

Problemas Decorrentes do Fornecimento de Energia Elétrica a Fornos a Arco⁽¹⁾

LUIZ ANÍBAL DE LIMA FERNANDES ⁽²⁾

ISMAEL BARRETO ANTUÑA ⁽³⁾

1. INTRODUÇÃO

O incremento mundial na demanda de aços-liga e não ferrosos torna os fornos elétricos de uso cada vez mais geral entre as companhias siderúrgicas. Em consequência, as concessionárias de energia elétrica são em ritmo crescente solicitadas à ligação, em seus sistemas, de novas cargas representadas por fornos elétricos.

Dos três tipos de fornos elétricos usualmente empregados na eletrosiderurgia: resistência, indução e arco, somente o último, em algumas de suas aplicações, pode ocasionar perturbações ao sistema ao qual se encontra eletricamente conectado. É necessário que a ligação de fornos a arco de grande porte em sistemas elétricos seja feita de maneira que nem as flutuações de tensão, causadas pelas violentas e súbitas variações de carga desses fornos, interfiram com as demais cargas do próprio consumidor siderúrgico ou ainda reflitam no sistema, de maneira a prejudicar o fornecimento feito a consumidores adjacentes. Precauções devem também ser tomadas no sentido de fazer com que este tipo de carga irregular não interfira com o funcionamento de nenhum equipamento instalado no sistema, nem perturbe a interconexão com as demais companhias do sistema elétrico interligado.

O objetivo deste trabalho é uma breve explanação sobre os problemas elétricos ocasionados pelos fornos a arco. Para melhor situamento da questão, fazem-se preliminarmente algumas considerações sobre a operação, do ponto de vista elétrico, dos fornos a arco, após o que detalham-

-se a natureza das perturbações ocasionadas e discutem-se suas medidas corretivas. Relata-se também a experiência da CEMIG com semelhante tipo de instalação.

2. A CAPACIDADE DOS FORNOS E O CONSUMO DE ENERGIA

Havendo possibilidade de serem superados possíveis inconvenientes ocasionados pela operação dos fornos a arco, dentro de limites elétricos e econômicos, este tipo de carga resulta de interesse para a empresa de energia elétrica, dado seu elevado consumo mensal de energia e bom fator de potência médio.

A capacidade dos fornos deve merecer um estudo econômico minucioso por parte do empresário, tendo-se sempre em mente que a capacidade máxima permissível para os mesmos estará intimamente relacionada com as características do sistema elétrico alimentador.

Ao usuário, interessa a maior produção horária com mínimo consumo de energia, tornando mais atrativas as unidades de maior porte, pois se o custo de aquisição dos fornos cresce em proporção direta com sua potência, o consumo de energia elétrica por tonelada produzida cai velozmente com o aumento do tamanho do forno. Essas assertivas podem ser visualizadas nas curvas apresentadas nas figuras 1 e 2, as quais compararam dados de custo e consumo relativos a fornos SSKD, de 1 a 15 MVA de potência.

Como confirmação da validade da tendência apresentada nos modernos fornos de grande capacidade, citamos os de 50.000 kVA da usina de Steelton, da Bethlehem Steel Corp., que apresentam produção de 50 t/h com consumo de 300 kWh/t.

Em contrapartida, os fornos de maior potência serão os que provavelmente acarretarão os maiores distúrbios ao sistema elétrico alimen-

(1) Apresentado ao Simpósio sobre Eletrosiderurgia; Salvador, BA; setembro de 1968.

(2) Engenheiro Mecânico-Eletricista — Divisão de Engenharia de Transmissão das Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A.

(3) Engenheiro Mecânico-Eletricista-Especialização em Engenharia Econômica — Chefe do Departamento de Grandes Consumidores das Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A. — CEMIG.

tador, atribuindo-se inclusive às grandes unidades perturbações cíclicas não observadas nas de menor capacidade.

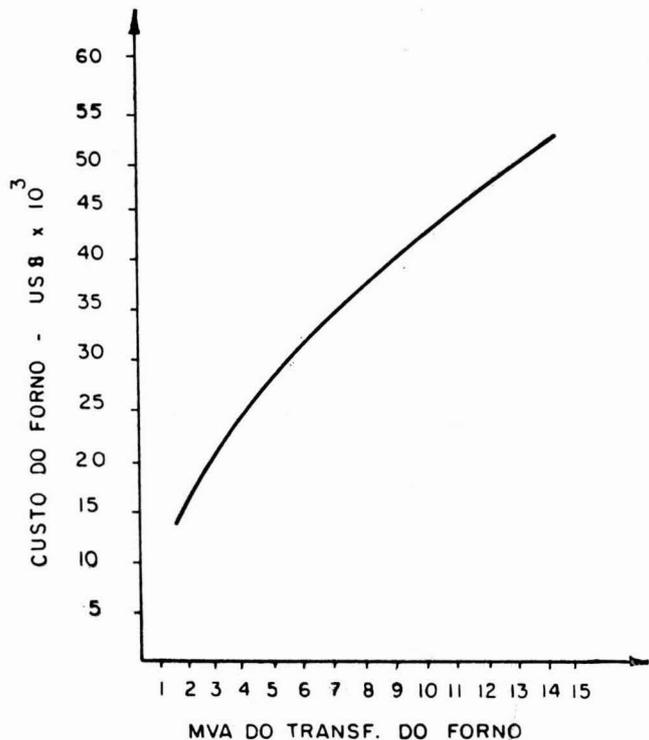


Fig. 1 — Relação entre o custo e a potência do forno.

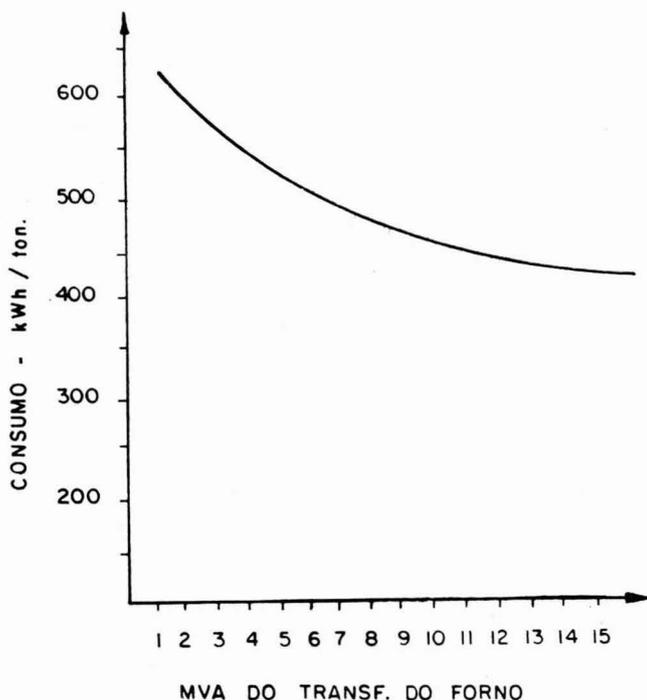


Fig. 2 — Relação entre o consumo de energia elétrica e a potência do forno.

3. OS FORNOS A ARCO

Há em uso corrente fornos a arco monofásicos e trifásicos. Os primeiros são sempre de arco indireto, processo no qual o arco é estabelecido entre dois eletrodos sem contato direto com a carga, sendo a energia calorífica transmitida àquela por radiação. Este tipo de forno aplica-se à produção de ligas não-ferrosas.

Os modernos fornos trifásicos são do tipo de arco direto, no qual o arco elétrico é estabelecido entre os três eletrodos e a carga, a qual forma a conexão em estrela do sistema trifásico naquele ponto. Os maiores fornos a arco trifásicos atualmente em operação já ultrapassam a marca dos 50.000 kVA, devendo-se fazer referência ao forno de 85.000 kVA da Northwestern Steel and Wire Co., e em termos nacionais, aos fornos de 42.000 kVA previstos no projeto da USIBA.

4. OPERAÇÃO DOS FORNOS A ARCO

Os fornos a arco operam em ciclos que se iniciam com o carregamento do forno e subsequente ignição do arco, e terminam com a corrida do metal fundido, quando se reinicia o processo.

No ciclo de operação do forno a arco observam-se fases distintas, caracterizando comportamentos diversos do forno com relação ao sistema elétrico. Dois períodos de operação são particularmente distinguíveis: o período de fusão e o período de refino.

O período de fusão tem duração aproximada de duas horas, notando-se um sub-período final de 40 min, denominado oxidação. Normalmente ocorre também um intervalo intermediário de uns poucos minutos para recarga do forno. O período seguinte, de refino ou redução, tem duração aproximada de uma hora e meia.

Nos fornos que operam na produção de aço-liga, e que portanto trabalham com sucata metálica, a fase inicial do ciclo de operação é caracterizada por inúmeros curto-circuitos entre os eletrodos ocasionados pelos pedaços daquele material, provocando violentas e rápidas variações de carga, geralmente monofásicas e de baixo fator de potência, e trazendo como consequência, flutuação de tensão. A frequência de ocorrência destes curto-circuitos é estimada de 0,5 a 2,0 Hz.

A qualidade de sucata utilizada tem forte influência na intensidade das perturbações, as quais se revelam mais perceptíveis quando se usa sucata pesada.

Os problemas acima relacionados não ocorrem nos fornos dedicados à produção de gusa e não-ferrosos, dada a não utilização de sucata, e nos fornos monofásicos, pelo seu princípio de operação por arco indireto.

Atingindo a processo a fase de refino ou redução, o metal já atingiu forma líquida, sendo possível manter uniforme o comprimento do arco nos três eletrodos, mediante o uso de dispositivo de regulação automática. Esta fase de operação é pois caracterizada por uma carga trifásica estável, de alto fator de potência.

5. CURVA CARACTERÍSTICA DE FORNO A ARCO

A relação potência elétrica \times tempo do processo de fusão pode ser representada por uma curva característica decrescente com o tempo, em correspondência ao decréscimo do gradiente de temperatura dentro da câmara do forno à medida que a carga passa do estado sólido para o líquido. Atingido o período de refino, a potência elétrica requerida será praticamente apenas a necessária para suprir as perdas em calor verificadas no forno.

Assim, a potência ativa (kW) demandada nas operações de fusão e refino variará desde 120% de sua potência nominal durante a fase de fusão, para 60% na fase de oxidação, e atingindo 25% a 30% no refino. Sendo a demanda do forno diretamente proporcional à tensão aplicada, esta deve ser reduzida no decorrer do processo, para acompanhar o decrescente gradiente de temperatura.

O acompanhamento da curva de operação ideal é obtido de maneira aproximada, na prática, pelo uso de derivações múltiplas no secundário do transformador do forno. Nas unidades de porte pequeno a médio estas derivações são geralmente fixas e em pequeno número, ao passo que nas de maior porte a tendência moderna é dotá-las de derivações de comutação sob carga, em maior número e com menores "steps" entre duas derivações sucessivas.

A comutação sob carga permite eliminar os desligamentos obrigatórios, necessários à operação das derivações fixas, possibilitando o seguimento da curva ideal com uma melhor aproximação, e resultando numa redução do tempo do processo. A figura 3 mostra uma curva característica para um forno de 10.000 kVA, e parte da premissa que a máxima corrente admissível será o dobro da nominal, com F.P. = 0,50.

A resistência efetiva do arco é colocada em abscissa, para maior comodidade considerando-se como zero a mínima resistência do arco (correspondente ao curto-circuito dos eletrodos), embora isso não corresponda exatamente à realidade.

Na curva apresentada, o período de fusão estará provavelmente no intervalo 0-10 ohms, situando-se o refino além da marca dos 10 ohms.

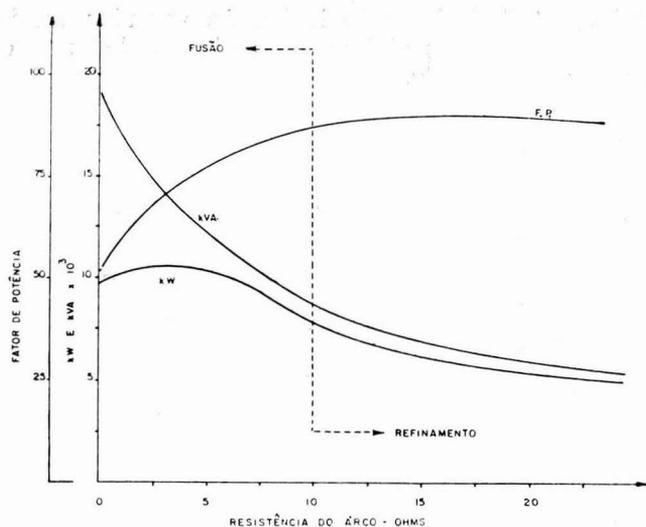


Fig. 3 — Curva característica do forno elétrico a arco.

Além de serem visualizadas as assertivas feitas quanto à potência ativa demandada nas diversas fases do processo, podem ser feitas ainda as observações:

- a máxima demanda em kVAR ocorre quando os eletrodos são curto-circuitados, como ocorre no período de fusão.
- a máxima demanda em kW não coincide com a máxima demanda em kVA.

A condição de máxima potência ativa demandada pelo forno ocorre quando a resistência e a reatância do circuito são iguais, sendo o F.P. correspondente a esta situação igual a 0,707.

6. NATUREZA DAS PERTURBAÇÕES

A operação de diversos tipos de agrupamentos elétricos, entre os quais estão incluídos os fornos a arco em algumas de suas aplicações, apresenta como característica principal freqüentes e rápidas variações de carga, acarretando correspondente flutuação de tensão (voltage flicker).

Para os consumidores individuais, em geral estas flutuações de tensão são identificáveis pela variação da intensidade luminosa dos equipamentos de iluminação, podendo mesmo nos casos limites ser afetado o funcionamento de equipamentos industriais e ser posta em risco a normalidade de operação do sistema elétrico fornecedor. A faixa de tolerância das flutuações de tensão tem sido determinada a partir dos efeitos das perturbações sobre o elemento humano: os consumidores individuais sobre os quais se refletem as conseqüências da carga irregular. Verifica-se que a reação ao fenômeno é função de

características individuais, sendo extremamente variável o grau de sensibilidade da vista humana aos distúrbios ocorridos nos níveis de iluminação.

Por outro lado, os diferentes tipos de iluminação reagem diferentemente às variações de tensão. As lâmpadas incandescentes, que pela sua extensa difusão tornam-se o mais usual dos equipamentos afetados pelas perturbações, decrescem sua sensibilidade ao fenômeno com o aumento da capacidade térmica do filamento: as lâmpadas de pequena potência variarão seu nível de iluminação mais rapidamente que as de potência maior, para a mesma variação de tensão. As lâmpadas fluorescentes são menos sensíveis às pequenas flutuações, porém, uma variação de maior amplitude poderá ocasionar o apagamento da lâmpada por alguns momentos.

A natureza das flutuações é também dado importante: as flutuações cíclicas ou rapidamente repetíveis são mais questionáveis que as não-cíclicas.

7. LIMITES PERMISSÍVEIS DA FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Experiência conduzida pela Commonwealth Edison Co., com limitado número de observações, comprovou que variações cíclicas tão pequenas quanto 0,3 V numa lâmpada incandescente de 115 V já era perceptível em 10% das observações quando a frequência atingia 8 Hz. Para os demais 90% de observações a sensibilidade só era atingida para variações de amplitude superior a 1 V, à frequência citada. Comprovou-se mais que a faixa crítica da frequência de ocorrência se encontra entre 6 e 12 Hz.

Para flutuações abruptas, não-cíclicas, verificou-se que a variação de intensidade de iluminação já era sensível para uma variação de tensão de 1,5 a 2 V. Entretanto, se uma variação abrupta de 1,5 V é já perceptível, uma variação

que demore alguns segundos para ser completada só será detetável para valores iguais ou maiores que 5 V.

Posteriormente, para dar maior cunho de autenticidade às curvas-limites e eliminar uma certa tendência de pré-sugestão dos observadores à constatação das variações, verificada nas observações limitadas, partiu-se para a elaboração de curvas-padrão preparadas a partir de estatística de reclamações dos consumidores.

A partir de limites estabelecidos por diversas companhias de eletricidade americanas, todas com mais de 100.000 consumidores ligados, foi possível o estabelecimento das curvas-padrão apresentadas na figura 4, nas quais os limites normalmente aceitos estão situados entre as duas curvas cheias. A curva tracejada representa o limite proposto ao EEI por uma companhia, e o ponto de vista expresso pelo Distribution Systems-Westinghouse é que os limites aceitáveis para a variação de tensão poderiam estar compreendidos entre a curva cheia superior e a curva tracejada.

8. RELAÇÃO ENTRE A CAPACIDADE DO SISTEMA E A POTÊNCIA DOS FORNOS

A partir do grande número de fornos a arco de tamanho pequeno a médio já instalados em várias partes do mundo, é possível estabelecer uma correlação experimental entre o tamanho dos fornos, a capacidade do sistema elétrico e a ocorrência de perturbações. A correlação assim obtida não é a melhor maneira de encarar o problema, pois corresponderia ao caso extremo de cargas sensíveis ligadas ao mesmo barramento do transformador do forno, situação que, na prática, é encontrada em menos de 20% do total dos casos. Entretanto, para estimativa preliminar do problema, as curvas experimentais relacionando a potência de curto-circuito trifásico simétrico no barramento de alimentação e a potência do forno são de grande valor prático, notadamente do ponto de vista da empresa concessionária, que normalmente tem previamente calculadas as potências de curto-circuito nos diversos barramentos.

A experiência americana constatou que, para se estar do lado da segurança, a potência de curto-circuito trifásico simétrico no barramento de alimentação do transformador do forno deve ser pelo menos 100 vezes maior que o máximo balanço monofásico de potência observado (ou previsto) na operação do forno. Balanços monofásicos de potência verificados numa série de fornos de diversas capacidades foram reportados por Clark⁽¹⁰⁾ e Jones⁽¹¹⁾, e são apresentados na tabela I, em forma de variação de potência trifá-

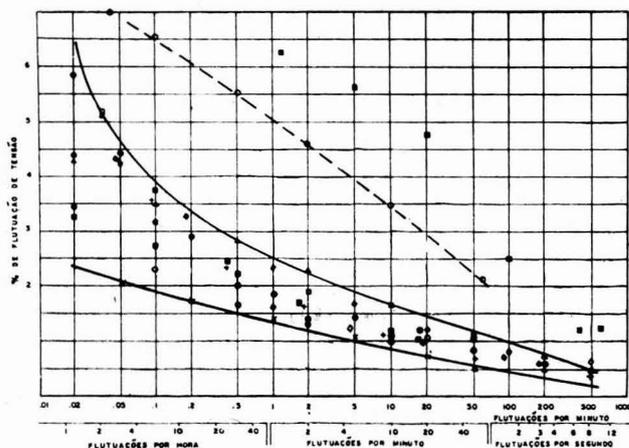


Fig. 4 — Limites permissíveis de variação de tensão.

TABELA I — Variação de potência trifásica que produziria aproximadamente o mesmo efeito da variação monofásica

Potência nominal do Transf. do forno (kVA)	Equivalente dos balanços monofásicos (kVA)
2.000	2.300
3.000	3.100
4.000	3.800
5.000	4.300
6.000	5.000
7.500	5.600
10.000	6.500
12.000	7.000
15.000	7.750
16.000	8.000
18.750	8.650
20.000	8.700

sica que produziria aproximadamente o mesmo efeito da variação monofásica.

Exemplificando, um forno trifásico de 4.000 kVA requeriria uma potência de curto-circuito trifásico de 100×3.800 , ou 380.000 kVA. A tabela é válida para apenas um forno.

O exame das curvas estatísticas sôbre permissibilidade das flutuações de tensão, preparadas por muitas companhias de eletricidade, revela que as flutuações situadas já na faixa de tolerância seguem com certa rigidez a fórmula:

$$NV^4 = K, \text{ ou } V = \sqrt[4]{\frac{K}{N}}$$

onde: N = n.º de flutuações por unidade de tempo; V = amplitude da flutuação (volts); e K = constante; indicando pois a relação ser a magnitude permissível das flutuações em tensão inversamente proporcional à raiz quarta do número das flutuações por unidade de tempo.

Para um dado forno, a magnitude da flutuação é também inversamente proporcional à potência de curto-circuito. Assim, a potência de curto-circuito requerida é diretamente proporcional à raiz quarta do número de flutuações por unidade de tempo.

Se aceita-se como verdadeiro que dois fornos similares produzirão o dôbro de flutuações de mesma espécie num dado período de tempo, então a potência de curto-circuito requerida pelos

mesmos será igual a $\sqrt[4]{2}$ vezes o necessário para um forno, ou seja, uma potência 1,2 vezes maior. Seguindo-se a mesma linha de raciocínio, para três fornos similares a potência de curto

necessária será $\sqrt[4]{3}$ vezes a requerida por um forno, ou seja, uma potência 1,32 vezes maior. A figura 5 apresenta as curvas representativas das relações entre a capacidade do sistema e a potência dos fornos.

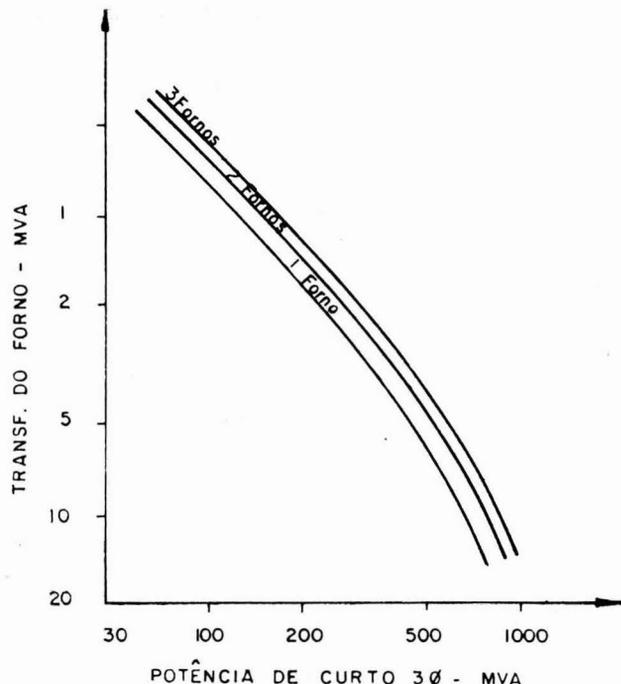


Fig. 5 — Relação entre a capacidade do sistema e a capacidade dos fornos.

9. CONSTANTES DE QUEDA DE TENSÃO MÚTUA E PRÓPRIA

Esclareceu-se que a relação entre a potência de curto-circuito no local da instalação e a potência do forno é elemento útil para fixação das idéias, porém não conclusivo. Para estabelecer uma correta relação entre o tamanho do forno e os requisitos do sistema relativamente às flutuações de tensão, são definidas grandezas específicas denominadas *Constantes de queda de tensão mútua e própria*.

A *Constante de queda de tensão mútua*, identificada pelo símbolo X_{mn} , e definida como a queda de tensão porcentual desde a tensão interna do gerador (ou equivalente de sistema gerador) até a carga sensível mais próxima do local da instalação (barra "n"), sendo de 1,0 p.u. (*) a corrente reativa passante no transformador do forno, na base de potência do mesmo. A queda de tensão porcentual até a barra no transformador do forno (barra "m"), nas mesmas condições supra, é denominada *Constante de queda de tensão própria*, e identifica-se pelo símbolo X_{mm} . O significado das constantes X_{mn} e X_{mm} pode ser visualizado pelos exemplos da figura 6.

Pode-se verificar que para um dado balanço na carga do forno, a flutuação de tensão no barramento da carga sensível ou residencial será proporcional a X_{mn} , ao passo que a flutuação na barra do transformador do forno será proporcional a X_{mm} .

(*) p.u. = por unidade.

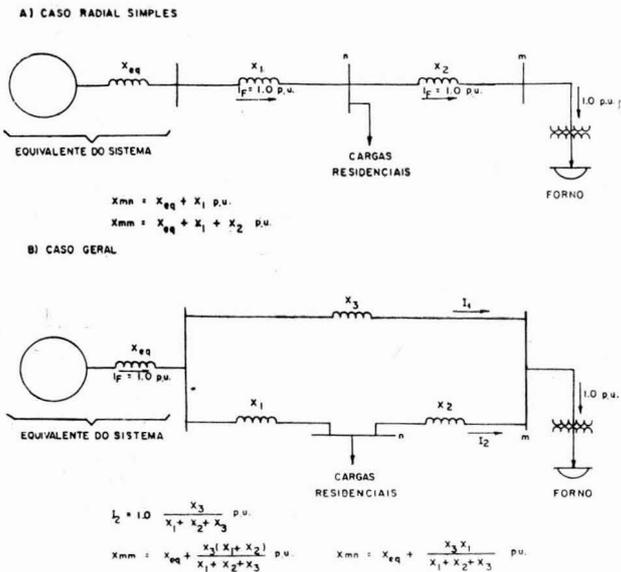


Fig. 6 — Constantes de queda de tensão mútua e própria.

Sendo o elemento importante a limitação das flutuações de tensão na barra dita crítica, à qual estão ligadas cargas sensíveis ou residenciais, a constante de queda de tensão própria, X_{mm} , é de importância secundária, a não ser que a barra crítica seja a própria barra do transformador do forno. Nesta hipótese, pode-se com propriedade aplicar o método exposto no item 8, pois X_{mm} nada mais será que a reatância do sistema vista da barra em referência (na base de potência do transformador do forno), sendo portanto o inverso da potência de curto-circuito trifásico no local.

Os valores de X_{mn} e X_{mm} são calculáveis a partir de dados do sistema alimentador, manual-

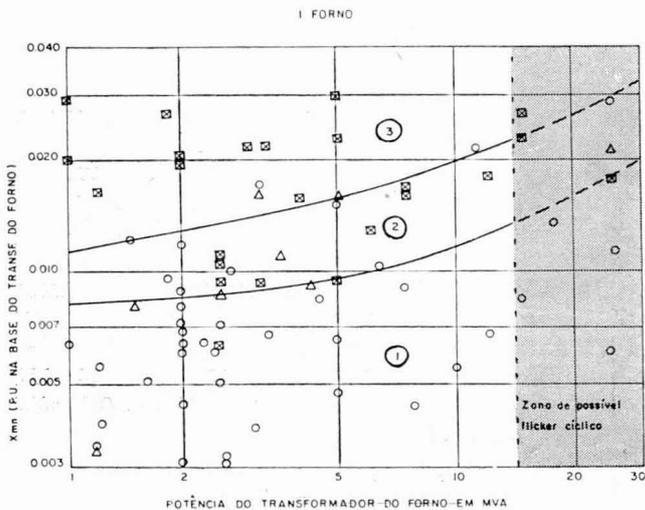


Fig. 7 — Gráfico de X_{mn} em função da potência do transformador de cada forno, para o caso de uma unidade. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de tolerância; 3 — Zona de reclamações.

mente nos casos mais simples, e mediante o uso de Analisadores de Circuito ou Computadores Digitais nos casos mais complexos.

As curvas relacionando a constante X_{mn} e a capacidade dos fornos, estabelecidas pelo AIEE Committee on System Engineering, e apresentadas nas figuras 7, 8 e 9, permitem uma correta expectativa dos efeitos produzidos pela operação dos fornos a arco. Observa-se que os valores de X_{mn} correspondentes a mais de um forno serão da ordem de 10 a 15% menores que o valor correspondente à instalação de uma única unidade, o que em última análise confirma o critério apresentado em item anterior com relação à potência de curto-circuito trifásico. As curvas limite apresentadas estão parcialmente tracejadas, além da marca dos 15 MVA.

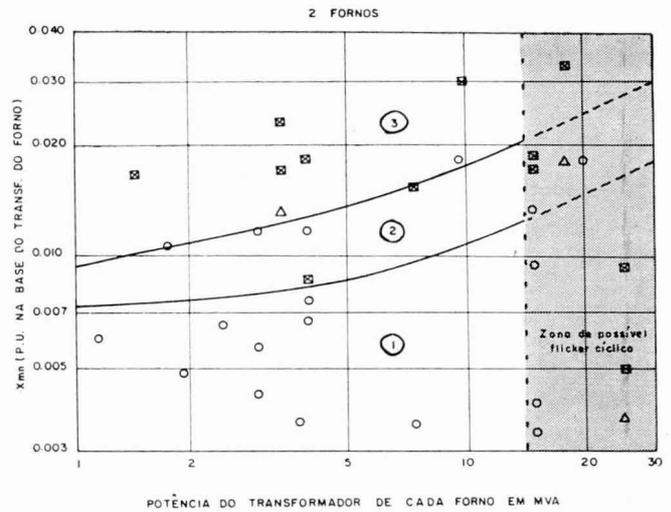


Fig. 8 — Gráfico de X_{mn} em função da potência do transformador de cada forno, para o caso de duas unidades. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de tolerância; 3 — Zona de reclamações.

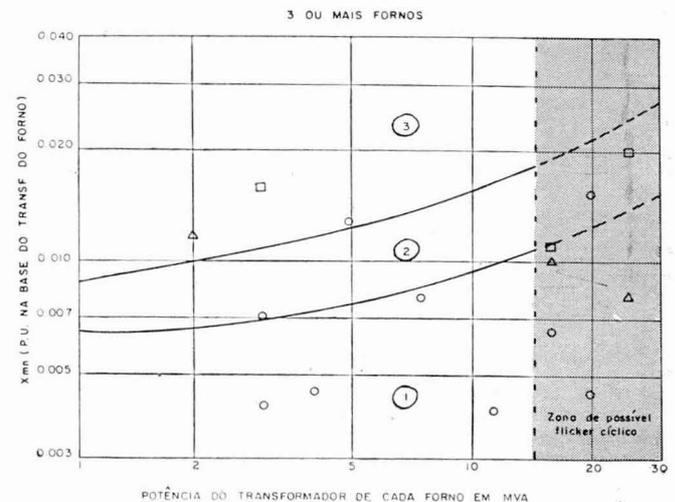


Fig. 9 — Gráfico de X_{mn} em função da potência de transformador de cada forno, para o caso de três ou mais unidades. 1 — Zona satisfatória; 2 — Faixa de tolerância; 3 — Zona de reclamação.

O significado deste fato é que nas unidades de maior porte há indícios de ocorrência, além dos problemas referidos anteriormente e classificados como *perturbações extrínsecas ao arco*, de flutuações cíclicas de frequência entre 3 e 10 Hz superpostas às flutuações de menor frequência, relacionadas com o projeto do forno, e classificadas como *perturbações intrínsecas ao arco*. Com o objetivo de reduzi-las, o projeto dos fornos de maior porte deverá obedecer à diretriz de operar com arcos de menor comprimento e grandes correntes, representando uma operação mais estável, mas exigindo para a sua concretização, eletrodos de grande seção, encarecendo assim o custo de aquisição.

O fenômeno citado não é observado nas unidades menores de 15 MVA, e portanto, as curvas apresentadas deverão ser manejadas com a devida cautela em se tratando de potências superiores àquelas, até que dados de observação e experiência venham permitir uma definição mais segura dos limites de X_{mn} para as grandes potências.

10. MEDIDAS CORRETIVAS DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Previstos problemas na operação de fornos a arco, mediante a utilização dos métodos apresentados, dois caminhos podem ser seguidos:

- Reforço do sistema elétrico alimentador, significando o aumento da capacidade geradora do sistema (medida somente viável em se tratando de indústria autoprodutora de energia elétrica) ou o reforço do sistema de transmissão.
- Uso de equipamento externo corretivo.

Em qualquer dos casos, as soluções serão provavelmente onerosas, implicando em investimentos elevados.

Passamos a relacionar então as medidas de correção das flutuações, passíveis de adoção.

11. SEPARAÇÃO DE CIRCUITOS

É via de regra a primeira medida cogitada, e é muitas vezes mais utilizada do que qualquer outro método corretivo.

Este procedimento tem por objetivo:

- Tornar as demais cargas (sensíveis) eletricamente distantes da barra do transformador do forno, significando a ligação de seu circuito alimentador em linhas de sub-transmissão (ou mesmo de transmissão) através de transformadores exclusivos, ou ainda, quando a indústria siderúrgica for alimentada por mais de um circuito de transmissão, separar uma linha exclusiva para o suprimento ao forno.
- Tornar o forno eletricamente mais próximo do sistema gerador, ou seja, reduzir a impedância do sistema (vista do ponto) mediante a duplicação de

circuitos de alimentação, ou ainda pela construção de linhas de alta tensão, exclusivas para a indústria.

12. CONDENSADOR SÍNCRONO

Viu-se que a característica de carga de um forno a arco é sua aplicação e retirada repentina, causando assim, distúrbios de tensão. O sistema elétrico alimentador é via de regra predominantemente indutivo. As grandes variações de corrente na operação dos fornos a arco ocorrem principalmente na fase de fusão do material, quando o fator de potência é da ordem de 50%.

Assim, a queda de tensão correspondente à variação súbita da corrente de carga do forno será primordialmente devida à circulação pelas reatâncias indutivas do sistema da energia reativa demandada no processo de funcionamento do equipamento.

Predominando os componentes reativos nos momentos mais críticos da alimentação do forno, um condensador síncrono instalado em paralelo com a carga teria teoricamente o efeito de suavizar as perturbações, pois supriria a energia reativa necessária, a qual deixaria de fluir do sistema. Entretanto, na realidade tanto o sistema quanto o condensador síncrono responderão instantaneamente à solicitação de energia reativa, na razão inversa de suas respectivas reatâncias. Ocorre porém que a reatância do sistema, vista da barra do consumidor, quase nunca é superior a 10% (na base de potência do transformador do forno), sendo 5% um valor médio. Um valor usual para a reatância transitória do condensador síncrono é de 25%, nas bases de potência e tensão da máquina.

Se um C.S. do mesmo porte da carga (em kVA) for instalado, a reatância do sistema, vista do ponto, se reduziria a:

$$\frac{5 \times 25}{5 + 25} = 4,2\%$$

após a instalação do síncrono, e a flutuação de tensão se reduziria de apenas 16% (ou seja, 1-4,2/5,0) de seu valor inicial antes da correção, pois o C.S. supriria apenas 16% da demanda de reativo, continuando os restantes 84% a fluir do sistema.

Para que a flutuação de tensão se reduzisse a 50% do seu valor não-corrigido, o C.S. deveria ter cinco vezes a potência do forno (em kVA), pois então a sua reatância transitória, na base de potência do forno, seria 5%, a reatância equivalente se reduziria a:

$$\frac{5 \times 5}{5 + 5} = 2,5\%$$

e a flutuação se reduziria a 50% (ou seja, 1-2,5/5,0) do valor original.

Os custo de aquisição dos condensadores síncronos, pode ser considerado de acôrdo com a tabela II:

TABELA II — Custo de aquisição dos condensadores síncronos

kVAR	Custo de aquisição — US\$/kVAR	
	Refrigeração a hidrogênio, instalação externa	Refrigeração a ar, instalação interna
10.000	13.00	9.00
20.000	11.00	8.20
30.000	9.80	7.80
40.000	9.20	7.50
50.000	8.90	7.20

Levados em consideração o custo de aquisição dos condensadores síncronos, suas despesas de instalação, e a relação entre as capacidades do C.S. e do forno, denota-se claramente a ineficácia e anti-economicidade da correção nas condições especificadas.

13. CONDENSADOR SÍNCRONO EM CONJUNTO COM REATOR-SÉRIE

A eficiência do uso do C.S. como corretivo de flutuações de tensão pode ser bastante incrementada pela inserção de reator-série amortecedor (buffer reactor) entre o sistema e a barra do transformador do forno. Esta providência isola parcialmente o sistema elétrico alimentador das bruscas solicitações de energia reativa, responsáveis pelas flutuações de tensão.

Estando a reatância transitória do condensador síncrono em paralelo com a reatância do sistema adicionada à do reator, esta última pode ser convenientemente escolhida de modo que o equivalente da composição seja baixo, refletindo-se assim as maiores flutuações de tensão na barra do síncrono e preservados os consumidores adjacentes dos efeitos perniciosos. Esta situação pode ser apreciada à figura 10.

O custo do reator (em tórno de US\$ 5.00/kVAR) é consideravelmente menor que o dos síncronos (vide item anterior) nos quais as já elevadas despesas de aquisição são ainda acrescidas pelas de instalação, que por sua relativa complexidade (notadamente no caso das máquinas resfriadas a hidrogênio) elevarão as despesas finais a praticamente o dôbro das iniciais. Mais ainda, a potência dos reatores a serem empregados será usualmente pequena.

Assim sendo, é economicamente desejável que se utilize a combinação da maior reatância

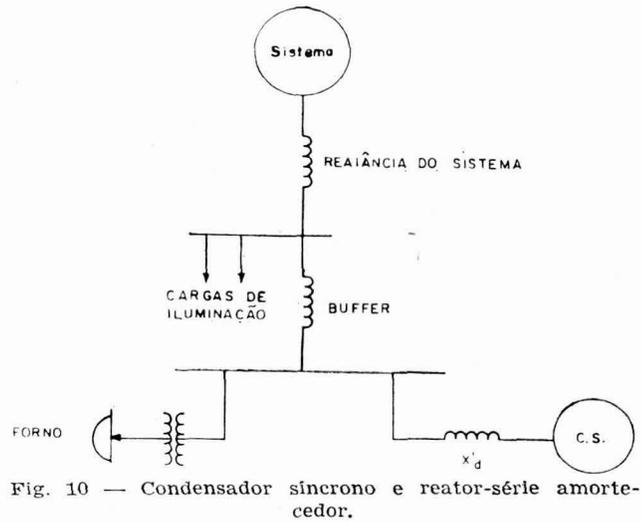


Fig. 10 — Condensador síncrono e reator-série amortecedor.

do amortecedor com o menor síncrono que os requisitos do caso possibilitarem.

O valor máximo de reatância utilizável sobre no entanto limitações:

- Para que seja estável a operação do condensador síncrono, a reatância sistema + reator não deve exceder de 35% nas bases da máquina.
- A estabilidade da operação do forno a arco exige que a reatância-série não exceda a reatância do circuito do forno.

Outro ponto a ser observado é que as grandes variações de tensão permitidas por êste método na barra do síncrono poderão refletir-se inconvenientemente nas demais cargas do consumidor siderúrgico, o que em última análise também limita o valor máximo da reatância-série.

Condensadores síncronos especiais para a aplicação em foco são dotados de excitação estática ultra-rápida, tendo seu reator dimensionado para suportar os efeitos da magnetização forçada.

Quanto à capacidade da máquina a ser instalada, a mesma deve atender à condição de manter na tensão nominal a barra do transformador do forno, para assegurar a produção nominal das instalações. Para que se consiga isso, a capacidade do síncrono deve ser no mínimo igual à soma das demandas em kVAR dos fornos ligados à mesma barra, mais metade dos kVAR consumidos na reatância sistema + reator. Na prática, tendo em vista a irregularidade da carga, o C.S. deverá ser 10 a 20% superior ao mínimo requerido.

Deve-se ter em vista também que, nas instalações onde sejam previstas ampliações futuras, a capacidade do condensador síncrono seja suficiente para as novas unidades, a menos que seja intencionalmente posta em prática uma diversidade de operação que evite o funcionamento

simultâneo de mais de um forno em período de fusão.

Em conclusão, a medida corretiva exposta tem sido considerada das mais efetivas e econômicas quando fôr suficiente uma redução das flutuações de tensão a 50% de seu nível não-corrigido, ao que ainda se acrescentam as usuais vantagens de regulação de fator de potência e tensão proporcionadas pela operação normal do condensador síncrono.

14. COMPENSAÇÃO SÉRIE

Com o objetivo de compensar parcialmente reatâncias indutivas, capacitores série podem ser empregados.

Um tipo de utilização possível seria a instalação de capacitores em série com o condensador síncrono do método exposto no item anterior, com o fito de reduzir sua reatância transitória e desta maneira conseguir um baixo equivalente na composição das reatâncias do sistema e do síncrono. A providência referida, embora aumentando a potência aparente momentânea do C.S., pode provocar o aparecimento de fenômenos de ressonância no circuito, dificultando a correta proteção da máquina. Este método, apresentado

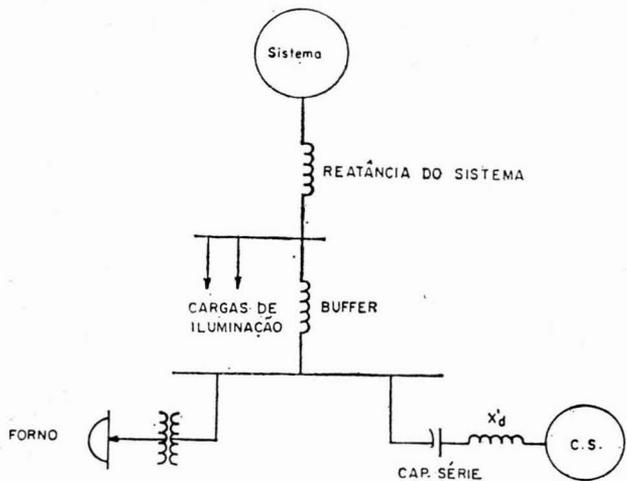


Fig. 11 — Aplicação de capacitor-série ao condensador síncrono.

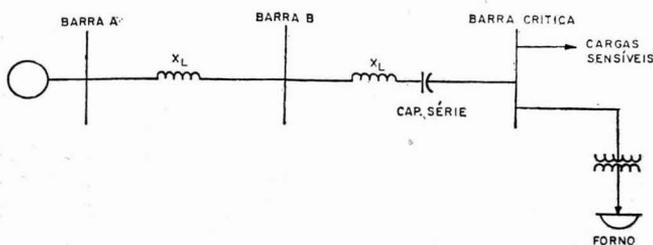


Fig. 12 — Aplicação do capacitor série ao circuito alimentador.

na figura 11, só é lembrado em casos de muito difícil solução.

Outra situação encontrada é a compensação parcial, por meio de um banco de capacitores-série, da reatância indutiva do circuito alimentador do forno, conforme ilustrado na figura 12.

Entretanto, se a compensação parcial proporcionada pelos capacitores-série terá como efeito a diminuição das flutuações de tensão na barra crítica (no caso a barra do transformador do forno), todos os barramentos situados aquém do ponto de instalação da correção continuarão submetidos às mesmas flutuações anteriores à medida, que assim se verifica ser de âmbito local e restrito.

Para ser exequível técnica e economicamente, este tipo de instalação deve subordinar-se às condições:

- a) Existindo no mesmo barramento outras cargas além da do forno, esta deverá representar a maior parcela do total, pois os capacitores deverão ser dimensionados para a potência total circulante no circuito alimentador, o que será pouco econômico caso a carga do forno seja uma pequena porcentagem do total.
- b) Tendo em vista as restrições apresentadas, este método só é bem utilizado nos casos alimentadores de grande extensão.

BIBLIOGRAFIA

1. KNOWLTON, A. E. — «Standard Handbook for Electrical Engineers».
2. AIEE System Planning Subcommittee — «Survey of arc furnace installation on power systems and resulting lamp flicker» (AIEE Transactions on Applications and Industry, set. 1957).
3. JONES, B. M. & STEARNS, C. M. — «Large electric-arc furnaces and power supply» — AIEE Transactions, pg. 763, 1941.
4. CONCORDIA, C.; LEVOY, L. G. & THOMAS, C. H. — Selection of buffer reactors and synchronous condensers on power systems supplying arc furnaces loads; AIEE Transactions on Applications and Industry, julho 1957.
5. LARRABURE, F. J. — A Eletricidade e o futuro da Siderurgia Brasileira; METALURGIA, vol. 24, n.º 133, dezembro, 1968, p. 953.
6. BECKIUS, I. & KOTLAREVSKY, M. — Distúrbios causados por fornos a arco em rédes de energia elétrica; METALURGIA, vol. 25, n.º 141, agosto, 1969, p. 635.
7. RAUMSAUR, O. & TREWEEK, J. E. — Systems Capacity required for three-phase arc furnaces; AIEE Transactions, 1954.
8. WESTINGHOUSE — Distribution Systems.
9. WESTINGHOUSE — Electrical Transmission and Distribution Reference Book.
10. CLARK, L. W. — AIEE — Transactions, 1935, v. 4.
11. JONES, B. M. — Bulletin, Edison Electric Institute.