

# A Operação da USIBA e o Sistema Elétrico CHESF-CEEB<sup>(1) (2)</sup>

ELABORADO PELO CORPO TÉCNICO DA USIBA

## R E S U M O

*São analisadas as condições de fornecimento de energia elétrica para a USIBA, desde a escolha da tensão mais adequada para alimentação, até a instabilidade da tensão provocada pelo funcionamento dos fornos elétricos. São apontadas várias soluções e cuidados a serem tomados e a necessidade de equipamentos de correção de maneira a não prejudicar o funcionamento das demais instalações vizinhas.*

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação de uma indústria do porte da USIBA, se não for precedida por um pormenorizado estudo das condições energéticas locais, pode provocar um impacto no sistema elétrico capaz de prejudicar o funcionamento de outras indústrias, tanto no que diz respeito à instabilidade da tensão da rede, como à inconstância do fornecimento de energia acarretada pela falta de capacidade geradora. Para não correr esses riscos, já demos início ao estudo do problema e, como pode ser constatado nas informações que se seguem, os resultados já obtidos são bastante otimistas.

Para que haja uma melhor visão do problema, esclarecemos primeiramente que, será construída junto da USIBA, uma subestação interligada com o sistema geral, através da subestação de Cotegipe. Na figura 1 esquematizamos o sistema geral CHESF-CEEB com as interligações existentes e as projetadas.

Esta subestação terá, na sua primeira etapa, além do equipamento convencional, dois transformadores de respectivamente 42 MVA e 20 MVA, sendo o primeiro destinado à alimentação do barramento onde será ligado o forno a arco e o segundo destinado a alimentação de outras subestações, como sejam, da laminação a quente, dos

retificadores, dos auxiliares, etc. A tabela I apresenta a estimativa de consumo de energia na USIBA.

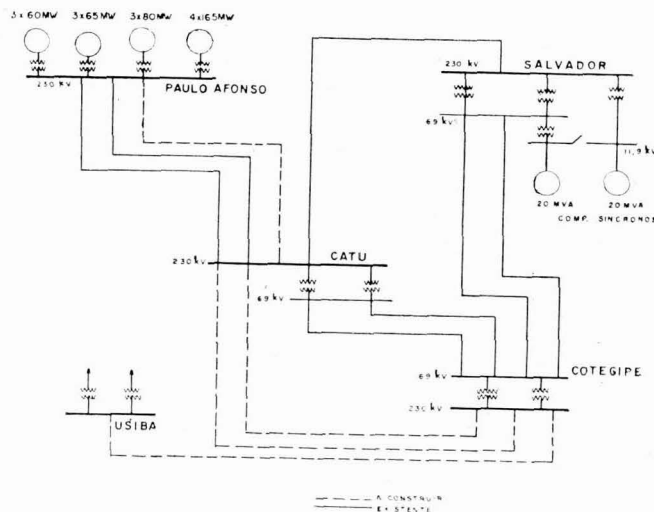


Fig. 1 — Diagrama unifilar CHESF-CEEB.

Hoje, sem levarmos em conta as usinas de apoio de Cotegipe e de Bananeiras, a potência disponível no sistema da CHESF é de 630 MVA, sendo que somente 540 MVA estão sendo utilizados. Em meados de 1971, Paulo Afonso contará com mais uma casa de força que adicionará a este total, dois geradores de 165 MVA, e no início de 1972, nesta mesma casa de força, funcionarão mais dois geradores de 165 MVA, elevando a potência total instalada na usina de Paulo Afonso para cerca de 1.300 MVA.

(1) Contribuição apresentada ao Simpósio sobre Eletrosiderurgia; Salvador BA; setembro de 1968.

(2) Alguns dos desenhos que acompanhavam as cópias prévias distribuídas na apresentação do trabalho, não eram susceptíveis de redução, sendo omitidas nesta publicação. Os interessados poderão obter cópias com a USIBA ou consultar o original na Secretaria da ABM.

TABELA I — Estimativa do consumo de energia da USIBA

UNIDADES	PRODUÇÃO ANUAL t	kWh/t	TOTAL kWh	TRABALHO EFETIVO HORAS/ANO	MÉDIA POR HORA	FATOR DE POTÊNCIA	DEMANDA EM 15 MIN kW
1-UNIDADE DE REDUÇÃO DIRETA (HYL)	165 000 (A)	20	3 300 000	7 560	436	980	545
2-ACIARIA - FORNOS ELÉTRICOS E LINGOTAMENTO CONTÍNUO	195 280 (B)	670	130 837 600	—	—	—	36 000 *
3-LAMINAÇÃO A QUENTE	178 100 (B)	93	16 563 300	2 800	5 915	0,7	9 858
4-LINHA DE TESOURA A QUENTE	50 430 (B)	10	504 300	2 800	180	0,7	257
5-LINHA DE COLAPAGEM CONTÍNUA	114 750 (B)	15	1 721 250	2 000	860	985	1 012
6-LAMINAÇÃO A FRIO (PARA CHAPAS)	46 350 (B)	40	1 854 000	2 000	927	—	—
7-FORNOS DE RECOZIMENTO (PARA CHAPAS)	46 350 (B)	15	625 250	2 800	248	985	291
8 LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO (PARA CHAPAS)	44 950 (B)	17	764 150	1 600	477	—	—
9-LINHA DE TESOURASA FRIO	40 000 (B)	10	400 000	2 800	142	0,70	203
10-LAMINAÇÃO A FRIO (PARA FÓLHAS DE FLANDRES)	66 100 (B)	120	7 932 000	4 400	1802	0,75	2 402
11-LINHA DE LIMPEZA ELETROLÍTICA	66 100 (B)	9	594 900	2 800	212	0,80	265
12-FORNOS DE RECOZIMENTO (PARA FÓLHAS DE FLANDRES)	66 100 (B)	7	462 700	4 000	115	0,85	135
13-LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO (PARA FÓLHAS DE FLANDRES)	65 450 (B)	30	1 963 500	4 400	446	0,70	637
14-ESTANHAMENTO ELETROLÍTICO E PREPARAÇÃO DE BOBINAS	54 300 (B)	100	5 430 000	2 800	1 939	0,80	2 424
15-CASA DE BOMBAS	31104 000m(A)	0,17	5 287 680	8 640	612	1	612
16-INSTALAÇÕES AUXILIARES E ILUMINAÇÃO	—	—	10 000 000	8 640	1 157	0,90	1 285
<b>TOTAL</b>			<b>188 310 630</b>		<b>32 774</b>		<b>55 936</b>
A. CARGAS CONSTANTES		1207 kW					
B. CARGAS VARIÁVEIS		54,729 kW		FATOR DE VARIAÇÃO = 1,1			
DEMANDA		1,207 +		= 1,207 + = 50,960			
Δ AÇO LÍQUIDO							
* ESTIMATIVA BASEADA NAS CARACTERÍSTICAS DO FORNO							
				DEMANDA 50,960 kW			
				CONSUMO 15.692.550 kWh			

## 2. A TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

A instalação no Centro Industrial de Aratu — CIA, de indústrias como a ALBRA, com uma demanda prevista de 100 MVA, a SIBRA com 25 MVA, White Martins com 25 MVA, Paskin com 10 MVA e outras, absorverá uma parte dessas reservas energéticas; mesmo assim, nenhum problema terá a distribuidora de energia elétrica para atender não só à demanda de 60 MVA que a USIBA terá necessidade na sua etapa inicial, como também para o atendimento da expansão que se seguirá.

A instalação de fornos de arco com potência de 42 MVA, que podem ser situados entre os de maior potência do mundo, levou-nos ao estabelecimento de uma nova etapa nos estudos já empreendidos: a escolha da tensão de alimentação. Como nas barras da subestação de Cotegipe existe atualmente a tensão de 66 kV, e dentro de 8 meses a de 230 kV, parece-nos que a escolha deverá processar-se em relação a um destes valores.

Naturalmente, sob o ponto de vista dos interesses da USIBA, a escolha deverá ser baseada na diferença de tarifas entre uma tensão e outra,

e no investimento a ser feito na nossa subestação. Em relação à empresa concessionária dos serviços de energia elétrica, interessará sobretudo a influência que uma carga tão instantaneamente variável, como a nossa, poderá ter nos outros consumidores; mesmo com a utilização de todos os equipamentos de correção, que sem dúvida instalaremos, caberá a ela a última palavra sobre a referida escolha.

Embora a CHESF seja a produtora de energia elétrica nesta região, a distribuição no CIA está a cargo da Companhia de Energia Elétrica da Bahia — CEEB. Por essa razão a USIBA dirigiu-se à CEEB para obter dados sobre as tarifas em vigor.

A Portaria n.º 154 de 9 de junho de 1967, considera no serviço de transmissão somente valores compreendidos entre 33 e 66 kV, não mencionando a tensão de 230 kV. Pareceu-nos que a única maneira de verificar a diferença de tarifas entre as duas tensões, seria pela observação das tarifas da CHESF em relação à CEEB para essas tensões. Na demanda, verificamos que em 66 kV havia um acréscimo de cerca de 8,5% e no consumo de cerca de 40% em relação ao for-

necimento à tensão de 230 kV. Olhando este fator, para uma indústria que na sua primeira fase deverá atingir uma demanda de cerca de 55 MW e um consumo anual de cerca de 200.000.000 de kWh, o fornecimento à tensão de 230 kV parece mais lógico. Não obstante, o investimento a ser feito na construção de uma subestação de 230 kV é bem maior do que em 66 kV. Uma estimativa rápida, feita com base na diferença de preços entre os equipamentos de maior vulto, mostrou que essa diferença poderá ser de 100%.

Em termos de valores absolutos podemos afirmar que, antes do início da segunda etapa, a economia resultante da diferença de tarifas já terá absorvido o investimento adicional. Embora, como já dissemos, tenhamos que aguardar um pronunciamento da empresa concessionária, a nossa escolha é favorável à tensão de 230 kV.

### 3. INSTABILIDADE DE TENSÃO

No início, falamos sobre a instabilidade de tensão, que um forno a arco pode provocar na rede. Por essa razão, explicaremos sucintamente as bases a serem adotadas para a seleção dos equipamentos de correção necessários à redução dessas oscilações a um mínimo permissível.

Um consumidor como a USIBA é considerado altamente rentável para a concessionária de distribuição de energia pois, apesar das flutuações, apresenta um alto fator de carga e um bom fator de potência durante as operações de refino.

Durante muitos anos a capacidade dos fornos a arco foi relativamente pequena. A partir de 1950, foram instalados vários fornos com capacidades de até 25 MVA. Hoje em dia existem instalações onde se encontram fornos de 45 MVA.

Na operação de um forno a arco distinguem-se dois períodos cujas influências no sistema elétrico são totalmente diferentes: o período de fusão e o período de refino. Durante o primeiro, pedaços de sucata provocam constantes curto-circuitos que se caracterizam por violentas variações de corrente com um baixo fator de potência. Durante o segundo, a carga já está em estado de fusão e os arcos podem ser mantidos uniformes entre os três eletrodos por meio de reguladores automáticos, permitindo assim uma carga trifásica constante a um bom fator de potência.

Vê-se então que as nossas preocupações se concentram no período de fusão, quando ocorrem as maiores variações de carga, as quais, dependendo do forno podem se estender até por uma hora e meia. Nos fornos pequenos estas flutuações de carga podem ser reduzidas adicionando-se reatâncias em série no lado de alta tensão do transformador que alimenta o forno. Em fornos cujas capacidades ultrapassam 10 MVA, tornam-se necessários outros equipamentos e precauções.

Os fornos a arco operam em ciclos que vão desde a formação do arco até o vazamento. Nos primeiros 45 min verificam-se de 500 a 1.000 curto-circuitos, com as correspondentes flutuações de tensão.

O processo a ser posto em prática pela USIBA, com o emprêgo de sucata preparada e ferro-esponja como carga do forno, permite que se forme um arco mais estável (menor resistividade do ferro-esponja em relação à da sucata), com menores variações de corrente.

### 4. A INSTALAÇÃO DA USIBA

A USIBA, na sua primeira etapa, instalará um forno a arco com capacidade nominal de 80 t, alimentado por um transformador de 42 MVA, tendo no primário a tensão de 34,5 kV. A tensão secundária, embora a ser ainda definida, não deverá ter um valor muito elevado, não só por considerações de segurança mas, também por ter sido observado que valores altos causam possíveis flutuações cíclicas (cyclic flicker). Estas flutuações, na razão de seis por segundo, foram verificadas em fornos com capacidade superior a 15 MVA e valores elevados de tensão entre eletrodos.

O primário do transformador será ligado em delta, com previsão para ligação em estrela. No secundário, a ligação em delta é padronizada. O número de "taps" será de 24, com comutação em carga. Os valores da tensão secundária correspondentes a esses "taps" não foram ainda fixados e estamos inclinados a mantê-los entre 550 e 150 V.

A comutação em carga permitirá diminuir as paradas obrigatórias do forno, necessárias quando a comutação é feita sem carga, e também aplicar em qualquer momento a voltagem mais favorável que permita uma redução de tempo de fusão.

Principalmente no início da fusão, para que a operação do forno não seja demasiado violenta, torna-se necessária a instalação de uma reatância que atinja valores até 50% da reatância do próprio transformador. Entretanto, um transformador de 42 MVA tem reatância própria suficiente para estabilizar o arco, não havendo por isso necessidade de reatores adicionais no lado de alta tensão, como normalmente se usam nos transformadores de pequena capacidade.

Como a intensidade das flutuações de voltagem produzidas pela variação da carga elétrica do forno depende da capacidade geradora e da reatância do sistema até as suas barras de ligação, parecerá a primeira vista que um sistema como o da CHESF, com grande capacidade geradora é perfeitamente adequado para suprir a carga em questão. Outros fatores entretanto têm influência preponderante.

### 5. A FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A experiência mostra que quanto maior a frequência das variações de tensão, maior a sensibilidade visual do observador. Na figura 2 podem ser observados os limites de visibilidade e de irritação para a frequência e o valor da flutuação de tensão, para diversos tipos de carga.

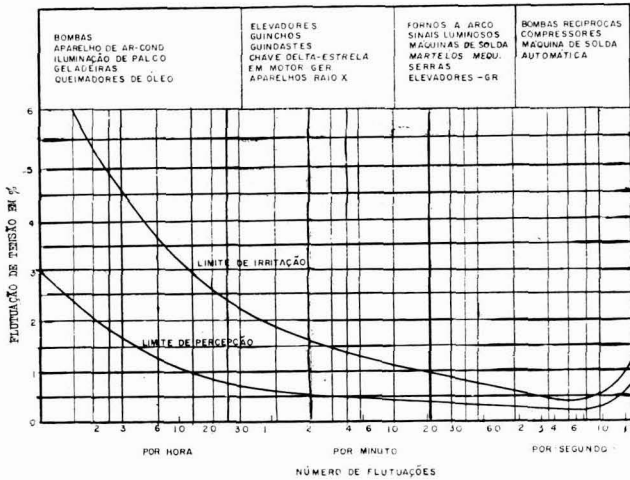


Fig. 2 — Limite de visibilidade à irritação em relação à frequência e o valor da flutuação de tensão para diversos tipos de carga.

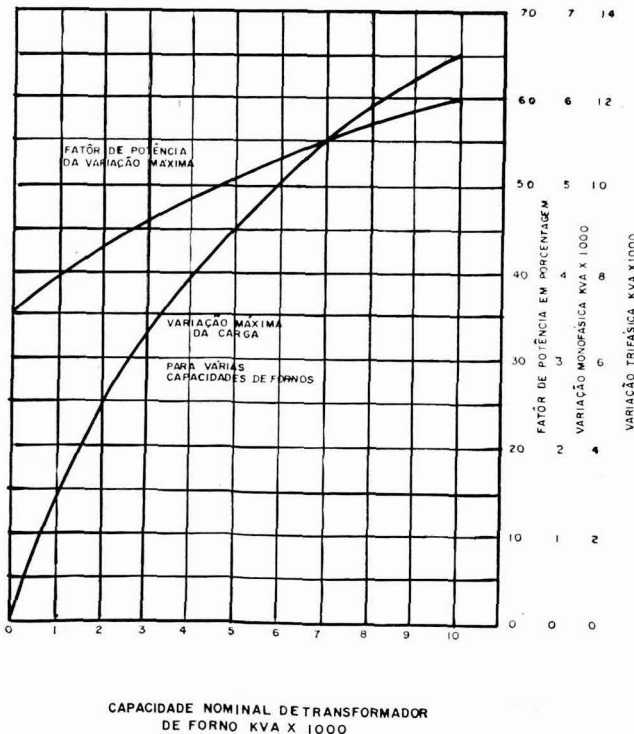


Fig. 3 — Curvas indicando máxima variação frequente de carga e fator de potência durante a operação inicial do forno.

A figura 3 mostra as variações de carga e fator de potência durante a operação inicial do forno. Para um forno de 3 MVA a variação trifásica chega a atingir 6,5 MVA, ao passo que para um forno de 10 MVA a variação atinge um máximo de 13 MVA. Vemos que, com o aumento de capacidade de forno, as variações de carga diminuem proporcionalmente a este valor, o mesmo se dando com o fator de potência.

Sabendo-se que as flutuações de tensão causadas pelos curto-circuitos provocam reclamações de outros consumidores, torna-se necessário que sejam estabelecidos limites para essas flutuações.

Dissemos que a intensidade das flutuações de tensão dependia da capacidade geradora e da reatância do sistema. No sistema CHESF, embora a capacidade geradora seja elevada, a quase totalidade das máquinas geradoras é constituída de rotores de polos salientes que possuem, por isso, uma reatância muito grande, diminuindo o valor do curto-circuito no sistema e, conseqüentemente, nas barras do forno.

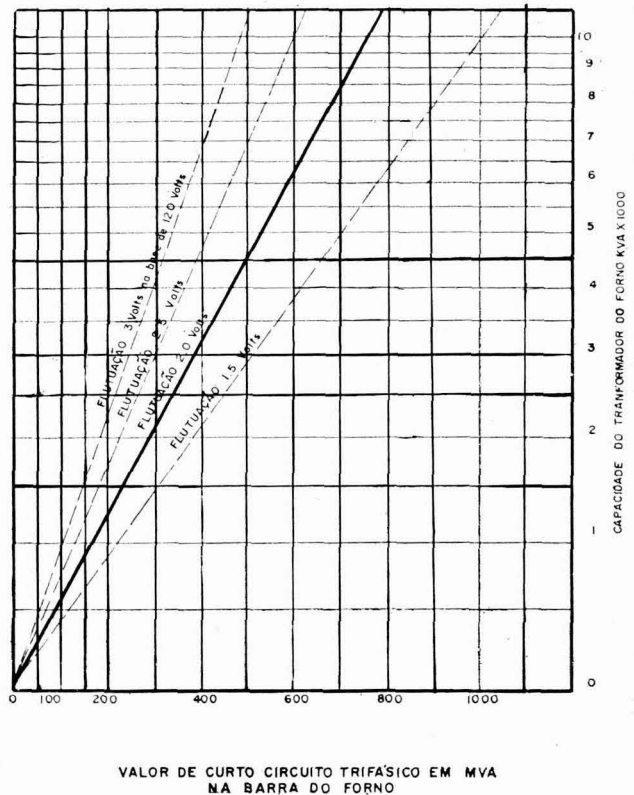


Fig. 4 — Capacidade de forno de arco em relação ao valor de curto circuito na barra do forno e flutuações de tensão entre 1, 2 e 3V.

Na figura 4 vemos a relação entre capacidade e valor de curto-circuito nas barras de um forno, para uma determinada flutuação de tensão, referida em porcentagem a 120 volts. Nesse gráfico vê-se claramente como é importante

um alto valor de cruto-circuito. Infelizmente, isso não será no sistema CHESF, e por isso o investimento a ser feito na USIBA em equipamento corretivo será muito mais elevado.

Sendo a reatância um fator preponderante para a fixação do valor de curto-circuito nas barras do forno, vamos citar os meios que podem ser usados para diminuir este valor, reduzindo assim o valor das flutuações de tensão.

- Aumento de capacidade geradora** — Em 1972 Paulo Afonso estará com a sua capacidade geradora completa, não sendo possível aumentar o número de máquinas. Outras instalações já estão sendo estudadas e até 1976 poderemos contar com a barragem de Moxotó, cuja usina com 600 MW possibilitará o aumento de capacidade geradora do sistema, atendendo à segunda fase de expansão da USIBA.
- Aumento de número de linhas de transmissão** — Em 1972 entrará em serviço uma terceira linha de 230 kV até Catú, com a conseqüente diminuição da reatância das linhas de transmissão.
- Aumento de capacidade transformadora** — Este fator depende de aumento de demanda do sistema CEEB.
- Instalação de compensadores síncronos nas barras do forno** — Embora a reatância de um compensador síncrono seja bem mais baixa do que a de um gerador, em virtude da tensão das barras de alimentação do transformador do forno ser de 34,5 kV, torna-se necessário intercalar um transformador entre o compensador e as referidas barras, o que provocará um aumento de reatância do conjunto, prejudicando um pouco o efeito que se pretende.
- Instalação de um reator em série com o alimentador do forno (buffer reactor).**
- Instalação de condensadores em série com o circuito de alimentação.**
- Instalação de condensadores em série com o compensador síncrono** — Este processo tem sido bastante usado pois obriga o compensador síncrono a aumentar o fornecimento de carga reativa fluuante pela diminuição da reatância sub-transiente.

A figura 5 apresenta uma instalação em funcionamento normal, estudada por Black e Lischer<sup>(2)</sup> sobre a aplicação de capacitores em série nos compensadores síncronos para redução da flutuação da tensão. É interessante notar a aplicação de condensadores "shunt", solução que vem sendo bastante criticada.

No caso da USIBA ainda não há decisões tomadas. Embora já tenhamos dados suficientes sobre as condições do sistema local, não os temos ainda sobre o equipamento de compensação de que poderemos dispor. Estamos certos porém, que com a instalação de um compensador síncrono, as flutuações de tensão diminuirão porque as flutuações de carga reativa, que não podem ser totalmente supridas pelo sistema, serão supridas em parte pelo compensador.

O American Institute of Electrical Engineers (AIEE), formou um comitê que, baseado no

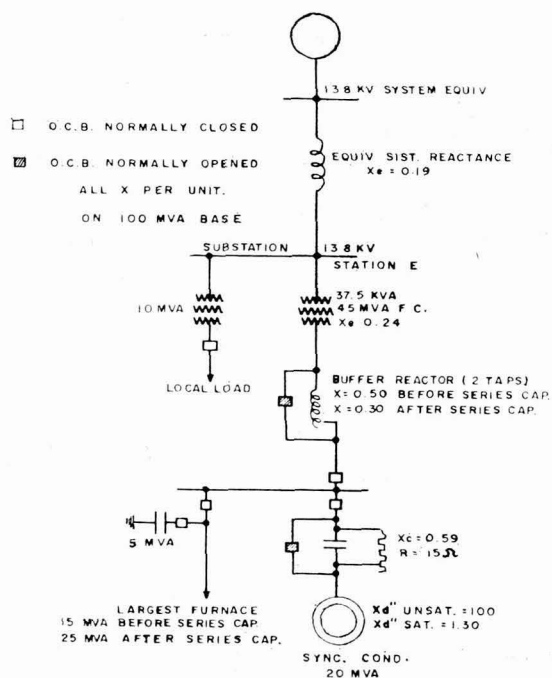


Fig. 5 — Esquema indicado por Black e Lischer<sup>2</sup> pela instalação de condensadores em série com o compensador síncrono.

estudo de 246 instalações de fornos a arco, concluiu que a relação entre a capacidade do sistema, a capacidade do forno em kVA e a intensidade das flutuações de tensão, poderia ser estabelecida por cálculo, com a utilização das constantes elétricas do sistema, chamadas *Constante de Queda de Tensão Mútua*  $X_{mn}$  (Mutual Drop Constant) e *Constante de Queda de Tensão Própria*  $X_{nm}$  (Self Drop Constant). A primeira define-se como a queda de tensão que ocorreria desde o sistema gerador até as barras "n" que fornecem os circuitos de distribuição e iluminação, com a circulação de uma corrente reativa igual à corrente nominal do transformador do forno a arco, corrente esta suprida pelo sistema ao forno no ponto de sua ligação na barra "m". A segunda define-se como sendo a queda de tensão até as barras do transformador do forno.

Na figura 6 podemos ver um sistema hipotético onde se podem verificar os pontos "n" e os pontos "m" da definição acima. Foi apresentado como exemplo em trabalho apresentado à AIEE em Chicago, sobre o cálculo de  $X_{mn}$  numa instalação com vários fornos a arco. Este cálculo foi feito usando um calculador de corrente contínua. Poderia ter sido usado um calculador de corrente alternada ou, na falta deste, terem-se feito os cálculos analiticamente.

Poderá ser observado na figura 7 o valor de  $X_{mn}$  e sua relação com várias capacidades de transformadores, assim como o efeito das flutuações produzidas pelo forno. Poderão ser observa-

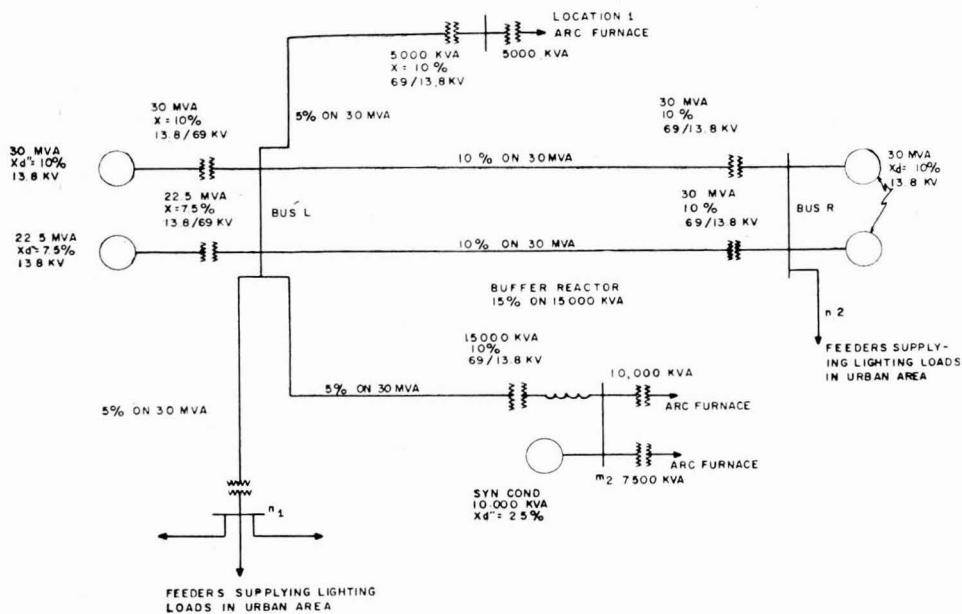


Fig. 6 — Diagrama unifilar de um sistema hipotético para a definição das Constantes de Queda de Tensão.

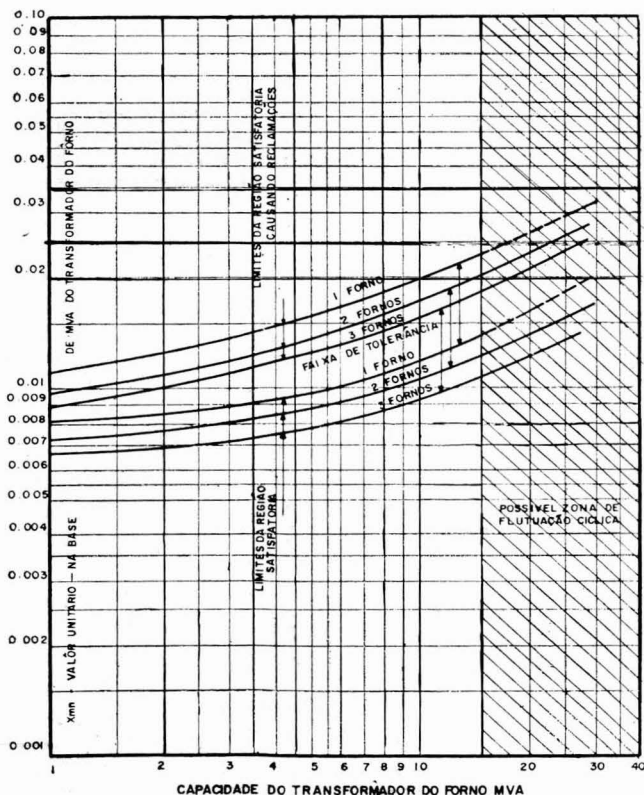


Fig. 7 — Valor do  $X_{mn}$  para várias capacidades de transformadores de forno e operação satisfatória e não satisfatória.

das três zonas, com valores de  $X_{mn}$  para os quais as flutuações de tensão são *aceitáveis*, *perceptíveis* mas ainda *aceitáveis* e *inaceitáveis* podendo cau-

sar reclamações de outros consumidores. Nesse mesmo gráfico pode ser feito um estudo da operação com dois ou três fornos ligados às mesmas barras.

Pela análise destas curvas pode-se notar uma redução de 10 a 15% nos valores de  $X_{mn}$ , quando se passa de uma instalação de um forno para uma de dois ou mais fornos.

## 6. CONCLUSÕES

Nos estudos que estamos procedendo a respeito dos efeitos da carga de um forno sobre a tensão do sistema que o alimenta, preparamos um diagrama do mesmo, detalhando as características dos seus componentes. Em continuação, determinaremos a reatância de sequência positiva em porcentagem ou por unidade, escolhendo 100 MVA como base e indicando os valores das tensões nos diversos barramentos.

Os equipamentos de correção com tôdas as suas características especificadas, assim como as condições de carga máxima e mínima do sistema, deverão também fazer parte integrante dos dados que servirão para uma análise completa do problema que nos propomos resolver.

Posto isto, definida a faixa dos valores de  $X_{mn}$ , dentro de limites satisfatórios em relação à capacidade do forno, deveremos fazer o cálculo do referido valor das características já mencionadas, determinando então a necessidade e valor do equipamento de correção a acrescentar àquele empiricamente projetado.

## BIBLIOGRAFIA

1. JONES, B. M. & STEARNS, C. M. — Large Electric — Arc Furnaces Performance and Power Supply.
2. BLACK, P. M. & LISCHER, L. F. — The application of a Series Capacitor To a Synchronos Condenser reducing Voltage Flicker.
3. RAMSANS, O. & TREWEEK, J. E. — System capacity Required for 3 — Phase Arc Furnaces.
4. KATSER, H. J. — Considerações sobre fornecimento de energia elétrica a fornos de arco.
5. AIEE — Guide for Application of Arc Furnaces on Power Systems.
6. SANTER, D. M. — Voltage fluctuation on Power Systems.