

ADALBERTO MAGNO MENDO

# Aparelhos electrotérmicos industriais

(Estudo das principais características)



Porto-1944

===== 1944 =====

Tip. e Enc. A PORTUENSE  
R. Conde Vizela, 80—PORTO

# Aparelhos electrotérmicos industriais

(Estudo das principais características)

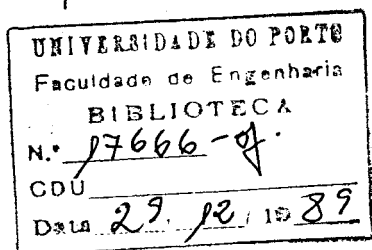
ADALBERTO MAGNO MENDO

# Aparelhos electrotérmicos industriais

(Estudo das principais características)

Dissertação para o doutoramento  
na Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto

T/518



043 D

M 493

Pôrto-1944

## Razão de ser

O problema eléctrico português está presentemente a ser estudado técnica e economicamente por alguns dos nossos melhores valores, havendo fundas razões para crer que dêse estudo algo de bom e proveitoso sairá e que a energia eléctrica vai dentro dum futuro próximo ser acessível a tudo e a todos, levando os seus indiscutíveis benefícios às mais recônditas aldeias, facilitando o tão necessário desenvolvimento agrícola, tornando possíveis muitas novas indústrias, numa palavra, melhorar consideravelmente as nossas condições económicas e elevar duma forma apreciável o nível de vida do povo português.

Os nossos escassos 60 kw-h por habitante, produzidos em 1938, têm que sofrer um aumento maciço, decuplar pelo menos, para nos pormos a par das principais nações da Europa.

Não é impossível este aumento, porquanto calcula-se em 6.000 milhões de kw-h, a energia que poderão fornecer os aproveitamentos hidro-eléctricos dos nossos cursos de água.

É, pois, uma questão de tempo, de tenacidade e de boa vontade.

Uma das aplicações mais importante da energia eléctrica, é, incontestavelmente, a sua transformação em energia calorífica.

Num país como o nosso, pobre de combustíveis de toda a sorte, essa transformação adquire uma acuidade especial, que é posta em relêvo pelos nossos melhores economistas.

O ilustre Prof. Engenheiro Ezequiel de Campos, diz:

*Nos usos industriais e domésticos poupar o mais possível o carvão mineral. Na indústria fácil é, inclusive para o alcance de vapor de água necessário: e muito há que fazer nesse sentido. Nos usos domésticos das vilas e cidades a energia hidro-eléctrica pode substituir boa parte do carvão. Nas aldeias a lenha.*

**Porém, estas aplicações electrotérmicas, exigem um preço bastante baixo do kw-h, para serem economicamente realizáveis, principalmente quando se trata da produção de vapor de água.**

**No entanto, no dizer do ilustre Engenheiro Rebêlo Pinto da Secção de Estudos de Aproveitamentos hidráulicos, os aproveitamentos hiâro-eléctricos podem e têm até vantagem em fornecer energia a êsse preço (para a produção de vapor) durante um certo número de meses por ano, exactamente no período de mais baixas temperaturas, em que a quantidade de calorias requerida é maior.**

*O irregular regime dos nossos rios, com superabundância de água no inverno, é extremamente favorável para esta utilização de energia hidro-eléctrica.*

**Por tôdas estas razões, justo é acreditar que as transformações electrotérmicas vão ser dum uso corrente e banal nesse futuro mais ou menos próximo, que todos antevemos e desejamos.**

**Pareceu-nos, portanto, interessante e até certo ponto útil, apresentar um estudo sobre aparelhos electrotérmicos industriais, pondo em evidência as suas características principais, já que a falta de elementos de ordem técnica e experimental me não permite fazer um estudo exaustivo dum determinado capítulo; nem a natureza e a finalidade dêste trabalho consentem um estudo desenvolvido e completo dêstes aparelhos.**

A. M.

## CAPITULO I

### Generalidades

#### 1. RESENHA HISTÓRICA.

A aplicação prática da transformação da energia eléctrica em energia calorífica é relativamente recente.

No entanto em 1800 Sir Humphry Davy, poucos meses depois da descoberta da pilha de Volta, produziu o primeiro arco luminoso entre electrodos de carvão ao fazer experiências com a nova bateria.

Em 1853, Pichou, preparador numa escola de farmácia, pediu patente de invenção para *a aplicação económica da luz eléctrica à metalurgia do ferro para fundir e reduzir toda a espécie de minerais.*

Contudo o primeiro forno eléctrico de alguma importância prática foi construído em 1878 por William Siemens, conseguindo fundir alguns quilogramas de aço e de platina.

Em 1885 os irmãos E. H. e A. H. Cowles construíram um forno de resistência, que chegou a ser um êxito comercial.

Moissan, em 1892, com as suas experiências deu um grande impulso ao forno eléctrico.

E o primeiro forno de indução foi imaginado por Ferranti, na Itália, em 1887.

Depois são tantos os cientistas que se dedicaram e dedicam ao desenvolvimento da electrotermia, que difícil se

torna enumerá-los, sendo justo, contudo, citar os nomes de Stassano, Heroult, Girod, Kjellin, Keller, Jacovielli, Northrup, Boucherot, Bethenod, Ribaud, Levasseur e tantos outros que ficarão para sempre ligados à história dos fornos eléctricos.

## 2. CLASSIFICAÇÃO DOS FORNOS ELECTRICOS.

Os aparelhos de uso industrial que têm por finalidade transformar a energia eléctrica em energia calorífica, são conhecidos pelo nome de *fornos eléctricos*.

O calor desenvolvido nas transformações electrotérmicas, por intermédio dos fornos, pode ser transmitido às substâncias a tratar, quer directa, quer indirectamente, resultando daí uma primeira classificação dos fornos.

Assim teríamos:

Fornos de acção directa.	<i>Pela corrente primária</i> — substância unida aos polos do gerador.  <i>Pela corrente secundária</i> — substância percorrida por correntes induzidas.  <i>Pelo arco eléctrico</i> — substância constituindo um dos polos.
Substância a aquecer actuando como resistência.	
Fornos de acção indirecta.	
Substância aquecida por contacto, condutibilidade ou radiação.	<i>Resistência</i> no seio ou envolvendo a substância.  <i>Arco eléctrico</i> formado entre electrodos, sem intervenção da substância.

Porém, a classificação que mais vulgarmente se adopta é baseada na maneira como é feita a transformação da energia eléctrica.

Como se sabe, realiza-se essa transformação, fazendo passar a corrente eléctrica por um condutor sólido ou líquido (*resistência*); fazendo saltar um arco entre dois pólos a poten-



ciais diferentes (*arco eléctrico*) ou induzindo correntes em substâncias condutoras (*indução*).

E assim, temos a classificação usual dos fornos em:

### Fornos de resistência

- > > arco
- > > indução

### 3. PRINCÍPIO GERAL DAS TRANSFORMAÇÕES ELECTRO-TERMICAS. LEI DE JOULE.

Dois condutores  $C_1$  e  $C_2$ , levados respectivamente aos potenciais  $V_1$  e  $V_2$  são ligados por um fio metálico A B. Entre o instante  $t$  e o instante  $t + dt$  passa no fio uma quantidade de electricidade:

$$dq = i dt$$

Sabe-se, por definição de potencial, que quando se transporta uma carga de electricidade  $dq$  do potencial  $V_1$  ao potencial  $V_2$  ( $V_1 > V_2$ ), se efectua um trabalho:

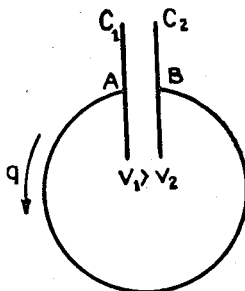


Fig. 1

$$dw = (V_1 - V_2) dq$$

Consideremos agora entre dois pontos A e B um con-

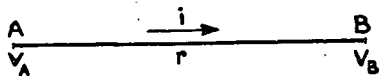


Fig. 2

dutor de resistência  $r$  percorrido por uma corrente de intensidade  $i$ ; durante o tempo  $t$ , esta corrente transporta do ponto A onde o potencial tem o

valor constante  $V_A$  ao ponto B onde o seu valor é  $V_B$ , uma quantidade de electricidade:

$$q = it$$

Este transporte fornece, pois, uma energia:

$$W = (V_A - V_B) q = (V_A - V_B) it$$

Mostra a experiência que esta energia aparece no condutor AB sob a forma de calor.

A quantidade de calor libertado Q é equivalente ao trabalho W e, se designarmos por J o equivalente mecânico do calor, temos:

$$JQ = W = (V_A - V_B) it$$

e como pela lei de Ohm

$$V_A - V_B = ri \quad \text{obtem-se:}$$

$$\boxed{JQ = W = r i^2 t} \quad (1) \quad \text{ou} \quad \boxed{Q = 0.24 r i^2 t}$$

Este fenómeno de libertação de calor pela passagem da corrente eléctrica é conhecido pelo *efeito Joule* e a lei cuja expressão (1) deduzimos é a conhecida *Lei de Joule* que pode ser enunciada da seguinte maneira:

*A quantidade de calor libertada pela passagem duma corrente continua num condutor, é proporcional à resistência do condutor, ao quadrado da intensidade da corrente e ao tempo, durante o qual a corrente passou.*

Se a corrente i, é uma corrente periódica de período T, (caso das correntes alternadas), a quantidade de calor Q libertado por período, será dado por:

$$JQ = r \int_0^T i^2 dt = r I_e^2 T$$

chamando a  $I_e$  a intensidade eficaz, isto é, a corrente cujo quadrado é igual ao valor médio do quadrado  $i^2$  da corrente periódica.

A lei de Joule pode, pois, ser enunciada ainda da mesma maneira, quando se trata de corrente periódica, com a condição de se substituir a intensidade da corrente contínua, pela intensidade eficaz da corrente alternada.

É neste princípio que se fundam, na sua essência, todos os fornos eléctricos, embora difiram na sua aplicação, ou melhor, na constituição e natureza da resistência eléctrica posta em jôgo.

## CAPÍTULO II

### Fornos de resistência

#### 4 CLASSIFICAÇÃO DESTES FORNOS.

Nos fornos que classificamos *de resistência*, o calor produz-se devido à passagem da corrente eléctrica através duma resistência sólida ou líquida, que pode ser independente da carga ou constituída pela própria carga.

Podemos assim dividir êstes fornos em duas classes principais:

a) Onde o aquecimento se faz por condutibilidade ou irradiação e as resistências estão colocadas no interior das paredes, no interior da substância a tratar ou fóra dela, conforme mostram esquematicamente as figuras 3 a 8.

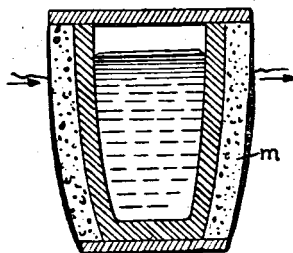


Fig. 3

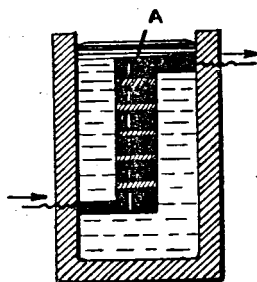


Fig. 4

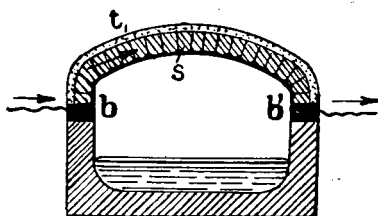


Fig. 5

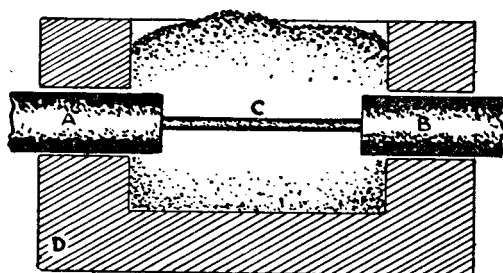


Fig. 6

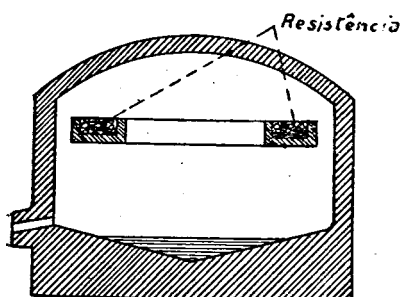


Fig. 7

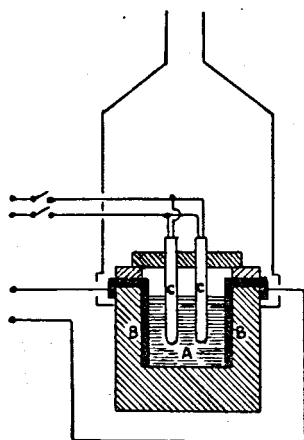


Fig. 8

b) Onde o aquecimento se faz por condutibilidade e a resistência é constituída pela própria substância a tratar. Figuras 9 e 10.

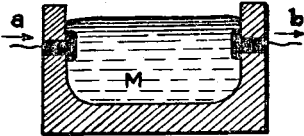


Fig. 9

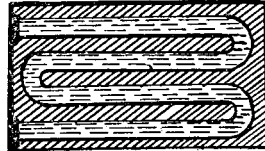


Fig. 10

### 5. RENDIMENTO CALORÍFICO.

Em qualquer dos tipos de fornos de resistência, o rendimento calorífico é dado, numa primeira aproximação, por:

$$\eta = \frac{q}{q + q'} = \frac{R}{R + R'} \quad (2) \quad \text{em que}$$

$q$  = calor libertado no forno.

$R$  = resistência do forno.

$q'$  = calor dissipado no circuito de alimentação.

$R'$  = resistência do circuito de alimentação.

Por outro lado, se  $U$  fôr a tensão aplicada nos terminais do forno e admitindo que se trata de c. c., temos:

$$q = 0,24 \frac{U^2}{R} \cdot t \quad (3)$$

Vê-se, pela expressão (2) que o rendimento do forno cresce à medida que cresce a resistência  $R$  do forno; e pela expressão (3) vê-se que o calor libertado  $q$  baixará para um valor insuficiente se  $R$  é muito grande, a não ser que se dê a  $U$  um valor bastante elevado, o que acarretaria, como se sabe, dificuldades de ordem de isolamento, de manipulação, etc., etc.

Quer dizer, se por um lado há conveniência num grande R, por outro lado, exige-se um R pequeno.

O valor de R deverá ser tal que, para um certo valor de U, possamos, num tempo determinado, obter o calor necessário à operação a executar, sem que o rendimento deixe de ter um valor razoável.

## 6. VARIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS.

A resistência é dada pela fórmula:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (4)$$

Apresentam-se-nos dois modos para a fazer variar:

a) Actuar sobre  $\frac{l}{s}$  dando ao canal uma forma longa e estreita (fornos em que a carga é a própria resistência), que é pouco prático; ou aumentar  $\frac{l}{s}$ , aumentando o comprimento e diminuindo a secção, no caso de se tratar de fornos com resistência independente.

b) Escolher a substância de que é feita a resistência, de forma que ela possua uma resistividade  $\rho$  conveniente.

Qualquer destes modos são correntemente empregados, sacrificando-se, por vezes, o rendimento ao acondicionamento das resistências.

A resistividade  $\rho$  não mantém sempre o mesmo valor, quando a temperatura varia.

É-nos dada pela expressão:

$$\rho_t = \rho_0 (1 + Kt + K't^2 + \dots)$$

sendo  $(K + K't + \dots)$  um coeficiente chamado, *coeficiente de temperatura do corpo*.

Em geral o termo  $K't^2$  é desprezível e a fórmula simplifica-se para

$$\rho_t = \rho_0 (1 + Kt)$$

Os diferentes fabricantes de ligas metálicas destinadas aos fornos de resistência, dão os valores de K, encontrando-se os mais vulgares em tabelas.

A maior parte dos valores de K são positivos, isto é, a resistência aumenta com a temperatura. Casos há, porém, como o carvão, filamentos de lâmpadas, aglomerados de carborundo, água, soluções aquosas, etc., em que os valores de K são negativos.

Na prática corrente, despreza-se esta variação da resistividade, visto que na maior parte das ligas usadas, essa variação não ultrapassa umas décimas-millonésimas, havendo até algumas em que ela pode ser considerada nula.

Pelo que ficou dito e com o auxílio das expressões citadas, fácil é calcularem-se as dimensões da resistência a aplicar a um dado forno, conhecendo-se o calor necessário para dada operação, a tensão de alimentação e o tempo gasto em cada operação.

## 7. CONSTITUIÇÃO E PROPRIEDADES DAS RESISTÊNCIAS AUXILIARES.

Nem tôdas as ligas vulgarmente usadas nos aparelhos electrotérmicos caseiros, são próprias para a constituição das resistências dos fornos eléctricos, principalmente devido à sua oxidabilidade acima das temperaturas de 400/500 graus centígrados a que em geral são submetidas nos fornos eléctricos.

As ligas mais empregadas para êsse efeito são em geral de níquel e crómio com adições de ferro, de ferro-manganês, de alumínio-silício-cobalto, etc.

Além destas ligas, usam-se para constituir resistências, a grafite em grãos, em peças moldadas e juxtapostas e em peças inteiriças; compostos de carboneto de silício (carborundo); magnésia, depois de atingir certa temperatura; sais fundidos,



tais como, nitratos de sódio e potássio, cloretos de potássio e bário, etc.; o molibdeno; o estanho fundido e muitos outros.

Como dissemos, cada casa especializada tem as suas ligas próprias a que por vezes dão nomes especiais porque são conhecidas no mercado, a saber:

Nichrome, Chromel, Calido, RNC, Tophet, Kantal, RCA, etc.

Vendem-se em fios e fitas, fornecendo as casas as suas características, tais como, a resistência específica, a carga de superfície admissível, as relações entre a largura e a espessura, se se trata de fitas, etc.

## 8. FACTOR DE POTÊNCIA.

O factor de potência dos fornos de resistência é praticamente igual à unidade.

Se considerarmos, porém, não a resistência do forno, mas o conjunto de instalação ligado aos terminais do secundário do transformador de alimentação, temos:

$$\text{tag } \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

em que L e R são respectivamente a indutância e a resistência do circuito.

O factor de potência será dado por:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tag}^2 \varphi}}$$

Para aumentarmos este valor teremos que diminuir o valor de tag  $\varphi$ .

Para isso poderemos actuar nos valores de L,  $\omega$  ou R. Vejamos até que ponto podemos variar estes valores, afim de melhorarmos o cos  $\varphi$  da instalação.

### 1.º) *Redução de L.*

O valor de L pode reduzir-se um pouco, colocando os condutores o mais direito possível, evitando-se os ângulos bruscos, diminuindo a superfície abraçada pelas linhas de alimentação da corrente e alternando os condutores conforme o sentido da corrente. Convém colocar o forno longe de peças magnéticas e evita-se que as que são indispensáveis formem anéis fechados em torno da corrente.

Estas precauções aplicam-se, duma maneira geral, a toda a classe de fornos.

### 2.º) *Redução da pulsação $\omega$ .*

A redução da frequência da corrente de alimentação não é prática, nem económica, pelo que, em geral, não se altera a do sector.

### 3.º) *Aumento de R.*

O aumento da resistência do circuito traz, como vimos, o aumento do  $\cos \varphi$ , mas esse aumento é limitado pela potência do forno, que tem o seu máximo para  $R = L\omega$ , como veremos em seguida.

## 9. FUNCIONAMENTO DO FORNO EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA.

O funcionamento dum forno de resistência em função da resistência total R, pode pôr-se em evidência pelas curvas representativas das funções:

$$P = f_1(R) = \frac{RU^2}{R^2 + L^2\omega^2}$$

$$I = f_2(R) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$$

$$\frac{U}{I} = f_3(R) = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\cos \varphi = f_4(R) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

mantendo  $L$ ,  $\omega$  e  $U$  constantes.

Essas curvas estão traçadas (em escalas diferentes) na fig. 11.

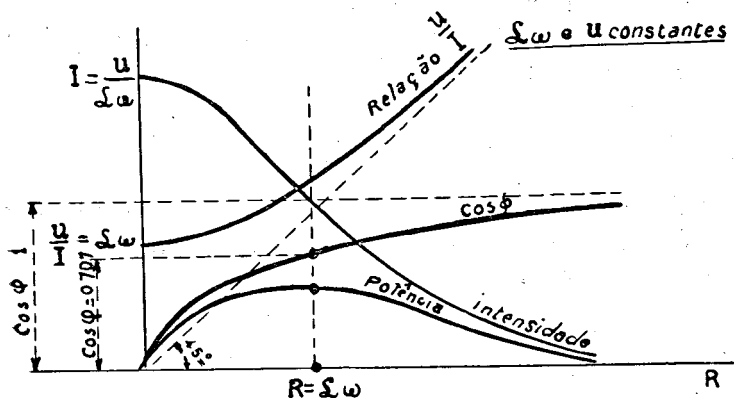


Fig. 11

Analisemos cada uma delas.

$$1.a) - P = f_1(R) = \frac{R U^2}{R^2 + L^2 \omega^2}$$

A potência aumenta à medida que  $R$  aumenta, atingindo um máximo para  $R = L \omega$  ou

$$P = \frac{U^2}{2R} = \frac{U^2}{2L \omega}$$

Por consequência o máximo de  $P$  corresponde também a

$$\tan \varphi = \frac{L \omega}{R} = 1 \text{ ou } \cos \varphi = 0,707$$

Não haverá, pois, conveniência em melhorar o valor do  $\cos \varphi$  da instalação acima de 0,707.

$$2.a) \quad I = f_2(R) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

A intensidade, como era de esperar, aumenta à medida que  $R$  diminui e tem o seu máximo para  $R=0$ .

A intensidade será neste caso limitada pela reatância do circuito.

$$3.a) \quad \frac{U}{I} = f_3(R) = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

Esta relação nada tem de especial e é uma pequena variante da anterior.

Se quisermos manter constante  $\frac{U}{I}$  ou melhor  $I$ , teremos que conjugar os valores de  $R$  e da reatância para êsse efeito, como se poderia ter deduzido da 2.<sup>a</sup> expressão.

Como a resistência do forno é variável na seqüência duma operação, teremos que actuar sôbre  $L$  para manter  $I$  constante.

Será êste um dos processos de regulação automática.

$$4.a) \quad \cos \varphi = f_4(R) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

Êste caso já foi também pôsto em evidência quando estudámos o factor de potência e já vimos a forma prática de o aumentar, e qual o limite conveniente.

## CAPÍTULO III

### Fornos de arco

#### 10. NOÇÕES GERAIS.

Nestes fornos o calor é produzido pela passagem da corrente através do espaço que separa os electrodos.

A corrente, ao franquear esse espaço, cria uma passagem condutora vaporizando a substância dos electrodos, podendo, pois, dizer-se que o arco não é mais do que um vapor levado à incandescência.

A temperatura do arco pode ser considerada invariável para cada substância do electrodo, isto é, a temperatura seria limitada pela temperatura de volatilização da dita substância.

No nosso estudo consideramos apenas os electrodos de carbono.

Se considerarmos, porém, o arco eléctrico como uma resistência, a temperatura seria variável e dependente, em parte, da intensidade da corrente.

O arco pode ser produzido pela passagem da corrente contínua ou corrente alternada.

Nas aplicações industriais emprega-se geralmente a corrente alternada, a não ser, no caso da electrólise ígnea em que a corrente contínua é a única empregada.

Vejamos, no entanto, como se produz e se apresenta o arco com as duas correntes.

## 11. ARCO COM CORRENTE CONTÍNUA.

Para se obter o arco é preciso primeiramente escorvã-lo. O modo mais simples de escorvamento consiste em aproximar os electrodos até os pôr em contacto e afastá-los em seguida. A resistência do contacto imperfecto assim realizado, provoca um aquecimento dos pontos de contacto. Se a intensidade é suficiente, estes pontos são levados rapidamente à incandescência. No momento da rotura do contacto, a extremidade incandescente do electrodo negativo emite em abundância electrons que, acelerados pelo campo electrostático criado entre os electrodos, ionizam por choque os gases ou vapores interpostos entre êles, tornando assim o meio condutor.

A alta temperatura do gás ou dos vapores parece ser uma condição essencial da existência do arco.

O arco, uma vez escorvado, mantém-se se a tensão nos terminais é suficiente e se a intensidade da corrente é bastante elevada para manter o cátodo incandescente.

A incandescência do cátodo desempenha um papel importante na conservação do arco.

Suponhamos que fazemos saltar o arco entre o ânodo A e cátodo C, figuras 12 e 13.

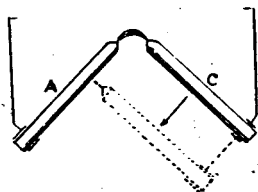


Fig. 12

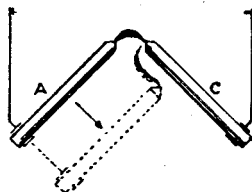


Fig. 13

Se se desloca o cátodo C no sentido da flecha de maneira que a sua distância de A fique constante, nota-se que o arco não se alonga e o seu ponto de contacto sobre o ânodo A desloca-se ao mesmo tempo que o cátodo.

Se em lugar de se deslocar o cátodo, se desloca o ânodo A no sentido da flecha, nota-se, pelo contrário, que o arco não se desloca sobre o electrodo C, mas toca sempre na extremidade de C e alonga-se à medida que o ânodo se desloca, até ao momento em que o comprimento é tão grande que o arco se apaga.

Vê-se que nos deslocamentos dos electrodos, o arco não deixa nunca o ponto de incandescência do cátodo.

No caso dos fornos eléctricos este facto pouca importância tem, visto o movimento dos dois electrodos ser simultâneo, mas outro tanto não acontece na soldadura eléctrica com corrente contínua. Nesse caso há necessidade de fazer cátodo, o electrodo móvel.

## 12 - REGIME ELECTRICO DO ARCO.

O regime eléctrico dum arco, é caracterizado pelas relações existentes entre a d. d. p.  $E$ , a intensidade  $I$  e o comprimento  $l$ .

Analisemos, portanto, cada uma dessas relações.

a) *Relação entre  $E$  e  $I$ , mantendo se constante o comprimento  $l$  do arco.*

A figura 14, representa uma série de curvas mostrando a variação da d. d. p. entre os electrodos para diferentes comprimentos do arco.

Verifica-se pelas curvas que  $E$  diminui quando  $I$  aumenta; primeiro rapidamente e depois mais lentamente.

À medida que  $I$  é mais pequeno e  $l$  é maior, maior é a variação  $\frac{dE}{dI}$ , e a estabilidade do arco diminui com o aumento de  $\frac{dE}{dI}$ .

Se para um comprimento de arco dado se aumenta a intensidade, verifica-se que a partir de certo momento, o arco

que até aí tinha sido silencioso, passa a sibilar e a d. d. p. entre os electrodos torna-se independente da corrente.

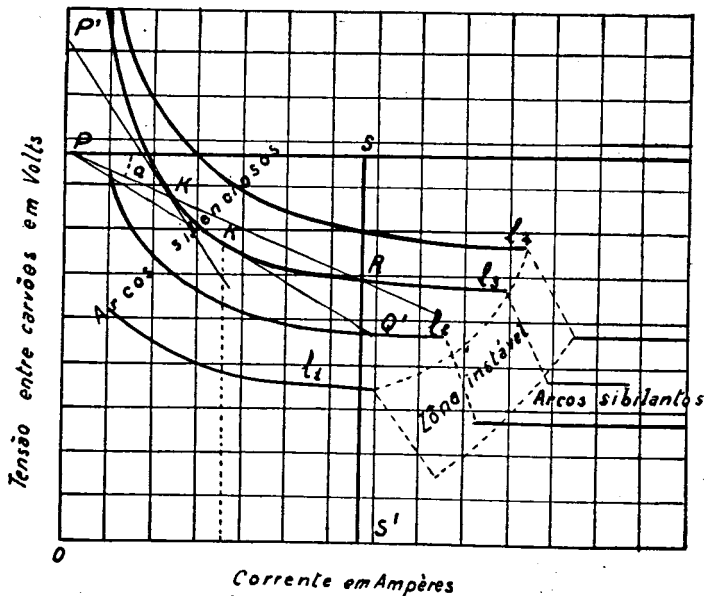


Fig. 14

Além disso, existe uma zona, limitada por dois valores da corrente, entre a qual o arco, ora silencioso, ora sibilante, passando dum estado a outro duma maneira caprichosa.

Entre as duas espécies de arcos, silenciosos e sibilantes, há uma descontinuidade tanto mais sensível, quanto mais diferentes são as leis do arco silencioso.

b) *Variação de  $E$  com  $l$ , mantendo  $I$  constante.*

Uma relação linear liga  $E$  com  $l$  quando  $I$  é constante.

Por conseguinte  $\frac{dE}{dl}$  é uma constante.

As diferentes rectas que representam esta relação para diferentes valores de  $I$ , cortam-se num mesmo ponto que está



situado à esquerda do eixo dos  $E E$  e acima do eixo dos comprimentos, figura 15.

Conseqüentemente não há nenhum valor real de comprimento de arco para o qual  $E$  seja o mesmo para tôdas as correntes.

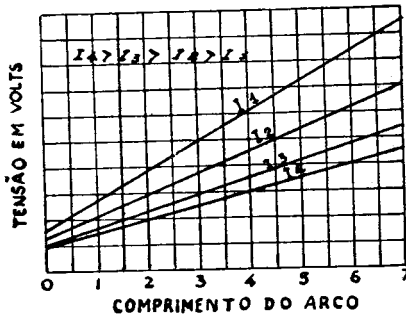


Fig 15

c) *Relação entre  $E$ ,  $I$  e  $l$  para dois carvões dados.*

Diferentes equações tem sido propostas para representar esta relação, tais como, as de Edlund, Frölich, Peukert, Cross, Shepard, etc. Porém a que parece representar melhor os factos é a de Ayrton

$$E = a + bl + \frac{c}{i}$$

em que  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  são constantes dependentes somente dos carvões empregados.

$i$  = corrente no arco.

$l$  = comprimento do mesmo.

A tensão  $E$  nos terminais do arco é a soma de três diferenças de potencial: a queda catódica; a queda anódica e a queda de tensão na coluna gasosa.

A constante  $a$ , chamada comumente f. c. e. m. do arco, corresponde sensivelmente à soma das quedas anódica e

catódica; o resto da fórmula corresponde à queda de tensão no arco propriamente dito.

Há uma outra fórmula, devida a Nottingham, de aplicação mais geral.

$$E = A + \frac{B}{i^n}$$

Esta fórmula supõe que um dos electrodos, entre os quais salta o arco, é levado à temperatura de ebulição da substância de que é formado.

Nela, temos :

$E$  = tensão nos terminais do arco.

$A$  e  $B$  = duas constantes para uma mesma matéria dos electrodos e um mesmo comprimento do arco.

$i$  = corrente do arco.

$n$  = coeficiente ligado à temperatura absoluta  $T$  da ebulição da substância dos electrodos, pela relação

$$n = 2,62 T \cdot 10^{-4}$$

A figura 16 dá-nos os valores do expoente  $n$  em função da temperatura absoluta de ebulição de algumas substâncias.

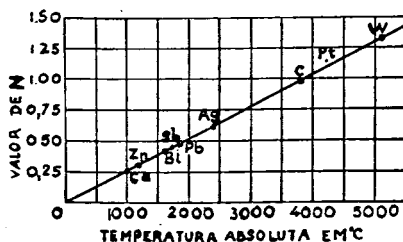


Fig. 16

Nota-se que para o carbono, o expoente  $n$  é pouco diferente da unidade e então assim, a fórmula de Ayrton, é um caso particular da de Nottingham.

### 13. ESTABILIDADE DO ARCO.

Suponhamos que o arco é alimentado com uma f. e. m. E e através duma resistência R, colocado em série.

A f. e. m. do gerador é OP; que a intensidade é OS' e o comprimento  $l_3$ , figura 14.

A queda de tensão na resistência é SR e tem-se

$$R = \frac{RS}{PS} = \tan \alpha.$$

Se aumentarmos a resistência R, o que equivale a fazer girar a recta PR em torno de P no sentido negativo, a corrente no arco diminuirá.

Quando a recta PR se tornar tangente à curva segundo PK, a abscissa do ponto K dar-nos-á o valor mínimo da corrente para o qual um arco de comprimento  $l_3$ , pode subsistir para uma f. e. m. dada  $E = OP$ .

Para se poder diminuir o valor da intensidade, correspondente, por exemplo, ao ponto K', teremos que aumentar o valor de E, para assim podermos aumentar o valor de R e a consequente diminuição de I.

Vê-se, pois, que à medida que queremos diminuir o valor de I, teremos que crescer com extrema rapidez o valor de E.

Suponhamos que queremos diminuir I aumentando o comprimento do arco, mantendo a resistência exterior.

Partindo do arco de comprimento  $l_3$ , caracterizado pelo ponto Q', por exemplo, o ponto característico descreverá uma recta tal como PQ', e o maior comprimento de arco que é possível obter será aquêle cuja curva representativa fôr tangente a PQ', isto é, no caso da figura 14, será a curva  $l_3$ .

Mostra-nos êste estudo que a curva da tensão de alimentação do arco deve ter uma forma suficientemente caída para que os pontos de intersecção com a curva característica do arco respectivo, representem os regimes estáveis de funcionamento.

Estas curvas de tensão de alimentação obtêm-se empregando dínamos ou alternadores com forte reacção do induzido; montando, em série com o arco, uma resistência suplementar ou uma indutância, ou então colocar vários arcos em série.

#### 14. RENDIMENTO ELÉCTRICO DO ARCO.

Se designar-mos por  $W'$  a energia consumida no arco e por  $W$  a fornecida pelo gerador, sabe-se que o rendimento é tanto maior quanto maior fôr a relação

$$\eta = \frac{W'}{W}.$$

Verifica-se experimentalmente que esta relação aumenta à medida que:

- a) o arco é mais curto
- b) a corrente é maior
- c) e a resistência exterior e a f. e. m. do gerador se aproximam mais dos pequenos valores para os quais o arco pode subsistir.

Estas conclusões, porém, só são verdadeiras para o caso dos arcos silenciosos, visto que no caso dos arcos sibilantes o melhor rendimento é obtido apenas com os arcos muito curtos.

#### 15. ARCO COM CORRENTE ALTERNADA.

Vimos que o arco não podia subsistir senão com um cátodo incandescente emitindo electrons e a existência duma queda catódica brusca produzindo um campo eléctrico intenso onde os electrons adquirissem uma velocidade suficiente para ionizar as moléculas neutras.

Se a corrente que alimenta um arco é interrompida durante um tempo suficiente e se se aplica de novo aos electrodos a mesma tensão anterior, o arco não se produz porque as condições precedentes, necessárias à sua existência, não são realizadas.

É preciso criar de novo essas condições para se dar o escorvamento.

Mas se a interrupção da corrente não dura senão uma pequena fracção do segundo, de maneira que o cátodo não tenha tido tempo de resfriar sensivelmente, o arco produz-se logo que se aplique a tensão primitiva.

Isto supõe que a tensão foi aplicada no mesmo sentido: ánodo—cátodo.

Se applicarmos uma tensão invertida, o que acontece em cada alternância com a alimentação em corrente alternada, o ánodo torna-se cátodo e vice-versa, sendo preciso para que o arco se reproduza que o ánodo tornado cátodo esteja a uma temperatura suficiente para emitir electrons; se a temperatura é muito baixa, a corrente só passará durante a alternância correspondente.

O funcionamento do arco alternado, tem sido estudado por muitos autores entre os quais M. A. Blondel, que estudou o caso do arco com electrodos de carvão, com resistências indutivas e não indutivas.

As figuras 17 e 18 representam as curvas da tensão e da intensidade, obtidas com o oscilógrafo nos terminais dum arco, respectivamente, circuito não indutivo e indutivo.

Nas curvas da figura 17, onde E representa a curva da tensão nos terminais do arco e I as variações da intensidade, nota-se que a duração da extinção do arco é muito apreciável (de  $m$  a  $n$  a corrente anula-se) e que se produz uma ponta de tensão no escorvamento.

Na figura 18 vê-se que a auto-indução permite obter uma curva de variação da corrente quasi que sinusoidal e de suprimir praticamente a duração da extinção. A estabilidade do arco é dessa maneira aumentada.

É mais fácil manter arcos curtos que compridos; a

intensidade mínima realizável é tanto mais elevada quanto maior é o afastamento dos electrodos.

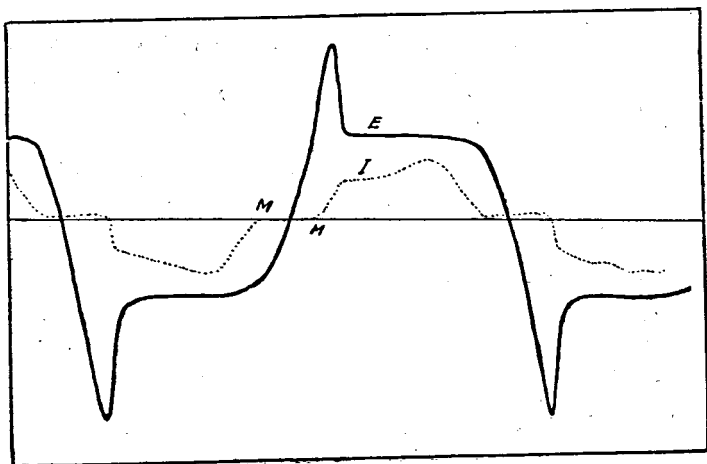


Fig. 17

A temperatura média do arco alternado é inferior à do arco em corrente contínua.

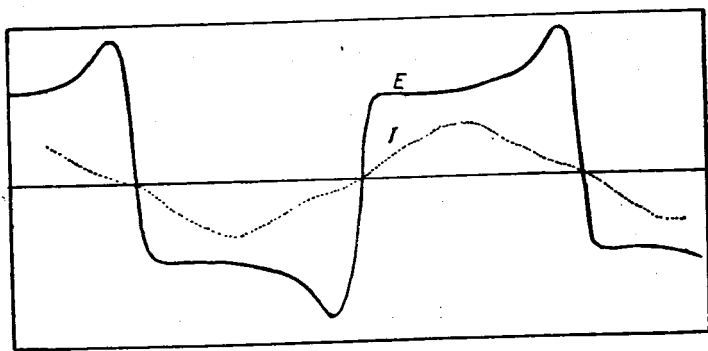


Fig. 18

Sob o ponto de vista económico esta baixa de temperatura é compensada pela substituição da resistência óhmica, destinada a assegurar a estabilidade do arco, por uma bobina de auto-indução na qual as perdas de energia são muito menores.

## 16. CARACTERÍSTICAS DO ARCO ALTERNADO.

São duas as características principais do arco alternado. Uma representa, como no caso da corrente contínua, a variação da tensão eficaz aplicada aos electrodos em função da intensidade eficaz, mantendo constantes as outras grandezas.

É a chamada *característica estática* e em tudo semelhante às que foram traçadas para o arco em c.c. fig. 14. A outra, representando a variação da tensão instantânea dos electrodos em função da intensidade instantânea durante um período, chama-se *característica dinâmica*.

As figuras 17 e 18 dão os valores instantâneos da tensão e da intensidade em função do tempo.

Se em vez de traçarmos estes valores em função do tempo, traçassemos a curva dos valores instantâneos de  $E$  em função de  $I$ , obteríamos a curva da figura 19, que representa a característica dinâmica.

Tem, como vemos, uma forma análoga à duma curva de magnetização.

A tensão do arco é mais elevada quando a intensidade cresce do que quando decresce e as pontas  $p$  e  $p'$  correspondem às tensões de escorvamento em cada alternância.

O valor desta ponta é influenciado por diferentes factores.

A figura 20, onde estão representados apenas os valores positivos da característica dinâmica, mostra que as pontas são cada vez menos acentuadas à medida que a frequência da corrente aumenta.

Admite-se que o arrefecimento do arco é menor no caso de altas frequências e, por consequência, o novo escorvamento é facilitado.

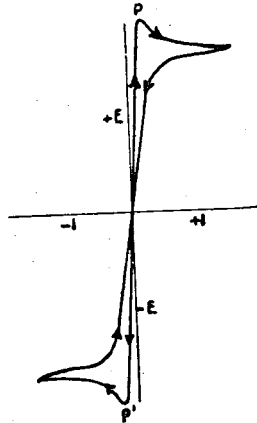


Fig. 19

A figura 21, mostra que à medida que o comprimento aumenta, maior será o arrefecimento entre cada alternância e maior é a ponta do novo escorvamento.

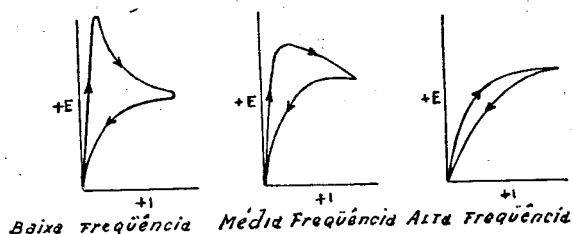


Fig. 20

A auto-indução do circuito diminui a importância desta ponta, tornando o arco mais estável aproximando-o do funcionamento em c. c.

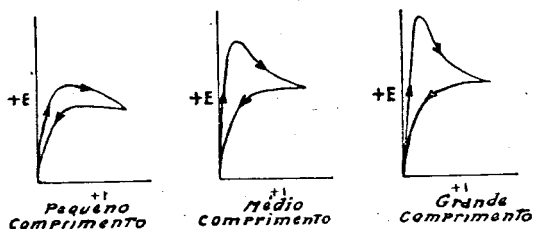


Fig. 21

# 17. COEFICIENTE DE ESTABILIDADE. CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DOS ARCOS COM C. ALT.

Chama-se *coeficiente de estabilidade* a relação entre a tensão nos terminais do arco quando está apagado e a tensão obtida em funcionamento. A estabilidade só é assegurada quando este coeficiente é bastante grande.

O aumento deste coeficiente pode ser obtido, como já tivemos ocasião de ver, quer inserindo resistências ôhmicas no circuito, quer inserindo bobinas de reatância.



Estes dispositivos têm, como sabemos, os seus inconvenientes.

O primeiro traz como consequência principal um consumo elevado de energia eléctrica, afectando a parte económica da operação.

O segundo modo, inserção de indutâncias, evita o consumo de energia, mas diminue fortemente o factor de potência da instalação, podendo provocar desequilíbrio funcional no sector de alimentação.

Se dispusermos nos terminais do arco um condensador com uma capacidade convenientemente escolhida em relação à reactância da bobina, pode-se atenuar notavelmente este inconveniente.

Se considerarmos o arco eléctrico como constituindo uma resistência puramente óhmica, e se se realiza a condição de ressonância perfeita entre o condensador e a bobina de reactância (supondo-os sem perdas e admitindo o ferro da bobina não saturado), a corrente no arco torna-se independente do comprimento e obtém-se, teóricamente, uma tensão de escorvamento infinitamente grande.

Não é preciso, porém, realizar uma ressonância perfeita, o que acarretaria gastos elevados com a instalação de capacidades para fornecerem potências reactivas muito elevadas. Basta, geralmente, uma ressonância aproximada para se ter, em certas condições, uma tensão, entre os terminais do arco, superior à tensão da rede, conservando-se um factor de potência dentro dos limites razoáveis.

O dispositivo descrito tem, contudo, sérios inconvenientes na prática, pois, devido à influência das irregularidades de regime do arco e às dificuldades de escorvamento, o arco pode tomar o carácter duma descarga oscilante de frequência muito elevada, provocando roturas de isolamento e descargas parasitas que perturbariam o funcionamento.

Empregando, porém, alguns artifícios consegue-se suprimir este inconveniente. Fazer a ligação entre o condensador e o arco por intermédio, ou dum transformador auxiliar, ou dum enrolamento suplementar junto ao transformador de alimentação.

No primeiro caso, por exemplo, como indica a fig. 22 liga-se aos terminais do arco um enrolamento secundário (3)

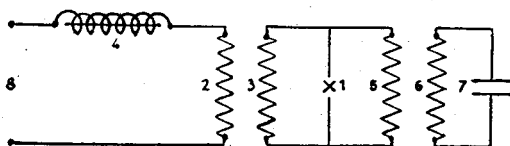


Fig. 22

dum transformador de alimentação cujo enrolamento primário (2) está ligado à rede (8) por intermédio duma reactância (4).

Por outro lado monta-se nos terminais do arco o enrolamento primário (5) dum transformador auxiliar cujo secundário (6) está ligado ao condensador (7).

Para os regimes estacionários tudo se passa como se o condensador estivesse ligado directamente aos terminais do arco; nos regimes transitórios este dispositivo tem a vantagem de impedir a produção de descargas directas do condensador (7) entre os electrodos.

No caso da figura 23 o condensador (7) está ligado a

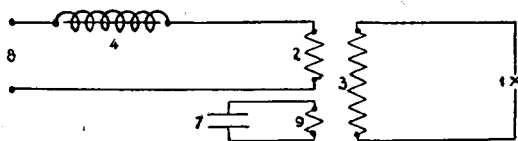


Fig. 23

um enrolamento suplementar (9), junto ao transformador de alimentação do arco; obtém-se assim um resultado equivalente ao que é realizado com a montagem da fig. 22.

No caso da fig. 22, pode substituir-se o transformador auxiliar por um auto-transformador, assim como se pode suprimir o enrolamento suplementar (9) da montagem da fig. 23, ligando o condensador entre um dos terminais principais do enrolamento secundário (3) do transformador de alimentação

do arco e uma tomada convenientemente escolhida sobre este enrolamento, como mostra a fig. 24.

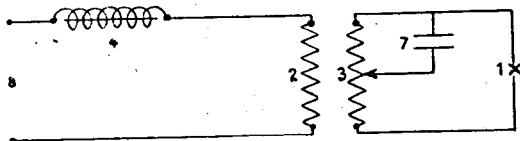


Fig. 24

Estes artifícios foram já ensalados com resultados satisfatórios, obtendo-se um funcionamento estável com um factor de potência de 0,85.

#### 18. ESTUDO ANALÍTICO DO DISPOSITIVO BOUCHEROT, FORA DAS CONDIÇÕES DE RESSONÂNCIA PERFEITA.

O dispositivo Boucherot, de alimentação, consta duma bobina de auto-indução em série com uma capacidade, tendo nos terminais da bobina ou da capacidade uma resistência variável em derivação, conforme indica a fig. 25.

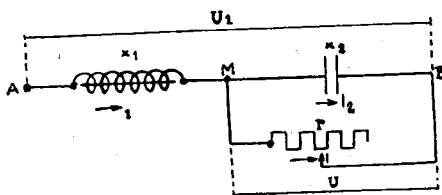


Fig. 25

Vimos no capítulo anterior que, quando a capacidade está em ressonância com a reactância, a corrente no circuito derivado torna-se constante e independente da resistência.

Vimos que a obtenção desta ressonância é dispendiosa na prática, mas que o afastamento d'este acôrdo perfeito não perde completamente o seu poder regulador. M. V. Genkin, estudou, analiticamente, até que ponto a regulação da corrente

é realizável fóra da ressonância e para uma capacidade inferior à que corresponderia àquêle caso:

*Estudo analítico.*

Designemos por  $X_1 = \omega L$  a reatância no ramo A M, fig. 25, e por  $I_1$  a corrente absorvida da rede a uma tensão constante igual a  $U_1$  e à frequência  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ .

A capacidade C, ligada aos terminais M e B e percorrida pela corrente  $I_2$  dá lugar a uma reatância  $X_2 = \frac{1}{C\omega}$ .

O circuito comportando uma resistência variável  $r$  é atravessado por uma corrente  $I$  sob uma tensão  $U$ .

Desprezam-se as perdas de energia na bobina, assim como no circuito capacitivo.

Quando a ressonância tem lugar, tem-se a seguinte condição:

$$X_1 = X_2 \quad \omega^2 LC = 1 \quad (5)$$

Para um valor menor da capacidade, tem-se:

$$X_2 > X_1 \quad \omega^2 LC < 1 \quad (6)$$

Consideremos, primeiramente, os dois circuitos em derivação entre os pontos M e B do esquema da fig. 25.

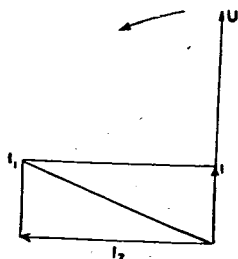


Fig. 26

As correntes  $I$  e  $I_2$  que circulam nos circuitos e a corrente total  $I_1$  são representadas no diagrama da fig. 26 em relação à tensão  $U$  entre os pontos M e B.

As correntes  $I$  e  $I_2$  estando em quadratura, pode-se escrever:

$$I_1^2 = I^2 + I_2^2 \quad (7)$$

Por outro lado entre as correntes  $I$  e  $I_2$  existe a seguinte relação, em valores absolutos:

$$I_2 = I \frac{r}{X_2} \quad (8)$$

ou pondo  $\frac{r}{X_2} = \tan \theta$ , para simplificar, vem:

$$I_2 = I \tan \theta \quad (9)$$

Para exprimirmos  $I$ ,  $I_1$  e  $I_2$  em função da resistência variável  $r$ , escrevamos as expressões das potências activas e reactivas e temos:

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = r I^2 \quad (10)$$

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 = X_1 I_1^2 - X_2 I_2^2 \quad (11)$$

Eliminando as correntes  $I_1$  e  $I_2$  da última equação, atendendo às relações (7) e (8), vem:

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 = [X_1 + (X_1 - X_2) \tan^2 \theta] I^2 \quad (12)$$

elevando ao quadrado as expressões (10) e (12) e adicionando os resultados, obtém-se:

$$I^4 = \frac{U_1^2 I_1^2}{r^2 + [X_1 + (X_1 - X_2) \tan^2 \theta]^2}$$

Substituindo  $I_1$  pelo seu valor em função de  $I$  tirado das relações (7) e (8) e pondo  $X_2^2$  em factor comum no denominador, vem:

$$I^2 = \left( \frac{U_1}{X_2} \right)^2 \frac{1 + \tan^2 \theta}{\tan^2 \theta + \left[ \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1 - X_2}{X_2} \tan^2 \theta \right]^2} \quad (13)$$

Designando a diferença das reatâncias  $X_2$  e  $X_1$  por  $X$

$$X_2 - X_1 = X \quad (14)$$

O termo entre parênteses recto da expressão (13), torna-se:

$$\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1 - X_2}{X_2} \operatorname{tag}^2 \theta = 1 - \frac{X}{X_2} (1 + \operatorname{tag}^2 \theta) \quad (15)$$

Dividindo o numerador e o denominador da expressão (13) por  $(1 + \operatorname{tag}^2 \theta)$  obtém-se o resultado:

$$I^2 = \left( \frac{U_1}{X_2} \right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \theta + \left[ \cos \theta - \frac{X}{X_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \right]^2} \quad (16)$$

O denominador desta expressão simplifica-se escrevendo:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen}^2 \theta + \left[ \cos \theta - \frac{X}{X_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \right]^2 &= 1 - 2 \frac{X}{X_2} + \\ &+ \left( \frac{X}{X_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \right)^2 = \left( 1 - \frac{X}{X_2} \right)^2 + \\ &+ \left( \frac{X}{X_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \right)^2 - \left( \frac{X}{X_2} \right)^2 = \\ &= \left( 1 - \frac{X}{X_2} \right)^2 + \left( \frac{X}{X_2} \right)^2 \frac{1 - \cos^2 \theta}{\cos^2 \theta} = \\ &= \left( \frac{X_1}{X^2} \right)^2 + \left( \frac{X}{X^2} \right)^2 \operatorname{tag}^2 \theta \end{aligned} \quad (17)$$

A expressão (16) torna-se:

$$I^2 = \frac{U_1^2}{X_1^2 + X^2 \operatorname{tag}^2 \theta} \quad (18)$$

E se pusermos  $\frac{1}{X_1^2}$  em factor comum e se designarmos por  $n$  e por  $p$  as relações:  $n = \frac{X_1}{X_2}$   $p = \frac{r}{X_1}$  (19)

chega-se à expressão seguinte que nos dá o valor absoluto da corrente no circuito do arco:

$$I^2 = \left( \frac{U_1}{X_1} \right)^2 \frac{1}{1 + (1-n)^2 p^2} \quad (20)$$

A corrente  $I$  varia com  $p$  e a sua variação é tanto menor quanto mais próxima da unidade está a relação  $n$ . A corrente torna-se constante para  $n=1$  (ressonância perfeita).

A variação da corrente  $I$  pode, pois, ser determinada pela expressão (20) no caso duma ressonância imperfeita e, para todos os valores de  $n$  compreendidos entre  $n=0$  (capacidade nula) e  $n=1$  (capacidade em ressonância).

#### a) Tensão útil.

A tensão nos terminais do circuito de carga é determinada em relação à tensão da rede  $U_1$  suposta constante. Atendendo a (19) e (20) tem-se:

$$\left( \frac{U}{U_1} \right)^2 = \frac{I^2 r^2}{U_1^2} = \frac{1}{\left( \frac{1}{p} \right)^2 + (1-n)^2} \quad (21)$$

Vê-se que a tensão  $U$  varia entre  $U=0$  (para  $r=0$ ) e um máximo (para  $r=\infty$ )

$$U_{\max} = \frac{U_1}{1-n} \quad (22)$$

b) *Corrente fornecida pela rede.*

A corrente fornecida pela rede  $I_1$ , definida em relação à corrente útil  $I$  é, atendendo a (7) (8) e (19):

$$\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 = 1 + \left(\frac{r}{X_2}\right)^2 = 1 + p^2 r^2 \quad (23)$$

c) *Potência aparente fornecida pela rede.*

A relação entre a potência útil  $r I^2$  e a potência aparente fornecida pela rede  $U_1 I_1$ , obtêm-se das expressões (21) e (23), que nos dão:

$$\left(\frac{UI}{U_1 I_1}\right)^2 = \frac{p^2}{1 + (1-n)^2 p^2} \cdot \frac{1}{1 + p^2 n^2}$$

Esta relação é igual à unidade para uma carga  $r$  que verifique a condição:

$$\frac{r}{X_1} = p = \frac{1}{\sqrt{(1-n)n}} \quad (24)$$

d) *Factor de potência.*

O factor de potência em relação à corrente  $I_1$  é definido pelo seu quadrado: De (10) e  $I^4$  vem

$$\cos^2 \varphi_1 = \frac{r^2 I^4}{U_1^2 I_1^2} = \frac{r^2}{r^2 + [X_1 + (X_1 - X_2)^2 \tan^2 \theta]^2} \quad (25)$$

$$\text{ou } \cos^2 \varphi_1 = \frac{1}{1 + \left[ \frac{1}{p} - (1-n)np \right]^2} \quad (26)$$

O dispositivo funciona com  $\cos \varphi_1 = 1$  quando a resistência de carga é determinada pela condição:



$$p = \frac{r}{X_1} = \frac{1}{\sqrt{(1-n)n}} \quad (27)$$

Condição idêntica à (24).

e) *Potência aparente de capacidade.*

A importância da capacidade é função da potência reactiva  $X_2 I_2^2$  à qual ela deu origem.

Avaliada por comparação com a potência útil, tem-se:

$$\frac{X_2 I_2^2}{r I^2} = p \cdot n. \quad (28)$$

A importância relativa da capacidade diminui, pois, na razão directa de  $n$ .

f) *Potência aparente de auto-indução.*

A proporção da potência reactiva,  $X_1 I_1^2$  absorvida pela auto-indução determina a importância desta última.

Como precedentemente, encontra-se:

$$\frac{X_1 I_1^2}{r I^2} = \frac{1}{p} + p \cdot n^2 \quad (29)$$

Ficam desta maneira determinadas as características de funcionamento dum dispositivo de alimentação do arco, em função dum parâmetro variável  $p = \frac{r}{X_1}$  e da relação de

duas reatâncias  $n = \frac{X_1}{X_2}$  ou da constante  $\omega^2 L C$ .

As fórmulas deduzidas são de aplicação fácil quando se quer determinar o valor de  $n$  tal que a variação da corrente útil fique compreendida entre certos limites para uma variação da carga  $r$ .

## 19. FACTOR DE POTÊNCIA DOS FORNOS DE ARCO.

Já tivemos ocasião de ver que o factor de potência dos fornos de arco é, em geral, diferente da unidade.

As principais causas que influem no seu abaixamento, são as seguintes:

1.a) A forma irregular da corrente no arco alternado, mesmo quando a tensão se mantém sinusoidal.

Desta maneira o produto  $UI$  dos valores eficazes da tensão e da corrente é maior que o valor da potência:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

havendo, portanto, um factor de potência  $\frac{P}{UI}$  mais pequeno que a unidade, embora não haja que atender propriamente ao ângulo de esfasamento entre a corrente e a tensão.

Este factor pode ser expresso pela fórmula

$$K = \frac{\sum u_n i_n \cos \varphi_n}{ui}$$

em que  $u_n$ ,  $i_n$  e  $\cos \varphi_n$  são os valores relativos aos harmónicos da ordem  $n$ .

2.a) A queda de tensão indutiva do circuito completo do forno, independentemente das indutâncias inseridas para estabilização do arco e cujo estudo já fizemos. Esse circuito completo, compreende: o secundário do transformador de alimentação que apresenta geralmente uma indutância de fugas bastante notável; os electrodos e as suas ligações entre si e os condutores eléctricos do transformador ao forno.

3ª) O factor de potência ainda varia da seguinte maneira:

a) aumenta com a potência volumétrica do forno, isto é, com  $\frac{P_a}{C}$ , sendo  $P_a$  a potência do arco e  $C$  a capacidade do forno;

b) aumenta ou diminui com a natureza dos electrodos;

c) depende da atmosfera do forno;

d) varia, portanto, durante o curso duma operação electrotérmica.

Dentro de certos limites pode-se melhorar este factor de potência, procedendo da maneira como foi indicado para o caso dos fornos de resistência.

Nos casos apontados consideramos apenas o  $\cos \varphi$  nos terminais do secundário do transformador de alimentação. Para se determinar o  $\cos \varphi$  nos terminais do primário, Bergeon e M. Bunet indicam um processo para a sua determinação rápida e com suficiente aproximação.

Seja:

$I_v$  = corrente em vazio;

$I_c$  = corrente primária em carga;

$U_{cc}$  = tensão normal em curto-circuito;

$U_n$  = tensão primária normal.

Designemos:

$$\frac{I_v}{I_c} = a \quad \text{e} \quad \frac{U_{cc}}{U_n} = b$$

Quando se tem:

$$\cos \varphi_1 > 0,6 \quad \text{e} \quad a + b < 0,4$$

pode-se escrever:

$$\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1 + 0,4(a + b).$$

## 20. DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO.

O funcionamento dos fornos de arco pode ser estudado por meio dum diagrama circular análogo ao diagrama utilizado para os motores de indução, conforme o mostra Mr. Bethenod.

Para isso estabelecem-se as seguintes hipóteses:

1.a) Que as curvas de tensão nos terminais do arco e da corrente são suficientemente sinusoidais para que o arco seja electricamente assimilável, uma vez o regime estabelecido, a uma resistência ôhmica.

2.a) Admite-se que o arco é alimentado directamente por uma rede a tensão constante  $E$ , com impedâncias convenientes, definidas pela constante  $R$  e  $X$ , inseridas no circuito.

No caso da alimentação se fazer por meio de transformador,  $E$  será a tensão secundária em vazio e em  $R$  e  $X$  incluir-se-á a resistência aparente total e a reatância de fugas total do transformador, avaliadas pelo ensaio em curto-circuito de Kapp, e referidas ao circuito secundário. Quanto à corrente magnetizante e às perdas no ferro, desprezar-se-ão por enquanto, entrando depois com elas para avaliação gráfica do factor de potência e do rendimento.

Traça-se um comprimento em  $A B$  medindo a tensão  $E$  da rede. Fig. 27.

Chamando a  $R$  e  $X$ , como dissemos, a resistência e a reatância do circuito de alimentação, pode-se traçar o triângulo rectângulo  $A B C$  para cada intensidade  $I$ , no qual o lado  $B C$  representa a soma da queda de tensão devida à resistência ôhmica  $C M = R I$  e à queda de tensão nos terminais do arco  $M B = U$ , em fase com  $I$ .

O lado  $A C$  é igual à queda de tensão indutiva  $X I$ .

O ângulo  $C A M = \gamma$  definido por  $\tan \gamma = \frac{R}{X}$  é constante e o mesmo acontece com o ângulo  $A M B$ .

Dados os valores de  $R$  e  $X$ , seguem-se facilmente as variações da intensidade  $I$  em função da tensão nos terminais

do arco e vice-versa, medindo-se a intensidade pelo vector  $AC = XI$ .

Adoptar-se-á para os ampères uma escala  $X$  vezes maior do que a empregada para os volts.

O lugar do ponto  $M$  é um círculo passando pelos pontos  $A$  e  $B$  e cujo centro  $O$  é a intersecção das rectas  $AO$  e  $BO$  que fazem ângulos  $\gamma$  com a recta  $AB$ .

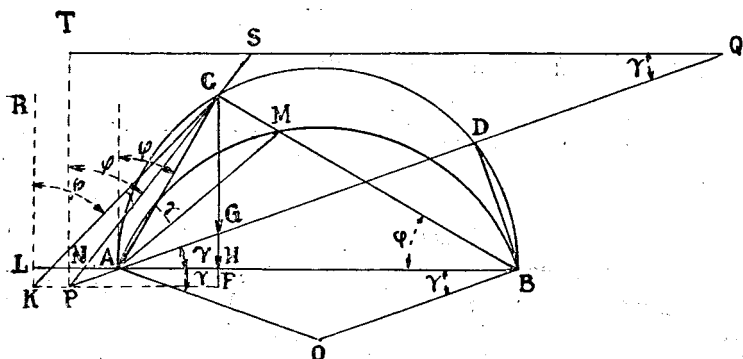


Fig. 27

O ângulo  $MBA$  é o ângulo de esfasamento  $\varphi$  entre a corrente e a tensão  $E$  da rede.

O vector  $AD$  mede em ampères a corrente de curto-circuito  $\frac{E}{Z}$  ( $U=0$ ) e o ângulo  $DBA$ , que define o esfasamento correspondente, é o complemento do ângulo  $\gamma$ .

Se traçarmos em  $A$  uma perpendicular a  $AB$ , o ângulo que ela faz com o vector  $AC$ , é igual a  $\varphi$  e segue-se que a projecção  $CH$ , mede, à escala das correntes, a corrente activa  $I \cos \varphi$  fornecida pela rede.

Pode-se representar a corrente activa correspondente à potência útil  $UI$ .

Ela tem por valor  $I' = \frac{UI}{E} = I \cos \varphi - \frac{RI^2}{E}$ , isto é, a corrente activa útil é aquela cujo produto por  $E$  nos dá a potência útil.

Pelo diagrama tira-se:

$$\overline{AC^2} = AB \times AH \text{ ou } AH = \frac{\overline{AC^2}}{AB} = \frac{XI^2}{E}$$

e por outro lado:

$$GH = AH \tan \gamma = \frac{XI^2}{E} \times \frac{R}{X} = \frac{RI^2}{E} \quad \text{logo a}$$

corrente activa útil será dada no diagrama por:

$$I = I' \cos \varphi - \frac{RI^2}{E} = \overline{CH} - \overline{GH} = \overline{CG}$$

isto atendendo à escala das correntes e tendo-se traçado a recta A D uma vez para tôdas com  $U=0$ .

Podemos, portanto, seguir as variações da potência útil quando se modificam os valores de U e I.

Esta potência é máxima quando a tangente em C é paralela a A D; o esfasamento vale então  $\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}$ , estando o ponto C na extremidade do raio do círculo A B perpendicular a A D.

No mesmo diagrama podemos determinar a corrente magnetizante do transformador eventual, assim como as perdas correspondentes no ferro.

Marquemos em A L, à escala dos ampères, um comprimento igual à componente reactiva da corrente magnetizante, referida ao circuito secundário; depois, segundo uma direcção perpendicular, marquemos L K medindo a componente activa.

A corrente magnetizante será a resultante A K.

Compondo A K com A C obtém-se K C que é a corrente primária real.

O factor de potência  $\cos \varphi'$  é máximo para uma certa carga, atingida quando o vector K C fôr tangente ao círculo A B.

Esta carga é geralmente bastante fraca, a não ser que o transformador possua uma corrente em vazio exagerada.

Vejamos agora uma representação gráfica do rendimento:

$$\eta = \frac{C F - G F}{C F} = 1 - \frac{G F}{C F} \quad (H F = L K)$$

Prolongando AD até ao encontro em P com KF, temos:

$$C F = \frac{P F}{\tan \psi} \quad \text{e} \quad G F = P F \tan \gamma$$

que substituídos na expressão do rendimento, vem:

$$\eta = 1 - \tan \gamma \tan \psi$$

em função da variável  $\tan \psi$ .

Tracemos a recta T Q paralela a A B, sendo T e Q os pontos de intersecção com os prolongamentos de P N (paralela a R L) e de A D.

Prolongue-se ainda o vector P C até S.

Se tomarmos a unidade igual a T Q, o rendimento, em cada regime, será dado pelo comprimento S Q, isto é:

$$\eta = 1 - \frac{T S}{T P} \cdot \frac{T P}{T Q} = 1 - \frac{T S}{T Q} \quad \text{e para } T Q = 1 \text{ vem:}$$

$$\eta = T Q - T S = S Q$$

Traçado, pois, o diagrama, basta conhecer-se uma das quantidades: intensidade, tensão nos terminais do arco, factor de potência, potência fornecida pela rede, potência útil e rendimento, para se conhecerem imediatamente todas as outras.

## 21. DISPOSIÇÃO DOS ARCOS NOS FORNOS.

Temos suposto até aqui que o arco se produz através do espaço que separa os electrodos.

Com ligeiras alterações, as mesmas considerações subsistem quando o arco é produzido, interessando a carga do forno.

As principais disposições que os arcos dos fornos podem tomar em relação à sua carga, dependem de vários factores, tais como:

da substância a tratar (volatilização, acção química do electrodo);

da regulação da corrente, quando ligado a um sector pouco elástico;

da melhor utilização do calor;

da conservação da abóbada refractária;

do ajustamento dos electrodos, etc.

As disposições mais usuais são as seguintes:

a) *Fornos de arco livre* (Tipo Stassano). Fig. 28 e 29, respectivamente mono e trifasado.

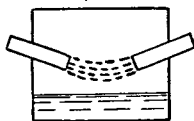


Fig. 28

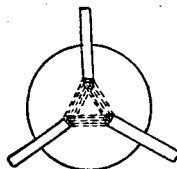


Fig. 29

O arco forma-se entre os electrodos sem intervenção da carga.

O da fig. 29, assemelha-se a um receptor ligado em triângulo.



b) *Fornos de arco sôbre a carga (Tipo Girod).* Fig. 30 e 31, respectivamente mono e trifasado.

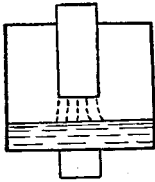


Fig. 30

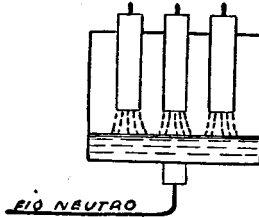


Fig. 31

O arco forma-se entre o electrodo e a carga fechando-se o circuito pela soleira.

O da fig. 31 assemelha-se a um receptor ligado em estrêla.

c) *Fornos de arco sôbre a carga (Tipo Hérault).* Fig. 32 e 33, respectivamente mono e trifasado.

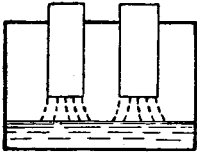


Fig. 32

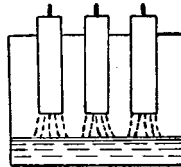


Fig. 33

O arco forma-se entre os electrodos por intermédio da carga.

No caso da fig. 32, o circuito é: electrodo / carga / electrodo.

Baseados, mais ou menos, nestas três disposições, há muitos outros tipos de fornos de arco, cada um com as suas vantagens e os seus inconvenientes, adequados às respectivas operações metalúrgicas para que foram estudados.

O âmbito dêste trabalho não permite um maior desenvolvimento dêste assunto.

## CAPITULO IV

### Fornos de indução

#### 22. PRINCÍPIOS GERAIS.

Nestes fornos, como nos outros já estudados, é aplicável o princípio geral das transformações electotérmicas, regido pela citada lei de Joule.

Vimos que para fazer circular no condutor a aquecer, a corrente necessária, era preciso ligá-lo a uma fonte eléctrica que desse a tensão suficiente para vencer as respectivas resistências.

Neste caso, porém, os fenómenos de indução fornecem um outro processo para desenvolver a mesma corrente no condutor.

A lei fundamental da indução diz-nos que:

«Um circuito atravessado por um fluxo  $\Phi$  variável é a sede duma f. e. m. de indução  $E$  proporcional à derivada  $\frac{d\Phi}{dt}$  do fluxo em relação tempo; esta f. e. m. não depende nem da resistência do circuito nem da intensidade de corrente que o percorre».

O valor dessa f. e. m. induzida é:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ volts}$$

Se ligarmos as extremidades do circuito que está submetido a essa variação de fluxo, ele será percorrido por uma corrente que, segundo a lei Ohm, é proporcional à f. e. m. gerada e à sua resistência eléctrica.

### 23. MODOS DE REALIZAÇÃO.

A variação de fluxo necessário à produção da corrente induzida, pode ser obtida, quer por deslocamentos dos circuitos no campo magnético constante, quer pela variação do campo magnético, atravessando circuitos fixos.

É este último caso que é aplicado aos fornos de indução, como é também aos transformadores estáticos.

Pode-se dizer que os fornos de indução não são mais que transformadores estáticos, nos quais o secundário tem uma única espira constituída pelo corpo a aquecer.

Estes fornos poderão ser alimentados, como veremos mais adiante, por correntes de frequência normal (50 p. s.); frequências inferiores (25, 15 e 5 p. s.) e frequências superiores, chamadas médias ou altas frequências, que vão algumas centenas a alguns milhares de períodos.

Além disso os fornos de indução são, em geral, constituídos sob a forma de:

- a) *transformadores com ferro e circuito magnético fechado e alimentados à frequência normal.*
- b) *transformadores sem ferro ou sem circuito magnético fechado e habitualmente alimentados a médias ou altas frequências.*

### 24. CLASSIFICAÇÃO DOS FORNOS DE INDUÇÃO.

Pelo que já dissemos no parágrafo anterior, os fornos de indução dividem-se em duas grandes categorias, a saber:

- a) *Fornos com núcleo magnético ou de baixa frequência.*
- b) *Fornos sem núcleo magnético ou alta frequência.*

Esta distinção entre aparelhos com núcleo e sem núcleo magnético designa duma maneira mais exacta as características construtivas essenciais de cada tipo de forno.

Os fornos com núcleo constam dum circuito magnético fechado, como esquematicamente representa a fig. 34.

Sobre o circuito em chapas de alta permeabilidade, estão dispostas de um lado o enrolamento primário AB, ligado a uma fonte de corrente alternada de tensão  $U$ ; doutro lado a substância a aquecer constitui o secundário do transformador sob a forma duma espira em curto-circuito S.

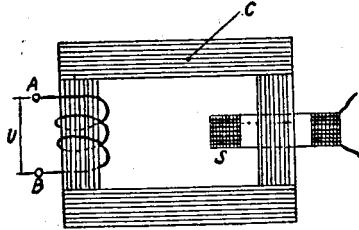


Fig. 34

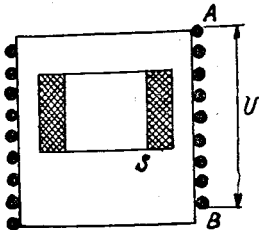


Fig. 35

Os fornos sem núcleo ou alta frequência, são normalmente constituídos como indica o esquema da fig. 35.

A substância a aquecer forma sempre o secundário e é colocada no interior da bobina AB, ligada a uma fonte eléctrica de frequência e tensão convenientes.

## 25. FORNOS COM NÚCLEO MAGNÉTICO.

Êstes fornos são utilizados essencialmente na fusão dos metais e o secundário apresenta-se sob a forma dum anel líquido, disposto dentro duma espécie de canal em material refractário.

Apresentam-se construtivamente de dois modos diferentes:

- a) com canal horizontal ao ar livre;
- b) com canal submerso.

Nos parágrafos seguintes veremos as vantagens e inconvenientes de cada um destes tipos.

Vejamus esquemáticamente cada um dêles e as suas diferenças fundamentais.

O forno de canal horizontal está representado na fig. 36 em que:

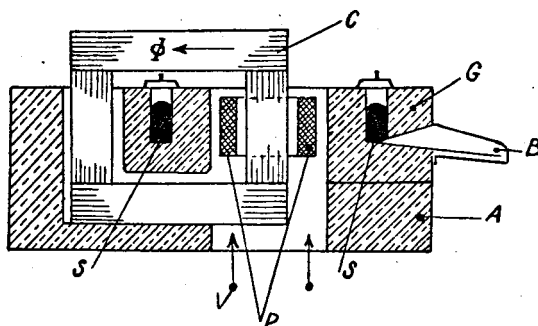


Fig. 36

A = carcaça metálica, colocada sôbre suportes que permitam o movimento para a descarga.

B = caleira para a descarga.

C = circuito magnético em fôlhas metálicas.

P = enrolamento primário.

S = canal secundário.

V = canal de ventilação do primário.

G = guarnição de refractário.

O forno de canal submergido, é representado pela fig. 37, em que:

A = Comunicação dos ramos superiores do canal C com o cadinho ou câmara de fusão M.

B = enrolamento primário com ventilação forçada.

C = canal de fusão.

D = núcleo magnético.

M = câmara de fusão.

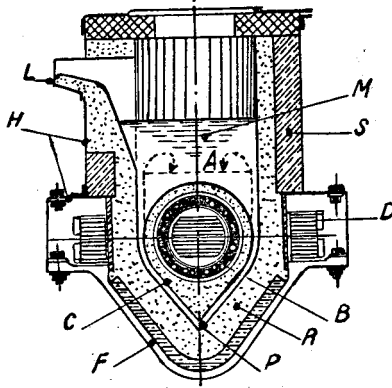


Fig. 37

## 26. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.

Para simplificação do estudo, vamos supor que se trata dum forno com um só núcleo e um só canal de fusão, alimentado com corrente monofásica à tensão  $U_1$ , embora êstes aparelhos sejam também realizados para correntes polifásicas, isto é, com uma bobina e um canal para cada fase.

### 1.<sup>a</sup>) Potência.

Seja  $R_2$  a resistência ôhmica da veia líquida formando o secundário sob o aspecto duma só espira em curto-circuito.

$L_2$  a indutância aparente da mesma espira.

A teoria simplificada do transformador diz-nos que a tensão  $U_1$  aplicada ao primário com  $n$  espiras, produzirá no secundário uma tensão:

$$U_2 = \frac{U_1}{n}$$

e uma corrente

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + L_2^2 \omega^2}}$$

A potência desenvolvida no secundário, será pois:

$$W_2 = R_2 I_2^2 = \frac{R_2 U_1^2}{n^2 (R_2^2 + L_2^2 \omega^2)}$$

Vê-se que  $W_2$  pode tomar um valor elevado, com a condição de  $U_1$  ser elevado.

Praticamente pode ser esta condição satisfeita sem perigo para o pessoal, visto que a parte metalúrgica (secundário) é completamente separada da parte eléctrica (primário). Para um aparelho dado, a potência é limitada pela permeabilidade magnética dos núcleos.

Para a mesma tensão, a potência diminui quando aumenta a frequência da corrente.

A expressão da potência, é a mesma, quer se trate de fornos com canal horizontal ou submergido.

## 2.a) *Rendimento.*

Designemos por  $R_1$  a resistência total do circuito primário (enrolamento e circuito de alimentação); por  $q_1$  o calor consumido no primário;  $R_2$  a resistência do secundário;  $q_2$  o calor desprendido no secundário.

O rendimento do conjunto  $\eta_0$  é, numa primeira aproximação:

$$\eta_0 = \frac{q_2}{q_1 + q_2} = \frac{0.24 R_2 I_2^2 t}{0.24 (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) t}$$

e como pela teoria elementar dos transformadores  $I_2 = n I_1$  temos:

$$\eta_0 = \frac{0.24 R_2 n^2 I_1^2 t}{0.24 (R_1 I_1^2 + R_2 n^2 I_1^2) t} = \frac{R_2 n^2}{R_1 + R_2 n^2}$$

Pode-se construir o forno de maneira a tornar-se  $R_1$  bastante pequeno em relação a  $R_2$ , obtendo-se assim um rendimento superior e 95 por 100.

As perdas secundárias são neste caso perdas da potên-

cia útil, contrariamente ao que normalmente se produz num transformador.

*Nos fornos de canal horizontal as perdas caloríficas são bastante elevadas de forma que o rendimento energético anda à volta de:*

$$\eta_t = 60 \text{ a } 70 \text{ por } 100.$$

$\eta_t$  = sendo a relação entre a energia realmente utilizada nos produtos aquecidos e a energia absorvida da rede eléctrica.

*Nos fornos de canal submergido, devido à pequena secção do canal, aumenta-se o valor de  $R_2$  de forma que o rendimento pode ir além de 98 por 100.*

Além disso, a redução da secção do canal e o facto de 4/5 da carga, aproximadamente, estarem na câmara de fusão de forma cilíndrica, permite diminuir muito sensivelmente as *perdas caloríficas*, obtendo-se um rendimento total cerca de:

$$\eta_t = 80 \text{ por } 100.$$

### 3.<sup>a</sup>) *Factor de potência.*

O baixo factor de potência destes fornos parecia limitar muito o seu emprego na prática corrente, visto ser bastante medíocre e algumas vezes muito mau.

Se chamarmos a  $R$  e  $L$  as resistências e indutâncias totais, primário e secundário, temos:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

isto é, o factor de potência dependente dos três factores principais  $R$ ,  $L$  e  $\omega$ .

O factor de potência é tanto melhor quanto maior for  $R$  e menores os valores de  $L$  e  $\omega$ .



Nos fornos de canal horizontal, o aumento de  $R$  implica com a diminuição da secção do canal ou com o aumento da secção do mesmo.

No primeiro caso teremos a capacidade do forno bastante limitada e no segundo um aumento de fugas magnéticas e, por consequência, de  $L$ .

Nos fornos de canal submergido, o aumento de  $R$  obtém-se quasi que independentemente da capacidade do forno, visto o canal de aquecimento ter uma capacidade muito pequena em relação à da câmara de fusão. As fugas magnéticas podem-se reduzir bastante neste caso, porque o canal pode ser aproximado suficientemente do enrolamento primário.

Consegue-se, desta forma, nos fornos deste tipo, aumentar  $R$  e diminuir  $L$ , isto é, melhorar o *factor de potência*, atingindo valores compreendidos entre 0,7 e 0,8.

Duma maneira geral reduzem-se as fugas magnéticas, não exagerando também a indução do núcleo.

Pode-se ainda actuar na pulsação da corrente  $\omega$ , alimentando os fornos com frequências baixas.

Isto exige geradores especiais ou conversores de frequência caros e de grandes dimensões, o que acarretaria um aumento nas despesas da primeira instalação e, por consequência, uma diminuição do rendimento da transformação.

#### 4.<sup>a</sup>) *Agitação do banho.*

Como sabemos, a agitação do banho favorece, até certo ponto, a homogenização dos produtos a tratar, a uniformização da temperatura e, às vezes, a aceleração das reacções químicas.

Essa agitação, porém, pode tornar-se perigosa para a conservação do forno se fôr além de certos limites.

Nos fornos de resistência e arco essa agitação pode ser conseguida por meios mecânicos, mas nos fornos de indução produz-se automaticamente por efeitos electromagnéticos. Suponhamos o caso dum forno monofásico de canal horizontal, fig. 38.

Representemos por  $F$ , a força repulsiva devida aos fenó-

menos electromagnéticos, acção das correntes indutoras e induzidas.

Por P, a acção da gravidade. O metal líquido ficará sujeito à acção da resultante R dessas duas forças e a sua superfície livre tenderá a orientar-se normalmente à direcção da resultante.

Nota-se, de facto, uma elevação da borda externa do banho. Se a frequência da corrente de alimentação é  $f$ , as forças F anulam-se  $2 \times f$  vezes por segundo e, nesses instantes, o banho tende a tornar-se horizontal.

Devido, porém, à inércia, ele continuará inclinado, embora já com uma certa tendência para a agitação, que se tornará muito sensível à medida que a frequência baixa e as dimensões do forno aumentam.

Juntamente com esta causa, há uma outra ainda mais importante, que reside no facto da parte do banho em contacto com o ar estar mais fria e, por conseguinte, mais densa que o resto do líquido.

Uma partícula metálica situada em M. fig. 39, devido

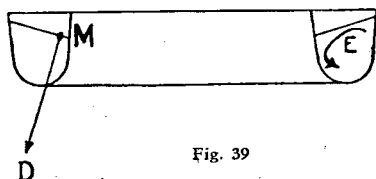


Fig. 39

à sua maior densidade, tende a descer na direcção MD, resultando daí uma rotação do banho no sentido da flecha E. Resulta destes fenómenos uma agitação automática

normal ao eixo do canal. Pode ainda conseguir-se uma nova causa da agitação, descentrando o núcleo magnético.

Nos fornos de canal submerso, a forma do canal é estudada de maneira a facilitar a acção das correntes.

O canal de fusão tem, nalguns fornos deste tipo, a forma dum V, cujo ângulo no vértice P, é determinado experimentalmente para assegurar as melhores condições de circulação do metal líquido.

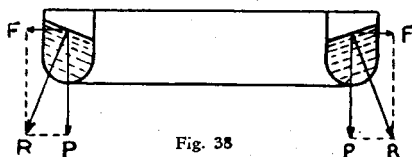


Fig. 38

Produz-se, portanto, um movimento muito intenso, refluindo o metal na parte superior dos dois ramos do canal, segundo as flechas representadas em A, fig. 37.

Ainda uma outra causa de agitação é o fenómeno da contracção, que estudaremos em seguida.

Essa contracção, tem o seu máximo no ponto baixo P, tendendo a repellar o metal para cima.

#### 5.<sup>a</sup>) *Fenómeno da contracção.*

Trata-se dum fenómeno específico que se manifesta nos condutores líquidos percorridos por uma corrente eléctrica, quer ela tenha sido produzida por indução, quer pela ligação do condutor a uma fonte de energia de c. a. ou corrente contínua.

Consideremos, fig. 40, uma veia metálica líquida colocada num canal e percorrida por uma corrente eléctrica.

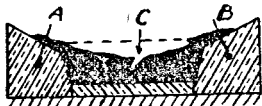


Fig. 40

Se se aumenta a densidade de corrente além de certo limite, a superfície do metal em lugar de conservar a forma segundo A B, sobe para os lados baixando no centro C.

No limite, a massa metálica divide-se em duas partes, dando em resultado interromper-se a corrente; logo em seguida a massa metálica junta-se, para voltar a separar-se, e assim sucessivamente, resultando por êsse motivo um forte crepitar do banho que pode causar graves prejuízos.

Pode acontecer, também, se no momento da interrupção da corrente, os fragmentos da escória isoladora se interpuserem, entre as duas superfícies separadas, a corrente não volta a restabelecer-se e o canal terá que ser demolido caso solidifique o metal.

O fenómeno da contracção pode explicar-se admitindo que a veia metálica é equivalente a um grande número de condutores  $C_1, C_2, C_3 \dots$ , fig. 41, percorridos em paralelo

por correntes eléctricas do mesmo sentido e, por consequência, atraindo-se e dando origem à contracção.

Se o condutor é cilíndrico, tôdas as partículas que o compõem tendem a mover-se para o eixo; porém, sendo a pressão resultante igual em todos os pontos do comprimento do cilindro, não se produz nenhum effeito aparente.

Se o condutor possui inicialmente uma menor secção recta num ponto qualquer, a densidade de corrente será maior nesta secção e as forças radiais serão maiores, produzindo-se uma acção maior e originando a contracção do condutor nesse ponto.

A pressão produzida no eixo dum condutor cilíndrico líquido, pela atracção electromagnética das partículas que o compõem, foi calculada por Northrup e expressa pela fórmula:

$$P = \frac{A^2}{44'479'100 S} \quad \text{na qual}$$

$P$  = pressão no eixo em libras por polegada quadrada.

$A$  = corrente total em ampères.

$S$  = secção recta em polegadas quadradas.

Num condutor de secção recta variável, o valor de  $P$  varia dum ponto para outro ao longo do eixo, dando isto origem a um fluxo axial dos pontos de pequena para os de grande secção recta, voltando o líquido assim deslocado, novamente para a superfície inicial.

Quando a contracção não é muito forte, é contrariada pela pressão hidrostática que tende a conservar o nível do líquido. Porém, se a depressão aumenta além de certa proporção da profundidade original do líquido, o equilíbrio não se mantém; um novo decrescimento da secção aumenta a força da contracção e o condutor divide-se rapidamente em dois.

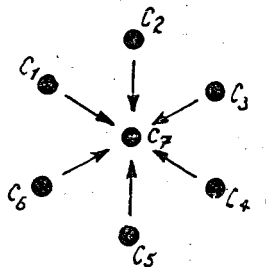


Fig. 41

Para um condutor de secção rectangular, esta condição crítica aparece, quando a profundidade do líquido se reduzir a metade do seu valor original.

Tomando um condutor de altura dupla da largura, de modo que, com a corrente crítica, a parte comprimida tenha secção quadrada; a fórmula:

$$dc = 895 \sqrt{\frac{G}{H}}$$

dá-nos a densidade de corrente crítica em ampères por polegada quadrada da secção original, sendo G o peso específico do metal fundido e H a altura do metal.

Nos *fornos de canal submergido*, subsiste o fenómeno da contracção e seria mesmo perigoso dada a fraca secção do canal e a grande densidade da corrente.

Este fenómeno é, nestes fornos, contrariado pela pressão hidrostática devida à carga metálica contida no cadinho.

As velas a contrair são mantidas por êsse facto, e as densidades de corrente elevadas não são de temer como no caso dos fornos de canal horizontal.

Traz isto como consequência, a possibilidade de reduzir a secção do canal, melhorando assim, como vimos, o factor de potência e o rendimento.

## 27. FORNOS SEM NÚCLEO MAGNÉTICO.

Um forno de alta frequência ou sem núcleo magnético é, na sua simplicidade, constituído por um solenoide alimentado por uma corrente alternada e envolvendo um corpo condutor que se pretende aquecer.

As correntes de Foucault induzidas nesse corpo podem levá-lo a uma alta temperatura e provocar a sua fusão.

Se o corpo é magnético, há a juntar à acção calorífica das correntes de Foucault o calor desenvolvido pelos fenómenos histeréticos, mas na prática corrente e neste estudo, desprezaremos os efeitos dêsse fenómeno.

Esquematizemos na fig. 42 um forno d'êste tipo, em que:

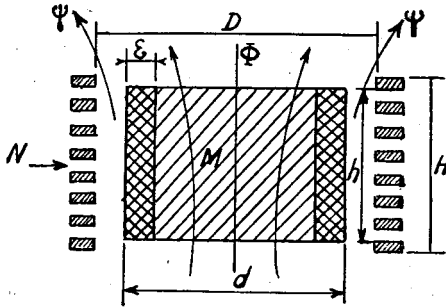


Fig. 42

$M$  = corpo condutor;

$h$  = altura do corpo;

$d$  = diâmetro do corpo;

$N$  = bobina indutora com  $N$  espiras;

$D$  = diâmetro da bobina;

$H$  = altura da bobina;

e vejamos como o corpo  $M$  pode ser a sede duma f. e. m. tal que dê origem a uma potência

$$P = R I^2$$

capaz de fornecer o calor desejado para o aquecimento ou fusão do corpo.

## 28. PRINCÍPIO CERAL.

Um forno nas condições indicadas, não é mais do que um transformador no ar sem ferro.

A f. e. m. induzida no secundário, será:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ volts}$$

Neste caso, porém, as variações do fluxo são menos importantes do que nos fornos de baixa frequência, visto que o fluxo não é reforçado com a presença do núcleo magnético.

O aumento da f. e. m. consegue-se pelas variações de  $dt$ , muito mais rápidas, se se emprega uma corrente alternada de frequência elevada.

Vê-se que a supressão do circuito magnético é compensada, até certo ponto, pelo aumento de frequência da corrente de alimentação.

Seja  $\Phi$  o fluxo resultante;  $E_2$  a f.e.m. total induzida no secundário;  $R_2$  a resistência do mesmo e  $P_2$  a potência posta em jôgo no secundário.

Podemos escrever, aproximadamente:

$$P_2 = \frac{E_2^2}{R_2} = \frac{\omega^2 \Phi^2}{R_2}$$

Quer dizer, sendo dado um valor determinado de  $R_2$ , há dois processos de aumentar a potência  $P_2$ ; ou o que vale o mesmo, aumentar a f.e.m. induzida:

- a) aumentar  $\Phi$  pela introdução dum núcleo magnético;
- b) aumentar  $\omega$  pelo acréscimo da frequência.

Conclusões estas a que já tínhamos chegado ao analisarmos a expressão que nos dá a f.e.m. induzida.

Devemos notar, contudo, que o aumento da frequência pode não trazer um acréscimo da potência  $P_2$ , principalmente quando a alimentação é feita a tensão constante.

Outro tanto se dá com a introdução dum núcleo magnético, em que a potência não aumenta por êsse facto. M. Bunet observou que se tivermos um tubo condutor envolvido por um solenoide e atravessado por um núcleo magnético, êste não será a sede de nenhuma f.m.m. se a frequência da corrente não fôr bastante elevada para que a espessura  $e$  da «pele», devido ao efeito de Kelvin, no tubo, fôr muito mais pequena que a espessura  $e$  do tubo.

## 29. EFEITO PELICULAR OU DE KELVIN.

Se as correntes induzidas nas massas metálicas que servem de secundário, se distribuissem uniformemente por toda a massa  $M$  (fig. 42), esta apresentaria uma resistência aparente muito pequena e ter-se-iam as mesmas dificuldades que se encontram nos fornos de resistência, quando é a própria substância a servir de condutor.

Nos fornos de que estamos a tratar, aparece um fenómeno que soluciona e conduziona os problemas de aquecimento por este processo.

Trata-se do fenómeno conhecido pelo *efeito de pele*, *efeito de Kelvin* ou *skin effect*, que não é mais do que a tendência que têm as correntes alternadas de se localizarem nas regiões periféricas dos condutores, ficando as regiões axiais mal utilizadas.

Podemos estabelecer o seguinte facto fundamental:

Quando um cilindro condutor é submetido à acção dum campo magnético alternado paralelo ao seu eixo, a corrente circular induzida é repartida em profundidade de tal maneira que se pode considerar como localizada numa «pele» cuja espessura é expressa pela fórmula de Steinmetz:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

Na fig. 43 estão representadas várias curvas, mostrando a profundidade de penetração em diferentes qualidades de substâncias e em função da frequência.

Pela análise das curvas, pela fórmula de Steinmetz e pelos dados experimentais, chega-se à conclusão que o efeito pelicular varia da seguinte maneira:

- a) na razão directa da frequência, ou então, a penetração diminui com o aumento da frequência.
- b) na razão inversa da resistividade e na razão directa da permeabilidade.



c) é maior com as substâncias no estado sólido do que no líquido.

d) nos metais magnéticos existem diferenças mais nítidas entre a profundidade de penetração em ambos os estados do que nos metais não magnéticos.

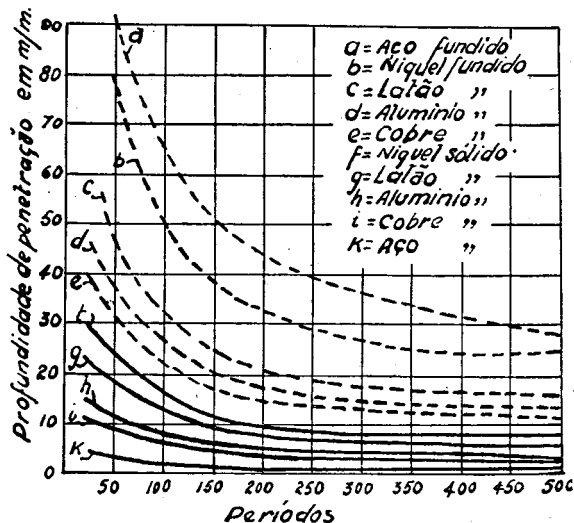


Fig. 43

e) o efeito Skin, aumenta também, com o tamanho das peças a tratar e aumenta também à medida que a sua secção recta se aproxima da forma circular.

A intensidade das correntes de Foucault  $I_x$  diminui a partir da superfície da peça segundo a lei exponencial.

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}$$

onde  $I_0$  é a intensidade da corrente à superfície. O valor do expoente  $\alpha$  depende das constantes eléctricas e magnéticas

da matéria (resistividade e permeabilidade), da frequência da corrente  $f$  e da configuração da superfície da peça a aquecer, isto é:

$$\alpha = 2 \pi \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}$$

A figura 44 mostra a diminuição das correntes de Foucault a partir da periferia até ao interior da peça.

### 30. POTÊNCIA UTILIZADA NO SECUNDÁRIO.

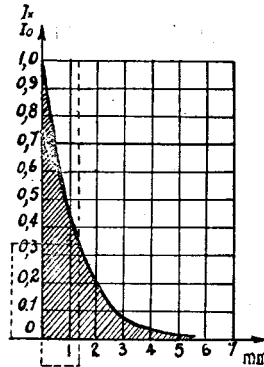


Fig. 44

Reportando-nos à fig. 42, podemos considerar, para o caso da massa  $M$  cilíndrica, a espira secundária como um tubo de parede  $\varepsilon$  e de altura  $h$ , donde o valor aproximado da resistência:

$$R_2 = \frac{\pi d \rho}{h \varepsilon}$$

A questão essencial no funcionamento dum tal forno, está em conhecer o valor das frequências necessárias para que se possa fazer a consideração anterior.

No caso do aquecimento dum bloco maciço, pode-se tomar, grosso modo, uma frequência de corrente de alimentação, tal que, a espessura da pele seja inferior a 1/10 do diâmetro da massa aquecida, seja:

$$d > 10 \varepsilon$$

donde

$$f > \frac{254 \rho}{\mu d^2}$$

Quer isto dizer, que a frequência deve crescer com a resistividade e decrescer com o diâmetro das peças a tratar.

Assim, os fornos deste tipo, recebendo carga líquida poderiam trabalhar com frequências normais — quanto ao diâmetro — se não fôsse o efeito perigoso da agitação do banho com as frequências baixas.

Para substâncias magnéticas, a frequência também decresce rapidamente, pois o valor da permeabilidade pode atingir valores altos.

Supondo, porém, que a condição da frequência está satisfeita; nós temos para expressão da potência utilizada no secundário:

$$P = R_2 I_2^2 = N^2 R_2 I_1^2 = N^2 \frac{\pi d \rho}{h \epsilon} I_1^2 = \\ = \frac{N^2 I_1^2 \pi d}{h} \sqrt{2 \pi \rho \mu \omega}$$

em que  $I_1$  é a corrente na bobina primária contendo  $N$  espiras.

A potência utilizada é, pois, proporcional:

- a) à raiz quadrada da frequência;
- b) à » » » resistividade;
- c) ao diâmetro do cilindro da substância;
- d) ao quadrado do número de ampères-espiras do indutor.

Não é de considerar a altura  $h$  visto que quando o seu valor cresce, aumenta também o número de espiras do solenoide indutor.

Os metalurgistas julgaram durante muito tempo que o aquecimento era proporcional à frequência da corrente e não à raiz quadrada, dando origem ao emprego de frequências muito altas e pouco económicas retardando o progresso destes fornos sem núcleo magnético.

Está demonstrado que, quando a tensão de alimentação é constante, a potência não cresce indefinidamente com a raiz quadrada da frequência, mas que passa por um máximo e decresce em seguida tendendo para zero.

Na fig. 45 estão representadas as variações da potência, em função da frequência e a tensão constante, respectivamente, com núcleo e sem núcleo.

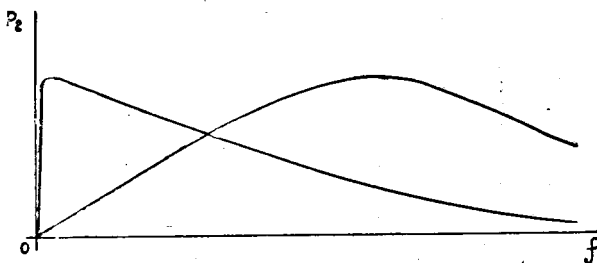


Fig. 45

Elas mostram-nos a razão de ser da aplicação de correntes de alta frequência nos fornos sem núcleo e da aplicação de baixas frequências nos fornos com núcleo.

### 31. RENDIMENTO.

O rendimento é dado pela relação entre a potência útil no secundário e a potência absorvida pelo forno, juntando-lhe as perdas pelo efeito Joule na bobina do primário, cuja resistência representaremos por  $R_1$ .

Nessas circunstâncias, temos:

$$\eta_e = \frac{N^2 R_2 I_1^2}{N^2 R_2 I_1^2 + R_1 I_1^2}$$

Estando a bobina do primário sujeita igualmente ao efeito pelicular, e sendo  $\rho$ , a resistividade do metal que é

constituído,  $D$  o diâmetro,  $H$  a altura e  $\varepsilon_1$  a espessura da pele interessada na corrente, temos para valor de  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{\pi D \rho}{H \varepsilon_1}$$

e a expressão do rendimento, será então:

$$\eta_e = \frac{1}{1 + \frac{D \rho_1 h \varepsilon}{N^2 d \rho H \varepsilon_1}}$$

Para o mesmo forno, o rendimento varia com as dimensões e resistividade das peças a aquecer.

O primeiro factor é limitado pela necessidade dos fornos em terem uma parede refractária de espessura suficiente para agüentar com a carga.

Tem-se suposto até aqui que a carga do forno é constituída por um bloco maciço ou por uma massa líquida.

Na prática, porém, a carga é constituída por pedaços de metal de diferentes tamanhos que o forno tem possibilidades de tratar, contrariamente ao que acontece com os fornos de baixa frequência.

O quadro a seguir mostra-nos os diâmetros óptimos, em centímetros, para diversas substâncias em função da frequência da corrente e para se ter um rendimento máximo teórico:

Frequências em p. s.	50	200	500	2000	10000
Cobre frio . . . . .	3,6	1,8	1,2	0,6	0,25
Chumbo frio . . . . .	11	3,5	5,6	2	0,8
Ferro a 1000° c. . . . .	14	7	5	3	1
Grafite . . . . .	80	40	25	12	5

No caso de cargas em pedaços, as frequências aplicadas são bastante altas de forma a não haver dificuldades de escorvamento.

Em fornos para aço consegue-se um rendimento total de 80 a 85 por cento.

### 32. FACTOR DE POTÊNCIA.

Referindo-nos ainda à fig. 42, vê-se que uma parte do fluxo produzido pela bobina primária  $\Phi$ , passa através da substância induzindo nela correntes de Foucault. Estas correntes, por sua vez, dão origem a um fluxo igual e de sinal contrário a  $\Phi$ . Uma parte, porém, do fluxo primário  $\psi$  passa no intervalo entre a bobina e a carga do forno, dando origem a uma indutância de fugas, que é tanto maior quanto maior for o espaço ocupado pelo refractário.

Como a espessura deste refractário é bastante elevada, pois é função da carga do forno, segue-se que o factor de potência:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

Será muito pequeno, visto que  $L$  e  $\omega$  são muito grandes. Na prática, nos fornos industriais de fusão, o  $\cos \varphi$  não ultrapassa, 0,1 e às vezes ainda é menor.

Como não é económico alimentar aparelhos com um factor de potência tão baixo, prevê-se sempre a montagem simultânea duma bateria de condensadores para fornecerem a potência reactiva necessária de forma a elevar-se o  $\cos \varphi$  para perto da unidade.

Estas baterias são hoje construídas economicamente e com todas as condições de segurança. Em geral o preço do KVAR decresce à medida que a frequência se eleva. As perdas nos condensadores são extremamente baixas, aproximadamente 3 por mil, não influyendo praticamente no rendimento total da instalação.

## 33. AGITAÇÃO DO BANHO.

Quando tratamos dos fornos com núcleo magnético, vimos qual o mecanismo que originava a agitação do banho.

Nos fornos sem núcleo passam-se identicamente e observam-se as mesmas acções electromagnéticas entre as correntes indutora e de Foucault.

A fig. 46 mostra o aspecto do fenómeno para o caso de o forno ser alimentado por corrente monofásica.

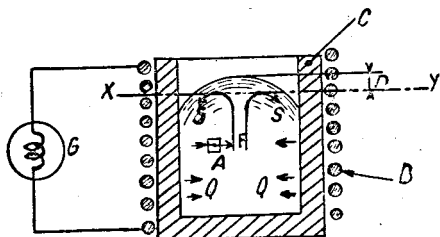


Fig. 46

As correntes concentradas na periferia da massa metálica têm tendência a serem repelidas para o centro devido à acção repulsiva da corrente primária.

A massa será comprimida para o centro por um conjunto de forças  $Q$ . Como o líquido é incompressível subirá segundo as flechas  $S$  descendo depois ao longo das paredes.

Em relação ao nível do banho em repouso  $XY$ , este movimento produz um desnível  $D$ , em forma de menisco, susceptível de atingir vários centímetros, ou mesmo várias dezenas de centímetros.

O peso deste menisco, deve equilibrar a pressão electromagnética.

Este movimento começa desde que a carga começa a fundir e continua durante todo o período da fusão, e leva constantemente o calor às partes da carga não ainda em fusão e protege assim a carga contra os sobreaquecimentos locais, que seriam perfeitamente possíveis. Além disso, o movimento do banho assegura uma composição química uniforme da carga.

Para uma mesma potência calorífica do forno, a força da agitação é inversamente proporcional à raiz quadrada da frequência, ao diâmetro do forno e à resistividade.

A experiência mostra que nos fornos cilíndricos de grande capacidade, o movimento do banho é extremamente lento, assim como é imperceptível para as grandes frequências.

Suponhamos agora que temos um forno alimentado com corrente trifásica.

A sucessão das fases cria um campo girante e as forças centrípetas que movimentavam o banho no caso dos fornos monofásicos, são aqui substituídas, por esse facto, em forças dirigidas ao longo das paredes, resultando o movimento indicado pelas flechas F, fig. 47, havendo uma ascensão lateral do banho e uma descida central.

Como dissemos, estes movimentos são inversamente proporcionais à raiz quadrada da frequência, e pode acontecer que sejam,

para um dado forno e uma dada carga, tão lentos, que haja necessidade de os aumentar, assim como há operações onde o movimento deverá ser alterado durante o curso dessa operação.

Como a frequência está ligada à potência calorífica do forno, não há vantagem em alterá-la.

Para obviar a esses inconvenientes, constroem-se presentemente fornos que podem ser alimentados sucessivamente ou mesmo simultaneamente por corrente de frequências diferentes.

São os chamados fornos de dupla-frequência, que estão sendo largamente empregados, principalmente quando se trata de grandes unidades.

Acontece também que a agitação provocada pelas correntes polifásicas são mais eficientes e deterioram menos os revestimentos refractários, usam-se, por esse motivo, as correntes monofásicas para aquecimento e as polifásicas para a agitação.

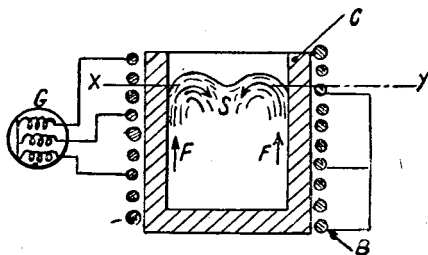


Fig. 47



## CAPÍTULO V

### Regulação automática dos fornos

#### 34. SISTEMAS PRINCIPAIS.

A regulação automática dos fornos eléctricos tem-se desenvolvido de tal ordem nos últimos tempos que, pode-se dizer, só em casos muito restritos é que a regulação se faz manualmente, isto é, só quando se trata de unidades muito pequenas para operações metalúrgicas sem grande responsabilidade ou quando o movimento da carga do forno é sujeito a bruscas e grandes variações e os aparelhos, devido à sua inércia, não podem actuar com a rapidez necessária.

Fóra, pois, destes casos esporádicos e raros, há toda a vantagem em instalar os fornos com equipamentos automáticos de regulação porque, além do mais, consegue-se com eles uma homogenização rigorosa dos produtos; liberta o operário dum trabalho fastidioso; diminue o preço do custo dos produtos fabricados; protege o material dos fornos, (resistências, transformadores, electrodos, etc.) e atenua grandemente as perturbações das rês com o funcionamento de certos fornos. Pode dizer-se que o grande desenvolvimento do forno eléctrico se deve, em grande parte, aos reguladores automáticos que constituem, por êsse facto, um órgão essencial do forno.

A regulação automática não consiste apenas em manter

uma certa e determinada temperatura; ela regula a marcha geral do forno, quer quanto à temperatura, quer quanto ao trabalho a executar segundo um diagrama determinado.

Quando os fornos se destinam a tratamentos térmicos há, em geral, necessidade duma temperatura bem determinada; se se destinam à fusão, é indispensável que a temperatura não atinja a da ebulição do produto com risco de se perder por volatilização; se nos fornos se dão reacções químicas, é preciso manter uma temperatura bem definida; casos há, porém, em que o forno deve oferecer, durante a mesma operação metalúrgica, várias temperaturas, segundo uma marcha previamente estabelecida.

Nos fornos de arco, um regime irregular dá um mau rendimento e um desgaste prematuro do material e dos electrodos, assim como um mau produto fabricado. Há, pois, também necessidade de uma regulação tão perfeita quanto possível.

O único inconveniente que se pode apresentar quanto à montagem dum equipamento regulador, é o seu custo mais ou menos elevado, mas êle será rapidamente amortizado com os enormes benefícios que traz, quer sob o ponto de vista técnico, quer económico.

Desta forma o problema do industrial reside apenas na escolha racional, por vezes embaraçosa, do sistema mais conveniente ao produto a fabricar entre os numerosos tipos que se apresentam.

Duma maneira geral, podemos classificar os grupos ou sistemas de regulação, em três categorias:

- a) Regulação pirométrica.
- b)     >       por deslocamento dos electrodos.
- c)     >       >       variação de tensão.

Vejamos em que consistem cada um destes grupos.

### 35. REGULAÇÃO PIROMETRICA.

Os reguladores pirométricos aplicam-se aos fornos de resistência e aos fornos de indução.

São aparelhos que além de indicarem a temperatura, a regulam se ela se afasta dos valores fixados.

O indicador é constituído por um termómetro, um pirómetro de dilatação, um binário termo-eléctrico, etc., e que actuando sobre um relé leva a temperatura ao valor desejado, diminuindo ou aumentando a energia fornecida, conforme os casos.

A regulação faz-se, variando a tensão de alimentação ou a intensidade.

A variação da tensão realiza-se quando se dispõe dum grupo gerador de alimentação do forno, actuando sobre a velocidade ou sobre a excitação.

Se a alimentação do forno é feita por intermédio duma rede de distribuição, a regulação da tensão faz-se por meio dum regulador de indução ou por meio duma bobina de indutância.

Quando a regulação se faz pela variação da intensidade ou da potência, usam-se geralmente os dispositivos conhecidos pelos nomes de *tudo ou nada*, por *impulsões* ou *contínuos*. A regulação por *tudo ou nada* consiste em alternar períodos de aquecimento máximo com períodos de aquecimento nulo.

Só é aplicável em certos casos particulares, isto é, quando o regulador actua sobre um interruptor electromagnético ou sobre os contactos dum circuito de aquecimento.

A regulação por *impulsões* consiste na emissão, em intervalos de tempo regulares, de corrente, accionando dois relés correspondentes, um a uma zona *muito quente* e o outro a uma zona *muito fria*, em relação à temperatura desejada. Esta regulação por impulsões, pode ser proporcional à diferença entre a temperatura base escolhida e a temperatura existente no momento da acção reguladora.

A regulação *contínua* não é mais que a regulação por impulsões em que os períodos das impulsões tendem para zero.

Há certas aplicações, (tratamentos térmicos, indústrias de produtos químicos, metalurgia do alumínio, etc.) que necessitam uma temperatura bem determinada em cada ponto, mas, variando durante a marcha da operação. Neste caso a regulação, embora complexa, tem sido resolvida por meio de reguladores chamados de *programa*, que obrigam o meio a seguir um programa de aquecimento ou de resfriamento fixado de ante-mão.

Os reguladores usados na regulação pirométrica, são: termométricos, pirométricos de dilatação, pirogalvanométricos e piropotenciométricos.

a) *Reguladores termométricos.*

A fig. 48, representa esquematicamente um regulador deste tipo em que:

F = ambiente cuja temperatura se quer regular;

T = termómetro;

S = fonte luminosa;

$C_1$  e  $C_2$  = células foto-eléctricas.

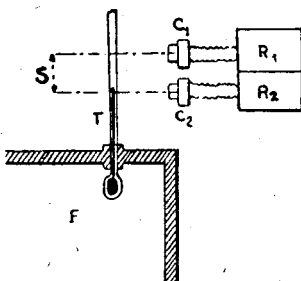


Fig. 48

Se a temperatura é muito elevada o líquido do termómetro intercepta o feixe que incide sobre  $C_1$  e a corrente que ela fornece é cortada, e este corte actua sobre um relé que reduz a energia admitida.

Se a temperatura desce de forma a que o feixe luminoso incida sobre a célula  $C_2$ , esta acciona o relé correspondente ao aumento da corrente.

b) *Reguladores pirométricos de dilatação.*

Os pirómetros de dilatação foram usados já há bastante tempo, mas o seu uso diminuiu muito devido à irre-

versibilidade e outras anomalias dos sólidos com que eram construídos vulgarmente.

Voltaram, porém, a ser utilizados por se ter verificado que há sólidos cuja dilatação é muito regular e que mantinham a quente, uma rigidez suficiente para esta aplicação. Em geral a haste dilatável é feita de invar, piro, silício fundido, etc..

São vários os sistemas de reguladores dêste tipo e cujo modo de actuar facilmente se compreende.

A fig. 49, representa o esquema duma instalação dêste tipo em que :

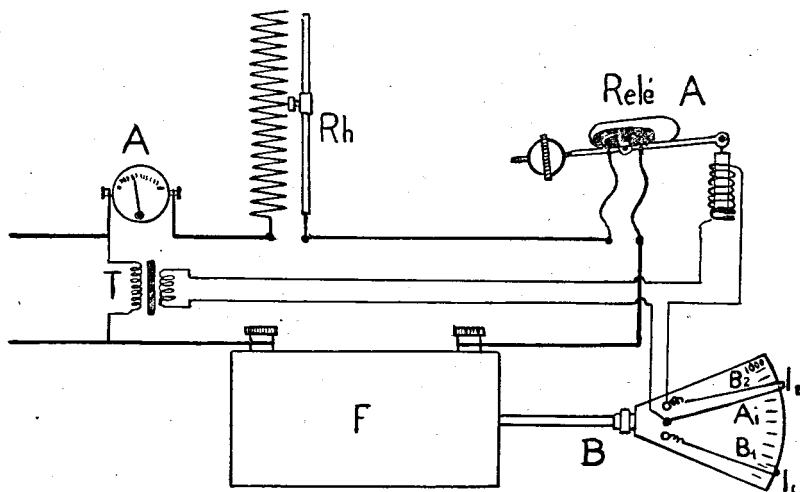


Fig. 49

Rh = reóstato.

A = amperímetro.

F = forno eléctrico.

T = transformador auxiliar.

B = prômetro de dilatação.

Trata-se dum regulador de laboratório por *tudo ou nada*.

Suponhamos que o índice I<sub>2</sub> está regulado para 800°. Quando a agulha A<sub>1</sub> indica esta temperatura, um dos seus pontos toca o braço B<sub>2</sub> e é lançada uma corrente no relé

que interrompe a corrente ao forno. Uma vez resfriado a agulha desfaz o contacto e a corrente volta a restabelecer-se.

c) *Reguladores pirogalvanométricos.*

A fig. 50, representa o esquema dum regulador d'êste tipo.

A e B = terminais, cuja posição é regulável.

C = haste pirométrica.

D = quadro do galvanómetro.

R = relé.

G = galvanómetro.

Os pirómetros utilizados na prática são de resistência ou termo-eléctricos. Quando se trata dos primeiros, o pirómetro é constituído

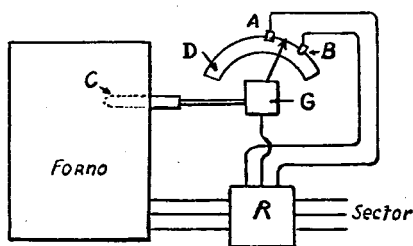


Fig. 50

por uma resistência sensível que é intercalada num ramo duma ponte de Wheatstone alimentada por uma fonte auxiliar.

A toda a variação da temperatura corresponde uma variação da resistência

e, por conseguinte, uma variação da corrente no galvanómetro.

Quando se trata de binário termo-eléctrico, a corrente que passa no galvanómetro é função da temperatura.

Tanto um como outro dos dispositivos são empregados, mas os pirómetros de resistência não são usados para temperaturas superiores a 500°, ao passo que os outros vão até 1800°. Se se trata de temperaturas mais altas, substitue-se a parte pirométrica por um pirómetro óptico.

O princípio d'êstes aparelhos baseia-se no deslocamento da agulha do galvanómetro, que, atingindo os terminais A ou B, correspondentes às temperaturas limites admissíveis, acciona o relé R, que por sua vez faz variar a energia fornecida pelo sector.

#### d) Reguladores piropotenciométricos

Êstes reguladores são mais precisos que os anteriores e o seu princípio é o seguinte:

Uma resistência callbrada A B C, fig. 51, sendo percorrida por uma corrente constante, produz-se em A B uma queda de tensão que depende da posição do ponto móvel B. Esta d. d. p. opõe-se à f. e. m. do binário termo-eléctrico D e será igual quando a agulha do galvanómetro G estiver no zero.

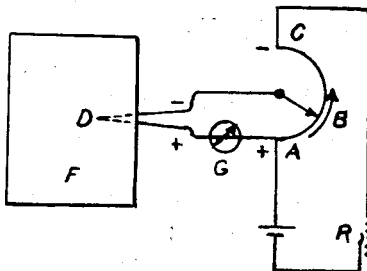


Fig. 51

Êstes aparelhos têm, além disso, um dispositivo destinado a ferir e regular a corrente que percorre o circuito A B C por meio dum potenciômetro, duma segunda pilha, dum reóstato e dum compensador da temperatura da soldadura fria.

A regulação é automática se o deslocamento do ponto B sobre a resistência A B C o fôr.

Nalguns sistemas, baseados neste princípio, a regulação efectua-se pelo deslocamento do ponto B sobre a resistência A B C. Noutros, o ponto B tem uma posição fixa, regulada uma vez por tôdas, conforme a temperatura desejada.

#### 36. REGULAÇÃO POR DESLOCAMENTO DOS ELECTRODOS.

Quando as temperaturas são muito elevadas, como é o caso dos fornos de arco, não é utilizável a regulação pirométrica e recorre-se então ao deslocamento dos electrodos para se obter essa regulação.

São variados os tipos de reguladores, applicando êste princípio, diferindo apenas na maneira como é conseguido o movimento útil.

Esta regulação pode depender da tensão, da intensidade ou duma combinação dos dois, isto é, da potência.

E assim, aparecem os diversos reguladores conforme se pretende manter constante a tensão, a intensidade da corrente, a potência ou a impedância.

a) *Tensão constante.*

A regulação, a tensão constante é muito pouco usada, pois, mantendo-se constante a tensão da central eléctrica, seria necessário uma grande variação da intensidade da corrente para se produzir uma variação de tensão nos terminais do arco, de forma a ser utilizada nos reguladores.

b) *Intensidade constante.*

Esta regulação não apresenta os inconvenientes da precedente, pois a intensidade é independente da tensão secundária do transformador, convindo, especialmente aos fornos de arco livre ou ao caso de se tratar dum arco único sobre a carga.

Se se trata de fornos de arco sobre o metal, tipo Héroult, por exemplo, esta regulação quasi não permite o escorvamento automático dos arcos, pois o primeiro electrodo vindo em contacto com o metal a fundir, penetra demasiado, podendo partir-se, porquanto a intensidade neste instante é nula, visto os outros electrodos ainda não estarem em contacto com o metal.

Devido a esta penetração pode acontecer que, no escorvamento, a intensidade atinja um valor muito grande.

No caso ainda de se tratar de dois arcos sobre metal dum forno monofásico, supostos já escorvados, a sua regulação será instável, pois a repartição da tensão total entre estes dois arcos em série é indeterminada.

Com este modo de regulação, qualquer que seja o tipo de forno, é conveniente prever um dispositivo adicional de levantamento dos electrodos no caso de faltar a corrente.



c) *Potência constante.*

Este modo de regulação tem propriedades semelhantes às da regulação a intensidade constante.

Só apresenta algum interesse prático quando o forno está montado numa rede cuja tensão apresenta variações consideráveis.

Caso a tensão da rede de alimentação seja constante, cai-se no caso da regulação anterior.

d) *Regulação diferencial.*

Esta regulação diferencial ou a impedância constante, como também é conhecida, é representada pela equação:

$$U - A I = 0 \quad \text{sendo } A \text{ constante e}$$

igual a  $A = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$

Como  $L\omega$  é uma quasi constante, segue-se que este modo de regulação se confunde com a regulação a  $\cos \varphi$  constante, visto que a regulação a  $\cos \varphi$  constante é, praticamente, dependente também da resistência.

Este modo de regulação apresenta grandes vantagens, sobretudo sob a forma aperfeiçoada:

$$U - A I - B = 0$$

a duas constantes, como é o caso dalguns reguladores.

Nesta fórmula,  $U$  é a tensão entre o electrodo e a massa;  $I$  é a corrente no electrodo e  $A$  e  $B$  são constantes.

Por construção, os aparelhos dão a solução seguinte:

Se  $U - A I - B = 0$ , o electrodo fica imóvel.

Se  $U - A I - B > 0$ , o electrodo desce e  $I$  aumenta até que a igualdade seja satisfeita.

Se  $U - A I - B < 0$ , o electrodo sobe até se dar a igualdade.

Vejamos quais as vantagens dêste sistema sôbre os de intensidade ou potência constante.

No caso dum forno tipo Hérault, os electrodos descendo simultâneamente para a carga, poder-se-á crear o escorvamento automático dos arcos em série com um limite sufficiente das pontas de corrente.

Um electrodo, encontrando por exemplo um bocado de metal, toma um atrazo sôbre o outro, e o equilibrio eléctrico permanece, sem inconveniente.

No caso da falta de tensão, os electrodos sobem sem haver necessidade de dispositivo especial.

e) *Comando dos electrodos.*

Os diversos aparelhos baseados nos princípios enunciados, podem ser classificados segundo o modo de comando dos electrodos, que é realizado, em geral, por um motor eléctrico ou um dispositivo hidráulico, cada um com as suas vantagens e os seus inconvenientes.

Além do mais, devem ser robustos, isentos de órgãos delicados, de contactos, de máquinas girantes, etc., visto trabalharem em meios onde a temperatura é elevada e bastante poeirentos.

Sob êste ponto de vista tem vantagens o comando hidráulico, embora tenham o inconveniente que provém da vedação das válvulas e das juntas.

Sendo a água incompressível, a acção reguladora é mais rápida nos aparelhos hidráulicos, contrariamente ao que acontece com o comando por motor, que nem pode atingir a sua velocidade regime, nem parar instantâneamente, visto terem uma certa inércia.

Duma maneira geral, o comando hidráulico é mais vantajoso, mas nem por êsse motivo o comando eléctrico deixa de ter uma larga applicação.

Tudo depende da maneira como os aparelhos foram concebidos, isto é, da sua robustez, perfeição e eficiência.

Quando se trata de reguladores com motor eléctrico, êste

pode ser accionado por contactos comandados por relés ou pode ser accionado directamente pelo regulador.

Casos há em que o motor eléctrico é alimentado por um gerador eléctrico com vários enrolamentos indutores de acção diferencial e outros em que os relés e contactos são substituídos por rectificadores estáticos.

Usam-se também reguladores um pouco mais complexos onde actuam simultaneamente os rectificadores e os enrolamentos indutores.

Quanto aos reguladores hidráulicos, são vários os tipos usados, mais ou menos engenhosos e perfeitos, cada um com as suas vantagens e inconvenientes.

Pode-se dizer, contudo, que os reguladores por deslocamento de electrodos são os mais usados e que o sistema empregado, motor eléctrico ou hidráulico, depende, como dissemos, da sua robustez e da sua boa actuação.

### 37. REGULAÇÃO POR VARIAÇÃO DE TENSÃO.

Como para o deslocamento dos electrodos se dispõe uma certa energia, um material relativamente custoso e delicado, tem-se procurado regular os fornos de arco, duma maneira mais prática, mantendo o electrodo fixo e regulando a tensão nos terminais do forno.

A regulação é feita pela mudança automática do número de espiras em serviço no primário do transformador de alimentação.

Este modo de regulação apresenta muitas vantagens, mas apresenta o inconveniente do preço elevado dos transformadores especiais que são precisos para esta regulação.

### 38. AUTO-REGULAÇÃO.

A auto-regulação só é applicável a casos muito particulares de fornos de indução e de acção indirecta sobre a substância a aquecer.

A fig. 52 representa o esquema dum forno dêsse tipo (Ugine-Infra) em que:

- A = solenoide (primário);
- B = cadinho (núcleo magnético);
- C = secundário;
- D = núcleo em chapas de ferro;
- E = isolante térmico.

O enrolamento indutor primário A é alimentado por corrente alternada de frequência industrial; o enrolamento secundário C reduz-se a uma espira fechada envolvendo o núcleo magnético B que forma o cadinho em liga magnética cujo ponto de Curie é bem determinado.

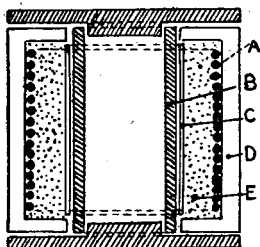


Fig. 52

As correntes induzidas no circuito secundário libertam uma quantidade de calor proporcional a  $R I^2$ , a resistência  $R$  dependendo unicamente da natureza do secundário, ao mesmo tempo que

$I$  varia com a indução do núcleo B e com as características eléctricas do circuito.

Este calor transmite-se ao cadinho B que, envolvido pelo isolante térmico E, é além disso, sede de correntes de Foucault e do fenómeno histerético que contribuem para aumentar a temperatura.

Quando esta temperatura de núcleo atinge o ponto de Curie da liga considerada, a sua indução magnética diminui bruscamente, assim como as correntes induzidas no secundário o calor libertado por este. O núcleo arrefece e torna-se magnético; a corrente induzida aumenta de novo, elevando a temperatura do secundário e do cadinho.

Tendo determinado as características do forno de maneira que o calor libertado, depois da diminuição do magnetismo do núcleo, devido à passagem pelo ponto de Curie, seja inferior à quantidade de calor necessário à manutenção da

temperatura desejada, obtém-se um forno auto-regulador, em que a temperatura de auto-regulação é precisamente a do ponto de Curie do núcleo magnético.

A espira, constituindo o secundário, não magnético às temperaturas de utilização, é de níquel ou aços inoxidáveis. A constituição do cadinho varia conforme a temperatura que se deseja, mas em geral é de ferro-níquel, uma liga de ferro-níquel e cobalto ou ainda de ferro-cobalto.

As variações de tensão da rede até 10 por cento, não provocam variação de temperaturas além de 2° c.

O núcleo magnético contém uma série de elementos intermutáveis. Substituindo alguns destes elementos por outros de composição diferente, consegue-se uma gama de temperaturas de auto-regulação.

## CAPÍTULO VI

### Algumas aplicações dos fornos

#### 39. RAZÕES DO SEU DESENVOLVIMENTO.

Durante os últimos anos o forno eléctrico para fins industriais tem encontrado um campo de aplicação cada vez maior, de maneira que, actualmente, não só constitue um sério rival de todos os outros tipos de fornos industriais, como já os suplantou em grande parte.

O grande desenvolvimento metalúrgico que se está a operar durante esta guerra deve-se incontestavelmente ao forno eléctrico, que permite certas delicadezas de operações, que até aqui não eram possíveis com os fornos clássicos de combustível e até nalguns tipos de fornos eléctricos.

O consumo mundial de energia eléctrica em 1937, em aplicações electrotérmicas, foi de 26 bilhões de kw-h.

Os maiores consumidores foram: Estados-Unidos,  $13,3 \times 10^9$  kw-h; Alemanha,  $8 \times 10^9$  kw-h; Suécia,  $10^9$  kw-h; Suíça,  $532 \times 10^6$ ; Grã-Bretanha,  $920 \times 10^6$ ; França,  $2,6 \times 10^9$ ; Itália,  $6 \times 10^9$  kw-h; Japão,  $4 \times 10^9$  kw-h.

Em Espanha montaram-se os primeiros fornos eléctricos para aço em 1919; no ano de 1933 já havia 33 fornos com capacidade que iam de 250 kgs. até 30 toneladas. Em 1942 havia 55 fornos de arco para aço; 10 de indução de baixa e alta frequência para ferro, bronzes e ferro-ligas.

Em Portugal, pode dizer-se, que as aplicações electro-térmicas quasi não existem a não ser no que diz respeito a aparelhos de uso doméstico e, mesmo assim, em escala reduzida.

No entanto, estamos certos de que tão depressa a energia eléctrica apareça no mercado em abundância e a preço compensador, o desenvolvimento da electrotermia industrial deverá fazer-se em larguíssima escala, suprimindo muitas das nossas deficiências industriais do presente e permitindo a criação de novas e importantes indústrias futuras. Uma das razões que mais tem contribuído para o desenvolvimento do aquecimento eléctrico, é a flexibilidade com que a energia eléctrica se presta à realização de todas as aplicações térmicas, permitindo uma gama extensa e contínua de temperaturas de algumas dezenas ou centenas de graus centígrados a vários milhares. Uma segunda razão reside nas novas condições da mecânica e da metalurgia, impondo materiais novos, métodos e tratamentos cada vez mais complexos e severos, necessitando para a sua realização, um agente manejável, preciso, independente de todas as outras condições físicas e químicas, e que só a electricidade pode satisfazer por completo.

Há ainda uma terceira razão importante que se pode filiar nos progressos cada vez maiores na construção dos fornos, satisfazendo todas as exigências técnicas e económicas, quer quanto ao modo de aquecimento e regulação, quer quanto à sua ligação às redes de distribuição.

Pode dizer-se que o seu principal e único inconveniente parece residir no preço da energia, mas mesmo esse, estamos em crer, é muitas vezes o produto dum raciocínio simplista do que propriamente o resultado de factos de ordem técnica e económica.

---

Se compararmos os fornos eléctricos com os outros fornos de combustível, conclue-se que possuem sobre estes múltiplas vantagens, entre as quais podemos destacar os seguintes:

### 1.a) *Rendimento.*

O rendimento térmico dos fornos eléctricos é melhor do que o dos de combustível, visto que o desprendimento do calor se faz no próprio interior do forno, sendo as perdas insignificantes.

É devido a este facto que os fornos eléctricos são comparáveis, economicamente, aos fornos ordinários, apesar do seu custo e dos seus acessórios ser muito mais elevado e, por consequência, os juros e a amortização do primeiro estabelecimento serem bastantes maiores.

É por isso também que há uma tendência nítida para aumentar cada vez mais a potência dos fornos eléctricos, de forma a diminuir-se o número de kw-h por tonelada de produto fabricado.

A fig. 53, dá-nos idéia clara das perdas caloríficas nos diferentes tipos de fornos.

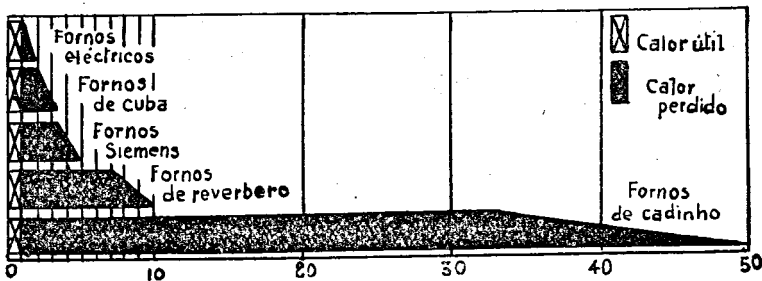


Fig. 53

### 2.a) *Instalação.*

Sobre este ponto de vista, os fornos eléctricos apresentam grandes vantagens, tais como :

a) *Economia de mão de obra* — porquanto as manobras são simples, necessitando pouco pessoal e sem especialização.

Muitas das manobras fazem-se automaticamente, graças aos aparelhos cada vez mais aperfeiçoados, não falando já na



economia de mão de obra que resulta de não haver cargas nem descargas de combustível.

b) *Espaço ocupado* — por tonelada de produto tratado, é muito mais reduzido no caso dos fornos eléctricos do que nos fornos de combustível. Além disso não há precisão de armazéns, nem reservatórios para combustíveis e a superfície das construções é comparavelmente menor.

c) *Facilidade de obter energia eléctrica* necessária para a produção de calor, visto que algumas oficinas metalúrgicas, por exemplo, podem-se situar onde fôr possível obter essa energia ou então torna-se mais fácil o seu transporte do que o do combustível.

d) As instalações de fornos eléctricos são indubitavelmente mais limpas do que as dos outros fornos, bastando para isso não existir, em muitas, o carvão.

e) A segurança das instalações é também mais eficiente nas instalações electrotérmicas, visto a electricidade se prestar à montagem de dispositivos de segurança, de um funcionamento seguro e rápido como acontece com os interruptores automáticos, campainhas, relés de temperatura, relés ampere-métricos e voltmétricos, etc.

### 3.<sup>a</sup>) *Qualidade dos produtos fabricados.*

Não falando nas indústrias em que é indispensável o forno eléctrico, a qualidade dos produtos saídos destes fornos é muito superior à dos outros, devido principalmente às seguintes razões:

a) regulação fácil e precisa da temperatura.

b) relações geralmente mais completas que nos fornos ordinários, visto podêrem atingirem-se mais altas temperaturas.

Certas reacções mesmo, não podem ser realizadas senão nos fornos eléctricos.

A alta temperatura permite igualmente ter uma escória bem fundida que se separa mais facilmente.

c) a atmosfera do forno não oxidante, é uma vantagem preciosa para as reacções de redução.

d) a agitação do produto que se obtém nalguns tipos de fornos eléctricos, assegura uma homogenização notável do produto.

e) pode-se resfriar facilmente o forno por meio de circulação exterior de água.

#### 40. ESCOLHA DO TIPO DE FORNO.

Quanto à escolha dos diferentes tipos de fornos (resistência, arco e indução) para determinadas operações, ela depende da natureza da operação que se quer efectuar e da consideração, de ordem técnica e económica, dos diversos factores que mais caracterizam esses fornos.

Comparemos, resumidamente, alguns desses factores que mais influem nessa escolha:

##### a) *Temperatura.*

É com os fornos de arco que se conseguem maiores temperaturas (3000 a 3600°) quasi que instantaneamente. Contudo nos fornos de indução sem núcleo magnético atingem-se temperaturas de 3000°.

Nos outros tipos de fornos as temperaturas são um pouco mais baixas.

As resistências auxiliares suportam sem grande dificuldade temperaturas de 1300 a 1500°, e com resistências de grafite e em fornos fechados, conseguem-se temperaturas de 3000°.

Estas altas temperaturas tem permitido fabricar certos produtos químicos que antes se não fabricavam, e permite, além disso, melhorar, de forma sensível, a qualidade de muitos outros.

Este factor (temperatura) não é, como vemos, notavelmente diferente para cada tipo de forno e, por consequência não é dos que maior influência tem para a sua escolha.

b) *Agitação do banho.*

Já vimos em que consiste, qual a origem e explicação dêste fenómeno.

Vimos também que esta agitação só se produz automaticamente nos fornos de indução com núcleo e sem núcleo.

É uma vantagem dêstes fornos na fabricação de certas ligas especiais e de certos produtos que necessitam dum grau elevado de homogeneidade.

c) *Electrodos.*

A necessidade de electrodos — gráficos ou amorfos — nos fornos de arco, constitue um dos grandes inconvenientes dêste tipo de fornos, tanto sob o ponto de vista técnico como económico.

Sob o ponto de vista técnico, porque além de tornar carburante a atmosfera do forno, o que nem sempre é útil, arrasta consigo uma série de problemas que, embora se resolvam, são sempre mais ou menos dispendiosos. Entre êles podemos citar os que se referem aos aparelhos necessários à regulação hidráulica ou eléctrica dos electrodos, e as precauções e cuidados a haver na introdução dos electrodos nos fornos, isto é, a necessidade de montagem de pára-chamas e economizadores de forma a diminuir o quanto possível as perdas térmicas. Sob o ponto de vista económico, há a considerar, além do mais, o consumo de electrodos nas diferentes operações metalúrgicas, quer êles sejam consumidos na obtenção do próprio arco, quer se consumam por oxidação ou deterioração. Em fornos de arco de capacidade superior ou igual a 10 toneladas, empregam-se com vantagem os electrodos contínuos, tipo Söderberg, que permitem usar matérias primas mais baratas e não tem os inconvenientes de se oxidarem e partirem como os electrodos interictos.

Têm o inconveniente do consumo ser duas vezes maior do que os de grafite, mas em compensação o seu custo é aproximadamente cinco vezes menor.

O consumo de electrodos é função da duração da opera-

ção metalúrgica, da natureza do produto a fabricar, da capacidade do forno e do regime do trabalho, contínuo ou intermitente.

No fabrico do aço, por exemplo, o consumo dos electrodos de grafite é calculado em média 7,5 kgs. por tonelada fabricada, valor bastante elevado quando se trata de fornos de mais de 10 toneladas, mas valor baixo para fornos de menos capacidade.

Usam-se também electrodos de carvão amorfo, muito mais baratos, mas consumindo-se muito mais e apresentando outros inconvenientes que os tornam cada vez mais em desuso.

O facto dos outros tipos de fornos, indução ou resistência, não precisarem de electrodos, faz com que os metalurgistas lhe dêem a preferência tôdas as vezes que a operação térmica a executar o permite.

d) *Factor de potência.*

Quanto ao factor de potência, os fornos de indução estão, como vimos, em desigualdade flagrante com os fornos dos outros tipos.

Foi êste um dos motivos porque não tiveram o desenvolvimento que ora se está operando, devido a fabricarem-se hoje em dia, condensadores robustos e relativamente baratos que permitem melhorar, duma maneira satisfatória, êsse mau factor de potência.

Apesar disso, ainda são instalações um tanto ou quanto delicadas e custosas com que é preciso contar na montagem dos fornos de indução.

e) *Transformadores.*

Os fornos de arco e resistência são alimentados a tensões relativamente baixas, contrariamente ao que acontece com os fornos de indução em que a tensão pode ser mais elevada.

Por êsse motivo os primeiros fornos citados necessitam de transformadores de corrente para a sua alimentação.

Êstes transformadores devem possuir características par-

ticulares, isto é, devem ser estudados especialmente para o duplo ponto de vista das variações bruscas da carga e para a regulação da tensão no secundário. São por esse motivo largamente dimensionados tanto no cobre como no ferro para poderem suportar, sem aquecimento perigoso, as sobrecargas que podem durar vários minutos. Como em certos fornos de arco, os curto-circuitos são freqüentes, limita-se a corrente de curto-circuito dando uma forte reatância ao circuito secundário do forno. Esta reatância é obtida pela reatância própria do transformador, sempre muito maior do que nos transformadores ordinários; pela reatância dos condutores de B. T. que ligam o forno ao transformador e ainda pela interposição de bobinas adicionais no circuito.

Este último processo é o mais vantajoso, embora não seja o mais económico.

A determinação total da reatância do circuito é um ponto delicado a considerar, pois se ela é muito fraca a intensidade de curto-circuito pode tomar valores perigosos, e se é grande de mais, baixa demasiado o  $\cos \varphi$  trazendo consigo os inconvenientes conhecidos e apontados.

A regulação da tensão secundária faz-se, em geral, pela variação do número de espiras do primário para o que os transformadores são munidos das respectivas tomadas. Este processo tem o inconveniente de se aplicar apenas a regulações que não ultrapassam 25%, além de que, o isolamento das tomadas é um tanto ou quanto difícil e não é de aconselhar um grande número delas.

A regulação pode ainda fazer-se intercalando entre a rede e o primário do transportador um auto-transformador com tomadas, um *survolteur-devolteur* ou um regulador de indução.

A tendência actual é aumentar cada vez mais a capacidade dos transformadores para igual carga de produto fabricado.

Assim, um forno antigo, por exemplo, de três toneladas, era equipado com transformadores de 750 KVA e presentemente, os fornos de igual capacidade, são providos com transformadores de 1500 KVA.

f) *Natureza da corrente.*

Nos fornos eléctricos pode-se empregar indistintamente a corrente contínua ou alternada, excepto nos fornos que são destinados a operações de electrolise ígnea (fabricação do alumínio, cálcio, etc.), em que só se emprega a corrente contínua ou nos fornos de indução onde só se pode usar a c. alternada.

Pode-se, contudo, dizer que fora destes casos particulares, é a corrente alternada que se usa, já porque são muito mais vulgares as distribuições neste tipo de corrente, já porque o consumo, de correntes muito intensas e com variações bruscas (casos dos fornos de arco), davam origem a avarias dos colectores dos dinamos e a perturbações prejudiciais nos rectificadores, mais delicados, que os transformadores vulgarmente usados.

Além disso, devido à facilidade de transformação da c. alt., pode-se trazer, as tensões de transporte, até junto dos fornos e, por consequência, com as vantagens que provém desse facto, isto é, menores perdas joule em linha.

Quanto ao número de fases com que é fornecida, depende da origem da corrente.

Se é produzida na própria oficina metalúrgica e se usam fornos monofásicos, a corrente é, em geral, também monofásica, embora se não preste à produção da força motriz auxiliar.

No caso da oficina ser alimentada por um sector exterior de c. alt. trifásica, os fornos são trifásicos, e caso sejam mono ou difásicos, são alimentados por intermédio de transformadores especiais utilizando montagens tipo Scott ou então, montam-se 3 ou um múltiplo de 3 fornos monofásicos de maneira a não trazer grande desequilíbrio à rede de alimentação.

No caso especial dos fornos de indução sem núcleo magnético, em que a frequência da corrente difere bastante da frequência normal, a alimentação dos fornos é feita por

intermédio de alternadores adequados, de tríodos ou aparelhos de faísca, segundo a potência e capacidade dos fornos.

Quando os fornos se destinam a usos industriais e de potências superiores a 50 KW, empregam-se usualmente correntes de média frequência, compreendida entre 300 e 3.000 p. p. s. e são obtidas por meio de alternadores homopolares com ferro girante, isto é, sem bobinas no rotor e cujo rendimento já vai a 96 % para alternadores de 1500 KVA.

Nos fornos laboratoriais ou para potências inferiores a 50 KW, empregam-se frequências que vão de 10'000 a 100'000 p. p. s., obtidas em aparelhos faiscadores. Se a potência dos fornos vai até 250 KW e as frequências usadas estão compreendidas entre 10000 e 1'000'000 de p. p. s. os geradores são do tipo termiônico que permitem a obtenção e a variação das altas frequências.

*g) Consumo de energia.*

É um dos dados mais importantes a que é necessário atender quando se pretende projectar qualquer instalação electrometalúrgica.

Este consumo é função do produto a fabricar, da qualidade do mesmo, da capacidade do forno, do tipo do forno, da duração da operação e do regime de trabalho.

Na fabricação do carboneto de cálcio, em fornos de 5000 kw, o consumo de energia anda à volta de 3.400 kw-h por tonelada. Este consumo baixa para 3.000 kw-h e ainda menos, quando se trata de fornos de potência igual ou superior a 1.500 kw. Eis mais alguns consumos:

*Cianamida cálcica* — 300 a 400 kw-h por tonelada.

*Alumínio* — 18.000 a 25.000 kw-h por tonelada de produto fabricado.

*Zinco* — 90 a 100 kw-h para fusão de 1.000 kgs. em fornos de indução.

*Metais leves* — 500 kw-h por ton. nos fornos de indução com núcleo e 650/750 nos fornos de resistência.

*Latão* – 200 240 kw-h para a fusão de uma tonelada.

*Ligas não ferrosas* – Em fornos de 1 tonelada, temos os seguintes consumos médios:

410 kw-h em fornos de resistência

230    »    »    »    » arco

220    »    »    »    » indução com núcleo.

*Níquel e suas ligas* – 600/700 kw-h em fornos de indução s/ núcleo.

*Metais cuprosos* – 500 kw-h por ton. em fornos s/ núcleo.

*Bronze* – 270 kw-h por tonelada, em fornos de radiação.

*Electrosiderurgia.*

*Fabricação da gusa* – a partir do mineral:

a) num alto forno de 1800 kw-h consumo de 1750 a 3000 kw-h por tonelada de gusa.

b) nos fornos de curva abertos 2000 a 3500 kw-h por tonelada, sem recuperação de gases.

*Fabricação de aços.*

700 a 720 kw-h por tonelada em fornos de radiação.

130 kw-h por ton. em fornos de arco para refinação de aço vindo líquido dos fornos de combustível.

430 kw-h por ton. em fornos de arco, a partir da gusa no estado líquido com sucata fria.

500 a 900 kw-h por ton. em fornos de arco, a partir da sucata de aço frio.

1.000 kw-h por ton. em fornos de arco, a partir da gusa líquida com junção de mineral.

1.500 kw-h por ton. em fornos de arco, a partir da gusa sólida, com junção de mineral.

400/500 kw-h por ton. em fornos de indução com núcleo a partir das sucatas.

500 a 800 kw-h por ton. em fornos de indução sem núcleo a partir de sucatas.

Os números que damos em cima, servem apenas para uma primeira aproximação, visto estes consumos, como já acentuamos, dependerem de variados factores.

Por exemplo, na fabricação do aço, num forno com a capacidade de uma tonelada, o consumo anda à volta de



1.000 a 1.200 kw-h por tonelada produzida; num forno de 10 toneladas, o consumo baixa para 750 kw-h e se fôr de 30 toneladas, baixa ainda para 450 a 500 kw-h.

Casos semelhantes se notariam com a variação dos outros factores.

*h) Capacidade, potência e manobra.*

A capacidade dos fornos tem aumentado de dia para dia, visto conseguir-se, além do mais, uma diminuição sensível no consumo de energia, representando, no entanto, como inconveniente maior o facto de ser mais difícil a tiragem das escórias.

A potência tem também, como já notámos ao falarmos nos transformadores, uma tendência a aumentar, visto que quanto maior fôr essa potência, mais rápida será a operação metalúrgica e, conseqüentemente, maior será a produção.

As manobras vão sendo também cada vez mais rápidas, quer quanto à carga, quer durante à marcha, quer ainda na descarga.

Os fornos modernos, de certa capacidade, são de abóbada ou de cadinho móvel, de forma a fazer-se a carga mecanicamente. Consegue-se desta maneira aumentar substancialmente a produção dos fornos.

Analisando, pois, cada um destes factores em face da operação metalúrgica que pretendemos e das circunstâncias em que ela deve ser produzida, podemos, em princípio, escolher o tipo do forno mais conveniente, embora não satisfaça em todos os seus aspectos.

#### 41. POSSÍVEIS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS.

Não é tarefa fácil dar uma resenha completa das possíveis aplicações dos aparelhos electrotérmicos, tanto mais que as suas vantagens são enormes e os seus inconvenientes diminutos, aumentando, por esse facto, as suas aplicações de momento para momento.

### 1.º) *Fornos de resistência.*

As suas aplicações são variadíssimas e podemos resumilas no quadro seguinte:

Aquecimento directo (a substância a tratar forma a própria resistência).	{	Fabricação inicial do carboneto de cálcio.
		Fabricação de certas ferro-ligas (ferro-tungsténio), por exemplo.
		Fabricação de carborundo, abrasivos em geral.
		Fabricação de produtos nitrados (cianamida).
		Fabricação de fósforo, de ácido fosfórico.
Aquecimento com resistência auxiliar	{	Fusão de metais e ligas { Ferrosos: ferro fundido. Não ferrosos: bronzes, alumínio. Preciosos: ouro e prata.
		Tratamentos térmicos { Têmpera, recosido. Cementação, nitruração, cianuração. Galvanização, estanhagem.
		Tratamentos térmicos e químicos { Fabricação da cianamida no forno túnel. Têmpera, recosido, decoração de vidro. Esmaltagem, envernizamento. Aquecimento de matérias plásticas. Baquelização, vulcanização, Cerâmica.
	{	Electrólise ignea { Alumínio, cálcio.
	{	Aquecimento no vazio { Metais e ligas para instrumentos de radiologia e vidraria científica.
		Aquecimento de sólidos { Pré-aquecimento para rebitagem, forjagem, etc. Aquecimento dos cilindros dos laminadores. Secagem de madeiras, etc.
	Aquecimento de líquidos diversos: água, banhos de electrólise, etc.	

Não incluímos na lista, os fornos destinados à indústria da alimentação (padarias, confeitarias, etc.), nem as diversas estufas aquecidas electricamente e cujo uso é tão vulgaríssimo.

Já descrevemos a forma de alguns fornos de resistência mas, como é fácil de calcular, essa forma é muito variada, dependendo em grande parte do uso a que se destinam. Quanto às suas dimensões são também muito variadas, pois, vão desde os pequenos fornos de laboratório até ao forno da *Compagnia generale di Elettricità*, de Milão, que mede  $14\text{m} \times 6,2\text{m}$ , com uma altura de  $7,5\text{m}$ , destinado ao tratamento térmico de chapas de aço.

No nosso país, poucas ou nenhuma das aplicações citadas se fazem. Segundo cremos, apenas se fabrica algum carboneto de cálcio e esse mesmo em quantidade deminuta.

No entanto, verifica-se que quasi todas as aplicações se poderiam fazer com vantagem enorme para a nossa vida económica, principalmente as que dizem respeito à cianamida cálcica, fusão de metais, esmaltagem, cerâmica, etc.

Se considerarmos, porém, os pequenos fornos officinaes, as suas aplicações tem grandes possibilidades e permitem desenvolver a nossa indústria metalúrgica, como sejam: têmpera, cementação, recosido, aquecimento para forjagem e rebitagem, etc.

---

Há um forno que, embora classificado como *forno de resistência*, possui propriedades tão características que melhor é classificá-lo como *forno de irradiação*.

Este forno permite a obtenção de altas temperaturas e está, por esse facto, a ser bastante empregado na indústria metalúrgica.

Consta dum corpo de aquecimento com elementos resistentes em carbono grafítico, dispostos no centro do forno e irradiando livremente sobre a carga e sobre as paredes do mesmo.

A densidade de corrente admissível é considerável ( $500\text{A}/\text{cm}^2$ ), resultando por esse motivo a possibilidade de executar operações rápidas e com um bom rendimento.

Êstes fornos, tanto mono como trifásicos, são duma instalação económica; dum manejo fácil; a temperatura atingida é praticamente limitada pela qualidade do revestimento refractário; a qualidade dos produtos fabricados é melhor do que a dos produtos dos fornos de arco, visto conseguir-se uma temperatura uniforme em toda a massa e, não haver carburação e a atmosfera do forno se poder ajustar ao trabalho desejado. O revestimento é bastante mais durável, porque o seu cozimento se faz perfeito e regular. Êste tipo de forno presta-se a variadas operações metalúrgicas, principalmente a fusões de metais ferrosos e não ferrosos e à redução de óxidos metálicos.

Com êstes fornos já é praticável a fusão dos metais no vazio, melhorando as suas propriedades mecânicas, em particular, a resistência à fadiga.

## 2.º) *Fornos de arco.*

Os fornos de arco ainda são presentemente os mais empregados nas grandes operações metalúrgicas e muito especialmente na metalurgia do ferro, quer no tratamento directo dos minérios (alto-fornos e fornos de curva), quer em aceraria.

Nesta última aplicação são mais usados os fornos tipo Héroult, isto é, com arcos de acção directa com soleira não condutora.

Há, como já vimos, presentemente uma tendência notável em aumentar as tensões aplicadas (de 70 e 90 passaram a 150, 180 e 250 volts) e as potências dos transformadores para igual carga. Está determinado, contudo, que para um forno duma capacidade dada, existe uma tensão máxima nos arcos e uma velocidade de fusão que não é conveniente ultrapassar devido aos revestimentos.

As condições de utilização tem melhorado constantemente, quanto aos dispositivos empregados nas cargas, assim como aos aperfeiçoamentos na mobilidade do cadinho ou da abóbada, permitindo fazerem-se as cargas muito rapidamente.

Os fornos de arco têm um rival importante nos fornos de indução de baixa e alta frequência, que estão a tomar um lugar de destaque nas modernas oficinas metalúrgicas, mercê das suas características eléctricas, de regulação e de aplicação.

É natural prever-se um maior desenvolvimento num futuro mais ou menos próximo, mas presentemente ainda é o forno de arco o mais utilizado.

São vários os inconvenientes que possuem estes fornos: tais como: consumo de electrodos, regulação dispendiosa, escorvamento, alimentação a muito baixa tensão, etc.

Outros inconvenientes ainda, tornam-nos impróprios para certas operações metalúrgicas, como acontece com os fornos de arco livre, em que a sua acção é bastante superficial e o calor do arco transmite-se apenas por condução às camadas inferiores do banho. Resulta daí, para este tipo de fornos de arco, um funcionamento lento e um rendimento pouco económico.

O escorvamento é também, como dissemos, um sério inconveniente, visto trazer como consequência uma carga momentânea excessiva, que pode causar perturbações à fonte de alimentação.

Os electrodos, como já salientamos, exigem dispositivos especiais para a sua manobra, quer a regulação se faça automática, quer pela vigilância contínua dos operários.

O rendimento calorífico destes fornos é mais baixo do que o de qualquer outro tipo de forno eléctrico, visto que às causas comuns que provocam as perdas de calor, há a acrescentar neste caso, as perdas produzidas pelo aquecimento dos electrodos e as que provem do calor dispendido na vaporização dos mesmos e cujos vapores se condensam ou se queimam.

No caso vulgar dos electrodos de carbono, esta condensação pode constituir um sério inconveniente se houver a temer a carburação da substância a tratar.

Apesar destes inconvenientes todos, os fornos de arco são largamente empregados, porque as suas vantagens sobrelevam os seus defeitos, especialmente comparados com os fornos de combustíveis.

Uma das aplicações mais importantes dos fornos de arco, é na aceraria ou, melhor dizendo, em tóda a metalurgia do ferro.

A montagem de altos-fornos eléctricos para redução dos minérios de ferro, tem tido um desenvolvimento extraordinário, mormente nos países onde o carvão escasseia e a energia hidro-eléctrica abunda, como acontece na Suécia, Noruega, Itália, Japão, etc.

O problema siderúrgico português só poderá ser resolvido, quanto a nós, quando houver possibilidade de montar altos-fornos eléctricos ou fornos eléctricos de cuva, para tratamento dos minérios.

Estes últimos serão, talvez, mais aconselháveis, porquanto não exigem, como os altos-fornos, um tão longo período de laboração e permitem fazer o aproveitamento da energia sobranste dos meses de inverno.

Quanto à aplicação dos fornos de arco em aceraria, comparados com os fornos clássicos de combustível para o mesmo fim (convertidor, Siemens e cadinho), as suas vantagens são notáveis, quer sob o ponto de vista puramente metalúrgico, quer económico.

A confirmar esta nossa afirmação, basta dizer-se que a produção mundial de aço eléctrico passou de 100.000 toneladas no ano de 1910 a mais de 2.000.000 no ano de 1939.

Tódas as operações de aceraria se podem fazer nos fornos eléctricos, quer quando se parte das gusas dos altos-fornos, quer das sucatas; contudo na maioria dos casos o aço eléctrico é fabricado a partir do próprio aço: proveniente das sucatas, de aços de inferior qualidade, ou ainda, dos aços vindos dos convertidores.

Uma outra aplicação importante dos fornos de arco, é na fabricação de aços especiais e que nos últimos anos se tem desenvolvido extraordinariamente, tanto para a indústria automobilística, como para a indústria dos armamentos, principalmente no que diz respeito aos aços de níquel e de níquel-crómio.

Na fabricação dos aços especiais, o forno de arco, tem

como concorrente a considerar, o forno de alta frequência que possui, além doutras, as vantagens seguintes: ausência de atmosfera oxidante, fixação fácil do teor em carbono do banho, boa agitação natural, facilidade de marcha intermitente e alta temperatura.

Em contra-partida, os fornos de alta frequência têm uma capacidade limitada, necessitam de matérias primas de composição conhecida e as despesas de instalação são ainda muito elevadas.

A indústria de aço moldado também deve ao forno de arco a sua enorme expansão e os progressos relativos à sua qualidade. Estes fornos podem ser alimentados com sucatas de baixo preço, dando depois produtos de qualidade superior. Prestam-se a marchas intermitentes e as perdas são relativamente pequenas.

O emprego do forno de arco na fabricação de ferro-fundido tem tomado também um grande desenvolvimento, depois que se exige ao ferro-fundido características mecânicas bastante diferentes, das que possui quando provém dos antigos *cubilot*.

O uso do forno de arco é justificado por permitir o emprego de sucatas de pouco valor, assim como permite a fabricação de ferros com fraco teor de carbono, enxôfre e fósforo. Muitas vezes o forno de arco corrige os ferros líquidos provenientes do *cubilot*.

O forno de arco só excepcionalmente é usado na fusão de metais não ferrosos, mas é o forno por excelência para a fabricação do carboneto de cálcio e das ferro-ligas.

É neste domínio que a sua aplicação também podia ser muito útil no nosso país, visto termos matérias primas suficientes para alimentar qualquer oficina destes produtos. A produção mundial anual de ferro-manganés é da ordem de um milhão de toneladas; do ferro-crômio de 30.000 toneladas e de ferro-tungstênio e ferro-molibdeno, anda à volta de 15.000 toneladas.

Estas ferro-ligas, destinadas ao fabrico de aços inoxidáveis e especiais, são preparadas a partir dos minérios, dos quais alguns temos em abundância no nosso sub-solo.

### 3.º) *Fornos de indução de baixa frequência.*

Nestas aplicações referir-nos-emos apenas aos fornos de canal submergido, visto que os de canal horizontal estão actualmente postos de lado, devido aos inconvenientes que apresentam em relação a estes.

Este tipo de forno é hoje largamente usado na fundição de metais e muito particularmente das ligas cuprosas, como seja o latão, bronze, maillechorts, assim como na fusão de metais ligeiros, zinco e afinação do ferro-fundido. Os fornos deste tipo mais usados são os de Ajax-Wyatt, Russ, Siemens, etc.

Quando destinados à fusão de metais leves, sofrem algumas modificações tendentes a facilitar a limpeza do canal, que facilmente se obturava.

O emprêgo destes fornos em siderurgia é limitado. Procura-se utilizá-lo na preparação do ferro fundido, ou melhor na afinação do ferro saído do *cubilot*.

São pouco usados na aceraria devido em parte à sua pequena capacidade relativa, e à dificuldade de obter altas temperaturas das escórias que são aquecidas indirectamente.

É contudo indicado na fabricação de aços especiais e superfinos, visto não haver a temer a acção dos electrodos e a temperatura ser de fácil regulação.

### 4.º) *Fornos de indução de alta frequência.*

Os fornos de indução sem núcleo são aplicados principalmente na fundição de metais, mas applicam-se com enormes vantagens em trabalhos laboratoriais, no tratamento térmico dos metais, no aquecimento de matérias não condutoras por indução indirecta, etc.

Embora algumas destas aplicações estejam no regime



de experiência, há tôdas as probabilidades que passem à prática corrente.

Laboratorialmente applicam-se porque permitem obter temperaturas elevadas, aquecimentos rápidos e trabalhar no vazio, tendo prestado enormes serviços no domínio da metalurgia, da química, dos produtos refractários e no aquecimento de matérias isolantes.

Na fusão dos metais têm, como dissemos, o seu campo de acção, porquanto permitem uma fusão muito rápida, uma homogenidade das ligas, uma regulação precisa da temperatura, uma supressão dos agentes exteriores, etc., etc.

Na fabricação do aço têm êstes fornos um papel importante a desempenhar, mormente nos aços de qualidade. Na preparação dos aços rápidos, aços de carbono para ferramentas e aços de níquel-crómio, os fornos de H. F. estão tendo um enorme incremento. Outro tanto acontece com os aços inoxidáveis em que o muito fraco teor em carbono lhe dá a propriedade exigida.

É fácil de prever neste caso de siderurgia ainda um maior desenvolvimento dêstes fornos, com o aumento sempre crescente da sua capacidade.

---

As ligas de níquel e o níquel puro têm no forno H. F. o aparelho de fusão apropriado, visto a ausência de impurezas sulfurosas. A fusão das ligas de cupro-níquel e níquel-crómio, sendo bastante delicada, faz-se também em boas condições nestes fornos.

Na fusão dos metais leves há a contar com o fenómeno da agitação, que pode ser prejudicial devido à pouca densidade do banho, havendo por vezes, necessidade de se elevar a frequência, ou então fazer-se o aquecimento por indução indirecta, isto é, com cadinho condutor.

No tratamento térmico dos metais estão indicados, como vimos, os fornos de resistência. No entanto quando se trata de aquecimentos rápidos, de aquecimentos parciais de certas peças metálicas, como sejam: extremidades de barras ou

tubos, a ogivagem dos projecteis e tantos, tantos outros trabalhos semelhantes, o forno de H. F. é de aconselhar.

Ainda uma das grandes e utilíssimas aplicações consiste na têmpera superficial das peças de aço, aproveitando-se o efeito pelicular que caracteriza êstes fornos.

5.º) No que dissemos neste capítulo, não foi mais do que um pequeno esboço das possibilidades presentes e futuras dos aparelhos electrotérmicos.

Difícil é imaginar até que ponto essas aplicações poderão ir, tanto nas indústrias já montadas, como em futuras indústrias a montar e cuja realidade só é possível com a flexibilidade dos fornos eléctricos.



## Bibliografia

- Prof. Ezequiel de Campos** — *O enquadramento geo-económico da população portuguesa.* — 1943.
- Rebêlo Pinto** — *Os rios portugueses ao serviço da Nação.*  
— Bolet. Ord. Engenheiros — Julho. — Agosto — 1943.
- Levasseur** — *L'ectrochimie et L'électrometallurgie.* — 1939
- Escard** — *Fours électriques industriels.* — 1924.
- Escard** — *L'Électrometallurgie du fer e de ses alliages*  
— 1920.
- Stansfield** — *El horno eléctrico.* — Trad. 1921.
- Caussergues (Ch. Clausel)** — *Électro-Sidérurgie.* — 1923.
- Minssieux** — *Les fours électriques à induction* — Electricité  
— Fev.-Mar. 1943.
- Déribéré** — *Les fours électriques à arc.* — Electricité —  
Décembre — 1943.
- *La régulation des fours électriques* — Revue  
Générale de l'Électricité. — N.º 13/936.
- Leblanc** — *L'arc électrique.* — 1922.
- Boilleau** — *Le chauffage électrique* — 1920.
- Bruhat** — *Cours d'électricité* — 1929.
- Vásquez** — *Modernos hornos eléctricos para fundir acero.*  
Anales de Mecânica y Electricidade. — Mayo  
a Julio — 1942.
- A. de Stavraky** — *L'alimentation des arcs à courant alternatif* —  
Revue Électricité y de Mécanique —  
Set.-Oct. — 1930.
- M. V. Genkin** — *Etude analytique du dispositif Boucherot.* —  
Revue Electricité de Mécanique. — Set.-Oct.  
1930.
- Asea** — *Fours à induction à haute et à double fréquence.*

**Bethenod**

– *Diagramme de fonctionnement des fours électriques.* – Revue Générale de l'électricité – Nov. 1926.

**Henri George**

– *Fours électriques à rayonnement à résistances de carbone et leur application à fusion des métaux* – Revue G. de l'Elect. – Juin. 1934.

**J. Minssieux**

– *L'état actuel du four à haute fréquence dans l'industrie.* – R. G de l' E – Janvier – 1939.

**Georges Flusin**

– *Eletrothermie appliquée.*

**L. Guillet**

– *Métallurgie Générale.* – 1922.

# Índice

RAZÃO DE SER.

## CAPÍTULO I

### Generalidades

- 1 – Resenha histórica.
- 2 – Classificação dos fornos eléctricos.
- 3 – Princípio geral das transformações electrotérmicas. Lei de Joule.

## CAPÍTULO II

### Fornos de resistência

- 4 – Classificação destes fornos.
- 5 – Rendimento calorífico.
- 6 – Variação das resistências.
- 7 – Constituição e propriedades das resistências auxiliares.
- 8 – Factor de potência.
- 9 – Funcionamento do forno em função da resistência.

## CAPÍTULO III

### Fornos de arco

- 10 – Noções gerais.
- 11 – Arco com corrente contínua.
- 12 – Regime eléctrico do arco.
- 13 – Estabilidade do arco.
- 14 – Rendimento eléctrico do arco.
- 15 – Arco com corrente alternada.
- 16 – Características do arco alternado.
- 17 – Coeficiente de estabilidade. Circuito de alimentação dos arcos c. alt.

- 18 – Estudo analítico do dispositivo Boucherot, fora das condições de ressonância perfeita.
- 19 – Factor de potência dos fornos de arco.
- 20 – Diagrama de funcionamento.
- 21 – Disposição dos arcos nos fornos.

## CAPÍTULO IV

### Fornos de indução

- 22 – Princípios gerais.
- 23 – Modos de realização.
- 24 – Classificação dos fornos de indução.
- 25 – Forno com núcleo magnético.
- 26 – Características principais.
- 27 – Fornos sem núcleo magnético.
- 28 – Princípio geral.
- 29 – Efeito pelicular ou de Kelvin.
- 30 – Potência utilizada no secundário.
- 31 – Rendimento.
- 32 – Factor de potência.
- 33 – Agitação do banho.

## CAPÍTULO V

### Regulação automática dos fornos

- 34 – Sistemas principais.
- 35 – Regulação pirométrica.
- 36 –       »       por deslocamento dos electrodos.
- 37 –       »       »       variação de tensão.
- 38 – Auto-regulação.

## CAPÍTULO VI

### Algumas aplicações dos fornos

- 39 – Razão do seu desenvolvimento.
- 40 – Escolha do tipo de forno.
- 41 – Possíveis aplicações.

#### BIBLIOGRAFIA.