

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

7.ª EDIÇÃO

JOÃO MAMEDE FILHO

Engenheiro eletricista

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1988-1990)

Ex-Diretor de Operação da Companhia Energética do Ceará — Coelce (1991-1994)

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1995-1998)

Ex-Presidente do Comitê Coordenador de Operações do Norte-Nordeste — CCON

Ex-Presidente da Nordeste Energia S.A. — Nergisa (1999-2000)

Atual Presidente da CPE — Consultoria e Projetos Elétricos

Professor de Eletrotécnica Industrial da Universidade de Fortaleza — Unifor (desde 1979)

LTC
EDITORA

8.1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico do nosso país surgiram projetos industriais em que os fornos elétricos são parte fundamental da carga. Em geral, apresentam uma potência elevada que preocupam sobremaneira as empresas concessionárias de energia elétrica, tanto pela capacidade do seu sistema supridor, como pela possibilidade de perturbação no seu próprio sistema, dependendo, neste caso, do tipo de forno que o consumidor adquiriu.

Os fornos elétricos estão divididos em três grupos distintos, cada um com suas características de processamento e operação definidas. Assim, são encontrados nos complexos industriais os seguintes tipos de fornos elétricos:

- fornos a resistência elétrica;
- fornos de indução eletromagnética;
- fornos a arco.

Dentro dos objetivos deste livro e em particular do presente capítulo, serão estudados sucintamente os dois primeiros tipos de fornos, devendo-se proceder a uma análise mais detalhada do último, devido às implicações que trazem aos sistemas de alimentação das concessionárias de energia elétrica que, por este motivo, exigem dos interessados a apresentação de estudos ou de dados que permitam fazê-los, a fim de assegurar um grau de estabilidade de tensão dentro dos limites de suas normas particulares.

8.2 FORNOS A RESISTÊNCIA

São assim denominados aqueles que utilizam o calor gerado por perdas Joule numa resistência elétrica que é atravessada por uma corrente de intensidade, geralmente elevada.

Os fornos a resistência, ao contrário dos fornos a arco, não provocam oscilação na tensão das redes de que são alimentados. Na verdade, contribuem significativamente para a melhoria do fator de potência do sistema de suprimento.

São constituídos de dois diferentes tipos, indicados para aplicações específicas nos processos industriais, ou seja, fornos a resistência de aquecimento direto e de aquecimento indireto.

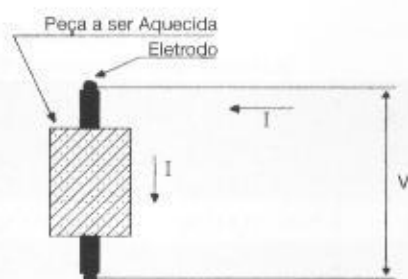
8.2.1 Fornos a Resistência de Aquecimento Direto

Neste tipo de forno, o material a ser trabalhado é posicionado entre os dois eletrodos e atravessado pela mesma corrente elétrica do circuito. Normalmente, a tensão dos eletrodos é de pequena intensidade.

São fornos de emprego muito específico, podendo-se citar, como exemplo, o aquecimento de água para produção de vapor, a manutenção da temperatura de fusão do vidro a partir de um bloco de material fundido, a fabricação de eletrodos de grafite utilizados em fornos a arco, a manutenção da temperatura do banho que permite a têmpera dos aços etc.

A Figura 8.1 ilustra o funcionamento desse tipo de forno.

FIGURA 8.1
Forno de aquecimento direto



8.2.2 Fornos a Resistência de Aquecimento Indireto

Neste tipo de forno, o material a ser trabalhado está contido em uma câmara isolada termicamente, e o calor é transferido da resistência elétrica através dos fenômenos de condução, convecção e irradiação.

São os tipos mais comuns de fornos a resistência. Industrialmente, são empregados na fusão de materiais como o chumbo e o alumínio, na secagem de vários produtos farmacêuticos, na vulcanização em geral, no cozimento de produtos alimentícios, no tratamento térmico de metais etc.

O dimensionamento da resistência bem como o material de que o forno é constituído devem obedecer a algumas prescrições básicas, tais como:

- ter uma elevada temperatura de fusão, na ordem de 25% superior à temperatura de fusão do material a ser trabalhado;
- ser resistente à corrosão na temperatura de operação;
- ter resistividade elevada;
- apresentar um elevado grau de dureza em altas temperaturas.

Alguns materiais respondem a estas e a outras características, o que permite serem utilizados como resistências de fornos elétricos, tais são as resistências de Nicromo V (80% Ni - 20% Cr), Cromax (30% Ni - 20% Cr - 50% Fe), Kantal (Cr, Al, Co, Fe) etc., normalmente constituídas de fios ou fitas dispostos em forma de espiral.

TABELA 8.1
Carga específica superficial (W/cm²)

Tipo de Liga	Temperatura do Forno (°C)						
	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200
80% Ni - 20% Cr	5,0	3,2	2,2	1,5	1,1	0,9	-
30% Ni - 20% Cr	4,6	3,0	2,0	1,4	1,0	0,8	-
20% Cr - 5% Al	8,0	5,8	4,3	3,1	2,2	1,3	0,8
Cr-Al-Co-Fe	3,9	3,5	3,0	2,4	1,5	-	-

As resistências elétricas podem ser ligadas de forma simples em circuitos monofásicos (fase-neutro ou fase-fase) ou em circuitos trifásicos, arranjados nas configurações estrela ou triângulo, preferindo-se esta última, que resulta uma menor quantidade do material resistor.

Um dado importante na escolha da seção da resistência é a carga específica superficial, que representa a maior taxa de transferência de potência cedida por unidade de superfície. Sua unidade é dada, em geral, em W/cm². É necessário, no entanto, avaliar para cada projeto a carga específica superficial, já que as seções de pequenas dimensões das resistências elétricas custam menos, porém têm durabilidade reduzida quando comparadas com as resistências de maior seção que apresentam custos significativamente maiores. Nas aplicações industriais, a carga específica superficial dos fios resistores é escolhida na faixa de 0,5 a 4,5 W/cm². A Tabela 8.1 fornece a carga específica superficial de algumas ligas de uso comum.

A Tabela 8.2 fornece a resistência ôhmica, característica das ligas Cromel e Copel.

TABELA 8.2

Características das ligas Cromel e Copel

Diâmetro do Fio (mm)	Resistência (Ohm/m)		Diâmetro do Fio (mm)	Resistência (Ohm/m)	
	80% Ni-20 Cr	55% Cu-45 Ni		80% Ni-20 Cr	55% Cu-45 Ni
10,414	0,01269	0,005742	0,64260	3,3368	1,5092
8,255	0,02017	0,009121	0,51050	5,2791	2,3886
6,553	0,03205	0,014502	0,40380	8,4322	3,8158
5,182	0,05124	0,022467	0,32000	13,4190	6,0764
4,115	0,08136	0,036747	0,25400	21,3300	9,6461
3,251	0,13025	0,058861	0,20320	33,3350	15,0600
2,591	0,20506	0,092850	0,16000	53,7100	24,3120
2,057	0,32515	0,146990	0,12700	85,3060	38,5840
1,626	0,52102	0,235570	0,11430	105,3200	47,6400
1,295	0,82020	0,370750	0,10160	133,2100	60,2720
1,016	1,33210	0,602720	0,08900	174,2200	78,7400
0,813	2,08340	0,941650	0,07870	221,7900	100,4000

O processo para o dimensionamento de um forno elétrico de aquecimento indireto pode obedecer às seguintes etapas:

a) Potência desejada do forno

A potência do forno é função do material a ser trabalhado e do tempo para o qual se deseja atingir a condição de operação. No caso de materiais metálicos, a Tabela 8.3 fornece a energia que deve ser utilizada para elevar as suas temperaturas a um valor desejado, próximo à temperatura de fusão.

Nessa tabela, os números em evidência representam aproximadamente a energia necessária, por tonelada, para os materiais indicados atingirem o estado de fusão.

A Equação (8.1) fornece a potência do forno de acordo com a quantidade de energia necessária para a sua operação e que é uma função da natureza da carga de trabalho.

$$P_f = \frac{E \times P_m}{\eta \times T} \text{ (kW)} \quad (8.1)$$

P_f – potência do forno, em kW;

η – rendimento do forno: varia entre 0,6 e 0,8;

T – tempo desejado para o material atingir a sua temperatura de trabalho, em horas;

P_m – peso do material a ser trabalhado, em t;

E – energia consumida no processo desejado, em kWh/t.

A Tabela 8.4 apresenta as principais propriedades de alguns materiais utilizados tanto em resistência de fornos como em carga de trabalho.

TABELA 8.3

Energia para elevar a temperatura dos metais (kWh/t)

Material	Temperatura Desejada (°C)													
	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500
Aço	20	38	50	60	90	120	160	175	215	225	250	260	280	295
Gusa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310	330	345	375
Al	55	80	100	140	170	300	335	370	393	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	57	65	76	90	100	120	135	200	215	223	235
Ag	-	-	27	38	45	50	55	60	105	110	120	127	135	140
Ni	20	38	50	60	85	100	115	140	160	180	195	220	237	333

TABELA 8.4

Propriedades dos materiais

Material	Composição	Resistividade $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Ponto de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Resistência à Tração (kgf/mm^2)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1,1221	1.350	66,79
Nicromo V	Ni-Cr	1,0806	1.400	70,31
Cromax	Fe-Ni-Cr	0,9975	1.380	49,22
Nirex	Ni-Cr-Fe	0,9809	1.395	56,25
Nilvar	Fe-Ni	0,8046	1.425	49,22
Bronze comercial	Cu-Zn	0,0415	1.040	26,01
Ni puro	Ni	0,0997	1.450	42,18
Platina	Pt	0,1060	1.773	34,00
Aço	Fe	0,0999	1.535	35,15
Zinco	Zn	0,0592	419	15,47
Molibdênio	Mo	0,0569	2.625	70,31
Tungstênio	W	0,0552	3.410	344,52
Alumínio	Al	0,0267	660	24,61
Ouro	Au	0,0242	1.063	27,00
Cobre	Cu	0,0172	1.083	24,61
Prata	Ag	0,0163	960	-

b) Determinação do diâmetro do fio resistor

$$D_f = 34,4 \times \sqrt{\frac{\rho}{P_1} \times \left(\frac{P_g}{N_p \times V} \right)^2} \quad (\text{mm}) \quad (8.2)$$

 D_f – diâmetro do fio resistor, em mm; ρ – resistividade do material do resistor, em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; P_1 – carga específica superficial do resistor, em W/cm^2 ; V – tensão de suprimento, em V; P_g – potência por fase do forno, em kW; N_p – número de circuitos resistores em paralelo.

c) Determinação do comprimento do fio do resistor

$$L_f = \frac{R_r}{R_{\Omega/\text{m}}} \quad (\text{m}) \quad (8.3)$$

 R_r – resistência do fio resistor, em Ω ; $R_{\Omega/\text{m}}$ – resistência, por unidade, do fio resistor, em Ω/m .

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.1)

Deseja-se calcular a resistência de um forno elétrico de aquecimento indireto destinado à fusão de 650 kg de prata, por corrida, num tempo de 30 min. Será utilizada como resistor do forno a liga Nicromo V (80% Ni – 20% Cr). A tensão de alimentação é de 380 V, trifásica, e os resistores serão ligados em triângulo.

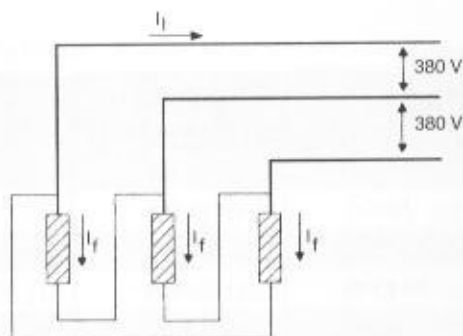
- Determinação da potência do forno

$$P_f = \frac{E \times P_m}{\eta \times T} = \frac{60 \times 0,65}{0,60 \times 0,50} = 130 \text{ kW}$$

 $E = 60 \text{ kWh/t}$ (Tabela 8.3); $\eta = 0,60$ (valor adotado); $T = 0,50$ horas;

FIGURA 8.2

Ligação do forno em estrela



$$P_m = 650 \text{ kg} = 0,65 \text{ t (peso da prata a ser trabalhada).}$$

Como as resistências do forno estão ligadas em triângulo, conforme a Figura 8.2, a potência dissipada por fase vale:

$$P_g = \frac{P_f}{3} = \frac{130}{3} = 43,33 \text{ kW}$$

- Determinação do diâmetro do fio resistor
- Aplicando-se a Equação (8.2), tem-se:

$$D_f = 34,4 \times \sqrt{\frac{1,0806}{1,5} \times \left(\frac{43,33}{1 \times 380}\right)^2} = 7,25 \text{ mm}$$

$$\rho = 1,0806 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m (Tabela 8.4)}$$

$$P_1 = 1,5 \text{ W/cm}^2 \text{ - Tabela 8.1 (liga Nicromo V, 80\% Ni - 20\% Cr, considerando-se a temperatura de fusão da prata igual a } 900^\circ\text{C aproximadamente)}$$

$$V = 380 \text{ V (ligação triângulo)}$$

$$N_p = 1$$

Logo, o diâmetro nominal do fio é de 8,255 mm (Tabela 8.2).

- Determinação da corrente de fase

$$I_f = \frac{P_f}{\sqrt{3} \times V} = \frac{130}{\sqrt{3} \times 0,38} = 197,5 \text{ A}$$

$$I_l = \frac{I_f}{\sqrt{3}} = \frac{197,5}{\sqrt{3}} = 114,0 \text{ A}$$

- c) Determinação da resistência do resistor por fase

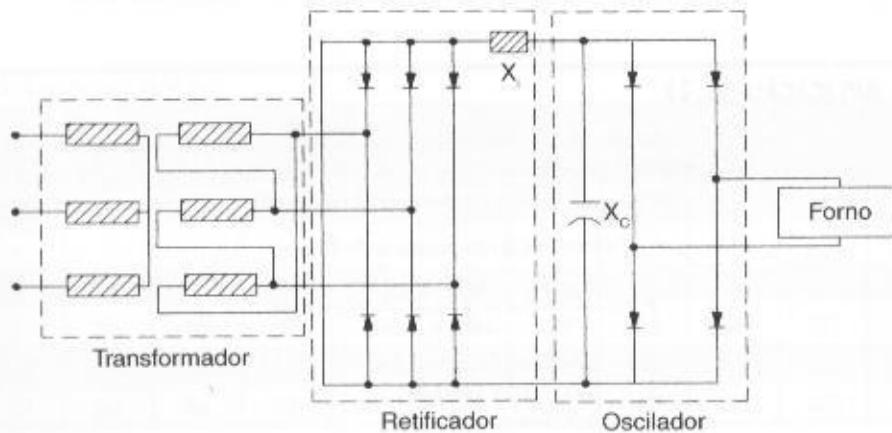
$$R_f = \frac{1,000 \times P_g}{I_f^2} = \frac{1,000 \times 43,33}{114^2} = 3,33 \text{ } \Omega$$

- Determinação do comprimento do resistor por fase

$$L_f = \frac{R_f}{R_{Dm}} = \frac{3,33}{0,02017} = 165 \text{ m}$$

FIGURA 8.3

Ligação de um forno de indução



$$R_{\Omega m} = 0,02017 \Omega/m \text{ (Tabela 8.2)}$$

Logo, o comprimento do conjunto dos resistores vale:

$$L_r = 3 \times L_s = 3 \times 165 = 495 \text{ m}$$

TABELA 8.5
Características de fusão de metais - fornos a canal

Material	Capacidade de Fusão (kg/h)	Potência do Forno (kW)	Consumos Médios (kWh/t)
Alumínio	70	35	50
	225	100	450
	1.000	500	500
Cobre	180	65	360
	750	235	315
	4.000	900	225

8.3 FORNOS DE INDUÇÃO

São assim denominados aqueles que utilizam as propriedades das correntes de Foucault para produzirem ou manterem a fusão de metais encerrados dentro de um recipiente isolado termicamente por material refratário e envolvido por uma bobina indutora.

Os fornos de indução operam basicamente como um transformador, no qual o primário representa a bobina de indução do forno e o secundário, em curto-circuito, equivale à carga metálica de trabalho.

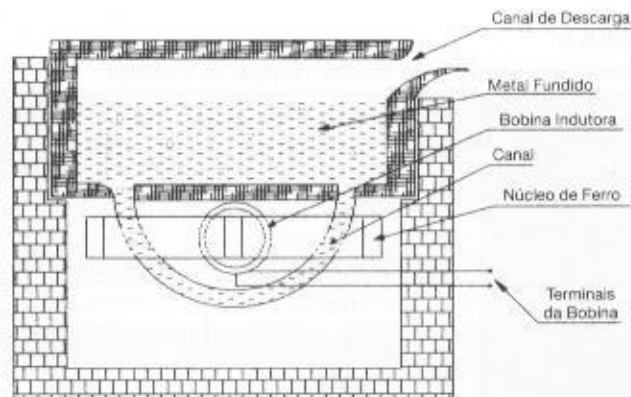
As bobinas de indução geralmente são fabricadas de cabos tubulares de cobre eletrolítico, dentro dos quais circula o meio refrigerante, normalmente a água tratada.

Uma propriedade vantajosa dos fornos de indução reside no fato de se poder transferir para a carga de trabalho uma potência elevada, sem que isto provoque fenômenos químicos externos que, combinados, modifiquem as características do material processado.

O rendimento dos fornos de indução depende de vários fatores, tais como a geometria do circuito indutivo e do material processado, as características elétricas e térmicas da carga, a intensidade do campo magnético da bobina de indução, a frequência de operação do circuito indutivo, a resistividade do material da carga e suas perdas magnéticas. Além disso, o rendimento dos fornos está diretamente ligado à profundidade de penetração das correntes induzidas no material da carga. Quanto maior for a frequência do circuito indutivo, menor é a penetração das correntes de Foucault na carga processada. Também o rendimento dos fornos é maior quando a carga é constituída de materiais ferromagnéticos e conseqüentemente menor quando a carga é constituída de materiais paramagnéticos e não-magnéticos, tais como o alumínio e o cobre.

Em geral, quando a carga é de grandes dimensões, a frequência do circuito indutivo deve ser baixa, igual à frequência industrial ou algumas vezes inferior a esta. Em peças delgadas podem ser aplicadas altas frequências. São consideradas frequências médias aquelas situadas em torno de 12.000 Hz.

FIGURA 8.4
Forno de indução a canal



As tensões de operação das bobinas de indução variam entre 60 e 600 V, dependendo da regulação de tensão que se deseja, a fim de se manter uma determinada potência requerida, de acordo com as necessidades do processo.

Em geral, os fornos de indução são monofásicos, sendo as bobinas de indução ligadas entre duas fases de um sistema trifásico, provocando inevitavelmente um desequilíbrio de corrente no sistema alimentador. Para se estabelecer um equilíbrio de corrente quando não se dispõe de três fornos de indução iguais, é necessário utilizar um retificador-oscilador, conforme desenho esquemático da Figura 8.3. Este esquema poderá ser substituído por um grupo motor-gerador.

Há três tipos diferentes de fornos de indução, cada um com uma aplicação específica, ou seja:

- fornos de indução a canal;
- fornos de indução de cadinho;
- fornos de indução para aquecimento de tarugos.

A seguir será feita uma análise sumária de cada um desses tipos sem entrar no detalhe do seu dimensionamento, que é normalmente um exercício de difícil solução, dado o grande número de parâmetros indeterminados, tais como a reatância de dispersão, a densidade de corrente induzida na massa do metal processada etc.

8.3.1 Fornos de Indução a Canal

Este tipo de forno é constituído de um ou mais recipientes isolados termicamente, em torno dos quais se constrói uma carcaça metálica dentro da qual se deposita a carga de trabalho. Em comunicação direta com o recipiente há um canal construído na parte inferior, em forma circular, cheio de material fundido da própria carga. No interior do canal são colocadas as bobinas de indução, envolvendo um núcleo magnético, submetidas, em geral, a uma tensão à frequência industrial.

Os fornos de indução a canal têm grande aplicação na manutenção da temperatura de metais já fundidos por outro forno ou por outro meio. Também são muito empregados na fusão de cobre, alumínio, zinco, bronze etc.

A Figura 8.4 mostra esquematicamente um forno de indução a canal. Já a Tabela 8.5 mostra as principais características de fusão dos metais num forno a canal.

FIGURA 8.5
Forno de indução de cadinho

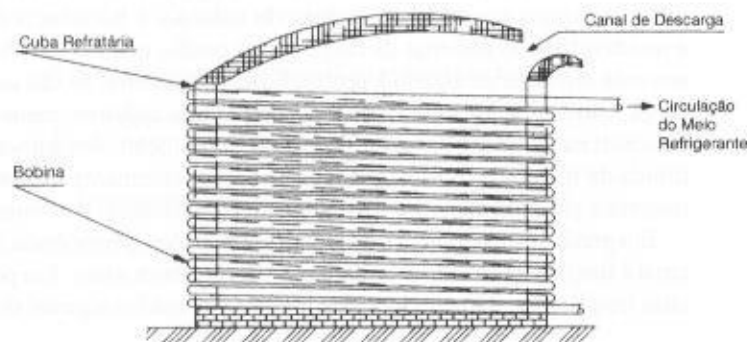


TABELA 8.6

Características de fusão de metais - fornos de cadinho

Material	Capacidade de Fusão (kg/h)	Potência do Forno (kW)	Consumos Médios (kWh/t)
Alumínio	60	45	740 a 770
	450	250	550 a 650
	900	500	520 a 570
Cobre	100	45	350 a 400
	500	180	370 a 420
	1.000	400	340 a 380

8.3.2 Fornos de Indução de Cadinho

Este tipo de forno é constituído de um recipiente circular isolado termicamente, envolvido por uma bobina de indução e dentro do qual se deposita o material de trabalho.

São empregados particularmente na fusão de cobre, bronze, aço inox etc. Também são muito utilizados na manutenção da temperatura de metais fundidos por outros fornos ou por outros processos.

A operação de fornos de indução de cadinho em baixas frequências provoca uma intensa movimentação na massa fundida do metal, devido às forças eletrodinâmicas da bobina de indução, resultando um efeito benéfico ao processo, pois homogeniza o banho.

A Figura 8.5 ilustra esquematicamente um forno de indução de cadinho mostrando a bobina de indução construída em fio tubular dentro do qual circula água como meio refrigerante.

A Tabela 8.6 fornece as características de fornos de indução de cadinho empregados na fusão de cobre e alumínio, segundo recomendações do IPT.

8.3.3 Fornos de Indução para Aquecimento de Tarugos

Este tipo de forno é constituído de várias bobinas circulares, instaladas no interior de material refratário, através das quais é introduzida a carga.

São empregados particularmente em companhias siderúrgicas destinadas à fabricação de ferro para a construção civil, utilizando como matéria-prima a sucata.

As peças metálicas de trabalho são conduzidas de uma extremidade à outra do forno através de roletes motorizados.

As bobinas que constituem o indutor podem ser dimensionadas diferentemente, a fim de manter a temperatura do material de trabalho dentro de condições adequadas do processo ao longo do forno.

Os fornos de indução para aquecimento de tarugos são constituídos basicamente de um conversor de frequência para permitir uma frequência compatível com o processo desejado, um banco de capacitores em derivação, com a finalidade de corrigir o fator de potência, um sistema de refrigeração das bobinas de indução e o próprio conjunto de bobinas indutoras.

A Figura 8.6 ilustra esquematicamente um forno de indução para aquecimento de tarugos, mostrando seus principais componentes.

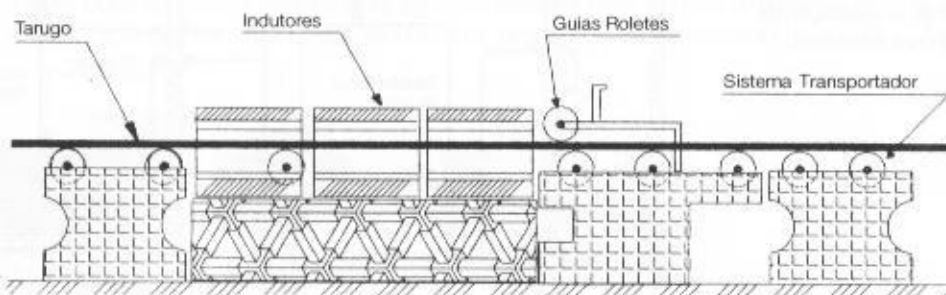


FIGURA 8.6
Forno de indução para
aquecimento de tarugos

8.4 FORNOS A ARCO

São assim denominados aqueles que utilizam as propriedades do arco elétrico para produzirem a fusão dos metais mantidos dentro de uma cuba isolada termicamente por material refratário.

Os fornos a arco são largamente empregados nas instalações industriais destinadas à fusão do ferro e aço, muito embora sejam empregados na fusão do cobre, latão, bronze e outras ligas metálicas.

Os fornos a arco surgiram no começo do século, mais precisamente no ano de 1904, concebidos pelo francês Héroult.

Sua construção está baseada no que hoje se denomina forno a arco direto, o mais utilizado atualmente pelas indústrias siderúrgicas.

O fenômeno de formação do arco elétrico está fundamentado na passagem de uma corrente entre dois eletrodos, tendo como meio ionizado, geralmente, o ar.

Os fornos a arco podem ser constituídos de três diferentes tipos:

- arco submerso ou arco-resistência;
- arco indireto;
- arco direto.

Para cada um dos tipos de forno anteriormente citados, a transmissão do calor chega até a carga de forma específica. No caso dos fornos a arco submerso, o material é aquecido como consequência da passagem de uma corrente elétrica através de sua massa, resultando em elevadas perdas Joule. No segundo caso, o calor é transferido através dos fenômenos de irradiação e convecção.

Nos fornos a arco direto, o próprio arco é o responsável pela transferência da energia térmica diretamente para o material da carga.

Os fornos a arco são fontes permanentes de poluição ambiental, tal é a quantidade de gases e material sólido expelidos para a atmosfera. A poeira lançada para o meio ambiente é constituída, em sua maioria, por óxidos (CaO , MnO , SiO e Fe_2O_3), e chega a atingir, em média, 11 kg/t de carga, correspondendo percentualmente ao fantástico valor de 1,1%.

8.4.1 Fornos a Arco Submerso

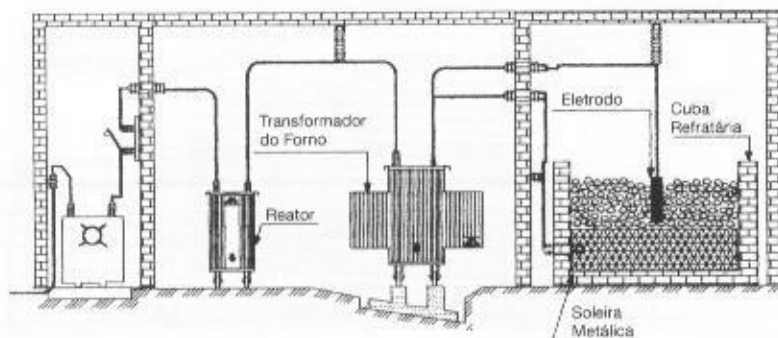
Também conhecido como forno a arco-resistência, este tipo de forno é constituído de uma cuba revestida de material refratário dentro da qual operam os eletrodos submersos na massa da carga de trabalho.

São destinados mais especificamente à produção de diversas ligas de ferro que, dependendo de sua composição, consomem uma quantidade de energia compreendida entre 3.000 e 6.000 kWh/t, podendo atingir, em certos casos, valores bem superiores.

Também são comumente empregados na manutenção do estado líquido da gusa ou aço oriundo de outros tipos de fornos.

Os fornos a arco submerso podem ser monofásicos a um eletrodo (Figura 8.7), monofásicos a dois eletrodos e trifásicos a três eletrodos (Figura 8.8). Este tipo de forno basicamente não apresenta distúrbios no sistema alimentador.

FIGURA 8.7
Subestação de alimentação de um forno a arco submerso



8.4.2 Fornos a Arco Indireto

Este tipo de forno é constituído basicamente de uma cuba revestida de material refratário dentro da qual operam os eletrodos fixados horizontalmente num ponto acima da carga de trabalho. Neste caso, o arco é mantido entre os eletrodos, e a energia térmica atinge a carga através dos fenômenos de irradiação e convecção.

São destinados mais especificamente à fusão de vários metais não-ferrosos. São de pouca utilização e constituídos normalmente de potências modestas, compreendidas, em geral, entre 100 e 1.000 kVA.

A Figura 8.9 mostra esquematicamente este tipo de forno e a sua ligação no sistema.

Tanto pela sua potência como pela maneira de operar, mantendo constante o arco formado entre os eletrodos, este tipo de forno não provoca distúrbios sensíveis nos sistemas de suprimento das concessionárias.

8.4.3 Fornos a Arco Direto

Este tipo de forno é constituído basicamente de uma cuba revestida de material refratário dentro da qual operam os eletrodos posicionados verticalmente acima da carga de trabalho.

São destinados mais especificamente à fusão de sucata de ferro e aço dirigida à fabricação de lingotes que, após laminados, se convertem em vergalhões utilizados na construção civil e em barras de espessuras e tamanhos variados, utilizadas em aplicações diversas. Também são empregados no superaquecimento e manutenção da temperatura de banhos de metais líquidos provenientes de outros fornos.

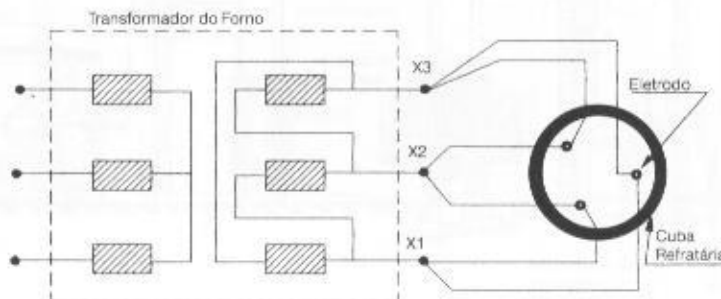
A Figura 8.10 mostra a vista lateral de uma instalação de forno a arco direto, detalhando a proteção de sobrecorrente, o reator limitador, o transformador do forno, os barramentos tubulares de cobre refrigerados, os cabos flexíveis, também refrigerados, e finalmente o próprio forno. Já a Figura 8.11 (a) e (b) mostra um forno a arco de fabricação ASEA, podendo-se observar os seus diferentes componentes que a seguir serão descritos e analisados. Enquanto isso, a Figura 8.12 apresenta o esquema elétrico trifásico simplificado de uma instalação siderúrgica, detalhando principalmente a parte referente às figuras anteriores.

Os fornos a arco direto, em geral, são trifásicos. O seu princípio de funcionamento se baseia na formação de um arco entre os eletrodos e a carga. A operação do forno se inicia com a ignição do arco e termina aproximadamente 2 1/2 horas depois, quando a carga é vazada da cuba refratária. Este período pode ser dividido em dois ciclos básicos de operação. O primeiro ciclo, chamado de período de fusão, é caracterizado pelo constante movimento da massa sólida a ser fundida. Neste período há grandes variações de corrente motivadas pela instabilidade do arco.

Ocorrem cerca de 600 a 1.000 curtos-circuitos e o período dura aproximadamente 50 minutos. É a parte mais crítica do regime de operação do forno. O segundo ciclo, comumente chamado de refino, é caracterizado por uma melhor estabilidade do arco devido ao estado líquido que a carga adquiriu. Neste ciclo, as flutuações de tensão são de menor intensidade, resultando um regime de operação mais favorável.

A operação do forno em curto-circuito é caracterizada quando a queda de tensão no arco é nula, isto é, os eletrodos estão diretamente em contato com a carga metálica. Nesta condição, a potência ativa absorvida pelo forno é praticamente nula. O forno absorve somente potência reativa, resultando, neste momento, num fator de potência também nulo. Os curtos-circuitos podem-se dar com os três eletrodos tocando simultaneamente a carga ou mais comumente com dois eletrodos.

FIGURA 8.8
Fornos a arco submerso



Os gráficos da Figura 8.13 mostram as características de operação de um forno a arco trifásico referentes a uma fase, em função da relação entre a corrente de carga I_f para um determinado instante de funcionamento e a corrente de curto-circuito do forno I_{ccf} quando os eletrodos estão em contato com o material de trabalho.

Com base nas curvas desta figura podem ser feitas várias considerações sobre as características operativas dos fornos a arco, ou seja:

- o fator de potência diminui quando a corrente de carga do forno, I_f , cresce, sendo nulo quando o seu valor for igual à corrente de curto-circuito do forno, isto é: $I_f/I_{ccf} = 1$;

- a potência ativa absorvida pelo forno cresce com o aumento da corrente de carga I_f , atingindo o seu máximo quando a relação $I_f/I_{cef} = 0,707$;
- a potência ativa absorvida pelo forno decresce a partir do aumento da corrente de carga que faz a relação $I_f/I_{cef} = 0,707$, atingindo o seu valor nulo quando esta relação for unitária;
- a potência reativa absorvida pelo forno cresce exponencialmente com o aumento da corrente de carga do forno, I_f , atingindo o seu valor máximo quando $I_f = I_{cef}$, ou seja, $I_f/I_{cef} = 1$;
- a potência aparente absorvida pelo forno cresce com o aumento da corrente de carga, I_f , atingindo o seu valor máximo quando $I_f = I_{cef}$;
- a potência ativa máxima absorvida pelo forno é 45% da potência de curto-circuito, no caso uma potência puramente reativa;
- quando o forno está operando em sua potência ativa máxima, a potência aparente corresponde a 70% da potência de curto-circuito;
- quando o forno está operando em sua potência ativa máxima, a potência reativa corresponde a 64% da potência de curto-circuito.

No período de fusão, o forno funciona em média com uma potência ativa 20% superior a sua potência normal absorvida e com um fator de potência compreendido entre 0,75 e 0,85. Já no período de refino, quando a carga se acha em estado líquido, a potência ativa média absorvida pelo forno é aproximadamente 30% de sua potência normal e com um fator de potência entre os limites de 0,85 e 0,90. Como se pode observar, durante o período de fusão as condições de operação do forno são as mais severas possíveis, transferindo para o sistema de alimentação grandes perturbações no nível de tensão.

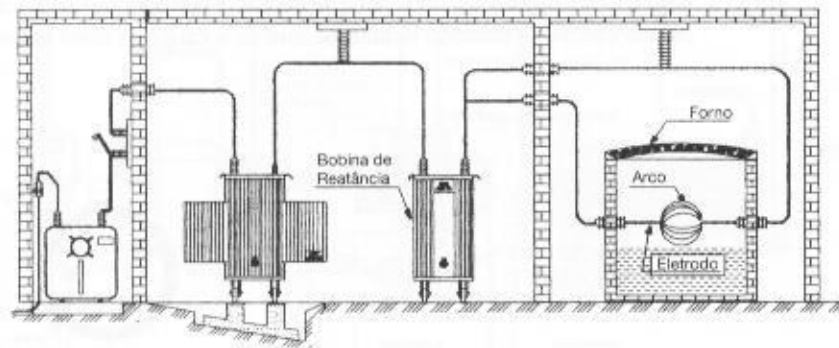
As principais partes físicas componentes de um forno a arco direto são:

a) Cuba refratária

É constituída de um recipiente de aço de grande espessura, isolada termicamente com materiais refratários, compostos à base de argila, dentro da qual é depositada a carga de trabalho.

A parte superior da cuba é provida de uma tampa na qual estão montados os eletrodos. A tampa é deslocada de sua posição de trabalho quando a cuba descarrega o material fundido. Um sistema de basculante permite a inclinação da cuba até um determinado ângulo para se proceder à descarga do material trabalhado. Logo em seguida se procede à recarga do forno, que é feita através de um grande recipiente montado numa ponte rolante e dentro do qual se encontra a sucata, a gusa ou outro material a que se destina o forno.

FIGURA 8.9
Subestação de alimentação de um forno a arco indireto



A tampa ou abóbada, geralmente de formato côncavo, é constituída de aço revestido internamente por uma camada de material refratário.

Tanto a cuba como a tampa são normalmente resfriadas através de um sistema de refrigeração cujo meio circulante é a água.

Os fornos a arco podem ser de abóbada fixa com carregamento pela porta de escória, ou de abóbada giratória, permitindo carregamento pela parte superior. A carcaça dos fornos é fornecida com bica de vazamento, porta de escória, anel refrigerado da abóbada, colunas e braços dos eletrodos, sistema para levantamento e rotação da abóbada. O basculamento dos fornos poderá ser feito por meios mecânicos ou hidráulicos.

b) Eletrodos

Os eletrodos são constituídos de um bloco cilíndrico de grafite de comprimento e diâmetro variáveis em função da capacidade do forno.

O uso provoca desgaste dos eletrodos, diminuindo o seu comprimento, o que pode ser compensado através de emendas apropriadas.

Os eletrodos de grafite apresentam uma densidade máxima de corrente da ordem de 40 A/cm^2 .

A fim de manter uma determinada distância entre os eletrodos e a carga, estes são movidos individualmente na vertical através de um sistema automático de regulação. Esta distância é necessária para manter um comprimento de arco entre os eletrodos e a carga que resulte uma potência a mais aproximadamente constante durante o ciclo de operação.

Os fornos são fornecidos com regulação automática dos eletrodos, porta-eletrodos refrigerados, economizadores e todos os acessórios necessários.

c) Transformador

Este equipamento é de fabricação especial, sendo imerso em óleo mineral e refrigerado a água. Deve suportar elevadas solicitações eletrodinâmicas, devido ao regime de trabalho dos eletrodos que freqüentemente operam em curto-circuito franco.

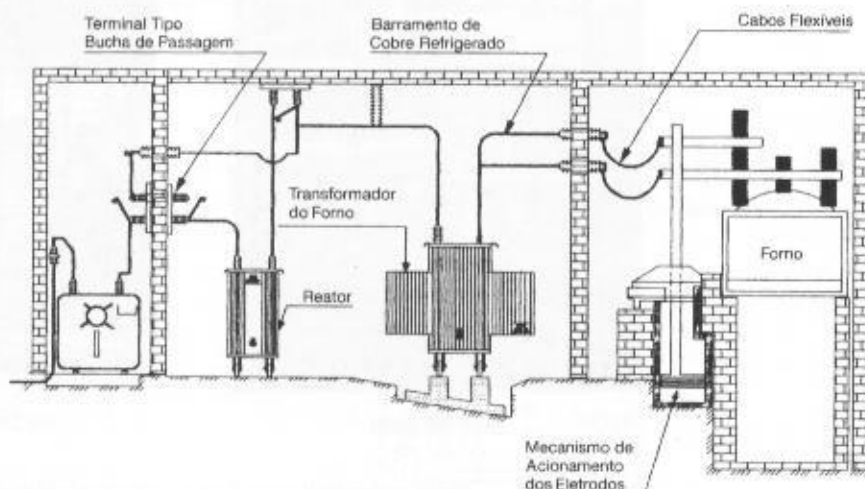
Os transformadores são trifásicos, com os enrolamentos primários ligados em estrela e o secundário em triângulo, conforme mostrado na Figura 8.12. O primário é constituído de 10 a 20 tapes, de modo a se ter no secundário tensões variáveis compreendidas geralmente entre 50 e 400 V.

Normalmente o transformador acompanha o forno respectivo, o qual é fabricado sob condições específicas.

A impedância percentual dos transformadores de forno está compreendida, em geral, entre 8 e 12%. As tensões primárias de alimentação dependem da capacidade do forno. Para pequenas unidades, os transformadores podem ser ligados à rede de distribuição primária da concessionária em 13,8 kV ou em outra tensão padronizada na área. É comum, porém, as siderúrgicas, pelo porte da carga, possuírem subestações próprias em tensão igual ou superior a 69 kV, e a partir da qual deriva o alimentador do transformador do forno.

A Tabela 8.7 fornece a potência aproximada dos transformadores em função da capacidade do forno destinado à fusão de aço e ferro fundido.

FIGURA 8.10
Subestação de alimentação de
um forno a arco direto



d) Cabos flexíveis

São condutores de cobre anular resfriados a água e fazem a conexão entre as barras fixas, ligadas ao secundário do transformador do forno, e os blocos móveis fixados no braço do porta-eletrodo.

e) Disjuntor do forno

É o equipamento de proteção do transformador do forno. Deve possuir uma elevada capacidade de ruptura. Devido às suas severas condições de operação, os disjuntores de proteção de fornos a arco são normalmente a ar comprimido ou do tipo a vácuo.

f) Painel de comando

O painel de comando inclui todas as funções necessárias para a operação do forno. Possui um comando manual e um automático, independentes, o que assegura maior flexibilidade ao comando dos eletrodos. O controle automático dos eletrodos é feito por meio de acionamentos eletrônicos, de respostas reversíveis e de resposta instantânea, programáveis através de um sinal de referência e de um sinal gerado no arco, podendo ser de corrente ou impedância.

8.4.3.1 Determinação da flutuação de tensão (*flicker*)

Os fornos a arco são uma fonte permanente de distúrbios para o sistema de alimentação das concessionárias, que, por este motivo, mantêm uma vigilância sobre as instalações siderúrgicas que operam com este tipo de equipamento.

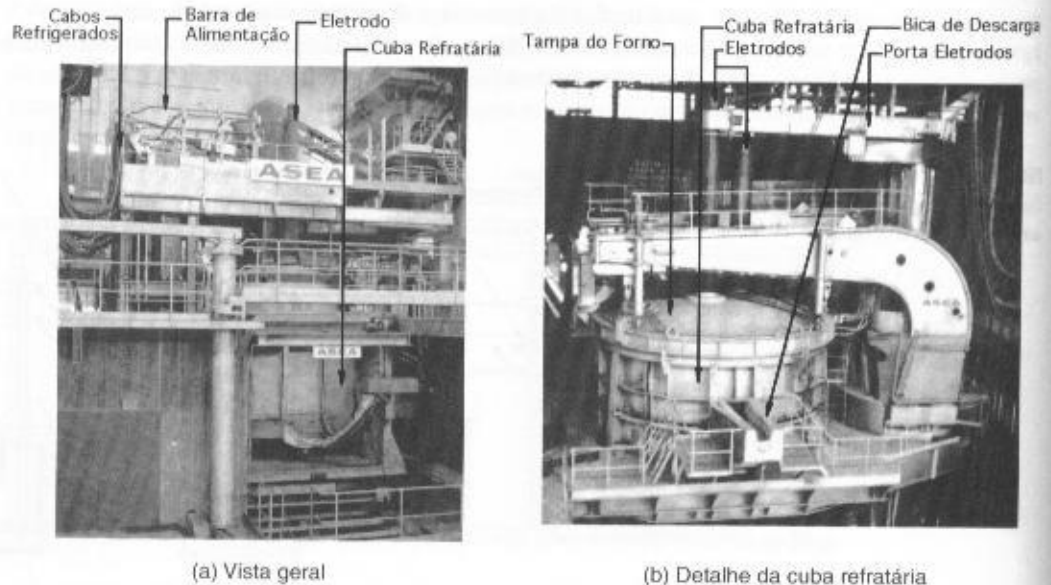
Os distúrbios se fazem sentir principalmente na iluminação incandescente e se caracterizam por uma variação da luminosidade das lâmpadas, que, além de irritar o observador, pode provocar lesões ao olho humano. Esta variação da luminosidade é o resultado da variação do valor eficaz, da tensão da rede provocada pela operação do forno, fenômeno este conhecido como *flicker*.

Como já mencionado anteriormente, quando da operação dos fornos a arco, principalmente no período de fusão, os eletrodos tocam momentaneamente a carga sólida, entrando em regime de curto-circuito, quando então a potência ativa absorvida do sistema se reduz às perdas ôhmicas do transformador, resultando num valor máximo de potência reativa, conseqüentemente reduzindo o fator de potência a níveis muito baixos.

O grande número de curtos-circuitos, no período de fusão, e a instabilidade do arco criam oscilações na rede que podem atingir cerca de até 20 variações por minuto.

Nessas condições, observando-se o gráfico da Figura 7.32, pode-se concluir que o limite percentual de variação de tensão é de 3,6 V na base de 120 V, que corresponde a 3%.

FIGURA 8.11
Vistas de um forno a arco direto



A Figura 8.14 mostra a variação do nível de tensão produzida por um forno a arco, destacando-se o comportamento da envoltória, o valor da tensão instantânea V_i , e a correspondente tensão eficaz V_{ef} .

É interessante observar que as flutuações de tensão produzidas por dois fornos a arco de mesma potência nominal são 18% mais severas do que aquelas verificadas quando somente um forno está em operação. Para se manter um nível de flutuação de tensão num sistema de suprimento a dois fornos a arco compatível com o nível de flutuação de tensão quando somente um forno está em operação, é suficiente que a reatância do sistema seja reduzida a 83% do sistema anteriormente projetado.

Também é certo que a potência equivalente para provocar os mesmos distúrbios que dois ou mais fornos de potência e características nominais iguais pode ser dada pela Equação (8.4).

$$P_{eq} = \sqrt[3]{N_f \times P_{nf}} \quad (8.4)$$

N_f – número de fornos em operação;
 P_{nf} – potência nominal do forno, em kVA.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.2)

Calcular a potência equivalente de um forno que produzirá os mesmos distúrbios que três fornos de potência unitária igual a 2.000 kVA, considerando as mesmas características de operação.

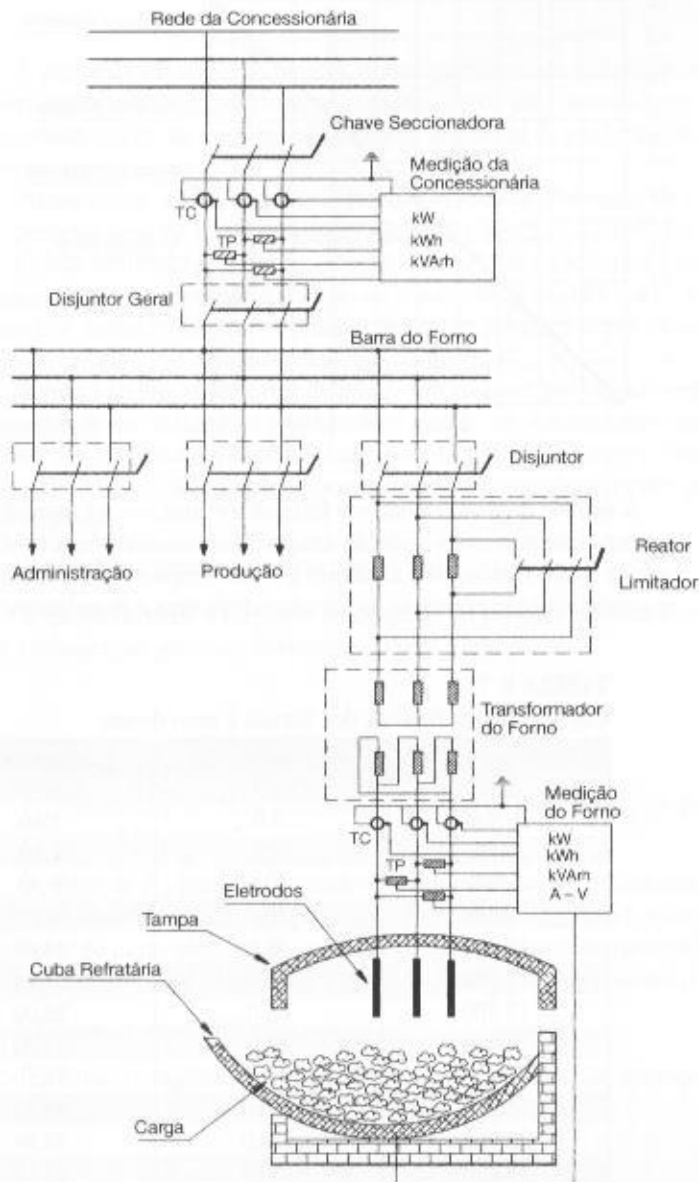
$$P_{eq} = \sqrt[3]{3 \times 2.000} = 2.632 \text{ kVA}$$

Quando dois ou mais fornos fazem parte de uma instalação, podem-se desprezar os efeitos provocados pelos fornos cuja potência unitária seja inferior a 75% da potência do maior forno.

As redes de alimentação de complexos siderúrgicos devem possuir um elevado nível de curto-circuito que minimize os efeitos do *flicker*. A Figura 8.15 fornece a capacidade do transformador do forno em função do nível de curto-circuito trifásico na barra de conexão do referido transformador, para produzir uma queda de tensão especificada numa rede de 120 V.

Dessa forma, a instalação de um transformador de 3.000 kVA conectado a uma barra cujo nível de curto-circuito seja de 300 MVA provocará uma flutuação de tensão de 2,5 V num sistema de 120 V, correspondente a 2,08%.

FIGURA 8.12
Esquema trifilar simplificado de
uma instalação siderúrgica

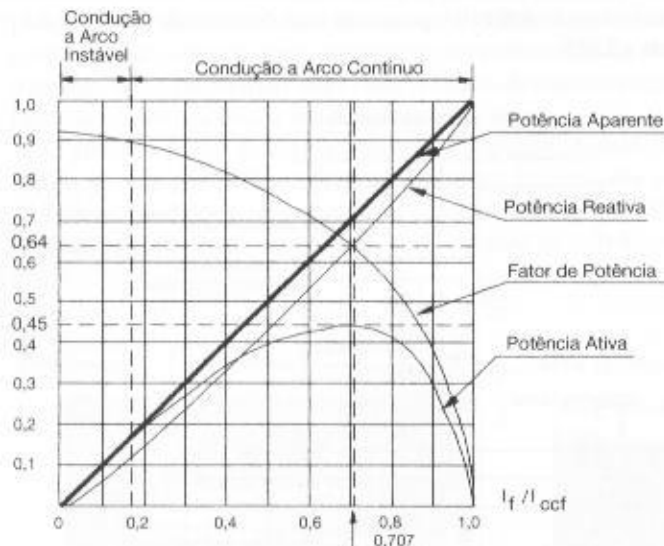


Quando da elaboração de um projeto de uma instalação siderúrgica, é necessário calcular o nível de flutuação de tensão e comparar o resultado com valores preestabelecidos que indicam a possibilidade de operação do forno sem causar distúrbios prejudiciais aos consumidores ligados ao sistema supridor da concessionária. Podem ser encontradas, na prática, situações distintas que serão analisadas detidamente.

8.4.3.1.1 Método da queda de tensão a baixas frequências (método inglês)

Existem vários métodos de cálculo que permitem determinar o nível máximo de flutuação de tensão, podendo-se destacar o método francês da EDF, o método alemão (FGH), o método americano da constante de queda de tensão mútua e, finalmente, o método inglês (ERA), que relaciona a queda de tensão à frequência industrial, queda essa devida a um curto-circuito trifásico franco nas pontas dos eletrodos, com as componentes de baixa frequência entre 1,5 e 30 Hz responsáveis pelo efeito visual do *flicker*. O curto-circuito é considerado admitindo-se que o transformador do forno esteja conectado na derivação mais desfavorável. Mais recentemente a UIE – União Internacional de Eletrotérnia desenvolveu um medidor de *flicker*, cujo método de avaliação desse fenômeno vem ganhando a adesão e confiança dos especialistas.

FIGURA 8.13
Características de operação de um forno a arco trifásico



A análise do *flicker* pode ser feita observando-se a Figura 8.14, em que a onda de tensão varia acentuadamente em relação ao tempo. Considerando-se a envoltória da onda de tensão, percebe-se que a sua formação é aleatória e a sua frequência é baixa. Essa onda de valor eficaz, V_{ef} , é a responsável pelo efeito do *flicker* em televisores e principalmente em lâmpadas incandescentes.

TABELA 8.7

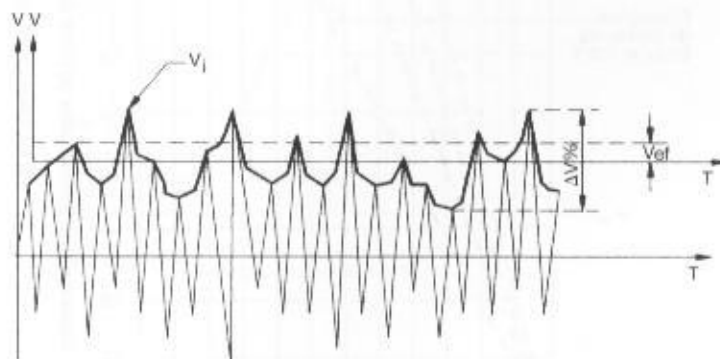
Características básicas dos fornos a arco direto

Potência (kVA)	Capacidade (t)	Produção (t/h)	Consumo (kWh/t)
600	0,7	0,70	550
1.500	3,0	1,80	545
3.000	7,0	2,80	625
5.000	10,0	6,30	480
7.000	20,0	9,23	460
10.000	35,0	14,48	440
12.500	40,0	17,14	435
17.500	65,0	26,00	420
20.000	80,0	30,00	420
25.000	100,0	37,50	420
31.500	110,0	49,80	440
35.000	120,0	53,30	420
40.000	150,0	62,10	420

A avaliação do efeito do *flicker* pode ser feita calculando-se o valor médio quadrático das variações de V_i vistas nas curvas da Figura 8.14. Tomando-se a tensão eficaz, V_{ef} , ao quadrado, aproximadamente igual ao valor médio quadrático das flutuações de tensão, pode-se relacionar percentualmente aquele valor com a tensão eficaz da rede de alimentação no ponto de entrega de energia.

A determinação percentual de um valor de V_{ef} que limitasse as condições de operação dos fornos a arco foi feita através da medição de flutuação de tensão em várias instalações siderúrgicas. Como resultado destas investigações, foi elaborado um gráfico que expressa a proporção de tempo durante a qual o valor de V_{ef} tinha sido excedido.

FIGURA 8.14
Variação do nível de tensão
produzida por um forno a arco



A curva da Figura 8.16 mostra, como exemplo, o resultado de um levantamento de dados que permitiu determinar, juntamente com um grupo de consumidores, o valor máximo da flutuação de tensão capaz de suscitar um número aceitável de reclamações por parte dos integrantes do referido grupo analisado.

Nessa curva, a abscissa representa os valores de flutuação de tensão percentual e a ordenada, as percentagens de tempo durante o qual os valores de V_{ef} foram excedidos.

Como resultado prático, foi adotado como limite o valor da flutuação de tensão igual a 0,25%, que se passou a denominar *padrão de flutuação de tensão* - ΔV_p . Logo, o *padrão de flutuação de tensão* é definido como "a variação de tensão provocada pelo forno e que é excedida em apenas 1% do tempo total de funcionamento do mesmo".

Sendo a aceitação do nível do *flicker* um caso subjetivo e as medições efetuadas para uma certa quantidade de instalações existentes, o padrão de flutuação de tensão relativo a um determinado forno indica a probabilidade de surgirem ou não reclamações durante a operação do mesmo.

O desenvolvimento do cálculo que permite determinar o valor da flutuação ΔV_p pode ser assim considerado:

a) Queda de tensão primária percentual

A queda de tensão no ponto de conexão do primário do transformador do forno com o sistema de alimentação pode ser determinado pela Equação (8.5).

$$\Delta V\% = \frac{P_{cf}}{P_s} \times 100 \quad (8.5)$$

P_{cf} - potência de curto-circuito do forno, em kVA;

P_s - potência de curto-circuito do sistema de suprimento no ponto de conexão considerado, em kVA.

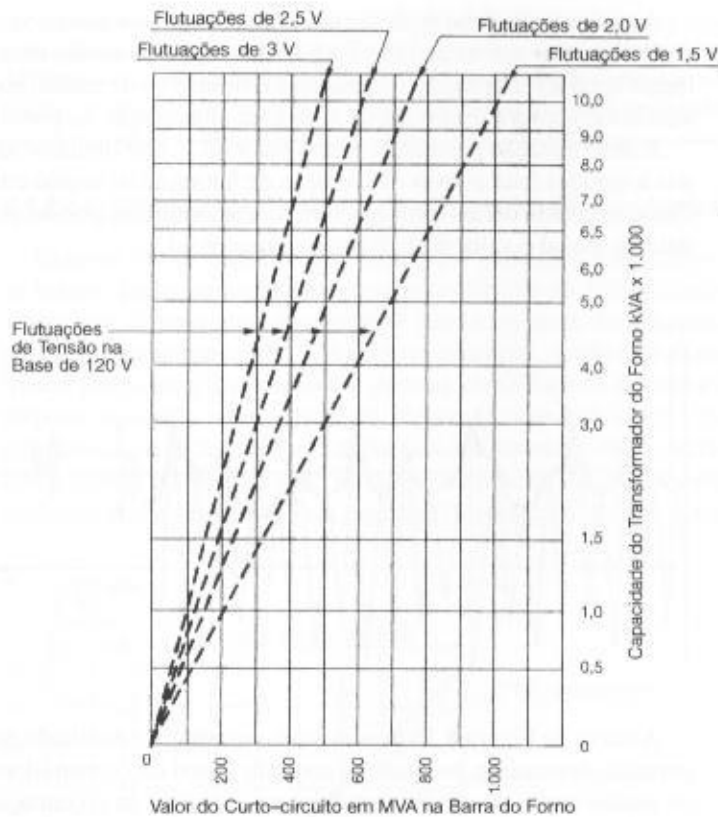
O valor de P_{cf} pode ser tomado considerando-se os três eletrodos em curto-circuito franco e o transformador do forno ligado no tape mais desfavorável, isto é, aquele que resulta na maior corrente de curto-circuito. A potência de curto-circuito do forno é fornecida pelo fabricante e, em geral, está compreendida entre 1,8 e 2,5 vezes a potência nominal do forno.

b) Fator de severidade

É um fator empírico que depende das características de operação do forno. Pode ser calculado pela Equação (8.6).

$$K_s = \frac{\Delta V_p}{\Delta V\%} \quad (8.6)$$

FIGURA 8.15
Determinação da capacidade do transformador de forno a arco



O valor de K_s pode variar entre os limites de 0,09 e 0,15. Muitas vezes é atribuído o valor de 0,15 quando não são conhecidas as características construtivas e de operação do forno.

c) Cálculo do padrão de flutuação de tensão

Este valor é obtido a partir da combinação das duas equações anteriores, ou seja:

$$\Delta V_p = K_s \times \frac{P_{cf}}{P_{cs}} \times 100 \quad (8.7)$$

O valor de ΔV_p assim obtido refere-se ao ponto considerado do curto-circuito, P_{cr} . O valor de ΔV_p em outros pontos do sistema pode ser determinado utilizando-se a relação de impedância, ou seja:

$$\Delta V_{p1} = \frac{Z_1}{Z_2} \times \Delta V_{p2} \quad (8.8)$$

Z_1 – impedância do sistema até o ponto no qual se deseja obter ΔV_{p1} ;

Z_2 – impedância do sistema vista do ponto de instalação do forno.

O valor de ΔV_p assim obtido está relacionado com a operação de somente um forno a arco. O cálculo de ΔV_p , quando estão em funcionamento dois ou mais fornos, pode ser feito através da Equação (8.9).

$$\Delta V_{pr} = \frac{98 + N_f}{100} \times \sqrt[4]{\sum (\Delta V_p)^2} \quad (8.9)$$

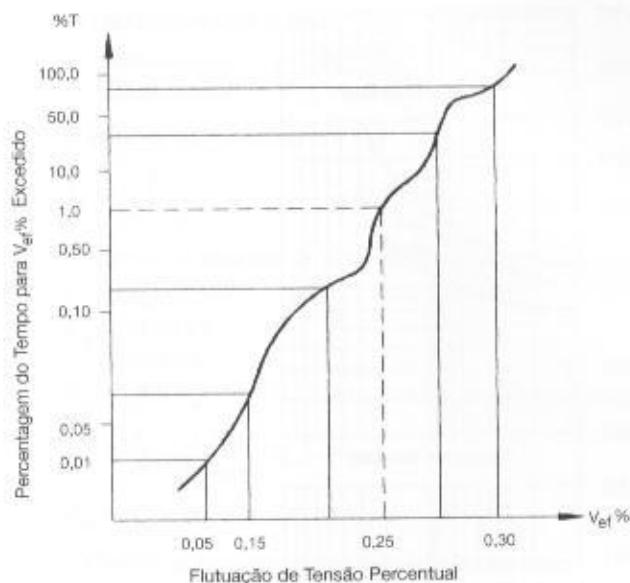
ΔV_{pr} – padrão de flutuação de tensão resultante;

ΔV_p – padrão de flutuação de tensão de cada forno considerado;

N_f – número de fornos em operação.

É importante frisar que os valores do padrão de flutuação de tensão calculados anteriormente (ΔV_p e ΔV_{pr}) para uma determinada instalação siderúrgica que utiliza fornos a arco não deverão ser superiores ao valor-limite estabelecido de 0,25% para sistemas alimentados até a tensão de 138 kV. Para tensões superiores, o valor de ΔV_p é de 0,20%.

FIGURA 8.16
Curva de flutuação de tensão e a
percentagem de tempo excedido



O gráfico da Figura 8.17 permite antever se a operação de um forno a arco irá provocar flutuações de tensão num nível tolerável ao observador, ser perceptível mas sem afetar o conforto visual do observador ou, ainda, simplesmente ser intolerável. Esta averiguação pode ser feita conhecendo-se a reatância do sistema de suprimento expressa na base da potência nominal do forno.

Também, como uma primeira indicação da probabilidade de haver flutuação de tensão em níveis toleráveis ou não no ponto de entrega de energia, podem-se verificar as seguintes desigualdades:

$$\frac{P_{cs}}{P_{nf}} \geq 100 \text{ (flutuações de tensão toleráveis)}$$

$$\frac{P_{cs}}{P_{nf}} < 60 \text{ (flutuações de tensão intoleráveis)}$$

P_{nf} – potência nominal do forno

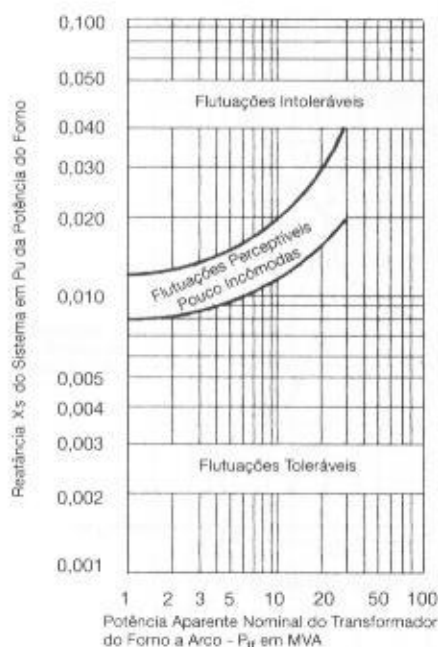
Nos cálculos práticos, como o transformador do forno está geralmente muito próximo do forno correspondente, podem-se desprezar as impedâncias dos cabos flexíveis e das barras fixas ligadas ao sistema secundário do referido transformador.

Muitas vezes, fornos antigos devem ser remanejados de uma unidade industrial para outra, em geral localizada distante, devendo o mesmo ser ligado a um sistema supridor cujo nível de curto-circuito seja menor. Neste caso, é comum o proprietário não conhecer mais os dados característicos do forno, criando uma incógnita para os técnicos que irão calcular as novas condições de operação desta unidade. Desta forma, deve-se calcular o valor do curto-circuito máximo em que deve operar o forno ligado nas novas instalações, considerando que o mesmo apresenta condições severas de funcionamento em razão de sua própria construção, o que pode ser dado pela Equação (8.10).

$$P_{cf} = 0,0167 \times P_{cs} \quad (8.10)$$

Essa equação é obtida da Equação (8.7), considerando-se os valores máximos do padrão de flutuação de tensão, $\Delta V_p = 0,25$ e o fator de severidade $K_s = 0,15$.

FIGURA 8.17
Níveis de flutuação-limite de tensão em função da potência nominal do transformador e da reatância da linha



EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.3)

Considerar a instalação industrial representada na Figura 8.18 na qual está prevista a instalação de um forno a arco direto. Determinar as condições de flutuação de tensão na barra de conexão do primário do transformador do forno que corresponde praticamente ao ponto de entrega de energia.

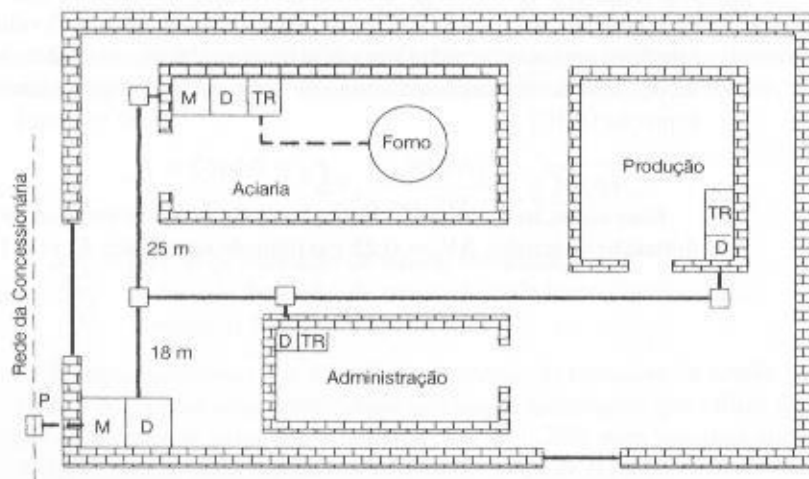
- potência nominal do forno: 1.500 kVA;
- potência de curto-circuito do forno: 3.000 kVA;
- fator de severidade: 0,10;
- tensão secundária máxima de alimentação do forno: 400 V;
- potência nominal do transformador do forno: 1.500 kVA;
- impedância do transformador do forno: 10%;
- perdas do cobre do transformador do forno: 18.000 W;
- impedância própria do forno: 2% (na base P_n).

Os dados do sistema são:

- corrente de curto-circuito trifásico no ponto P de entrega de energia: 3,5 kA;
- tensão primária de fornecimento: 13,8 kV.

São desconsideradas as impedâncias dos condutores primários que ligam o cubículo de proteção geral à subestação destinada ao forno por serem de efeito desprezível. A Figura 8.19 mostra o diagrama unifilar simplificado da instalação.

FIGURA 8.18
Indústria siderúrgica



a) Escolha dos valores base

- potência base: $P_b = 1.500$ kVA;
- tensão base: $V_b = 13,8$ kV.

O valor da corrente base vale:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 13,8} = 62,75 \text{ A}$$

b) Cálculo da impedância reduzida do sistema de suprimento

- **Reatância**

$$V_{op} = 13,80 \text{ kV}$$

$$I_{cs} = 3.500 \text{ A}$$

$$P_{cs} = \sqrt{3} \times V_{op} \times I_{cs} = \sqrt{3} \times 13,8 \times 3.500 = 83.658 \text{ kVA}$$

$$X_w = \frac{P_b}{P_{cs}} = \frac{1.500}{83.658} = 0,0179 \text{ pu}$$

$$Z_w = R_w \times jX_w = 0 + j0,0179 \text{ pu}$$

c) Cálculo da impedância do transformador do forno

- **Resistência**

$$R_{pr} = \frac{P_{ow}}{10 \times P_w} = \frac{18.000}{10 \times 1.500} = 1,2\% = 0,012 \text{ pu (na base } P_w)$$

$$R_w = R_{pr} \times \frac{P_b}{P_w} \times \left(\frac{V_w}{V_b}\right)^2 = 0,012 \times \frac{1.500}{1.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80}\right)^2$$

$$R_w = 0,012 \text{ pu (na base } P_b)$$

- **Reatância**

$$X_{pr} = \sqrt{Z_{pr}^2 - R_{pr}^2} = \sqrt{0,10^2 + 0,012^2} = 0,0993 \text{ pu (na base } P_w)$$

$$X_w = X_{pr} \times \frac{P_b}{P_w} \times \left(\frac{V_w}{V_b}\right)^2 = 0,0993 \times \frac{1.500}{1.500} \times \left(\frac{13,80}{13,80}\right)^2$$

$$X_w = 0,0993 \text{ pu (na base } P_b)$$

$$Z_w = 10\% = 0,10 \text{ pu (na base } P_w)$$

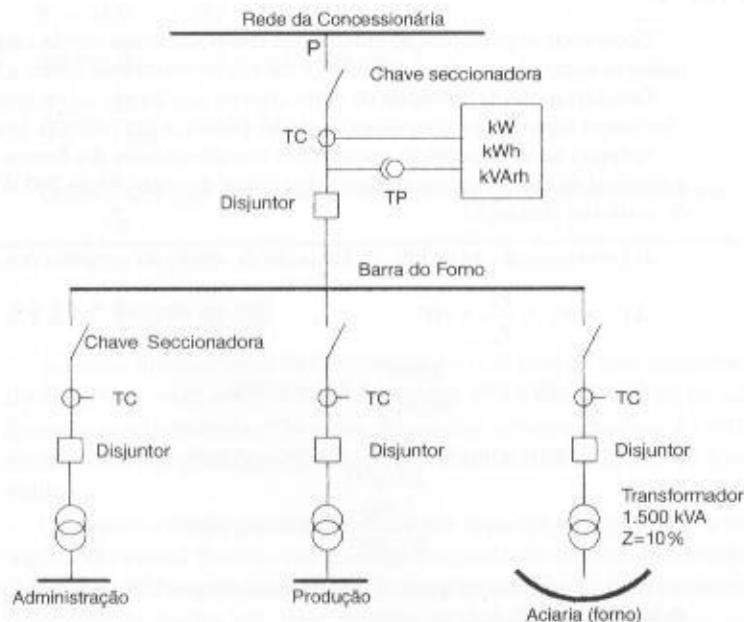
$$Z_{af} \cong X_w = 2\% = 0,02 \text{ pu (na base } P_w)$$

$$Z_w = R_w + jX_w = 0,012 + j0,0993 \text{ pu}$$

$$Z_{waf} = Z_w + Z_w + Z_{af} = (0 + j0,0179) + (0,012 + j0,0993) + j0,02$$

$$Z_{waf} = 0,012 + j0,1372 \text{ pu} \rightarrow Z_{waf} = 0,13772 \text{ pu}$$

FIGURA 8.19
Forno sem compensação



d) Determinação da corrente de curto-circuito no barramento secundário do transformador do forno

$$I_{cc} = \frac{I_b}{Z_{uno}} \times \frac{V_{sp}}{V_i} = \frac{62,75}{0,13772} \times \frac{13,800}{400} = 15,719 \text{ A}$$

A determinação do padrão de flutuação de tensão no barramento secundário do transformador do forno

$$\Delta V_p = K_s \frac{P_{cf}}{P_{cs}} \times 100 = 0,10 \times \frac{3,000}{10,890} \times 100 = 2,75\%$$

$$P_{cs} = \sqrt{3} \times 0,40 \times 15,719 = 10,890 \text{ kVA}$$

$$\Delta V_p > 0,25\%$$

Como se pode observar, nenhuma carga deverá ser ligada ao barramento secundário do transformador do forno, tanto em consequência do intolerável nível de flutuação de tensão como pela possibilidade de variação do tape do referido transformador.

e) Determinação do padrão de flutuação de tensão no barramento de conexão do forno, ou seja, primário do transformador do forno.

$$\Delta V_{p1} = K_r \frac{P_{cf}}{P_{cs}} \times 100 = 0,10 \times \frac{3,000}{83,658} \times 100 = 0,35\%$$

$$\Delta V_p = 0,25\% \text{ (máximo valor admitido)}$$

Neste caso, a concessionária não deve permitir a ligação do forno ao seu sistema de distribuição, sob pena de sofrer reclamações de seus consumidores. Desta forma, o projetista deve prever medidas de correção das flutuações de tensão. O mesmo valor poderia ser obtido através das relações das impedâncias, ou seja:

$$\Delta V_{p1} = \frac{Z_1}{Z_2} \times \Delta V_{p2} = \frac{0,0179}{0,13772} \times 2,75 = 0,35\%$$

Uma outra averiguação pode ser feita através do gráfico da Figura 8.17, tomando-se a reatância do sistema de suprimento $X_m = 0,0179 \text{ pu}$ na base da potência nominal do forno. Desse modo, a flutuação de tensão está na faixa das flutuações intoleráveis, conforme se constatou pelo cálculo. Também pode ser verificada a seguinte relação:

$$\frac{P_{cs}}{P_{cf}} = \frac{83,658}{1,500} = 55,7 < 60$$

Nesse caso, as flutuações de tensão são de nível intolerável.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.4)

Considerar uma instalação siderúrgica composta, entre outras cargas, de três fornos a arco de mesma potência nominal e igual a 3.000 kVA e fatores de severidade iguais a 0,09, 0,10 e 0,11, respectivamente.

Considerar que as potências de curto-circuito dos fornos sejam iguais a 1,9 vez a sua potência nominal. Um quarto forno é ligado ao sistema, sendo, porém, a sua potência igual a 1.000 kVA.

Sabendo-se que a potência nominal dos transformadores dos fornos é igual à dos respectivos fornos e que a potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia é de 260.000 kVA, calcular o nível de flutuação de tensão da instalação.

a) Determinação do padrão de flutuação de tensão do conjunto dos fornos

$$\Delta V_p = K_s \times \frac{P_{cf}}{P_{cs}} \times 100$$

$$\Delta V_{p1} = 0,09 \times 1,9 \times \frac{3,000}{260,000} \times 100 = 0,19\%$$

$$\Delta V_{p2} = 0,10 \times 1,9 \times \frac{3,000}{260,000} \times 100 = 0,22\%$$

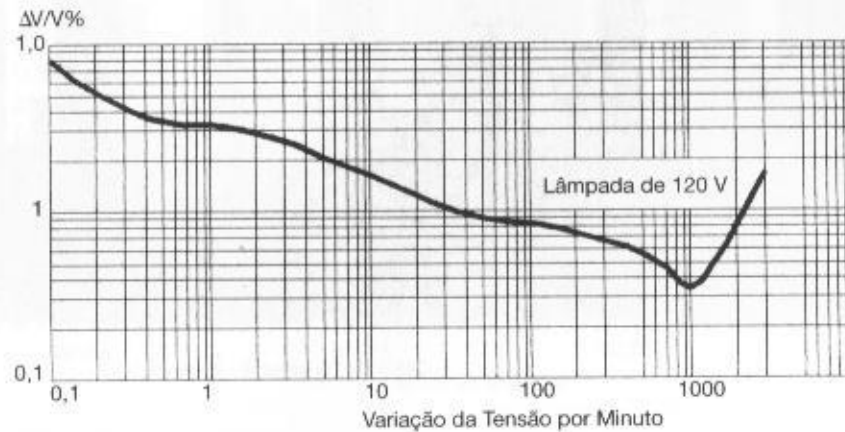
$$\Delta V_{p3} = 0,11 \times 1,9 \times \frac{3,000}{260,000} \times 100 = 0,24\%$$

Como a potência do quarto forno é menor do que 75% do maior forno, não será considerada no cálculo de avaliação do flicker.

$$\Delta V_{pr} = \frac{98 + N_t}{100} \times \sqrt[3]{\sum (\Delta V_p)^4} = \frac{98 + 3}{100} \times \sqrt[3]{(0,19^4 + 0,22^4 + 0,24^4)} \rightarrow \Delta V_{pr} = 0,29\% > 0,25\%$$

Logo, pela análise, a concessionária de energia elétrica não deverá fazer a ligação da instalação siderúrgica no seu sistema, pois há probabilidade de haver reclamações dos outros consumidores, devido às flutuações de tensão.

FIGURA 8.20
Curva de frequência cumulativa



EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.5)

Deseja-se instalar um forno numa indústria siderúrgica, mas seu proprietário adquiriu-o de terceiros sem que lhe fossem fornecidas as características técnicas do mesmo. Saber qual o limite de potência de curto-circuito que deve possuir o forno, conhecendo-se, no ponto de entrega de energia, a corrente de curto-circuito, $I_{cc} = 3.500\text{A}$, valor simétrico, na tensão de 13,80 kV.

A potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia é:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times 13,8 \times 3.500 = 83.568 \text{ kVA}$$

Para que as flutuações de tensão sejam toleráveis, deve-se ter:

$$P_{cf} = 0,0167 \times P_{cc} = 0,0167 \times 83.658 = 1.397 \text{ kVA}$$

Considerando-se que a potência nominal do forno seja a metade de sua potência de curto-circuito, tem-se:

$$P_{nf} = 0,50 \times 1.397 = 698 \text{ kVA}$$

Através da seguinte relação, tem-se:

$$\frac{P_{cc}}{P_{nf}} = \frac{83.658}{698} = 119,8$$

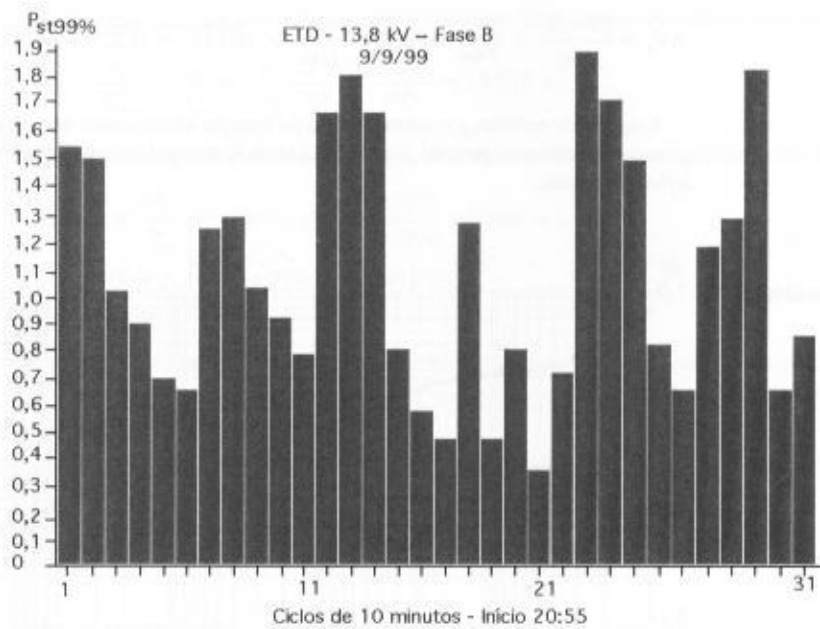
Como $\frac{P_{cc}}{P_{nf}} > 100$, as flutuações de tensão são perfeitamente toleráveis.

8.4.3.1.2 Método da UIE

A União Internacional de Eletrotermia – UIE propôs uma metodologia estatística para avaliação do *flicker* que vem sendo adotada nos mais diferentes países do mundo, com exceção dos Estados Unidos, sendo reconhecida pelas diferentes concessionárias do setor elétrico brasileiro como a forma mais adequada para análise de viabilidade da conexão de fornos a arco nos seus sistemas elétricos.

Qualquer método de análise de *flicker* leva em consideração a reação das pessoas quanto ao incômodo visual. Assim, o analisador de cintilação demodula a tensão num determinado ponto do sistema e, através da ponderação da tensão modulante pela característica do conjunto lâmpada-olho-cérebro, indica um valor peculiar de desconforto visual.

FIGURA 8.21
Curva analítica do parâmetro
 $P_{st199\%}$ para ciclo de 10 minutos



O medidor de *flicker*, ou analisador de cintilação, desenvolvido pela UIE – que permite quantificar o incômodo visual do efeito de *flicker* provocado por flutuações de tensões – tem como referência uma lâmpada incandescente de 60W-120V. Porém, no início das pesquisas a UIE desenvolveu um medidor de *flicker* com base numa lâmpada de 60 W-230 V. O método encontrou restrições de uso nos Estados Unidos, Canadá e nos países do leste da Ásia, nos quais se utilizam lâmpadas de 120 V. Para atender a essa demanda, a UIE desenvolveu novos estudos adaptando a concepção original do método para a lâmpada de 60 W-120 V.

A metodologia desenvolvida pela UIE consiste na classificação dos níveis instantâneos de sensação do *flicker*, obtidos a cada ciclo de 10 minutos pelo medidor de cintilação. Esses níveis são expressos em *pu* no limiar da percepção, obtendo-se uma curva de frequência cumulativa das sensações de *flicker* em *pu*, em conformidade com a Figura 8.20. São utilizados filtros dedicados, de acordo com a frequência das lâmpadas, associados à sensibilidade do olho humano e à reação do cérebro.

A curva de frequência cumulativa é obtida a partir das medições efetuadas pelo medidor de cintilação, cujos resultados estão expressos pelo gráfico da Figura 8.21 para ciclos de 10 minutos, e pelo gráfico da Figura 8.22 para ciclos de 2 horas.

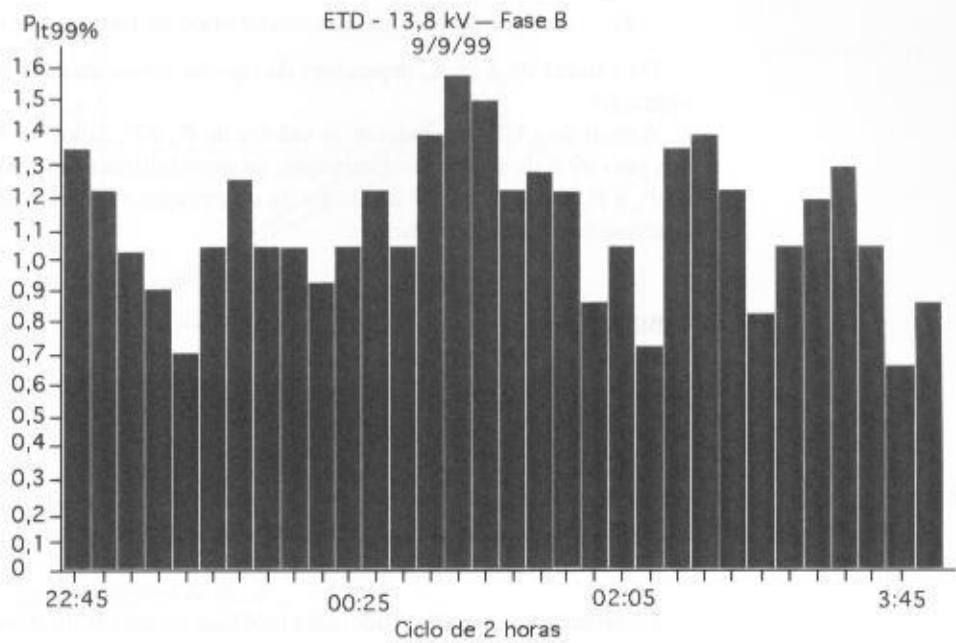
Através da curva da Figura 8.21, obtém-se um índice que representa o desconforto visual provocado pelo *flicker* num período de 10 minutos, medido pelo parâmetro P_{st} . O algoritmo que permite converter a curva de frequência cumulativa no parâmetro P_{st} foi desenvolvido de modo que o valor de P_{st} fosse igual a 1 para todos os valores limites de variação de tensão recomendados pelo IEE 555-3.

O parâmetro P_{st} indica o nível de severidade do *flicker* para um período de 10 minutos, considerado de curta duração (*short time*), e o parâmetro P_b para período de duas horas, considerado de longa duração, adotados pela UIE e tidos como os mais adequados parâmetros de severidade do *flicker*, o qual propõe valores para níveis de compatibilidade em conformidade com a Tabela 8.8.

Estes valores têm sido questionados em função de várias medições realizadas em diferentes países por serem muito conservadores. Há fornos em operação nos Estados Unidos e na Europa operando a um P_{st} de até 1,85 e a P_b igual a 1,35 sem que tenha havido comprometimento da qualidade de serviço capaz de gerar reclamação dos consumidores potencialmente afetados. Há especialistas que sugerem valores de P_{st} e P_b , respectivamente, iguais a 2,50 e 2,2. Pelo que o autor conhece, no mundo há poucas siderúrgicas operando nos limites dos valores da UIE. É necessário que os estudos desses limites sejam aprofundados no Brasil para se evitar que empreendimentos siderúrgicos sejam penalizados desnecessariamente com elevados níveis de investimentos para atender um requisito considerado extremamente conservador.

A severidade do *flicker* é função da taxa de repetição da perturbação da tensão, da amplitude do valor da tensão e da forma de onda.

FIGURA 8.22
Curva analítica do parâmetro $P_{i99\%}$ para ciclo de 2 horas



Na literatura existem diferentes indicações para os parâmetros de P_{st} e P_{fr} em função da probabilidade de serem excedidos. Assim, por exemplo, o $P_{st99\%}$ significa o valor de P_{st} que tem a probabilidade de 1% de ser excedido num determinado período de medição; neste caso 10 minutos e no caso do P_{fr} 2 horas.

O cálculo do P_{st} é determinado pela Equação (8.11) correspondente a cada ciclo de 10 minutos, considerando os valores $P_{0,1}$, $P_{1,0}$, P_3 , P_{10} e P_{50} obtidos da curva de frequência cumulativa da Figura 8.21 e que consistem nos níveis que foram excedidos, respectivamente, de 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50% do tempo de medição.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \times P_{0,1} + 0,0525 \times P_{1,0} + 0,0657 \times P_3 + 0,28 \times P_{10} + 0,08 \times P_{50}} \quad (8.11)$$

Já o valor de P_{fr} é obtido da Equação (8.12).

$$P_{fr} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \times \sum_{i=1}^{i=12} P_{st(i)}} \quad (8.12)$$

A avaliação do flicker numa instalação industrial é simples e bastante prática. Utilizando-se um medidor de cintilação, conectado geralmente no QGF localizado na subestação, procede-se à medição dos valores de P_{st} indicados no aparelho ao mesmo tempo em que se percebe a variação do fluxo luminoso emitido por uma lâmpada padrão. Os valores mostrados na Tabela 8.9 exemplificam o resultado de uma medição.

Para se determinar o valor do P_{st} num dado ponto do sistema elétrico, ou mais especificamente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), pode-se utilizar a Equação (8.13).

$$P_{st} = K_{st} \times \frac{P_{st}}{P_{cs}} \quad (8.13)$$

P_{cs} – potência de curto-circuito do sistema;

P_{cf} – potência de curto-circuito do forno;

K_{st} – coeficiente de emissão característico que varia de 48 a 85 e depende do tipo de forno. De acordo com a literatura, o valor mais adequado é 60 para fornos a arco de corrente alternada.

Para se determinar o valor do P_{fr} nas mesmas condições anteriores, deve-se aplicar a Equação (8.14).

$$P_{fr} = K_{fr} \times \frac{P_{fr}}{P_{cs}} \quad (8.14)$$

K_{fr} – coeficiente de emissão característico do forno e que varia de 35 a 50.

Os valores de K_{st} e K_{fr} dependem do tipo de forno, do tipo de carregamento e do método de operação.

Apesar de a UIE estabelecer os valores de P_{st} e P_{fr} dados na Tabela 8.8, e que não são excedidos para 99% do tempo de observação, os especialistas costumam trabalhar também com valores de P_{st} e P_{fr} tomados a 95% do tempo de observação e utilizam tais valores para complementar os critérios de avaliação do *flicker*.

TABELA 8.8

Valores de P_{st} e P_{fr} propostos pela UIE

Parâmetro (μ)	Fusão Nominal	
	< 69 kV	\geq 69 kV
P_{st}	1,00	0,79
P_{fr}	0,74	0,58

Considerando que sejam adotadas medidas corretivas de atenuação do nível de *flicker*, através da aplicação de quaisquer um dos métodos indicados na Seção 8.4.3.2, ou por meio do coeficiente de transferência entre alta tensão e média tensão, a Equação (8.13) pode ser complementada e transformada na Equação (8.15), ou seja:

$$P_{st} = K_{st} \times \frac{P_{st}}{P_{cs}} \times \frac{1}{K_{comp}} \times K_{at/br} \quad (8.15)$$

K_{comp} – fator de redução por compensação;

$K_{at/br}$ – coeficiente de transferência entre AT e MT. Este valor pode variar entre 0,6 e 0,80.

TABELA 8.9

Medição da severidade do *flicker*

Percepção de Cintilação	P_{st} Medido
Sim	1,12
Não	0,87
Não	0,92
Não	0,98
Sim	1,10
Sim	1,50
Não	1,00

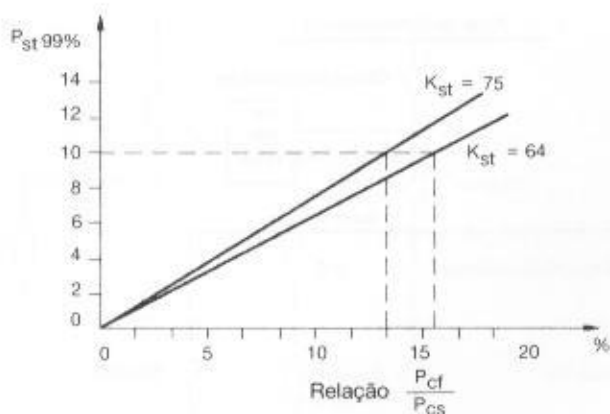
Ainda de acordo com os especialistas, a aplicação desses coeficientes permite que se admitam valores superiores àqueles estabelecidos na Tabela 8.8, conforme comentado anteriormente.

Atualmente existe uma tendência mundial para utilização de fornos a arco de corrente contínua em substituição aos fornos a arco de corrente alternada. Os fornos CC estão sendo empregados mais recentemente e existem no mundo poucas unidades em operação comparativamente aos fornos a arco CA. Sua grande vantagem é:

- redução do consumo dos eletrodos;
- aumento da vida útil do refratário;
- aumento da eficiência do processo;
- redução do consumo de energia elétrica por tonelada de produto;
- atenuação do nível de *flicker*.

Muitos projetos podem ser viabilizados em certas regiões onde o nível de curto-circuito é baixo simplesmente trocando o forno a arco de CA por CC. Estudos realizados mostram que os fornos

FIGURA 8.23
Correlação entre K_{st} e P_n para diferentes valores de P_{cf}/P_{cs}



a arco CC podem necessitar operar com a metade do nível de curto-circuito exigido pelos fornos CA. Porém, especialistas conservadores apontam para algo em torno de 75%.

A Figura 8.23 mostra a correlação que existe entre os valores de K_{st} e o valor de P_n para diferentes relações de P_{cf}/P_{cs} .

8.4.3.2 Correção da flutuação de tensão

A correção da flutuação de tensão provocada pela instalação de um forno a arco exige que sejam adotadas algumas medidas que normalmente envolvem uma soma apreciável de recursos, ou seja:

- aumentar a potência de curto-circuito do sistema de suprimento do forno;
- dispor de alimentadores exclusivos para suprimento do forno;
- instalar reator série;
- instalar compensador série;
- instalar compensador síncrono;
- instalar reator série e compensador síncrono;
- instalar compensador estático.

Nem sempre é possível executar economicamente a primeira medida, pois ela envolve, em geral, investimentos vultosos por parte da concessionária. A segunda medida pode ser adotada com menos recursos e estar limitada à melhoria das condições de fornecimento aos consumidores que poderiam estar ligados ao mesmo alimentador do forno. As demais medidas são aquelas geralmente adotadas nos estudos de suprimento de fornos a arco e que serão objeto de estudo sumário.

8.4.3.2.1 Instalação de reator série

A aplicação de reatores série tem sido o sistema mais utilizado pelos complexos siderúrgicos de pequeno e médio portes para atenuar as flutuações de tensão provocadas pela operação dos fornos a arco. Este sistema consiste em utilizar um reator, representado por uma reatância X_r , ligada em série com o circuito de alimentação do forno. A Figura 8.24 ilustra o esquema elétrico simplificado de uma usina siderúrgica e a Figura 8.25 mostra as impedâncias envolvidas.

O reator série ajuda a estabilizar o arco e permite que se opere o forno com arcos longos, reduzindo, em consequência, o desgaste dos eletrodos.

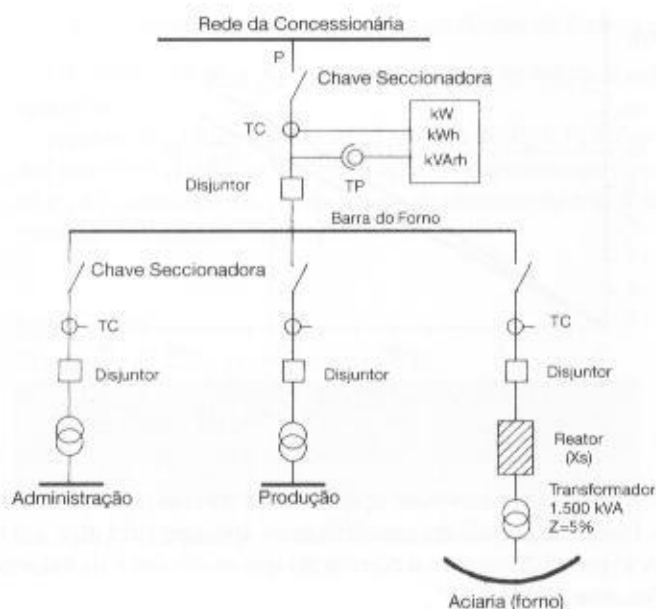
Na realidade, a inserção do reator limita consideravelmente a potência de curto-circuito do forno, resultando em menor queda de tensão no alimentador de suprimento. Medições apontaram que o reator série pode reduzir o efeito do *flicker* em cerca de 20%.

O reator pode ser constituído de vários tapes, cada um deles correspondente a uma reatância inserida de acordo com as necessidades de limitação da corrente de curto-circuito do forno.

O valor da reatância do reator pode ser dado pela Equação (8.16).

$$X_r = \frac{V_r \times (I_{cf} - I_{cf'})}{\sqrt{3} \times I_{cf} \times I_{cf'}} \quad (\Omega / \text{fase}) \quad (8.16)$$

FIGURA 8.24
Compensação com reator série



V_r – tensão de alimentação do reator, em V;

I_{cf} – corrente de curto-circuito do forno, considerando os eletrodos tocando diretamente a carga, em A;

I_{cfr} – corrente de curto-circuito do forno com o reator inserido e que corresponde ao valor desejado para permitir a queda de tensão prevista na barra em estudo, em A.

O valor da indutância da bobina do reator pode ser calculado pela Equação (8.17).

$$L_r = \frac{X_r}{2 \times \pi \times F} \quad (\text{H / fase}) \quad (8.17)$$

O valor da queda de tensão percentual na bobina do reator pode ser calculado pela Equação (8.18).

$$\Delta V\% = \frac{173 \times X_r \times I_{cfr} \times \sin \psi}{V_r} \% \quad (8.18)$$

I_{nf} – corrente nominal do forno, em A.

A potência nominal do reator pode ser calculada pela Equação (8.19).

$$P_{nr} = \frac{3 \times X_r \times I_{nf}^2}{1.000} \quad (\text{kVA}) \quad (8.19)$$

X_r – reatância do reator, em Ω .

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.6)

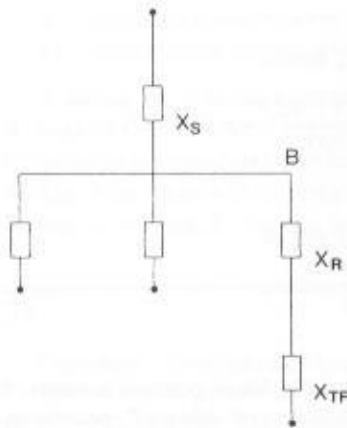
Considerando-se o Exemplo de Aplicação (8.3) da Seção 8.4.3.1.1, determinar as características nominais do reator série necessárias para atenuar as quedas de tensão nos níveis do padrão de flutuação de tensão. As reatâncias resultantes estão mostradas na Figura 8.25.

a) Determinação da máxima potência de curto-circuito de operação do forno

Este caso corresponde ao valor máximo do padrão de flutuação de tensão $\Delta V_p = 0,25\%$. Considera-se que o tape do transformador do forno está posicionado de modo a permitir as mais severas condições de operação do forno. De acordo com a Equação (8.7), tem-se:

$$P_{cf} = \Delta V_p \times \frac{P_{ca}}{100 \times K_s} = 0,25 \times \frac{83.658}{100 \times 0,10} = 2.091,4 \text{ kVA}$$

FIGURA 8.25
Diagrama de impedância



b) Cálculo da reatância do reator

De acordo com a Equação (9.16), tem-se:

$$X_r = \frac{13.800 \times (125,5 - 87,5)}{\sqrt{3} \times 125,5 \times 87,5} = 27,5 \Omega/\text{fase}$$

$$I_d = \frac{P_d}{\sqrt{3} \times V} = \frac{3.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 125,5 \text{ A}$$

$$I_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{2.091,4}{\sqrt{3} \times 13,80} = 87,5 \text{ A}$$

c) Cálculo da indutância da bobina

$$L_r = \frac{27,5}{2 \times \pi \times 60} = 0,073 \text{ H/fase}$$

d) Cálculo da queda de tensão no reator

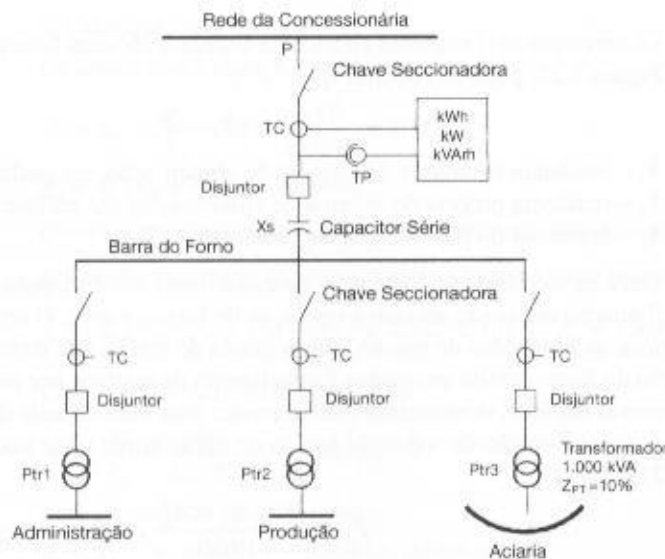
De acordo com a Equação (8.19), tem-se:

$$\Delta V\% = \frac{173 \times 27,5 \times 62,75 \times \sin 45,57}{13.800} = 15,44\%$$

$$I_w = \frac{P_w}{\sqrt{3} \times V} = \frac{1.500}{\sqrt{3} \times 13,80} = 62,75 \text{ A}$$

$$\cos \psi = 0,70 \text{ (valor considerado)} \rightarrow \psi = 45,57^\circ$$

FIGURA 8.26
Compensação com banco de capacitores série



e) Cálculo da potência do reator

De acordo com a Equação (8.18), tem-se:

$$P_{rr} = \frac{3 \times X_r \times I_{ca}^2}{1.000} = \frac{3 \times 27,5 \times 62,7^2}{1.000} = 324 \text{ kVA}$$

f) Cálculo do valor do P_{rr}

De acordo com a Equação (8.19), tem-se:

$$P_{rr} = K_{rr} \times \frac{P_{ca}}{P_{ca}} = 70 \times \frac{3.000}{83.658} = 2,51$$

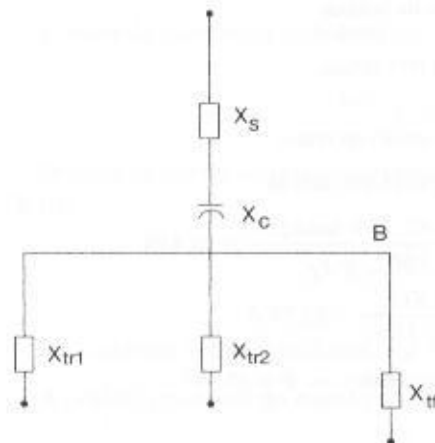
$P_{rr} = 70$ (valor médio adotado)

Logo, utilizando-se um reator de 324 kVA de potência nominal, obter-se-á um padrão de flutuação de tensão de 0,25%. Analisando os resultados pelo lado do P_{rr} percebe-se que seu valor é elevado, superior ao valor admitido pela UIE, mas aproximadamente igual a 2,5 aceitável de acordo com os comentários anteriores. Observar que os valores encontrados pelos dois processos são perfeitamente compatíveis, isto é, estão nos limites de aceitação.

8.4.3.2 Instalação de compensadores série

Considerando-se que o sistema de alimentação do forno seja representado por uma reatância indutiva ao se instalar um banco de capacitores com uma determinada reatância capacitiva em série com o referido sistema, a reatância resultante é sensivelmente reduzida, diminuindo os efeitos da queda de tensão provocada pelas elevadas correntes provenientes da operação do forno, principalmente no ciclo de fusão.

FIGURA 8.27
Diagrama de impedância



Observando-se o esquema elétrico da Figura 8.26, com base no esquema unifilar simplificado da Figura 8.25, pode-se concluir que:

$$X_i = X_s - X_c \quad (8.20)$$

X_i – reatância resultante do sistema de alimentação, em *pu/fase*;

X_s – reatância própria do sistema de alimentação, em *pu/fase*;

X_c – reatância do banco de capacitores, em *pu/fase*.

Deve-se alertar que a instalação de capacitores em derivação não é adequada para a correção de flutuação de tensão, devido à operação de fornos a arco. O seu efeito sobre o sistema pode até agravar as flutuações de tensão, pois a queda de tensão nos terminais do capacitor devido à operação do forno resulta um menor fornecimento de reativos por parte deste, devendo a fonte suprir a parcela restante, ocasionando, deste modo, uma maior queda de tensão no sistema.

A determinação do valor do banco de capacitores série pode ser feita através da Equação (8.21).

$$P_{ca} = \frac{3 \times X_c \times I_{ca}^2}{1.000} \text{ (kVA)} \quad (8.21)$$

X_c – reatância capacitiva em Ω /fase;

I_{ca} – corrente que circula no banco de capacitores, em A.

A instalação de capacitores série resulta um aumento considerável da potência de curto-circuito do sistema. No entanto, a sua utilização tem sido muito limitada devido à ocorrência de sobreensões em transformadores e motores de indução decorrentes do fenômeno conhecido como ressonância série, quando o valor da reatância capacitiva torna-se igual ao valor da reatância indutiva, ficando a corrente do circuito limitada somente pela sua resistência.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.7)

Considerar a instalação da Figura 8.26, cujo diagrama de impedância está representado na Figura 8.27. Verificar se o nível de flutuação de tensão é tolerável e, caso contrário, determinar o valor do banco de capacitores série necessário para corrigir o distúrbio. Sabe-se que:

- potência nominal do forno: 1.000 kVA;
- potência de curto-circuito do forno: 2.000 kVA;
- fator de severidade: 0,15;
- potência dos transformadores:
 $P_{n1} = 300$ kVA
 $P_{n2} = 500$ kVA
 $P_{n3} = 1.000$ kVA.
- impedância do forno e do transformador do forno: 8%;
- tensão de fornecimento: 13,80 kV;
- potência de curto-circuito do sistema: 45.000 kVA.

a) Escolha das bases

$$V_b = 13,80 \text{ kV}$$

$$P_b = 1.000 \text{ kVA}$$

$$I_b = \frac{1.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 41,80 \text{ A}$$

b) Cálculo da impedância reduzida do sistema

- Resistência

$$R_w = 0$$

- Reatância

$$X_{sc} = \frac{P_b}{P_{cs}} = \frac{1.000}{45.000} = 0,0222 \text{ pu}$$

c) Cálculo do padrão de flutuação de tensão sem o capacitor série

$$\Delta V_p = K_s \times \frac{P_d}{P_{cs}} \times 100 = 0,15 \times \frac{2.000}{45.000} \times 100 = 0,666\%$$

$\Delta V_p > 0,25\%$ (neste caso, deverá haver fortes flutuações de tensão)

d) Cálculo do valor do P_n

De acordo com a Equação (8.13), tem-se:

$$P_n = K_n \times \frac{P_d}{P_{cs}} = 85 \times \frac{2.000}{45.000} = 3,77$$

$$P_n = 85 \text{ (valor máximo adotado)}$$

Observar que os resultados obtidos pelos dois processos são compatíveis.

e) Cálculo da potência de curto-circuito na barra do forno necessário para que $\Delta V_p = 0,25\%$

$$0,25 = K_s \times \frac{P_d}{P_{cs}} \times 100 = 0,15 \times \frac{2.000}{P_{cs}} \times 100 \rightarrow P_{cs} = 120.000 \text{ kVA}$$

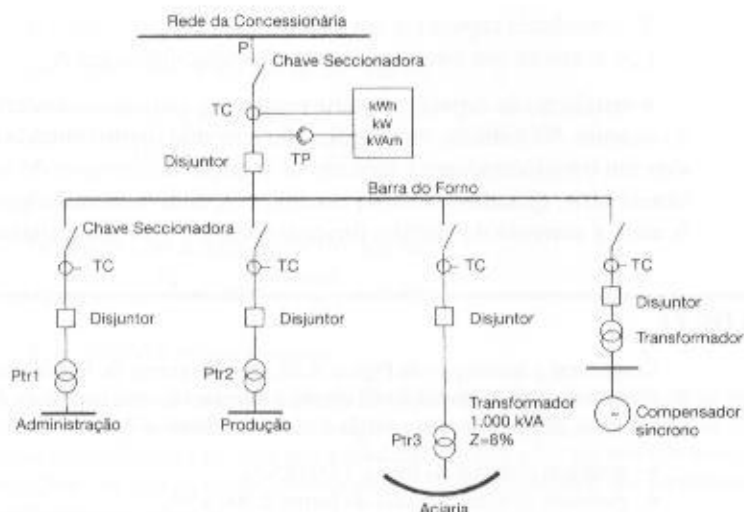
Logo, a reatância resultante deve valer:

$$X_s = \frac{P_b}{P_{cs}} = \frac{1.000}{120.000} = 0,0083 \text{ pu}$$

Então, a reatância capacitiva vale:

$$X_c = X_w - X_s = 0,0222 - 0,0083 = 0,0139 \text{ pu}$$

FIGURA 8.28
Compensação com compensador síncrono



A reatância capacitiva ôhmica vale:

$$X_{cft} = X_c \times \frac{1.000 \times V_o^2}{P_o} = 0,0139 \times \frac{1.000 \times 13,80^2}{1.000} = 2,64 \Omega$$

f) Cálculo da potência total do banco de capacitores vale:

$$P_{ca} = \frac{3 \times 2,64 \times 75,3^2}{1.000} = 44,9 \text{ kVAr}$$

$$I_{ca} = \frac{300 + 500 + 1.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 75,3 \text{ A}$$

g) Cálculo do valor do P_{ca}

$$P_{ca} = K_{ca} \times \frac{P_{of}}{P_{ca}} = 85 \times \frac{2.000}{120.000} = 1,41$$

Logo, será instalado um capacitor trifásico de 50 kvar em série com o sistema de alimentação do forno, conforme mostra a Figura 8.27.

8.4.3.2.3 Instalação de compensador síncrono

A instalação de um compensador síncrono rotativo como solução para atenuar as flutuações de tensão se prende ao fato de que as quedas de tensão produzidas na rede, pela operação do forno a arco, são consequência das oscilações de corrente reativa absorvida pelo referido forno e que, nestas condições, o compensador síncrono fornece uma parcela da potência reativa, enquanto a rede de suprimento fornece a parcela restante do total dos reativos absorvidos pelo forno.

A resposta do compensador síncrono às flutuações de tensão é considerada no regime de operação transitória da máquina rotativa. Desta forma, no diagrama de impedâncias o valor considerado para representar o compensador síncrono é o da reatância transitória que pode ser tomado como um valor médio aceitável igual a 0,5 pu na base da potência nominal da máquina.

A potência nominal do compensador síncrono é baseada na máxima potência reativa que o mesmo pode fornecer à barra do forno. Esta potência reativa é estimada na ordem de 5 a 10% superior à potência reativa absorvida pelo forno, isto é:

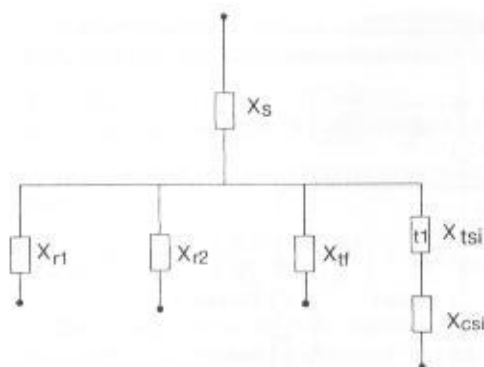
$$P_{nc} = (1,05 \text{ a } 1,10) \times P_{of} \text{ (kVA)} \quad (8.22)$$

P_{nc} – potência nominal do compensador síncrono rotativo, em kVA;

P_{of} – potência reativa média absorvida pelo forno, em kVAr.

A queda de tensão percentual na barra do forno após a instalação do compensador síncrono pode ser dada pela Equação (8.23).

FIGURA 8.29
Diagrama de impedância



$$\Delta V\% = \frac{100 \times \frac{X_{ur}}{X_d}}{1 + \left(\frac{X_{ur}}{X_d}\right) \times \left(1 + \frac{X_{tr}}{X_c}\right)} (\%) \quad (8.23)$$

X_d – reatância do forno e do transformador do forno, em pu;

X_c – reatância do circuito do compensador síncrono que compreende a do transformador mais a da máquina, em pu;

X_{ur} – reatância indutiva do circuito de alimentação, em pu.

A instalação de compensadores síncronos permite a elevação do nível de curto-circuito no sistema de alimentação. Medições efetuadas com fornos a arco utilizando compensadores síncronos demonstraram que o *flicker* foi reduzido em até 30%.

Algumas desvantagens podem ser atribuídas à instalação de compensadores síncronos:

- contribui com as correntes de curto-circuito, quando da ocorrência de um defeito no sistema de suprimento;
- responde com lentidão às flutuações de tensão;
- preço de aquisição e custo de instalação geralmente elevados.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.8)

Estudar a correção da flutuação de tensão, conectando à barra do forno um compensador síncrono rotativo de potência a ser determinada e tensão nominal de 2.600 V, ligado a um transformador elevador, conforme está mostrado esquematicamente na Figura 8.28. O valor de K_s , neste caso, é de 0,09. A impedância $X_{ur} = 0,0024$ pu nas bases de $P_b = 1.000$ kVA e $V_b = 13,8$ kV. A potência de curto-circuito do forno é duas vezes a sua potência nominal.

Como se pode observar, a reatância do circuito do compensador síncrono está em paralelo com a reatância do sistema de suprimento do forno.

a) Determinação da queda de tensão percentual compensada

Considerando-se o padrão de flutuação $\Delta V\% = 0,25\%$, a queda de tensão máxima permitida é dada de acordo com a Equação (8.6).

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V_p}{K_s} = \frac{0,25}{0,09} = 2,77\%$$

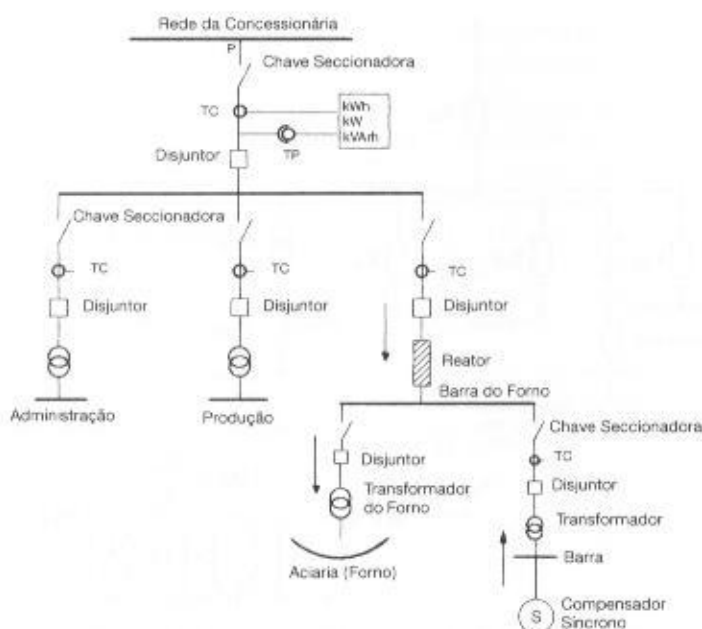
b) Cálculo da reatância do conjunto transformador e compensador síncrono

Da Equação (8.23), tem-se:

$$2,77 = \frac{100 \times \frac{0,0024}{0,08}}{1 + \left(\frac{0,0024}{0,08}\right) \times \left(1 + \frac{0,08}{X_c}\right)} \rightarrow X_c = 0,045 \text{ pu (nas bases de 1.000 kVA e 13,80 kV)}$$

$X_d = 0,08$ pu (valor dado nas bases de 1.000 kVA e 13,80 kV)

FIGURA 8.30
Compensação com reator
série primário e compensador
síncrono



c) Cálculo da potência do compensador síncrono

Considerando-se que o forno opere na sua potência ativa máxima, pode-se determinar, a partir do gráfico da Figura 8.13, que, nestas condições, é solicitada da rede uma potência reativa de 64% de sua potência de curto-circuito, ou seja:

$$P_{rf} = 0,64 \times P_{cf} = 0,64 \times 2.000 = 1.280 \text{ kVAr}$$

Através da Equação (8.22), tem-se:

$$P_{nc} = 1,10 \times P_{rf} = 1,10 \times 1.280 = 1.408 \text{ kVA}$$

Logo, a potência nominal do compensador síncrono deve ser de 1.500 kVA. A queda da tensão antes da instalação do compensador síncrono era de:

$$\Delta V\% = \frac{X_{sc}}{X_{sc} + X_f} = \frac{0,0024}{0,0024 + 0,08} \times 100 \rightarrow \Delta V\% = 2,91\%$$

Observar que, neste caso, é pequena a contribuição do compensador síncrono na atenuação da queda de tensão durante a operação do forno a arco. A redução percentual da queda de tensão é de apenas:

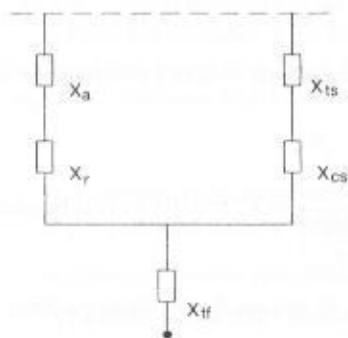
$$R\% = \left(\frac{2,91 - 2,77}{2,77} \right) \times 100 = 5\%$$

d) Cálculo da reatância do compensador síncrono

Pode ser calculada de acordo com o procedimento seguinte:

$$X_{s1} = X_{sc} \times \frac{P_2}{P_1} \times \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \rightarrow X_{s1} = 0,045 \times \frac{1.500}{1.000} \times \left(\frac{13,80}{13,80} \right)^2 = 0,067 \text{ pu}$$

FIGURA 8.31
Diagrama de impedância



Considerando-se a potência nominal do transformador do compensador síncrono também igual a 1.500 kVA, com uma impedância percentual de 5% nas bases P_n e V_n , tem-se:

$$X_{st} = X_{cs} + X_n \rightarrow 0,067 = X_{cs} + 0,050$$

$$X_{cs} = 0,017 \text{ pu (nas bases de 1.500 kVA e 13,80 kV)}$$

Logo, a reatância transitória do compensador síncrono nas bases de sua potência e tensão nominais vale:

$$X_{cs} = 0,017 \times \frac{1.500}{1.500} \times \left(\frac{13,80}{2,6} \right)^2 = 0,47 \text{ pu}$$

Esta solução, como se pode observar, é de custo muito elevado devido à grandeza dos equipamentos envolvidos, e de resultado operacional limitado.

8.4.3.2.4 Instalação de reator série e compensador síncrono na barra

Este sistema funciona introduzindo-se uma reatância indutiva X_r em série com o circuito de alimentação do forno e que tem a propriedade de desviar os picos de corrente reativa para o compensador síncrono, que, por sua vez, fornece à barra à qual está ligado a corrente reativa necessária no momento em que a tensão tende a diminuir de valor. O compensador é superexcitado através de um sistema automático de regulação. A Figura 8.30 ilustra a ligação deste sistema de correção de flicker, enquanto a Figura 8.31 mostra as reatâncias envolvidas no circuito correspondente.

A potência máxima reativa que deve ter o compensador síncrono pode ser calculada através da Equação (8.24).

$$P_r = P_f + 0,5 \times (P_m + P_{ms}) \text{ (kVAR)} \quad (8.24)$$

P_f – potência reativa média do forno, em kVAR;

P_m – potência reativa do sistema de alimentação, em kVAR;

P_{ms} – potência reativa do reator série, em kVAR.

Alternativamente ao esquema da Figura 8.30, pode-se empregar o esquema da Figura 8.32, em que o reator é aplicado no circuito secundário.

A Figura 8.33 representa o respectivo diagrama de impedâncias do sistema considerado. Neste esquema, o reator é alimentado por uma tensão variável, em função da mudança dos tapas do transformador do forno. Na realidade, dá-se preferência ao esquema da Figura 8.30.

Na Equação (8.24), desprezou-se o valor da potência reativa do transformador do compensador síncrono.

A queda de tensão no sistema provido das correções previstas na Figura 8.30 pode ser determinada a partir da Equação (8.25).

$$\Delta V\% = \frac{100 \times \frac{X_{st}}{X_f}}{\left(1 + \frac{X_f}{X_e}\right) \times \left(\frac{X_m + X_r}{X_e}\right) + 1} \quad (8.25)$$

$\Delta V\%$ – queda de tensão percentual do sistema compensado;

X_m – reatância do sistema de alimentação do forno, em pu;

X_f – reatância do forno e do transformador do forno, em pu;

X_r – reatância do reator do forno, em pu;

X_e – reatância do compensador síncrono mais a do seu transformador, em pu.

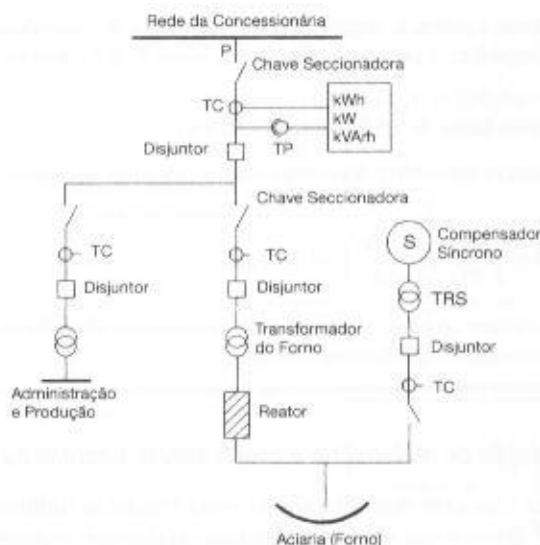
O reator série, juntamente com o compensador síncrono rotativo, é um sistema eletromecânico eficiente na correção da flutuação de tensão para a operação de pequenos e médios fornos a arco. O dimensionamento econômico deste sistema implica especificar adequadamente o reator com uma reatância elevada, reduzindo-se conseqüentemente as dimensões do compensador síncrono, pois este é um equipamento de preço de aquisição e custo de instalação elevados.

Adicionalmente a esses procedimentos, a possibilidade de elevação da potência de curto-circuito do sistema de suprimento acarretaria um dimensionamento mais modesto, tanto do reator como do compensador síncrono. Na maioria dos casos, porém, o aumento da potência de curto-circuito do sistema resultaria em investimentos elevados e quase sempre de difícil solução a curto e médio prazos.

Cabe observar que, em média, o compensador síncrono não fornece potência ativa ao sistema. Quando o forno solicita uma maior potência ativa por um rápido intervalo de tempo, o compensador reage, fornecendo esta potência à custa de sua inércia, resultando num defasamento angular entre o rotor e o campo estático. Logo em seguida, a máquina adquire a sua estabilidade.

FIGURA 8.32

Compensação com reator série no secundário e compensador síncrono



EXEMPLO DE APLICAÇÃO (8.9)

Considerar a instalação do forno a arco em conformidade com a Figura 8.30 em que são conhecidos os seguintes dados:

- potência nominal do forno: 3.000 kVA;
- potência de curto-circuito do forno: 6.000 kVA;
- fator de severidade: 0,12;
- tensão secundária máxima: 360 V;
- potência nominal do transformador do forno: 3.000 kVA;
- impedância percentual do transformador do forno: 12%;
- perdas no cobre do transformador: 27.000 W;
- corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia: 6 kA;
- tensão primária de fornecimento: 13,8 kV;
- tensão nominal do compensador síncrono: 2.200 V;
- impedância do transformador do compensador síncrono: 5% (nas bases P_b e V_b);
- impedância do compensador síncrono: 1,5% (nas bases P_b e V_b);
- impedância própria do forno: 2% (nas bases P_b e V_b).

a) Escolha dos valores de base

- potência base: $P_b = 3.000$ kVA
- tensão base: $V_b = 13,80$ kV

Logo, a corrente e a impedância de base valem:

$$I_b = \frac{3.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 125,5 \text{ A}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{13,80 \times 10^3}{125,5} = 109,9 \text{ } \Omega$$

b) Cálculo da impedância reduzida do sistema

- Resistência
 $R_w \cong 0$
- Reatância

$$X_w = \frac{P_b}{P_{cr}} = \frac{3.000}{143.413,8} = 0,0209 \text{ pu}$$

$$P_{cr} = \sqrt{3} \times 6.000 \times 13,80 = 143.413,8 \text{ kVA}$$

c) Cálculo da impedância do transformador do forno

• Resistência

$$R_w = \frac{P_{co}}{10 \times P_m} = \frac{27.000}{10 \times 3.000} = 0,9\%$$

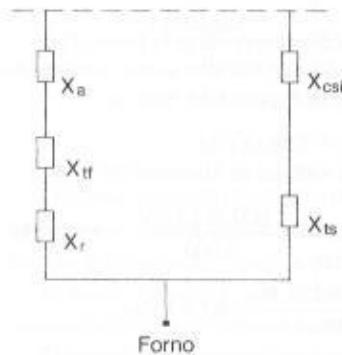
$$R_w = R_w \times \frac{P_b}{P_m} \times \left(\frac{V_m}{V_b}\right)^2 \rightarrow R_w = 0,009 \times \frac{3.000}{3.000} \times \left(\frac{13,80}{13,80}\right)^2 = 0,009 \text{ pu}$$

• Reatância

$$X_w = X_m \times \frac{P_b}{P_m} \times \left(\frac{V_m}{V_b}\right)^2 \rightarrow X_w = 0,1196 \times \frac{3.000}{3.000} \times \left(\frac{13,80}{13,80}\right)^2 = 0,1196 \text{ pu}$$

$$X_w = \sqrt{0,12^2 - 0,009^2} = 0,1196 \text{ pu}$$

FIGURA 8.33
Diagrama de impedância



Logo, a impedância total do transformador e do respectivo forno vale:

$$X_{wt} = X_w + X_{tr} = j0,1196 + j0,02 = j0,1396 \text{ pu}$$

d) Padrão de flutuação de tensão

$$\Delta V_p = K_v \times \frac{P_d}{P_b} \times 100 = 0,12 \times \frac{6.000}{143.413,8} \times 100 = 0,5\%$$

e) Cálculo do valor do \$P_m\$

De acordo com a Equação (8.13), tem-se:

$$P_m = K_m \times \frac{P_d}{P_b} = 67 \times \frac{6.000}{143.423,8} = 2,80$$

$$P_m = 67 \text{ (valor médio adotado)}$$

Logo, pelos resultados de \$\Delta V_p\$ e \$P_m\$, o forno irá provocar intensa flutuação de tensão no sistema de suprimento.

f) Determinação da queda de tensão máxima permitida

Considerando-se o padrão de flutuação de tensão \$\Delta V_p = 0,25\%\$, o valor máximo da queda de tensão vale:

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V_p}{K_v} = \frac{0,25}{0,12} = 2,08\%$$

g) Determinação da reatância do reator série

A reatância do reator série pode ser calculada de acordo com a Equação (8.25).

$$X_w = j0,05 + j0,015 = j0,065 \text{ pu}$$

$$2,08 = \frac{100 \times \frac{0,0209}{0,1396}}{\left(1 + \frac{0,1396}{0,0650}\right) \times \left(\frac{0,0209 + X_r}{0,1396}\right) + 1}$$

$X_r = 0,254 pu = 25,4\%$ (nas bases de 3.000 kVA e 13,80 kV)

O valor da reatância ôhmica vale:

$$X_{ohm} = X_r \times \frac{1.000 \times V_b^2}{P_b} = 0,254 \times \frac{1.000 \times 13,80^2}{3.000} = 16,12 \Omega$$

h) Cálculo da potência do reator

$$P_{rs} = \frac{3 \times X_r \times I_{nf}^2}{1.000} = \frac{3 \times 16,12 \times 125,5^2}{1.000} = 761,6 \text{ kVA}$$

$$I_{nf} = \frac{P_{nf}}{\sqrt{3} \times V_{np}} = \frac{3.000}{\sqrt{3} \times 13,80} = 125,5 \text{ A}$$

i) Dimensionamento da potência nominal do compensador síncrono

De acordo com a Equação (8.24), tem-se:

$$P_{cs} = P_{rf} + 0,5 \times (P_{rs} + P_{rs})$$

• Cálculo da potência reativa média absorvida pelo forno (P_{rf})

Será considerado que, em média, o forno trabalha a uma corrente de carga 50% da corrente de curto-circuito. Deste modo, através do gráfico da Figura 8.13, tem-se:

$$P_{rf} = 0,43 \times P_{cf} = 0,43 \times 6.000 = 2.580 \text{ kVA}$$

• Cálculo da potência reativa do sistema de alimentação (P_{rs})

$$X_r = X_{rs} \times \frac{1.000 \times V_b^2}{P_b} = 0,0209 \times \frac{1.000 \times 13,80^2}{3.000} = 1,326 \Omega$$

$$P_{rs} = \frac{3 \times X_r \times I_{nf}^2}{1.000} = \frac{3 \times 1,326 \times 125,5^2}{1.000} = 62,6 \text{ kVA}$$

Logo, a potência reativa máxima que deve fornecer o compensador síncrono vale:

$$P_{cs} = 2.580 + 0,5 \times (62,6 + 761,6) = 2.992 \text{ kVA}$$

Desta forma, a potência nominal do compensador síncrono vale:

$$P_{nc} = 1,05 \times P_{cs} = 1,05 \times 2.992 = 3.141 \text{ kVA}$$

Na prática, adota-se um compensador síncrono de $P_{nc} = 3.000 \text{ kVA}$.

A reatância transitória do compensador síncrono, calculada nos seus valores de tensão e corrente nominais, vale:

$$X_{wo} = 0,015 \times \frac{3.000}{3.000} \times \left(\frac{13,80}{2,2} \right)^2 = 0,59 pu$$

Deve-se alertar para o fato de que existem programas computadorizados que fornecem as reatâncias do compensador síncrono e do reator de compensação do forno de modo otimizado, em função de um compromisso técnico-econômico.

8.4.3.2.5 Instalação de compensador estático

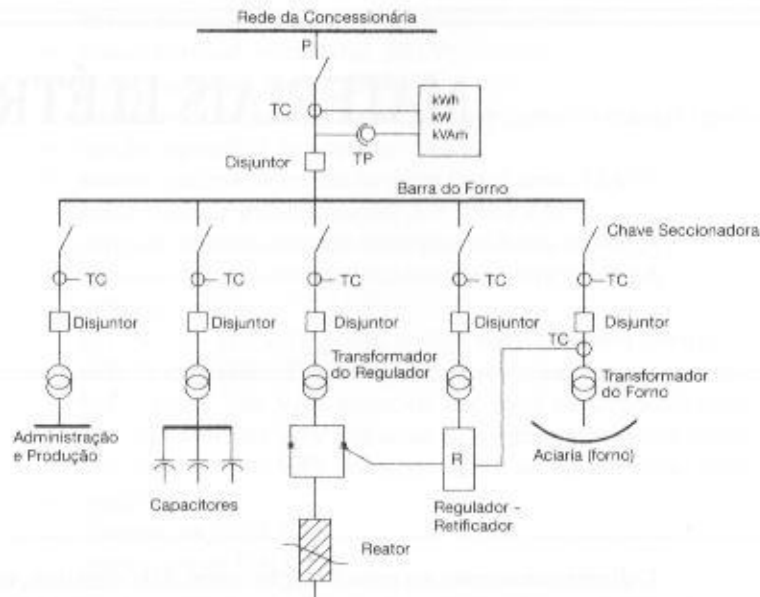
Modernamente, com o avanço da tecnologia na área da eletrônica de potência, os compensadores estáticos têm sido preferidos na correção da flutuação de tensão devido à operação de fornos a arco, substituindo os compensadores síncronos rotativos interligados a reatores série.

São fabricados comercialmente cinco tipos básicos de compensadores estáticos, ou seja:

- reator saturado;
- reator comandado por tiristores;
- reator chaveado por tiristores;
- reator transdutor;
- capacitores controlados por tiristores.

O primeiro tipo de compensador estático funciona mantendo constante a potência reativa necessária à operação do forno. Um aumento da potência reativa por parte do forno resultará numa resposta rápida do reator saturado, fornecendo ao sistema a potência reativa demandada naquele exato momento, obedecendo, desta maneira, às propriedades naturais de ferro saturado.

FIGURA 8.34
Correção de *flicker* por meio de
reator transdutor



O reator comandado por tiristores funciona colocando-se um conjunto de válvulas tiristores em série com o reator linear, isto é, reator não saturado. Através de uma série de sinais de controle, a tensão é variada de modo a permitir uma corrente de valor adequado ao circuito do forno.

O reator chaveado por tiristores é constituído de um conjunto de indutores ligados ao sistema de uma maneira ordenada através de válvulas tiristores.

O reator a transdutor consiste em um banco de capacitores fixo e em um reator linear variável, chamado de transdutor, cuja reatância é controlada por um sistema de regulação que age diretamente sobre um retificador, o qual é responsável pelo suprimento de corrente contínua de controle e que resulta na manutenção de uma potência reativa constante no circuito de alimentação do forno. A Figura 8.34 mostra esquematicamente esse tipo de sistema de controle de *flicker*.

Quanto ao sistema de capacitores controlados por tiristores, consiste no comando de vários grupos de capacitores através de válvulas tiristores, dimensionadas adequadamente em função da variação da máxima potência reativa solicitada pelo sistema de suprimento do forno.

A tendência atual é a utilização de compensadores estáticos para correção de *flicker* em substituição às máquinas rotativas até então empregadas. O dimensionamento desse sistema foge ao escopo deste livro.

O compensador estático, de forma geral, atenua o nível de *flicker* de acordo com a Equação (8.26).

$$\Delta C_e = 1 + 0,75 \times \frac{P_{ce}}{P_{nf}} \quad (8.26)$$

P_{ce} – potência do compensador estático, em kVAR;

P_{nf} – potência nominal do forno, em kVA.

Assim, um compensador estático de 3.000 kVAR instalado na barra de conexão de um forno a arco de 5.000 kVA atenua o nível de *flicker* em 45%, ou seja:

$$\Delta C_e = 1 + 0,75 \times \frac{3.000}{5.000} = 1,45 = 45\%$$