Capítulo 2 Análise do Forno Elétrico a Arco como uma Carga Especial

Este capítulo apresenta as características básicas e o comportamento dos fornos elétricos a arco como cargas elétricas especiais, introduzindo alterações na forma de onda da corrente e da tensão. Embora o conjunto formado pelo sistema trifásico e carga apresente desequilíbrio e distorção, é apresentada uma análise das potências ativas e reativas consumidas, baseada na formulação tradicional do regime permanente senoidal, buscando equacionar as condições operativas otimizadas. Como complementações são apresentados alguns aspectos relacionados com a teoria de potência instantânea e também com a qualidade de energia em sistemas elétricos, na presença desses fornos. Procura-se traçar um panorama geral dos vários aspectos envolvidos com essas cargas especiais.

2.1 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS

O funcionamento dos fornos a arco é eletricamente simples, uma fonte de energia elétrica alimentando eletrodos de grafite, localizados em uma câmara fechada, provocando curtos-circuitos que concentram a energia suficiente para fundir uma carga metálica. As características operativas básicas de um forno são baixas tensões e altas correntes, que circulam pelos arcos voltaicos e transferem a energia elétrica para a carga metálica (DUGAN, 1997).

Os primeiros fornos a arco instalados no Brasil datam da década de 40 e um considerável crescimento no número de instalações foi notado nos anos 70. Nos últimos anos, os investimentos nessa área se concentraram na modernização dos equipamentos existentes, visando maior produtividade e qualidade tanto dos produtos finais como das condições ambientais. Isto se nota na implementação de técnicas como painéis refrigerados, sistemas de exaustão de fumos, técnicas de

vazamento sem escória, conversão de fornos de fusão para fornos panela (refino secundário), automação do processo sendo que o destaque consiste no aumento de potência específica (vide Apêndice A).

A Figura 2.1 mostra uma instalação industrial com três fornos a arco, onde FEA1 e FEA2 são fornos de fusão de sucata, enquanto o Forno Panela faz o refino que é parte do processo de fabricação do aço. A prática de utilização dos fornos panela, liberando o forno a arco para a operação como apenas elemento fusor, tem sido utilizada em grande escala pelas inúmeras vantagens que proporciona como: aumento de produtividade, redução dos custos operacionais, e melhoria da qualidade do aço. Inicialmente, há o carregamento dos fornos FEA1 e FEA2 com sucata e materiais ferrosos. A sucata é transportada desde o local de armazenamento (pátio) até o forno através de dispositivos específicos para esta finalidade.

O ciclo típico de operação de um forno a arco conhecido como corrida apresenta as seguintes etapas:

<u>1° Carregamento:</u> etapa realizada com a estrutura superior (tampa) do forno fora de sua posição (abóbada aberta) para que o carregamento de sucata, denominado de primeiro cesto, seja colocado no forno.

Início de Fusão: após o fechamento da abóbada, o disjuntor do forno (FEA1 ou FEA2) é ligado, energizando o transformador e o sistema hidráulico dos braços mecânicos, inicia-se a descida até que a extremidade dos eletrodos faça contato com a carga, começando os arcos voltaicos.

Fusão: etapa de característica similar à anterior quanto à movimentação dos eletrodos. Porém a máxima potência pode ser atingida, pois os arcos já penetram na sucata abrindo três perfurações. Assim sendo, forma-se um anteparo entre os arcos e as paredes do forno pela própria sucata e todas as irradiações são dissipadas na própria carga a ser fundida.

<u>2° Carregamento:</u> repete-se a seqüência, anterior, de carregamento, início de fusão e fusão. Normalmente, são feitos dois ou três carregamentos por ciclo de operação do forno.

Fim de fusão/Refino: As operações metalúrgicas necessárias são feitas nesta etapa no forno panela, preparando a carga nas características desejadas para o vazamento.

Para análise do melhor ponto de operação e os efeitos sobre a qualidade de energia foram utilizados os sinais de campo coletados e analisados através do Analisador de Sinal Elétrico (ASE).



Figura 2.1 - Sistema elétrico industrial com 3 fornos a arco.

A Figura 2.2 mostra a potência ativa média, em função do tempo, de um forno a arco durante um ciclo de aquecimento normal, ou seja, sem a injeção de oxigênio, caracterizada por um consumo elevado de energia elétrica, com demanda extremamente variável, principalmente durante o processo de fusão.

O carregamento do forno é feito em vários estágios, sendo que perto do final de cada estágio, a potência fornecida é reduzida para prevenir sobreaquecimento do refratário.



Figura 2.2 - Potência de entrada do forno durante uma corrida.

- 1. Cesto 1 (período de fusão)
- 2. Cesto 2 (período de fusão)
- 3. Cesto 3 (período de fusão)
- 4. Refino
- 5. Ciclo de Calor

Em fornos modernos de alta potência, o tempo necessário para a fusão e superaquecimento é normalmente de 70 até 80 minutos.

O acabamento do aço (refino) ocorre depois da fusão e nesta etapa o consumo de energia se reduz, compensando apenas as fugas de calor. A duração do período de refino depende do grau do aço que será produzido. Isto pode ser feito em um curto espaço de tempo, em torno de meia hora para determinados tipos de aço e até mesmo 2 horas para aços especiais.

O tempo de utilização da potência máxima gira em torno de 2.500 horas por ano. Recentemente, as siderúrgicas introduziram processos onde a potência instalada é melhor utilizada. Um exemplo é o processo ASEA-SFK, onde o aço é transportado para o forno panela depois da fusão e o refinamento ocorre neste forno. Desta forma, o forno elétrico a arco estará disponível mais rapidamente para uma nova carga. Com este processo, o tempo de utilização da potência instalada pode aumentar para mais ou menos 3.500 horas/ano.

A Figura 2.3 mostra um exemplo das formas de ondas de tensão nas fases a, b e c, registradas no secundário do FEA1. Nota-se as formas de onda de tensão quando o forno está ligado, porém sem carga e o início da fase de fusão do aço.



Figura 2.3 - Forma de onda da tensão de um forno elétrico a arco.

2.2 ARCO ELÉTRICO

2.2.1 Generalidades

O arco elétrico se manifesta durante descargas elétricas em meios gasosos, normalmente associado a correntes elevadas. Durante a fase de extinção, em um forno a arco, a tensão aplicada ao meio ionizado corresponde à tensão do secundário, fase-neutro, do transformador de alimentação. Esta tensão tem uma influência decisiva no instante de reignição do arco. A Figura 2.4 mostra as formas de ondas típicas de corrente e tensão, sob condições ideais.

Durante o período de condução do arco elétrico, a corrente é transportada em um meio denominado por plasma, submetido a altas temperaturas, da ordem de 10000 a 15000°C. A tensão necessária para estabelecer e manter o arco elétrico estável, entre os eletrodos, é da ordem de 10 V/cm. Para uma tensão de arco de 300 V, pode-se esperar que o comprimento do arco figue em torno de 30 cm.



Figura 2.4 - Corrente e tensão teórica durante o processo de estabelecimento do arco elétrico em um sistema de 60 Hz.

Os sistemas de controle dos fornos a arco modernos possuem reguladores de eletrodos cuja função principal é manter uma determinada relação entre os valores de corrente e de tensão do arco, ajustada pelo operador, para se obter a máxima potência de operação e o melhor rendimento. Quando a abóbada está coberta com escória derretida, somente pequenos ajustes da posição dos eletrodos são necessários para manter a potência constante. Entretanto, durante a fusão, os reguladores constantemente ajustam a posição dos eletrodos em resposta a flutuações na corrente e na tensão. Quando os reguladores enviam os sinais de comando para a elevação dos eletrodos, visando a interrupção da corrente, o arco é naturalmente extinto. Um valor alto de corrente aparece quando o eletrodo entra em contato novamente com a carga para reacender o arco.

A interrupção do arco pode ser causada pela repentina fundição de um tipo especifico de sucata, ao redor do eletrodo, isto pode também resultar na diminuição da corrente do regulador para um valor abaixo do limite de estabilidade do arco para o circuito elétrico formado.

A Figura 2.5 mostra o sistema de regulação para um forno a arco industrial.

Devido à instabilidade da corrente de arco, principalmente no início da fusão, é difícil quantificar os harmônicos presentes no sinal de corrente. A Tabela 2.1 mostra algumas faixas de valores médios de harmônicos de corrente, típicos de fornos elétricos a arco.



Figura 2.5 - Sistema de controle de eletrodos.

Tabela 2.1 - Harmonicos de corrente em fornos a arco em % do componente fundamental				
Ordem dos Harmônicos	Faixa dos Valores Médios %	Máxima %		
2	4 - 9	30		
3	6 - 10	20		
4	2 - 6	15		
5	2 - 10	12		
6	2 - 3	10		
7	3 - 6	8		
9	2 - 5	7		

Tabela 2.1 - Harmônicos de corrente em fornos a arco em % do componente fundamental





Figura 2.6 - Curvas de corrente e tensão de um forno a arco com transformador para dois "*tap's*" distintos e dois fatores de potência.

- a transformador com tensão secundária correspondente a 1,60 pu de pico com a corrente de arco nula durante aproximadamente 2,00 ms.
- b transformador com tensão secundária correspondente a 2,20 pu de pico com a corrente de arco nula durante aproximadamente 0,75 ms.
- c transformador com tensão secundária correspondente a 1,60 pu de pico com fator de potência a corrente de arco com reignição instantânea.

Na Figura 2.6-a, o fator de potência (FP) considerado é 0,66 e a tensão disponível, quando a corrente passa por zero, não é suficiente para permitir a ignição instantânea do arco. A ignição não ocorre até que a tensão tenha se elevado acima de um patamar mínimo, conseqüentemente existindo um intervalo de tempo com corrente nula.

Na Figura 2.6-b, por outro lado, o fator de potência é da ordem de 0,81 e neste caso a tensão é suficiente para que o arco se estabeleça após a corrente permanecer em zero ainda durante um pequeno intervalo de tempo.

Na Figura 2.6-c, o fator de potência considerado é 0,37 e neste caso a tensão é suficiente para que o arco se estabeleça instantaneamente, após a passagem da corrente pelo zero. Notar que neste caso a tensão secundária de circuito aberto é de 1,6 pu de pico, ou seja, o mesmo tap da Figura 2.6-a. Durante o processo de refino do aço, as formas de onda de tensão de arco tornam-se mais estáveis, enquanto a temperatura do banho líquido se eleva.

Desse modo, nota-se que o forno deve ser operado com baixo fator de potência para assegurar operação estável, principalmente no início do período de fusão, no qual o arco é normalmente instável. As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram a formação do arco elétrico com vários comprimentos, assim como a nomenclatura usual utilizada.



Figura 2.7 - Visualização dos eletrodos e formação do arco elétrico.

Pode-se notar na Figura 2.7, a distância (D) entre os eletrodos e o ângulo (θ) da direção do arco em relação ao nível médio superior da sucata.



Figura 2.8 - Tipos de arco elétrico: a - arco longo, b - arco curto, c - arco médio.

A transferência de calor está concentrada sobre a região próxima dos eletrodos, se o arco for curto, entretanto, se o arco for longo, grande parte do calor atinge as paredes do forno e a abóbada.

Para evitar desgaste desnecessário do refratário, o forno deve ser operado preferencialmente com comprimento de arco curto. O comprimento do arco depende quase que inteiramente da tensão. A seguinte relação empírica pode estimar o comprimento do arco:

$$L_a = V_a - 50 \tag{1}$$

Na expressão e figura anteriores tem-se:

- L_a Comprimento do arco em mm;
- V_a Tensão do arco em V.

Se for desejado um arco curto, a tensão através dele deve, conseqüentemente, ser mantida baixa.

A potência reativa (Q) necessária à operação do forno elétrico obedece à equação:

$$Q = 3.X_{th} I_a^2$$
⁽²⁾

Onde X_{th} é a reatância por fase vista dos terminais do eletrodo (equivalente de Thevenin). É interessante observar que deve existir um valor mínimo para X_{th} visando obter uma corrente máxima de curto-circuito adequada para a operação do forno elétrico a arco. Quando o projeto do transformador do forno juntamente com o equivalente da rede não atingir o valor de X_{th} mínimo, é normalmente incluído no lado primário do transformador um reator (vide *L3* ou *L2* na Figura 2.1).

A Figura 2.9 mostra a curva característica do comprimento do arco (L_a), ou até mesmo da tensão de arco (1), em função da corrente, parametrizada por tensão de tap do transformador.



Figura 2.9 - Característica do comprimento do arco em função da corrente e da tensão.

O posicionamento dos eletrodos, para cima ou para baixo, ajusta o comprimento do arco, tentando estabilizá-lo quando a corrente fica reduzida, com arcos longos, ou mesmo quando a corrente se eleva a valores próximos da corrente de curto-circuito, com tensão de arco quase nula.

Obviamente, os diferentes comprimentos de arco têm influência no fator de potência da instalação.

2.2.2 Arco elétrico com comportamento resistivo linear

A Figura 2.10 mostra o circuito equivalente do sistema elétrico industrial da Figura 2.1, para o ramal do alimentador do FEA1, permitindo a análise operativa do forno supondo sistema trifásico equilibrado e regime permanente senoidal (VARADAN; MAKRAM; GIRGIS, 1996) e (MONTANARI et al., 1994). Nesta avaliação, o arco elétrico é admitido com uma característica estática, considerando o comportamento de uma resistência pura.



Figura 2.10 - Circuito simplificado para mostrar o comportamento qualitativo do sistema.

Onde se tem:

- V Tensão da fonte (entre fase e neutro)
- *X_{th}* Reatância equivalente (de Thèvenin)
- *R*_{th} Resistência equivalente (de Thèvenin)
- *R*^{*a*} Resistência equivalente do arco

Na Figura 2.10, para uma dada condição operativa, a corrente é dada por:

$$I_{a} = \frac{V}{\sqrt{X_{th}^{2} + (R_{th} + R_{a})^{2}}}$$
(3)

Ocorrerá um curto-circuito pleno com a corrente:

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{X_{th}^2 + R_{th}^2}} \tag{4}$$

Definindo-se ainda a relação:

$$a = \frac{I_{cc}}{I_a} \tag{5}$$

Com base na Figura 2.10, se $R_a = 0$, tem-se $I_a = I_{cc}$. O arco se torna mais estável à medida que o valor de **a** tender a 1, ou seja, quando a corrente de arco ficar elevada, porém, é recomendável mantê-la acima do valor unitário. O fator de potência do forno elétrico, dado pela expressão (6) e a estabilidade do arco variam em sentido inverso.

$$FP = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{a}\right)^2} \tag{6}$$

A Figura 2.11 mostra o comportamento do fator de potência (*FP*) em fornos elétricos a arco de pequeno, médio e grande porte.



Figura 2.11 - Característica FP = f(a).

Considerando que o fator de potência de operação dos fornos elétricos a arco é normalmente inferior aos limites estabelecidos pelos concessionários, para se evitar multas (devido ao baixo fator de potência), devem-se instalar sistemas de compensação de potência reativa tais como banco de capacitores, filtros de harmônicos, compensadores estáticos, etc.

Assumindo o arco elétrico com comportamento linear, puramente resistivo, os oscilogramas das tensões e correntes são senoidais, podendo o sistema trifásico ser tratado com as expressões de potências tradicionais, a partir de valores eficazes, ou de potências instantâneas, indistintamente.

A Figura 2.12 exemplifica para uma resistência de arco linear, o comportamento de tensões, correntes e potência instantânea média, ativa e reativa, obtida através de simulação, usando os dados da referência Ozgun e Abur (1999).



Figura 2.12 - Tensões, correntes e potências ativa e reativa instantâneas com arco puramente resistivo.

2.2.3 Comportamento não linear do arco elétrico

Na realidade, o arco elétrico não apresenta o comportamento de uma resistência linear, descrevendo ao longo do tempo uma curva de tensão em função da corrente denominada por ciclograma. Em condições de um meio gasoso

controlado, este comportamento pode ser repetitivo, o que não é o caso do plasma que se estabelece em um forno elétrico a arco, sujeito as diversas modificações de pressão, temperatura e de componentes do meio físico, de forma aleatória, resultando em ciclogramas com aspectos bem variáveis e difíceis de serem modelados.

A Figura 2.13 apresenta o comportamento de alguns ciclogramas obtidos como resultado de medições efetuadas no FEA1.



Figura 2.13 - Ciclogramas obtidos das medições de campo para alguns ciclos.

A Figura 2.14 apresenta, para um ciclo, um ciclograma reduzido a três segmentos aproximados de reta para o FEA1.



Figura 2.14 - Comportamento do arco elétrico com três segmentos de reta.

A Figura 2.15 apresenta o comportamento médio do arco elétrico com três segmentos de reta, descrevendo os semi-ciclos positivos e negativos de correntes e tensões, simuladas no software ATP.



Figura 2.15 - Característica não linear do arco conforme Ozgun e Abur (1999).

As distorções de tensões e correntes são causadas pelo comportamento aleatório do arco elétrico, sendo difícil o estabelecimento de um modelo que reproduza esta variabilidade dos ciclogramas do ponto de vista físico.

Montanari, et. al. (1993), Ozgun e Abur (1999), Plata e Tacca (2005) fazem um estudo do modelamento do arco elétrico, um tanto simplificado, tentando estabelecer modelos não lineares do mesmo, a partir de medições de tensões e correntes em um forno. A possibilidade de se obter um modelo do arco permitiria o uso de simulações do comportamento elétrico do forno em programas de transitórios eletromagnéticos.

O modelo de arco desta natureza pode eventualmente servir para determinadas avaliações, de potências elétricas e avaliações de considerações operativas, apresentando, contudo, um comportamento limitado por ser repetitivo. Um outro modelo, apresentado por Plata e Tacca (2005), introduz modificações nos segmentos de retas a partir de gerações de números aleatórios, porém, sem apresentar um claro embasamento físico para este comportamento. Um aspecto que ainda torna este modelo um pouco rudimentar é a ausência de uma representação na forma de uma histerese, durante o crescimento e redução da tensão, presente no comportamento descrito pelo ciclograma.

As Figuras 2.16 e 2.17 a seguir apresentam o comportamento da tensão e da corrente de arco para o modelo simplificado da Figura 2.14, composto por segmentos, ajustado para as condições experimentais apresentadas por Ozgun e Abur (1999), desenvolvido para o programa ATP.







Figura 2.17 - Corrente de Arco.

Podem-se observar as distorções introduzidas pelo comportamento não linear do arco elétrico, que implicam em análises mais detalhadas das potências consumidas pela carga.

O desenvolvimento de modelos matemáticos mais sofisticados para o arco elétrico com a finalidade de utilização em programas de transitórios eletromagnéticos, poderia contribuir para futuras explorações da carga elétrica do forno. No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo, baseado na proposição da referência Ozgun e Abur (1999), implementado no programa ATP. Com este modelo, podem ser obtidos resultados comparativos sobre o efeito de representações lineares ou não do arco elétrico a serem ainda melhor avaliadas no consumo de energia elétrica. Cabe ainda comentar que, do ponto de vista da análise de distorções, objeto do Capítulo 3, preferencialmente serão utilizados os resultados de medições, contendo os múltiplos distúrbios existentes e aleatoriedade de eventos.

2.3 OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS

Como existe uma falta de experiência operativa dos fornos elétricos a arco no Brasil, pois algumas empresas ainda apresentam procedimentos operacionais artesanais e conhecimento superficial do processo, a otimização das condições operativas de um forno elétrico normalmente é obtida em análises e observações experimentais de várias corridas sucessivas, as quais são ajustadas às diversas variáveis, evidenciando a necessidade de um conhecimento mais aprofundado do controle de algumas variáveis específicas, tais como:

- Consumo de energia elétrica em kWh/t;
- Consumo de eletrodos em kg/t;
- Tempo de fusão em minutos.

Para controle e ajuste do consumo de energia elétrica, com a finalidade de se otimizar a produção, é necessário o controle das perdas.

A potência ativa, disponibilizada para o circuito elétrico do forno, é dada pela seguinte expressão:

$$P = P_a + P_j \tag{7}$$

P - Potência ativa *P_a* = Potência de arco *P_i* = Potência de perdas

A potência relativa às perdas (P_j) é pequena ao ser comparada com a potência de arco (P_a) e, portanto, pode ser desprezada. Para se otimizar P_a deve-se concentrá-la ao máximo no período de fusão e na manutenção da temperatura do banho de aço líquido.

Isto pode ser conseguido com uma regulagem do forno em termos da máxima potência em todas as fases do processo da corrida, levando em conta as condições metalúrgicas, com um programa de otimização da potência, ao longo de todo processo de fabricação do aço.

O controle da temperatura dos painéis refrigerados e da abóbada, assim como do comprimento do arco, é importante, pois tais componentes devem aquecer a carga e não os painéis. Quanto maior for o arco, maior será o calor irradiado e menor a potência aplicada (para um mesmo tap), com um rendimento maior.

O consumo de eletrodos é conseqüência da faixa de operação do forno. A regulagem do forno passa pela programação de potência, limitada pela densidade de corrente dos eletrodos. O próprio fabricante do eletrodo fornece a faixa de corrente mais econômica para sua operação, assim como os limites, superior e inferior, da corrente operativa. Com a corrente fluindo pelo eletrodo, abaixo do valor mínimo garantido, aparece o fenômeno de oxidação, demonstrada pelo afinamento do eletrodo e conseqüente quebra de pontas. Com alta densidade de corrente, próxima ao limite especificado pelo fabricante, o consumo de eletrodos é acelerado com a elevação de temperatura, podendo inclusive danificar as placas de contato da garra do braço condutor.

A determinação do ponto de operação otimizado é de fundamental importância para se obter o melhor rendimento do processo, com a preservação das condições do forno e do conjunto de eletrodos. Com base nos cálculos apresentados

no Apêndice B, tomando como base o FEA1, o valor da corrente nominal de operação e a de curto-circuito é 36,2 kA e 51,7 kA respectivamente (DASTUR e CO. PRIVATE LTD., KUKA, 1963) e (SCHWABE, 1954).

Para o forno em análise, nas condições definidas anteriormente, elabora-se a curva de carregamento do mesmo, com base na Tabela 2.2 e apresentada na Figura 2.18, para a reatância indutiva do reator *L3* (vide Tabela C.2) como sendo $XL3 = 1,1 \Omega$. Nesta análise, admite-se um comportamento linear para o arco elétrico (resistivo) e um sistema trifásico simétrico equilibrado.

la	S	Q	Р	Pj	Pa	R _a	Va	Va	l _a	FP
pu	MVA	MVAr	MW	MW	MW	pu	pu	V	kA	pu
0,005	0,52	0,01	0,52	0,00	0,52	193,30	0,9998	577,87	0,5	1,000
0,052	5,17	0,52	5,15	0,01	5,14	19,20	0,9933	574,11	5,2	0,995
0,103	10,34	2,07	10,14	0,04	10,10	9,44	0,9764	564,35	10,3	0,980
0,155	15,52	4,65	14,80	0,08	14,72	6,11	0,9488	548,42	15,5	0,954
0,207	20,69	8,27	18,96	0,14	18,82	4,40	0,9097	525,80	20,7	0,917
0,259	25,86	12,93	22,40	0,22	22,18	3,32	0,8575	495,64	25,8	0,866
0,310	31,03	18,62	24,83	0,32	24,51	2,55	0,7898	456,50	31,0	0,800
0,362	36,20	25,34	25,86	0,43	25,43	1,94	0,7023	405,91	36,2	0,714
0,414	41,38	33,10	24,83	0,57	24,27	1,42	0,5865	338,98	41,3	0,600
0,465	46,55	41,89	20,30	0,72	19,59	0,90	0,4208	243,20	46,5	0,436
0,491	49,14	46,67	15,36	0,80	14,56	0,60	0,2964	171,33	49,1	0,313
0,497	49,65	47,66	13,93	0,82	13,11	0,53	0,2641	152,62	49,6	0,280
0,502	50,17	48,66	12,22	0,83	11,39	0,45	0,2271	131,25	50,1	0,244
0,507	50,69	49,67	10,12	0,85	9,27	0,36	0,1829	105,74	50,6	0,200
0,512	51,20	50,68	7,28	0,87	6,41	0,24	0,1251	72,33	51,1	0,142
0,517	51,72	51,71	0,88	0,88	0,00	0,00	0,0000	0,00	51,7	0,017

Tabela 2.2 - Curva de carregamento do forno a arco



Figura 2.18 - Curva de carga para o FEA1 com circuito equilibrado com o reator L3

Na Figura 2.18, pode ser visto ainda que, se a potência for diminuída apenas através da redução da corrente com a tensão secundária do transformador inalterada, a tensão do arco aumentará, implicando na redução da eficiência da etapa do processo de fusão, que depende da quantidade de calor transferida do arco para a sucata. No entanto, a eficiência global do forno diminui e o desgaste do refratário aumenta devido ao calor por radiação.

O decréscimo de potência do ponto máximo da curva, apenas pela redução da tensão do transformador, leva o ponto operativo à direita do valor máximo da curva, reduzindo eficiência e arcos mais curtos.

Em resumo, pode-se dizer que do ponto de vista elétrico, deve-se manter o ponto de operação à esquerda do ponto máximo da potência de arco, mas não muito à esquerda. Procura-se ainda selecionar um ponto no qual o fator de potência esteja próximo de 0,8 a 0,7 para fornos de médio e grande porte.

Destaca-se que o desgaste do refratário, nas paredes e no teto do forno, representa um considerável desperdício e, portanto, uma redução relativa deste desgaste otimiza o custo total de operação por tonelada de aço produzido, justificando a operação ligeiramente à esquerda do ponto onde ocorre a potência máxima.

Analogamente ao procedimento anterior, porém curto-circuitando o reator *L3* (ou seja, com $XL3 = 0 \Omega$), obtém-se uma corrente de operação de 40,5 kA. Observa-se que com XL3 = 0, haverá um aumento na corrente de operação da ordem de 11%. O aumento na corrente de operação reduz o tempo necessário para cada fase do processo siderúrgico, consequentemente, haverá redução no consumo total e custo da energia elétrica.



Figura 2.19 - Curva de carga para o FEA1 com circuito equilibrado sem o reator.

Tomando como base a Figura 2.19, e os resultados anteriores, pode-se verificar que a análise da alteração da posição do reator *L3*, em função das fases do processo siderúrgico, pode ser bastante útil, tanto do ponto de vista dos diversos custos associados, quanto na redução dos efeitos da operação dos fornos na qualidade de energia nos sistemas aos quais estão inseridos.

A Figura 2.20, a seguir, mostra a análise teórica do comportamento da potência ativa entregue ao FEA1, em regime permanente na freqüência industrial, ao alterar as características do reator *L3* (Siderúrgica Barra Mansa *EAF Power Study - Optimization -* AMI GE, 2007). Embora os tap's do reator estejam disponíveis para 1,1; 1,4; 1,7 e 2,0 Ω fez-se uma varredura desde 0 até 3,2 Ω , a fim de observar o possível ganho de potência ao se efetuar um aumento no reator *L3*.

O desenvolvimento de dispositivos que possam identificar de forma precisa, através da análise das formas de onda de tensão, as diversas fases do processo siderúrgico, poderá ser utilizado para a tomada de decisão no instante de chaveamento remoto de L3.



Figura 2.20 - Curva de carga do forno em função da indutância do reator, de fase fusão e corrente mínima de 38 kA.

2.4 OSCILOGRAMAS DE TENSÕES E CORRENTES

Com a finalidade de se caracterizar o comportamento desta carga, tanto do ponto de vista das distorções, quanto da potência consumida, foram feitas medições no secundário do transformador T-047 (nos terminais dos eletrodos do FEA1), utilizando-se um medidor com capacidade para coletar 64 amostras por ciclo a 60 Hz.

A Amostragem de Sinais está vinculada à necessidade de se determinar, em um sistema elétrico real, os valores eficazes e os harmônicos da tensão e da corrente, da potência média (ativa), do fator de potência, etc., pois, uma vez que na prática, as formas de onda de tensão e de corrente são distorcidas e não existem funções matemáticas específicas que consigam representá-las diretamente. Assim sendo, o procedimento da amostragem consiste em admitir que, por um intervalo de tempo finito, o valor característico da função em análise fique constante, o que permite a um dispositivo eletrônico ter o tempo necessário para reter este valor e utilizá-lo para aplicações específicas pelo lado da medição e utilizá-lo para se efetuar procedimentos matemáticos visando atender os objetivos da determinação dos valores de interesse das grandezas em análise.

O sistema de medição utilizado, de acordo com a teoria da amostragem em um período de tempo de 16,66 mseg (60 Hz) efetua a coleta de 64 amostras, ou seja, fixa o valor do sinal em análise durante 260 µseg. Assim sendo, os diversos registros (formas de onda) em função do tempo (valores instantâneos) referentes aos sinais de tensão e de corrente, que foram coletados perfazendo 45 (quarenta e cinco) ciclos seqüenciais estão mostrados nas Figuras 2.21 a 2.24.



Figura 2.21 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1.



Figura 2.22 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1.



Figura 2.23 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1.



Figura 2.24 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1.



Figura 2.25 - Corrente de arco.

Tomando como base as medições de campo, observa-se que existem várias distorções no sinal de tensão e corrente. Utilizando a Série de Fourier (HSU, 1973), é possível calcular os harmônicos de tensão e de corrente. A Figura 2.26 apresenta para um exemplo de campo, o conteúdo harmônico em um determinado ciclo de



tensão.

Figura 2.26 - Conteúdo harmônico fase a.

2.5 ANÁLISE DA POTÊNCIA EM CONDIÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES DISTORCIDAS.

O comportamento não linear do arco elétrico causa alterações nas formas de onda da tensão e da corrente, com implicações no cálculo da potência ativa e reativa. A análise, a seguir, procura traçar um paralelo do cálculo tradicional, supondo condições de um sistema trifásico simétrico equilibrado e de um sistema elétrico trifásico alimentando uma carga não linear, apresentando formas de onda distorcidas e não repetitivas.

As tensões e correntes distorcidas podem ser decompostas em suas componentes harmônicas, sendo dadas por:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{V}_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} \mathbf{V}_h \cos(h\omega t + \varphi h)$$
(8)

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} I_h \cos(h\omega t + \phi h)$$
(9)

Onde:

- *v(t):* tensão instantânea.
- *i*(*t*): corrente instantânea.
- ω : freqüência angular da componente fundamental.
- V_0 , I_0 : componentes DC.

 V_h e I_h : magnitudes das h-ésima harmônicas.

 $\varphi_h \in \Phi_h$: ângulos de fase.

Os valores eficazes da tensão e corrente são, respectivamente:

$$V = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \qquad I = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}$$
(10)

Onde V_h e I_h são as magnitudes das componentes harmônicas de tensão e corrente. As potências ativas e reativas, para cada harmônica, são dadas por:

$$P_{h} = V_{h}I_{h}\cos\theta_{h} \quad Q_{h} = V_{h}I_{h}\sin\theta_{h} \tag{11}$$

Onde θ_h é a diferença de ângulo entre tensão e corrente.

Para um sistema trifásico de quatro fios, os valores eficazes equivalentes de

tensão e corrente para sinais senoidais são dados por:

$$V = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}} \quad I = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}$$
(12)

 $V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c$ são os valores eficazes de tensão e corrente para as fases.

A potência aparente equivalente é:

$$S = 3VI \tag{13}$$

Para o caso de sinais distorcidos, a tensão e a corrente eficazes para a freqüência fundamental são, respectivamente:

$$V_{1} = \sqrt{\frac{V_{a1}^{2} + V_{b1}^{2} + V_{c1}^{2}}{3}} \qquad I_{1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^{2} + I_{b1}^{2} + I_{c1}^{2}}{3}}$$
(14)

A potência aparente equivalente para a freqüência fundamental é dada por:

$$S_1 = 3V_1 I_1$$
 (15)

Para as freqüências diferentes da fundamental as tensões e correntes eficazes são:

$$V_{h} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{V_{ah}^{2} + V_{bh}^{2} + V_{ch}^{2}}{3}} \qquad I_{h} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \frac{I_{ah}^{2} + I_{bh}^{2} + I_{ch}^{2}}{3}}$$
(16)

Desse modo, a potência aparente equivalente, considerando as freqüências diferentes da fundamental, é calculada com:

$$S_h = 3V_h I_h \tag{17}$$

A potência aparente total também pode ser calculada usando-se todas as componentes harmônicas:

As tensões e correntes eficazes são:

$$V = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} \frac{V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2}{3}} \qquad I = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} \frac{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2}{3}}$$
(18)

As potências ativas e reativas harmônicas totais são calculadas com as expressões:

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} V_h^a I_h^a \cos(\phi_h^a) + V_h^b I_h^b \cos(\phi_h^b) + V_h^c I_h^c \cos(\phi_h^c)$$
(19)

$$Q = \sum_{h=0}^{\infty} V_h^a I_h^a \sin(\phi_h^a) + V_h^b I_h^b \sin(\phi_h^b) + V_h^c I_h^c \sin(\phi_h^c)$$
(20)

A potência aparente é calculada a partir de:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{21}$$

Define-se a potência de distorção como:

$$D = \sqrt{S_t^2 - S^2} \tag{22}$$

A potência de distorção não tem um significado físico claramente definido mas é uma componente da potência aparente S_t que complementa seu valor total juntamente com a parcela S.

A relação entre as potências é:

$$S_t^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$
(23)

Um conceito que também pode ser utilizado é o da potência instantânea, em que a potência ativa num determinado instante de tempo é calculada em função dos valores instantâneos de tensão de fase e corrente de linha.

A potência ativa trifásica instantânea em termos das variáveis nas coordenadas *a*, *b* e *c* é dada conforme referência Akagi et al., (1994), por:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \tag{24}$$

A potência reativa trifásica instantânea é também definida pela referência Akagi et al., (1994), como:

$$q_{3\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\left(v_{a} - v_{b} \right) i_{c} + \left(v_{b} - v_{c} \right) i_{a} + \left(v_{c} - v_{a} \right) i_{b} \right]$$
(25)

A Figura 2.27 foi obtida supondo-se a alimentação do forno constituída por um sistema trifásico simétrico e equilibrado, e o mesmo modelo de arco para as três fases do forno. A figura é o resultado da simulação feita com o programa de transitórios eletromagnéticos ATP, a partir dos dados da referência Ozgun e Abur (1999).

Nesta figura pode-se observar o comportamento de tensões, correntes e das potências instantâneas calculadas.



Figura 2.27 - Comportamento da tensão, corrente e potências instantâneas do arco elétrico.

Com a aplicação das fórmulas de (10) a (23), levando-se novamente em consideração um sistema trifásico simétrico e equilibrado, são obtidos os seguintes resultados:

a) Valores eficazes de tensões e correntes contemplando todas as harmônicas.

Va = 217,72 V Vb = 220,2 V Vc = 220,17 V Ia = 13,39 kA Ib = 13,502 kA Ic = 13,673 kA

b) Potência aparente equivalente.

S = 8,621 MVA

c) Soma das potências das componentes harmônicas de tensões e correntes (S).

S = 8,300 + j0,638 S = 8,343 MVA

d) Potência de distorção.

D = 2,174 MVA

 e) Os valores médios de potências instantâneas ativa e reativa, calculadas para um ciclo são:

 $p_{3\phi} = 8,300 \text{ MW}$ $q_{3\phi} = 0,934 \text{ MVar}$ A Figura 2.28 mostra o comportamento das potências ativa, reativa e aparente para diversas componentes harmônicas.



Figura 2.28 - Potências ativa, reativa e aparente das componentes harmônicas.





Figura 2.29 - Medições de tensão, corrente e variação de potências instantâneas.

Aplicando-se as fórmulas de (10) a (23) aos sinais coletados em campo, são obtidos os seguintes resultados:

a) Valores eficazes de tensões e correntes contemplando todas as harmônicas.

Va = 381,28 V	Vb = 241,75 V	Vc = 388,25 V
la = 40,101 kA	lb = 42,043 kA	lc = 28,013 kA

b) Potência aparente equivalente.

S = 36,566 MVA

c) Soma das potências das componentes harmônicas de tensões e correntes (S).

S = 30,812 + j13,272 (MVA) S = 33,501 MVA

d) Potência de distorção.

D = 14,653 MVA

e) Os valores médios de potências instantâneas, calculadas para um ciclo, de potência ativa e reativa para os dados do FEA1 são:

 $p_{3\phi}$ = 29,309 MW $q_{3\phi}$ = 13,846 MVAr



Figura 2.30 - Potências ativa, reativa e aparente das componentes harmônicas de tensão e corrente.

2.6 QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Durante o processo de fusão dos fornos a arco, existem variações consideráveis nos valores de corrente as quais provocam alterações substanciais

nas formas de onda de tensão normalmente caracterizadas como afundamentos (*"sag's"*) e elevações de tensão (*"swell's"*).

A seguir, são descritos os principais eventos que afetam a qualidade de energia em um sistema elétrico industrial com a presença de fornos elétricos a arco. O efeito *"flicker"* será apresentado no Apêndice D.

2.6.1 Afundamentos ("sag's") e elevações de tensão ("swell's")

Os distúrbios relativos aos afundamentos de tensão ("*sag*") e elevação de tensão ("*swell*") podem ser classificados para os sinais de tensão, conforme Tabela 2.3 a seguir. Já a Tabela 2.4 apresenta os critérios de variação de tensão em regime permanente senoidal de acordo com a Resolução nº 024 da ANEEL, homologada em janeiro de 2000.

Tabela 2.3 - Classificação típica dos distúrbios afundamento e elevação

Perturbação	Faixa	Classificação
afundamento ou elevação	0,5 ciclo a 29,99 ciclos	Instantânea
afundamento ou elevação	30 ciclos a 2,99 segundos	Momentânea
afundamento ou elevação	3 segundos a 60 segundos	Temporária

Tabela 2.4 - Taixas de Vallação de letisão de letidia			
Classificação da Tensão de Atendimento	Faixa de variação de Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)		
Adequada	0,95 TC ≤ TL ≤ 1,05 TC		
Precária	0,93 TC ≤ TL ≤ 1,05 TC		
Crítica	TL < 0,93 TC ou TL > 1,05 TC		

Tabela 2.4 - Faixas de variação de tensão de leitura

2.6.2 Distorção de tensão devido a harmônicos

A análise de um sistema elétrico industrial, face à presença de harmônicos de corrente e tensão, é feita através de medições e/ou simulações nas quais são calculados o Fator de Distorção de Tensão devido aos harmônicos (*FDu*) e o Fator de Distorção Individual da Tensão (*FDun*). Estas grandezas servem como indicativos

para quantificar a presença de harmônicos em um sistema elétrico, em maior ou menor intensidade e o grau de perturbação que causam na rede elétrica.

A flutuação de tensão de um barramento também está associada às distorções devido aos harmônicos de corrente, que apresenta, conforme Procedimento de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2003), genericamente os seguintes limites individuais para o *FDU*:

FDU: (ordem par) \leq 0,5% *FDU*: (ordem ímpar) \leq 1,0%

O valor de distorção de tensão devido aos harmônicos é dado por:

$$FDU_n = \frac{U_n}{U_1}.100$$
(26)

$$FDU = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1^2}.100$$
 (27)

onde:

- FDUn Fator de distorção individual de tensão em %;
- FDU Fator de distorção total de tensão em %;
- U_1 Componente fundamental;
- U_n Harmônico de tensão;
- n ordem do harmônico.

Conforme IEEE Stand. 519-1992 (1993) os índices FDU e FDUn devem atender:

- tensões de operação inferiores a 69 kV: FDUn < 3% e FDU < 5%
- tensões de operação superiores a 69,001 até 161 kV: FDUn < 1,5% e FDU < 2,5%
- tensões de operação superiores a 161,001 kV: FDUn < 1% e FDU < 1,5%

Observa-se que as normas internacionais ainda não chegaram a um consenso em relação aos índices *FDU* e *FDUn* e no Brasil os procedimentos de Rede do ONS (2003) que tomaram como base as recomendações constantes em: (GCOI, 1984) e (CGPS, 1993) também indicam valores diferentes daqueles encontrado em IEEE Stand. 519-1992 (1993).

A Tabela 2.5 a seguir, resume os principais distúrbios que afetam a qualidade de energia em um sistema elétrico.

Distúrbios	Características	Causas típicas
Interrupções	Momentânea - menor que 2 seg;	Queima de fusíveis;
.,	Temporária - entre 2 seg a 3 min;	Operação da proteção
	Sustentada ("outage") - duração acima	(abertura de disjuntores);
	de 3 min.	Falhas em equipamentos (pára-raios, isoladores,
		etc);
		Manutenção preventiva / corretiva;
		Acidentes nos ramais de transmissão e
		distribuição;
		Vendaval, quebra de isoladores, etc
Transitórios	Impulsivos unidirecionais;	Descargas atmosféricas;
	Oscilatórios com alterações nas	Chaveamentos de grandes blocos de cargas;
	magnitudes das formas de onda na	Chaveamento de capacitores;
	freqüência fundamental.	Abertura de linhas. etc
Subtensão	Redução da magnitude da tensão	Faltas remotas no sistema;
("Afundamento ou	RMS;	Partida de grandes motores;
Dip")	Instantâneo: 0.5 ciclo a 30 ciclos;	Perda de geração;
	Momentâneo: 0.5 seg. a 3 seg;	Entrada de grandes blocos de carga;
	Temporário: 3 seg. a 1 min.	Contato com arvores e animais;
0 H H ~		Fornos a arco – operação.
Sobre tensao	Acrescimo da magnitude da tensao	Faltas desequilibradas;
(Elevação)	RINS:	Rejeições de cargas;
	- Instantaneo: 0.5 ciclo a 30 ciclos;	Fornos a arco – operação.
	- Momentarieo. 0.5 seg a 5 seg,	
Variações de	- Temporano. 3 Sey a Timin. Variações na magnitude por mais de	Contingôncias oporacionais o condições
tonção do longo	1 min	contingencias operacionais e contrições
duração	1 11011	especiais de valiação da carga.
Distorções devido	Distorções da forma de onda:	Operação de cargas especiais ou pão lineares
a Harmônicos	Ressonâncias:	tais como.
a narmonioos	Sobre tensões sustentadas em regime	- Fornos a arco
	permanente.	- Inversores de freqüência:
		- Retificadores:
		- Ferroressonância.
Flutuação de	Variações na intensidade luminosa	Operação de cargas especiais;
tensão	com incômodo visual envolvendo	- Fornos a arco;
("Flicker")	variações repetitivas entre 8 a 14 Hz	- Cargas intermitentes.
Transitório de	Ruídos de baixa freqüência na faixa	Origens diversas em redes de consumidores que
curta duração	de 0 a 200 Hz	se propagam pelo sistema;
("Notching ["]		Pontes conversoras;
"Spike")		Aterramentos impróprios.

Tabela 2.5 - Problemas de qualidade de energia

Em função dos fornos elétricos a arco apresentarem diversos métodos de controle, haverá diferentes problemas de flutuação de carga, desequilíbrios trifásicos, harmônicos e problemas relacionados à qualidade da energia elétrica (MONTANARI et al., 1993) e (OZGUN; ABUR, 1999). Os métodos operacionais tradicionais de monitoramento das diversas fases de fabricação do aço (fusão e refino), não conseguem revelar com precisão as condições e tempo de duração de cada uma, bem como identificar os diferentes problemas relacionados, por exemplo, à qualidade de energia, para cada fase distinta do processo.

Com base em medições realizadas, seria importante desenvolver um método que pudesse identificar com precisão tais fases do processo siderúrgico, bem como os diversos eventos associados à qualidade de energia, possibilitando dessa forma, a alteração do tap do transformador do forno ou controlando a inserção do reator, identificado como *L3* na Figura 2.1.

Assim sendo o capítulo 3 descreve uma nova técnica para a identificação e a classificação dos eventos que afetam a qualidade de energia durante a operação dos fornos elétricos a arco, tomando como base e analisando os fenômenos associados aos sinais coletados na fase de fusão do aço, e apresentados neste capítulo.