia irradiante do arco. A eficácia da transferência da energia proveniente do arco, e como consequência, o rendimento elétrico do FEA varia entre 75% e 95% durante a fusão e em condições de banho calmo, refino, entre 30% e 60%.

Ao longo da coluna do arco a distribuição de energia se faz praticamente constante e da ordem de 12V/cm , resultando: assim, que sendo (l_a) o comprimento do arco e V_a a tensão de arco.

$$V_a = 12l_a + 40 \text{ (volts)} \quad (4)$$

$$la = \frac{V_a - 40}{12} cm \quad (5)$$

Sendo a expressão 4 a queda de tensão no arco e a expressão 5 o comprimento do mesmo.

2.4.3. Estabilidade do arco

A resistência do arco dado por $R = V_{\text{arc}}/I$ não é um parâmetro linear. Um aumento da corrente do arco produz uma redução percentual muito maior na resistência. A corrente de arco, ajustando-se conforme a queda de tensão, cresce a um valor de curto circuito a partir de certo ponto e se extinguirá instantaneamente. Em resumo, num circuito onde só existe resistência de arco é impossível controlar este arco e o sistema é completamente instável, para que seja possível controlar a corrente de um arco é necessário que se associe a esta resistência uma reatância positiva (reator em série).

Verificamos assim que, à medida que a reatância varia, a corrente varia de forma inversamente proporcional. Nos casos dos fornos de grande capacidade, o mesmo deveria trabalhar com correntes bastante altas para atingir o regime de estabilidade, porém estas correntes para o regime estável podem ser tão altas que ultrapassam as características nominais do transformador do forno, eletrodos, cabos e etc., sendo, portanto, necessário adicionar reatores com intuito de aumentar a reatância indutiva para uma operação ideal. (RIES, 2001)

2.4.4. Circuito Elétrico do Forno

O circuito elétrico do forno começa nos terminais de baixa tensão do transformador e é ilustrado na Figura 11.

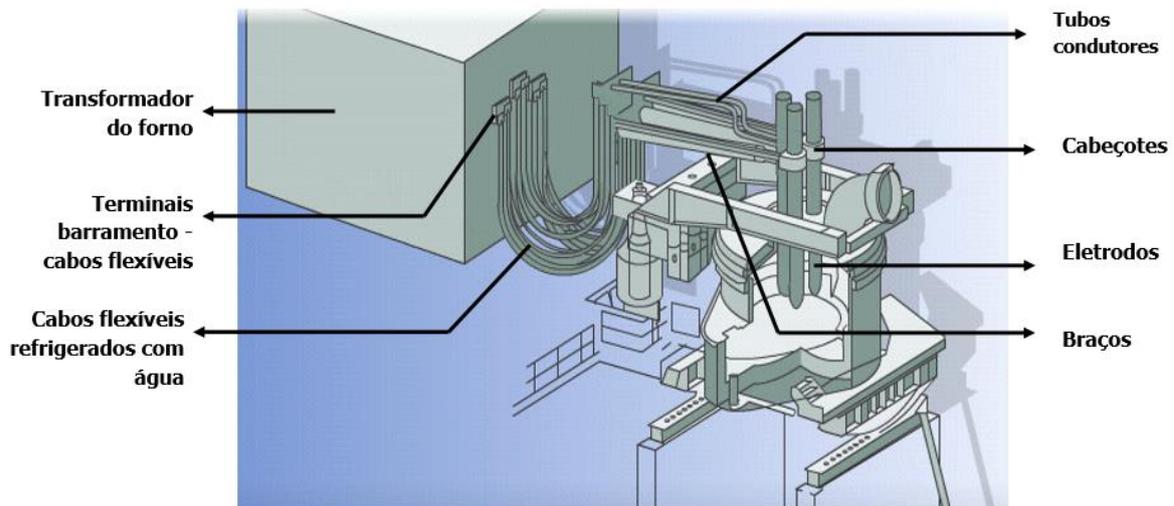


Figura 11 - Circuito Elétrico do Forno.

O barramento é uma conexão curta, realizada com barras ou tubos refrigerados por ar ou água, entre os terminais de baixa tensão do transformador e os cabos flexíveis do forno. Os condutores e cabos sobre os braços do forno também são refrigerados a água. O objetivo do circuito é transportar a corrente do transformador para os extremos dos eletrodos para, assim, produzir o arco elétrico. Tais condutores devem ser dimensionados para suportar as altas correntes demandadas por fornos de alta potência, que em geral, variam entre 30kA e 65kA. (JACCARD, 2009)

O circuito possui uma certa resistência de perdas e reatância indutiva. A resistência, que define as perdas elétricas do forno, varia de 0,35 m Ω para fornos de grande tamanho a 0,7 m Ω para fornos de baixa capacidade. Os valores típicos de reatância do forno são: 3m Ω para 50Hz, e 3,6m Ω para 60Hz, a reatância do forno se soma às reatâncias do circuito de alimentação primário. (RIES, 2001)

2.4.5. Potência ativa, corrente e tensão de arco

Para se calcular o desempenho de um forno elétrico a arco necessitamos da tensão de arco, corrente e reatância, o circuito equivalente com os respectivos parâmetros elétricos estão representados na Figura 12.

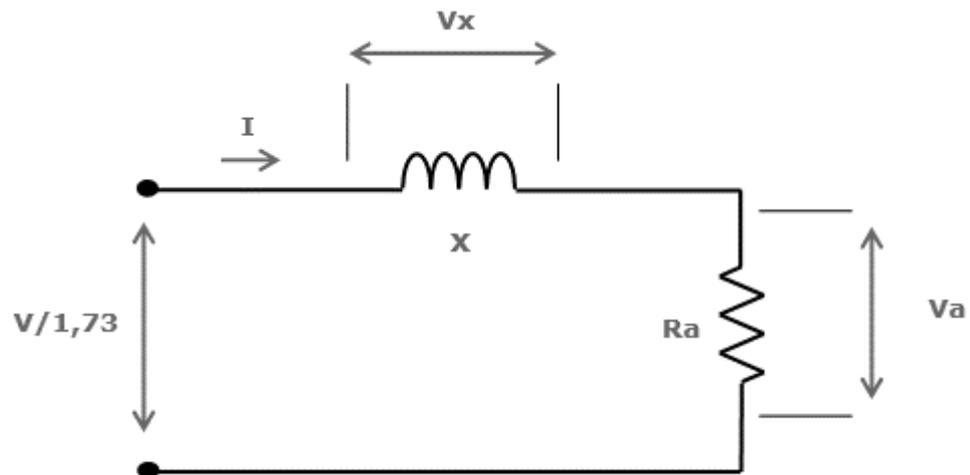


Figura 12 - Circuito equivalente e parâmetros elétricos.

A potência do arco é sempre dada pelo produto da tensão do arco e da corrente. As equações que representam a potência em fornos elétricos trifásicos (três eletrodos) e tensão do arco são definidas abaixo. (JACCARD, 2009)

$$\text{Tensão do Arco} = V_a = \frac{V \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$P \text{ (kW)} = 3 \cdot V_a \cdot I \quad (7)$$

Onde V é a tensão de alimentação entre fases e $\cos(\theta)$ é o fator de potência de operação. Para uma determinada tensão entre fases, o ângulo θ dependerá da intensidade da corrente e da reatância do circuito. Isto está representado na equação (9) a seguir. (JACCARD, 2009)

$$\text{seno}(\theta) = \frac{I \cdot X \cdot \sqrt{3}}{V} \quad (8)$$

Para se controlar o tamanho do arco é necessário que se controle a posição dos eletrodos através de um regulador de movimentos. A corrente é diretamente relacionada ao comprimento do arco, quanto mais próximo os eletrodos estiverem da carga metálica menor será o comprimento do arco e conseqüentemente maior será a corrente. O regulador de movimento

tem a função de posicionar os eletrodos para que se atinja a corrente determinada pelo programa de fusão. (RIES, 2001)

2.4.6. Reatância Operacional

O forno elétrico opera, durante várias fases da operação, em condições instáveis e, em certos momentos, o eletrodo se afasta da sucata e em outros chega a tocá-la. O resultado destas mudanças bruscas na operação é o surgimento de correntes harmônicas que conseqüentemente alteram a reatância do circuito. Verifica-se que na prática o valor da reatância operacional depende do fator de potência, aumentando de forma exponencial com o aumento do mesmo. Concluímos, portanto, que dois fatores afetam diretamente na reatância do circuito, são estes: o fator de potência e o estágio da operação (penetração, fusão ou refino). (JACCARD, 2009)

A reatância operacional é o produto da multiplicação entre a reatância real e uma variável chamada de fator reatância operacional, F_{op} . O fator F_{op} para correção da reatância é dado em função do fator de potência real e do estágio de fusão.

$$X_{op} = F_{op} \cdot X \quad (9)$$

Os parâmetros de operação são calculados utilizando as fórmulas anteriores, corrigindo a reatância real pelo fator F_{op} e relacionando entre si tensão, corrente, fator de potência, potência real, reativa e aparente.

2.4.7. Perdas Elétricas

As perdas por condução representam a maior parte das perdas geradas no sistema elétrico de um forno elétrico a arco. A resistência elétrica, presente nos condutores, cabos flexíveis e barramentos de alimentação do forno, produz energia térmica através da corrente que circula no sistema, a potência das perdas por condução é dada conforme a seguinte equação.

$$P = R \cdot I^2 \quad (10)$$

A resistência do forno varia entre 0,35 m Ω , para fornos de grande capacidade e 0,7 m Ω para pequenos fornos. Além das perdas por condução existem, nos transformadores, outras perdas que impactam no rendimento elétrico do sistema, são elas: perdas devido a histerese e corrente parasitas. Tais perdas são da ordem de 1% da potência nominal. (JACCARD, 2009)

2.4.8. Consumo de Energia Elétrica

O consumo de energia necessário para produzir uma tonelada de aço, a partir de sucata, em fornos de fusão, varia de 550 kWh a 620 kWh dependendo da capacidade do forno. Deste total, conforme vimos anteriormente, 390 kWh correspondem a energia líquida necessária para se fundir o aço e elevar a temperatura do material para um ponto ideal de vazamento de aproximadamente 1620°C. (RIES, 2001)

O rendimento térmico dos fornos não vem apresentando uma melhora significativa nos últimos tempos. Isso se deve às maiores perdas térmicas causadas pelos sistemas de refrigeração e vazamento de escória que estão mais eficientes. No entanto, apesar do rendimento térmico mais baixo, as melhorias dos sistemas auxiliares possibilitaram o aumento das potências elétricas e químicas, reduzindo o tempo das corridas e conseqüentemente aumentando a produtividade. (RIES, 2001)

Quando falamos no consumo de energia do forno, os parâmetros elétricos de operação e a posição dos reguladores de eletrodos não influenciam consideravelmente. A energia necessária para se produzir uma tonelada de aço depende, em ordem de relevância: do tipo de carga, do tamanho do forno, dos tempos de forno parado e ligado, das perdas térmicas nas refrigerações, da temperatura de vazamento, do rendimento metálico do aço e das perdas elétricas nos condutores. Este último item é o único fator que tem alguma relação com a operação elétrica do forno. (JACCARD, 2009)

2.4.9. Fator de Potência e Correção do Fator de Potência

O fator de potência, FP, pode ser definido pela razão entre o componente ativo da potência e o valor total desta mesma potência, ou seja:

$$FP = \frac{P(W)}{S(VA)} = \cos(\theta) = \cos(\arctg(\frac{Q(VAr)}{P(W)})) \quad (11)$$

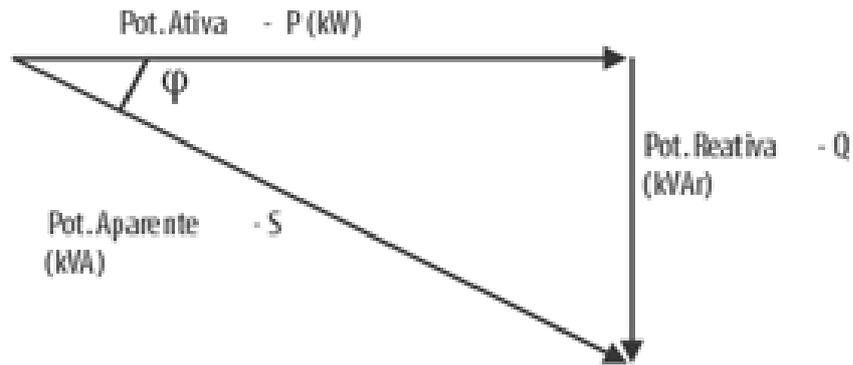


Figura 13 - Triângulo de Potência.

A potência reativa que o forno injeta na rede elétrica deve ser reduzida para possibilitar que uma maior entrega de potência ativa, sem aquecimento excessivo dos condutores e grandes perdas térmicas. É possível também evitar, com a correção do fator de potência, outros problemas, como quedas de tensão e baixa utilização da potência instalada.

Para se corrigir o fator de potência em uma carga de grande demanda, como é o FEA, é necessário instalar banco de capacitores em paralelo com a carga para que haja uma compensação da energia indutiva do forno, Figura 14. (JACCARD, 2009)

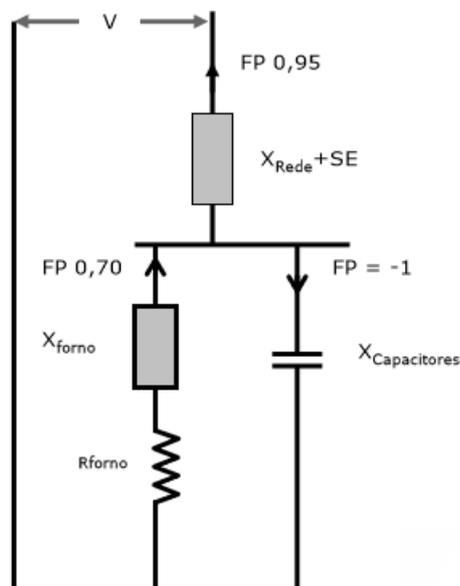


Figura 14 - Banco de capacitores instalados em paralelo.

Existem diversas vantagens da correção do fator de potência, tanto para a concessionária quanto para o consumidor. (ANICETO, 2016) Dentre os benefícios mais relevantes, podemos citar:

- Redução da corrente reativa na rede elétrica;
- Aumento da eficiência energética;
- Aumento da vida útil dos equipamentos e instalações;
- Evita as perdas por efeito Joule;
- Aumenta a capacidade do sistema de transmissão e distribuição para conduzir o bloco de potência ativa;
- Diminui os custos de geração.

3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução

Para a realização deste trabalho foram coletados dados pertencentes à uma usina siderúrgica de grande porte nacional. Atualmente a planta opera com uma capacidade de 1 milhão de toneladas/ano produzindo laminados longos e trefilados. Sua estrutura é dividida em várias gerências sendo estas: Altos Fornos, Aciaria, Laminação e Trefilaria.

O objeto de estudo deste trabalho é o Forno Elétrico a Arco, Figura 15, que se encontra localizado na aciaria. Esse forno opera com uma capacidade de 120 toneladas por corrida, tendo uma produtividade de 170 toneladas/hora e trabalhando com uma potência média ativa operação de 51 MW.



Figura 15 - Forno elétrico a Arco.

3.2. Descrição dos Materiais e Equipamentos Utilizados

3.2.1. Transformadores

O suprimento de energia da usina é feito através de duas linhas de transmissão, uma exclusiva para o barramento do FEA, Forno Panela e SVC, e outra linha para as outras cargas. O ponto comum de acoplamento possui uma capacidade de corrente de curto circuito de 1667 MVA, tensão de 138 kV e frequência de 60 Hz. O transformador abaixador da subestação principal possui uma potência nominal de 60 MVA e opera com uma relação de entrada e saída de tensão de 138/22kV.

O transformador trifásico da marca ABB ASEA alimenta o forno elétrico e é usado exclusivamente para este fim, ele se encontra localizado na aciaria, junto ao prédio da cabine de comando do forno. Na Tabela 3, pode-se ver as principais especificações técnicas do transformador presentes na placa de identificação do aparelho.

Tabela 3 - Transformador de Forno - Trifásico

Potência Nominal	48 MVA - CONTÍNUO 57,6 MVA – 1 ½ HORAS
Frequência	60 Hz
Relação de Transformação	22/0,6~1,1 kV
“Taps” de operação	22 Posições 383V/32110A – 1100V/25190A

3.3. Parte prática

As medições dos parâmetros elétricos de operação foram feitas através do sistema supervisorio WisCon nos barramentos de 138kV (Ponto de medição da concessionária CEMIG) e no barramento de 22kV que alimenta as cargas do Forno Elétrico a Arco, Forno Panela, Filtro de harmônicas e Compensador Flicker (SVC). A obtenção dos dados do supervisorio, Figura 16, foi feita através de medidores de potência SIEMENS SIMEAS P que são alimentados pelos transformadores de potencial e transformadores de corrente presentes nos barramentos. O medidor de potência por sua vez, tem como saída a rede PROFIBUS DP que alimenta o PLC, e por fim, o supervisorio presente na sala de controle da subestação central.

Para o presente estudo foram escolhidas duas corridas nos dias 11/11/2017 e 15/11/2017, Tabela 4, com parâmetros de operação distintos e mesmo mix de sucata. Os dados foram obtidos a partir do histórico de dados salvos no supervisório e separados de acordo com a duração das corridas.

Tabela 4 - Dados das corridas.

Corrida	Data/Horário	Tempo de Forno Ligado	Produção
G952500	11/11/2017 05:02 – 05:43	28,40 minutos	99,11 toneladas
G964700	15/11/2017 10:16 – 10:52	30,80 minutos	105,29 toneladas

3.3.1. Sistema de regulação de eletrodos

O sistema de regulação de eletrodos é utilizado para se manter a tensão e correntes desejadas no programa de fusão. Ele movimenta cada eletrodo, de modo independente, através de um sinal de erro decorrente da comparação entre um sinal proporcional à corrente de carga e outro proporcional à tensão de fase no arco. Para obter os valores da corrente e tensão o sistema utiliza transformadores de potencial, corrente e bobinas de Rogowski.

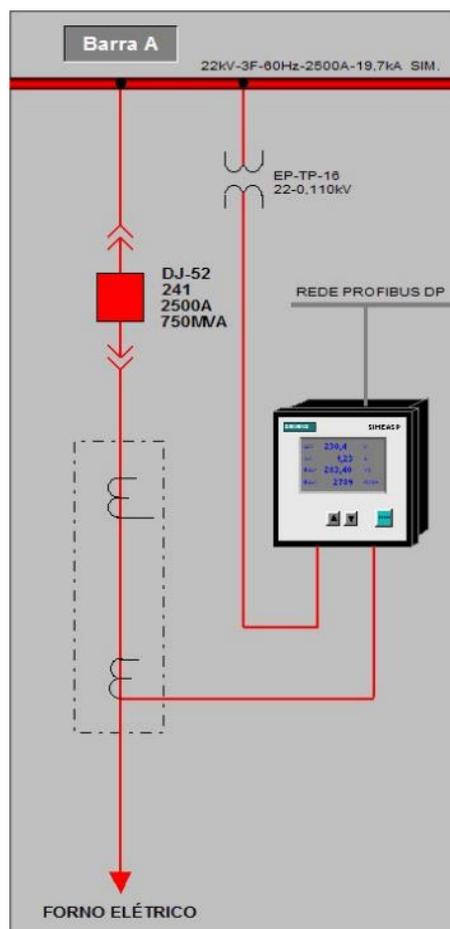


Figura 16 - Medidor de potência SIEMENS SIEMAS P – FEA.

3.3.2. Considerações de Caso

O forno elétrico a arco funciona conforme demanda de produção e opera em 3 turnos de 8 horas cada. Durante os dias úteis o forno é desligado por 3 horas dentro do horário de ponta, geralmente entre as 17h e as 20h. As condições de carga e operação do forno nas corridas que antecedem e sucedem à parada sazonal são bem distintas. O mix de carga no forno é modificado e se utiliza uma maior quantidade de gusa líquido proveniente dos altos fornos. Assim, procurando focar as análises nos parâmetros elétricos, foi evitado a escolha de corridas em horários que antecediam e sucediam o horário de ponta.

Os dados obtidos para o estudo foram coletados com uma taxa amostragem variando de 2 a 12 vezes por minuto, durante a duração da corrida. Foram selecionados dados conforme o nosso objetivo do estudo: tensão no transformador, corrente, fator de potência, potência ativa, aparente e total. Alguns parâmetros de operação que estão diretamente relacionados ao consumo de energia elétrica foram obtidos através do sistema de gestão dados PIMS da aciaria sendo eles: tempos de forno ligado e desligado, tempo de corrida e carga metálica.

4. Resultados e Discussões

4.1. Análise do consumo de energia elétrica

Nas Figura 17 e Figura 18 encontram-se os dados das correntes, e energia consumida em dois horários distintos de produção, obtidos através do sistema de regulação de eletrodos nas três fases A, B e C.

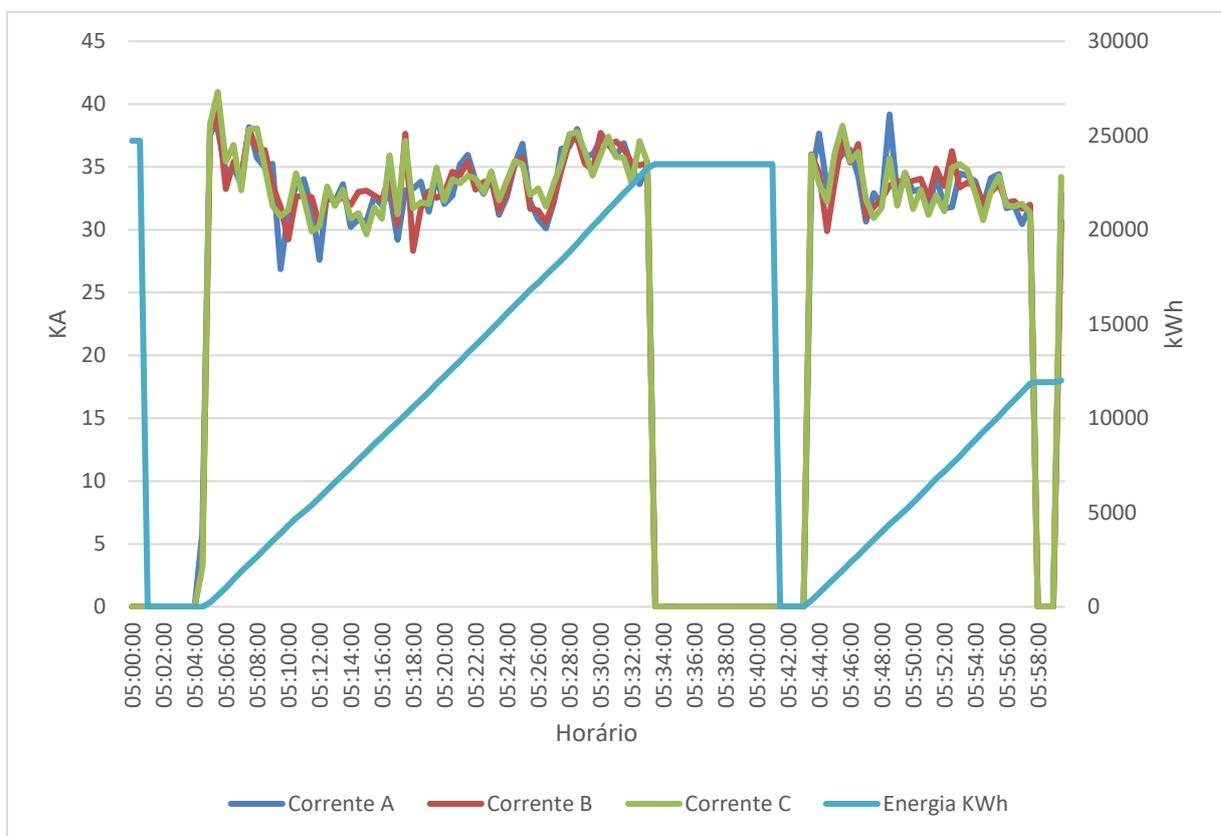


Figura 17 - Curvas de corrente por fase e energia consumida (corrida G952500).

Analisando a curva de consumo de energia, Figura 17, verifica-se que a potência entregue pelos arcos, na três as fases, foi linear durante a corrida. O consumo de energia total foi de 23490 kWh representando um consumo médio por tonelada de aço vazado de 237 kWh.

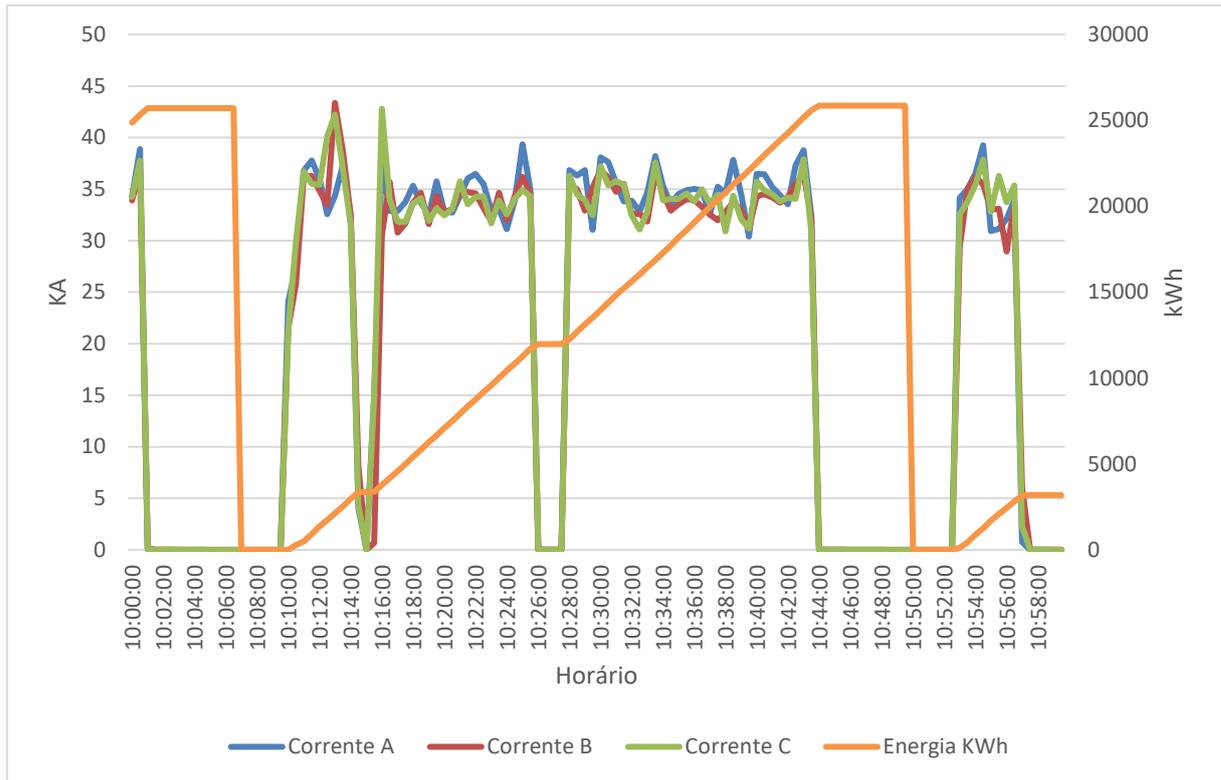


Figura 18 - Curvas de corrente por fase e energia consumida (corrida G964700).

A segunda corrida analisada, Figura 18, mostra uma curva de consumo típica de uma operação com dois carregamentos de sucata. Nota-se que durante a etapa de fusão o forno foi desligado duas vezes, por um tempo total de 4 minutos, período no qual houve a abertura da abóbora para o carregamento do segundo cesto de sucata e uma pequena interrupção devido ao posicionamento da carga dentro do forno. A relação entre o tempo de forno ligado e o tempo total da corrida ficou em 67%, um pouco abaixo do valor encontrado na corrida anterior, que foi de 70%.

Comparando o consumo de energia elétrica nas duas corridas temos que, para uma produção de aço líquido vazado de 105,29 toneladas na corrida G9647000, o consumo de energia elétrica ficou em 25860 kWh. Esse consumo representa um gasto 3,62% maior, por tonelada de aço vazado, que o obtido na corrida G952500.

Com base nos resultados obtidos das duas corridas acima, foi feito um estudo adicional para investigar a influência do número de carregamentos no consumo de energia elétrica por tonelada. As Tabela 5 e Tabela 6 mostram os valores de consumo, tempo de forno ligado e produção nas corridas com dois e um carregamento.

Tabela 5 - Tempo de forno ligado, produção e consumo de energia (Corridas com dois carregamentos).

Data	Número de corridas	Tempo de Forno Ligado (Médio)	Produção (Média)	Consumo (Médio)
11/11/2017	20	34,24 minutos	103,4 toneladas	265,1 kWh/t
12/11/2017	6	30,83 minutos	104,8 toneladas	284,7 kWh/t
13/11/2017	16	32,51 minutos	101,2 toneladas	249,4 kWh/t
14/11/2017	18	33,40 minutos	103,8 toneladas	262,0 kWh/t
15/11/2017	22	31,55 minutos	112,5 toneladas	243,0 kWh/t

Tabela 6 - Tempo de forno ligado, produção e consumo de energia (Corridas com um carregamento).

Data	Número de corridas	Tempo de Forno Ligado (Médio)	Produção (Média)	Consumo (Médio)
11/11/2017	11	27,95 minutos	98,8 toneladas	240,0 kWh/t
12/11/2017	23	28,40 minutos	98,8 toneladas	238,3 kWh/t
13/11/2017	11	32,51 minutos	100,6 toneladas	213,8 kWh/t
14/11/2017	9	25,45 minutos	101,7 toneladas	202,9 kWh/t
15/11/2017	8	26,31 minutos	98,2 toneladas	212,9 kWh/t

Nota-se que o consumo de energia elétrica está diretamente relacionado com o tempo de forno ligado e com o volume de aço líquido vazado. Há um acréscimo no tempo necessário para fundir e refinar o aço em corridas com dois carregamentos de sucata. Devido ao maior tempo necessário no processo, ocorrem, nessas corridas, uma maior perda térmica em decorrência dos sistemas de resfriamento e despoiramento.

4.2. Perdas elétricas

Como dito anteriormente na seção perdas elétricas (subseção 2.4.7), a maior parte das perdas elétricas do circuito do forno a arco se devem a condução de altas correntes no circuito do próprio forno (cabos flexíveis, barramentos, braços condutores e eletrodos). Essas perdas são proporcionais à potência ativa entregue pelo forno durante as corridas. Foi calculado na Tabela 7, os valores das perdas elétricas por condução e o rendimento elétrico resultante nas duas corridas analisadas nesse estudo.

Tabela 7 - Perdas elétricas por condução.

Corrida	Fase A	Fase B	Fase C	Perdas por condução	Rendimento Elétrico
G952500	33,74kA	33,93kA	34,07kA	1380 kW	0,9692
G964700	34,83kA	33,80kA	34,05kA	1405 kW	0,9684

Conclui-se que as perdas geradas pela condução de altas correntes no circuito do forno giram em torno de 3% da potência entregue pelo transformador. Esse bom rendimento é obtido devido ao bom sistema de refrigeração dos condutores e às manutenções preventivas realizadas mensalmente no sistema elétrico do forno.

4.3. Análise da potência específica do forno

A Figura 19 apresenta o gráfico da potência ativa durante uma corrida realizada no dia 11/11/2017 às 05:02h. O tempo total da corrida foi de aproximadamente 41 minutos dos quais 27 minutos o forno ficou ligado. Pode-se perceber que o programa de fusão se mostra bem diferente do modelo anteriormente citado, na seção 2.2.3, deste trabalho. Utilizou-se nessa corrida apenas um carregamento de sucata metálica sendo o gusa líquido adicionado durante o funcionamento do forno através do basculador. A potência ativa, com o forno ligado, apresenta uma média de 49,241 MW, o valor máximo de potência demandada pelo forno foi de 58 MW durante a etapa de refino (fim da corrida).

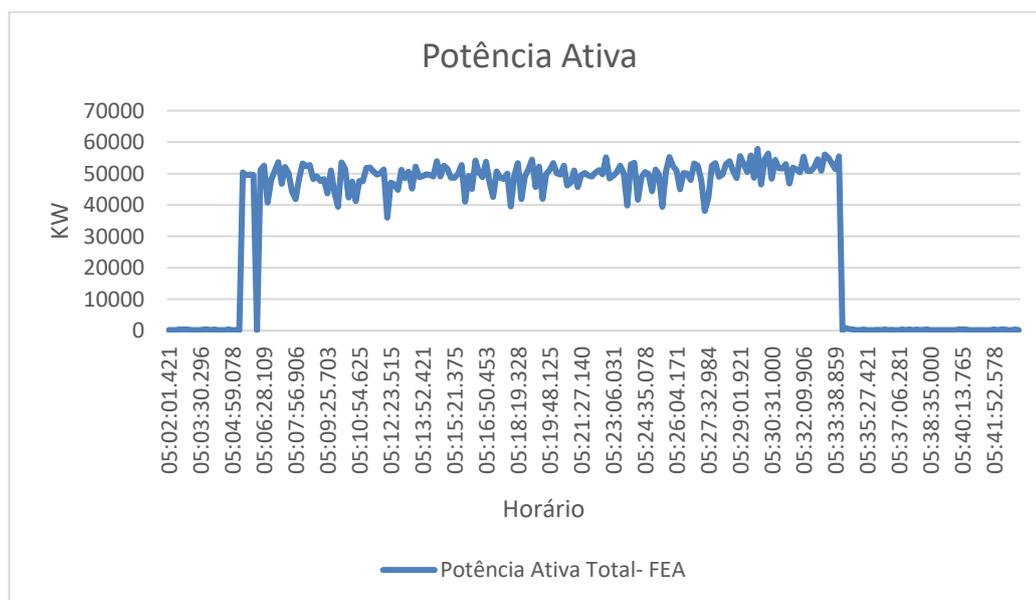


Figura 19 - Potência Ativa (Corrida com um carregamento).

Analisa-se então o fator de demanda da corrida, equação (1), para se verificar o aproveitamento da potência instalada no forno.

$$fd = \text{Potência Média}/\text{Potência na fusão} \quad (1)$$

$$fd = \frac{49,241 \text{ MW}}{50,822 \text{ MW}} = 0,968$$

Esse resultado indica um ótimo aproveitamento da potência instalada no forno durante a corrida.

Na Figura 20 observa-se a potência ativa durante uma corrida realizada no dia 15/11/2017 às 10:16h. O tempo de corrida foi de aproximadamente 44 minutos dos quais 31 minutos o forno ficou ligado.

Nota-se agora uma similaridade com o programa de fusão teórico onde, as etapas de fusão e refino bem são definidas.

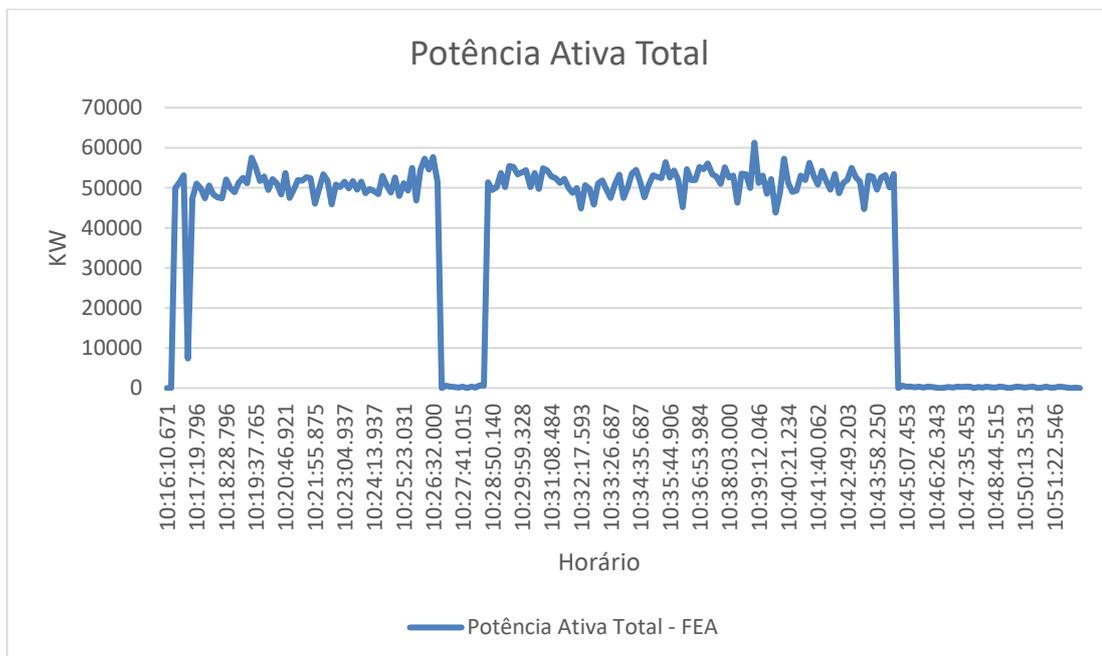


Figura 20 - Potência Ativa (Corrida com dois carregamentos).

Analisando os dados dessa corrida chegamos a um fator de demanda ligeiramente inferior.

$$fd = \frac{49,645MW}{51,761MW} = 0,959$$

Com base nos resultados encontrados anteriormente conclui-se que o aproveitamento da potência elétrica durante a corrida é maior quando há menos interrupções no processo. Para que se tenha uma maior produtividade no forno e um menor consumo de energia por tonelada, é interessante que o forno funcione de maneira ininterrupta e que a potência entregue pelos arcos seja constante, próximo da máxima permitida pelo transformador, durante o seu funcionamento.

De maneira geral, conclui-se que o consumo de energia no FEA da usina é inferior ao encontrado na maioria dos fornos de tamanho semelhante. O consumo é impactado positivamente pelo ganho energético proveniente da utilização de gusa líquido via basculador e do alto fator de demanda na operação.

4.4. Análise do Fator de Potência

Na Figura 21 encontram-se os dados obtidos durante as medições da potência ativa e fator de potência em uma das duas linhas que alimenta a usina (Linha1), no dia 11/11/2017 das 05:00h às 05:59h. O gráfico representa os dados discretos obtidos através do histórico do supervisor a uma taxa média de 6 amostras por minuto.

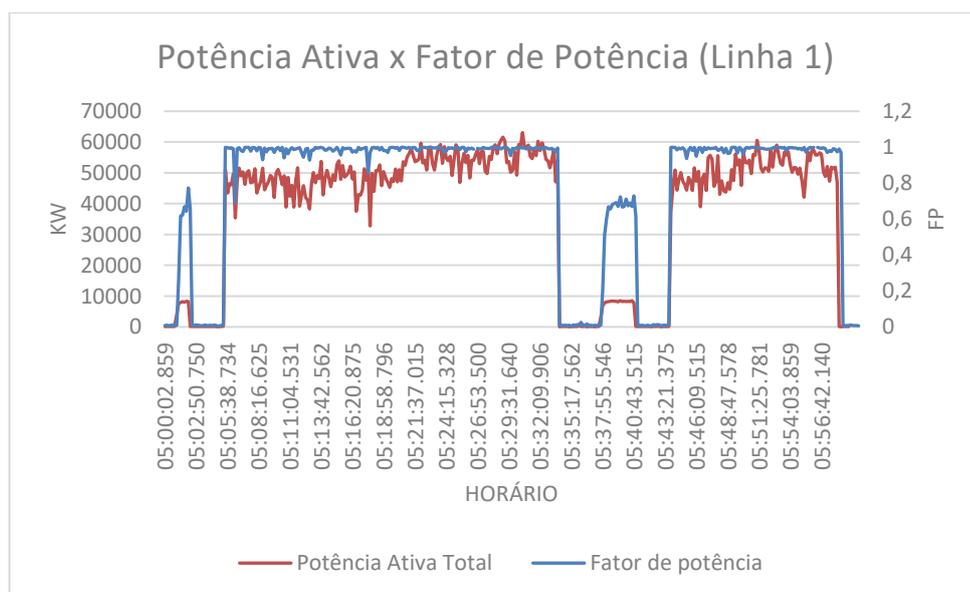


Figura 21 - Potência Ativa Aparente versus Fator de Potência (Ponto de medição da concessionária).

De acordo com os valores observados na Figura 21 nota-se que o fator de potência está diretamente relacionado à potência ativa demandada pelas cargas da aciaria. Períodos nos quais o transformador está operando muito abaixo de sua potência nominal provocam um baixo fator de potência. O fator de potência igual ou próximo de zero, como mostrado em vários momentos na Figura 21 não é o valor real, o que acontece é que o sistema supervisorio da subestação central não contabiliza os valores de potência ativa nos transformadores quando as cargas do barramento estão desligadas. Desta forma ele entende que há somente potência reativa no sistema e fornece um valor incorreto do fator de potência.

Para entender melhor esse comportamento temos a seguir, na Figura 22 e Figura 23, o fator de potência do forno elétrico e do forno panela durante o mesmo período.

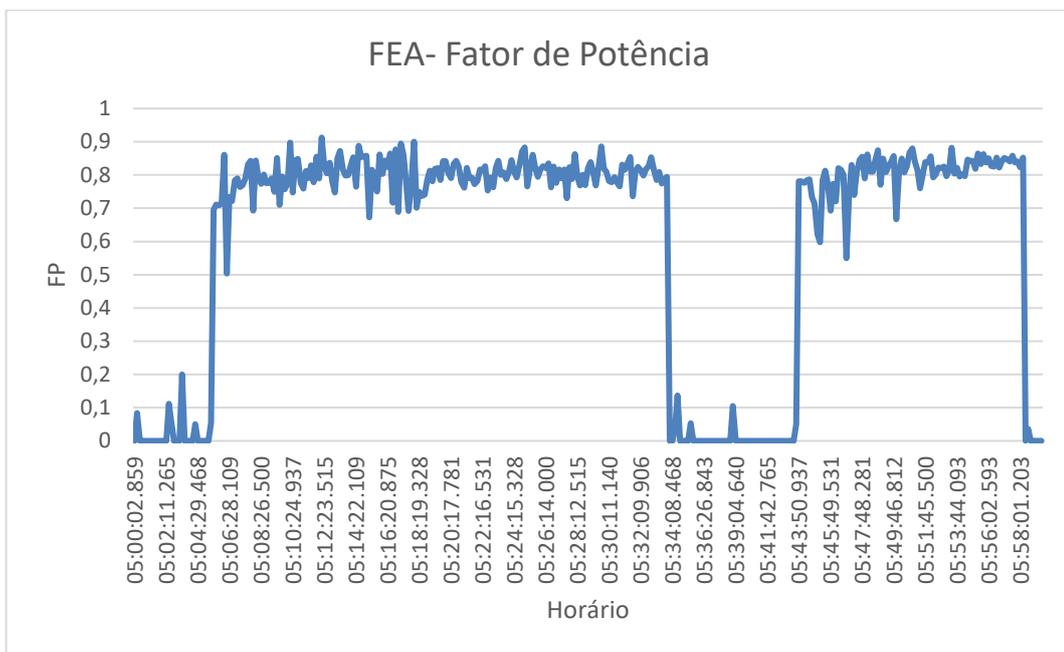


Figura 22 - Fator de Potência- Forno elétrico a arco.

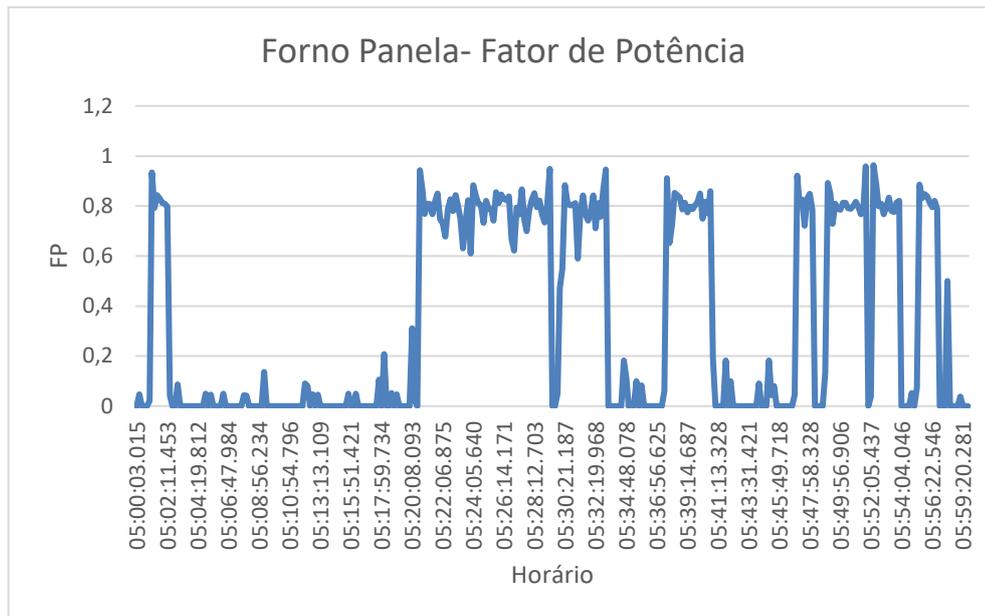


Figura 23 - Fator de Potência - Forno Panela.

Nos momentos em que a forno elétrico está funcionando o fator de potência é corrigido através dos bancos de capacitores do SVC e filtros de harmônicas presentes no barramento de 22kV. O valor médio do mesmo com o FEA ativo, no ponto de medição da concessionária, ficou em torno de 0,98.

Nota-se que a correção do fator de potência ocorre somente nos períodos em que o forno elétrico a arco está ligado. Isso se deve ao fato do compensador flicker (SVC) atuar somente circuito elétrico do FEA e não considerar as outras cargas do barramento. Essa é uma oportunidade de melhoria que está sendo estudada pela empresa com a compra de um novo SVC, visando uma maior segurança operacional.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo da eficiência energética do forno elétrico a arco de uma usina siderúrgica. Foram feitas análises dos dados referentes às perdas elétricas nos condutores, consumo de energia elétrica por tonelada, potência específica e fator de potência.

Primeiramente, foram calculadas as perdas elétricas no sistema decorrentes das altas correntes no circuito do forno necessárias para esse tipo de operação. Foi verificado que o rendimento elétrico nas duas corridas amostradas ficou em torno de 97%. Esse valor representa uma baixa perda na forma de calor nos condutores do circuito de alimentação do forno. Tal otimização é resultado do eficiente sistema de refrigeração dos condutores e das constantes manutenções preventivas que são feitas no forno.

Na análise do consumo de energia elétrica e potência específica chegou-se à conclusão de que as perdas térmicas estão diretamente relacionadas com os tempos de operação e número de carregamentos de carga metálica. Isto é, quanto maior são as perdas térmicas no processo maior é a demanda por energia elétrica para fundir e refinar o aço. Analisando também o fator de demanda da corrida, ficou constatado, que a potência instalada é melhor aproveitada quando não há grandes interrupções durante os processos de fusão e refino da sucata.

Por fim, ao analisar o fator de potência nos diversos pontos de referência, verificou-se que os níveis obtidos no ponto de medição da concessionária, durante o funcionamento do FEA, atendem aos requisitos das normas, ficando sempre acima de 0,92 com uma média de 0,98. Ocorre, no entanto, um baixo valor de potência quando está somente o forno auxiliar da aciaria (Forno Panela) em funcionamento.

Conclui-se assim, que há uma possibilidade de melhoria no sistema do SVC atualmente instalado na usina, para que se obtenha a devida correção do fator de potência durante todo o processo produtivo da aciaria.

Referências Bibliográficas

- AMBIENTE ENERGIA. **Ambiente Energia**, 2015. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/06/industria-e-o-setor-com-o-maior-desperdicio-de-energia-brasil/26311>>. Acesso em: 3 Julho 2017.
- ANICETO, D. M. Importância da correção do fator de potência nas instalações. **Especialize**, p. 17, Julho 2016.
- CÂNDIDO, M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. São Paulo: McGraw Hill, 1986.
- FELÍCIO, E. A. **Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 66. 2012. (16).
- HORIA ANDREI, C. C. A. S. G. **Power Quality and Electrical Arc Furnaces**. [S.l.]: INTECH, 2011.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Instituto Aço Brasil**, 2011. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 05 Julho 2017.
- JACCARD, L. R. **Operación del Horno Eléctrico de Arco**. Curitiba, p. 10. 2009.
- JONES, J. **Understanding Electric Arc Furnace Operations**. EPRI Center for Materials Production. [S.l.], p. 6. 1997.
- RIES, W. **Fornos A Arco Análise e Projeto do Sistema Elétrico**. 1ª. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2001.
- SARNA, S. K. **Ispat guru**, 2016. Disponível em: <<http://ispatguru.com/development-of-the-technology-of-electric-arc-furnace-steelmaking/>>. Acesso em: 12 Agosto 2017.
- SILVA, A. L. V. D. C. E. **Aços e Ligas Especiais**. 3º. ed. [S.l.]: Blucher Ltda, 2010.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel University**. Disponível em: <<https://steeluniversity.org/>>. Acesso em: 10 Agosto 2017.
- World Steel in Figures 2017. WorldSteel Association. [S.l.], p. 17. 2017. (11).