



Instalações Térmicas

3º Ano



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

Os fornos eléctricos são empregues nos processos tecnológicos baseados no aquecimento de materiais ou de produtos por meio de energia eléctrica (os quais são chamados processos electrotérmicos).

O uso da energia eléctrica para a geração de calor oferece as seguintes vantagens:

1. Concentração de muita energia em volumes pequenos, o que resulta em temperaturas muito altas que não podem ser alcançadas por outros métodos de geração de calor; altas taxas de aquecimento típicas de modelos modernos de fornos metalúrgicos e relativamente pequenas dimensões dos fornos.



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

2. Fácil controle e distribuição da temperatura no espaço de trabalho dos fornos, o que torna possível o aquecimento uniforme de corpos grandes (nos fornos de aquecimento directo) ou calor selectivo (para os casos de zona de têmpera, zona de fusão, etc) e proporcionar condições favoráveis para o controle automático dos processos térmicos e tecnológicos.
3. O aquecimento pode ser combinado com outros efeitos úteis produzidos pela energia eléctrica (electrólise, processos de electro-erosão, acção electrodinâmica no metal fundido, etc



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

4. Como não tem lugar a combustão de combustível nos fornos eléctricos, a pressão nos mesmos pode ser usada como factor para controlar o processo metalúrgico (nos fornos eléctricos de vácuo e de compressão) ou uma atmosfera protectora ou inerte pode ser produzida no forno para proteger o material aquecido dos produtos nocivos do ar atmosférico. A não existência de produtos de combustão torna possível aumentar o coeficiente de utilização de calor e deixar o forno eléctrico perfeitamente limpo.

5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

5. Outra vantagem da energia eléctrica é que ela pode ser facilmente transportada e fornecida aos consumidores (por linhas de transmissão de energia eléctrica)

As desvantagens dos fornos eléctricos são as seguintes:

1. Custo elevado de operação quando comparados com as instalações de fornos de chama, i. e., o custo de 1 joule de energia eléctrica fornecida ao forno é apreciavelmente mais alto que o custo de 1 joule de energia obtida pela combustão do combustível no forno.



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

2. Alto custo dos fornos eléctricos e daí grandes gastos de capital e grande consumo de material caro;
3. Baixa confiabilidade, durabilidade e reparabilidade;
4. A operação dos fornos eléctricos depende da confiabilidade dos serviços de fornecimento de energia eléctrica.

Os processo electrotérmicos são usados nos seguintes casos:

- quando o processo não pode ser efectuado de outro modo a não ser com aquecimento eléctrico;



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

- ❑ quando o aquecimento eléctrico pode aumentar a qualidade dos produtos;
- ❑ quando o aquecimento eléctrico pode melhorar as condições de trabalho fazendo com que a operação seja menos pesada e mais segura.
- ❑ quando o mesmo produto pode ser produzido a um custo mais baixo (por exemplo com uma pequena perda de metal na oxidação e uma alta produtividade num processo electro-térmico) ou quando a produção é organizada com poucos gastos de capital.



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

As aplicações industriais de fornos eléctricos tornou-se possível só depois da produção da energia eléctrica ter começado em grande escala. No presente os processos electotérmicos consomem acima de 15% de toda a energia eléctrica usada na indústria.

Na indústria de ferro e de metal os fornos eléctricos são empregues para fundir e refundir aços de alta qualidade (comumente chamados aços eléctricos) fundir aço para carcaças, para produzir ligas de ferro, aquecer o metal antes de tratamentos plásticos (laminagem, forja....) e tratamentos químicos.



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

Os fornos eléctricos podem ser classificados pelo princípio de geração de calor isto é pelo método de conversão de energia eléctrica em calor nos seguintes grupos:

1. Fornos de resistência, nos quais o calor é gerado numa resistência sólida ou líquida quando se deixa atravessar pela corrente eléctrica segundo a lei de Joule-Lenz:

$$Q = I^2 \cdot r \cdot \tau \quad (\text{J}) \quad \mathbf{(5.1)}$$



Forno eléctrico de resistência



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

2. Fornos de indução nos quais a energia eléctrica é transferida pela lei de indução electromagnética para o metal a ser aquecido que está num campo eléctrico variável e daí é dissipada e absorvida em forma de calor pela lei de Joule-Lenz
3. Instalações de aquecimento dieléctrico nas quais o material dieléctrico ou semicondutor é posto num campo magnético variável e entre as placas de um condensador ocorre o aquecimento através da polarização das moléculas (também chamadas perdas dieléctricas)



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

4. Fornos eléctricos nos quais o aquecimento ocorre através da libertação de energia térmica resultante da descarga de um arco eléctrico existente num meio gasoso (ar, atmosfera inerte) ou vácuo. Com uma condutividade eléctrica suficientemente alta do material aquecido e o calor adicional pode ser formado pela Lei de Joule-Lenz o que torna possível chamar a tais instalações, instalações combinadas ou fornos de arco – resistência. Os fornos nos quais a energia da descarga de um arco é usada para gerar fluxos de plasma de baixa temperatura (temperaturas de 5 000 a 20 000 K) são chamados fornos de plasma-arco



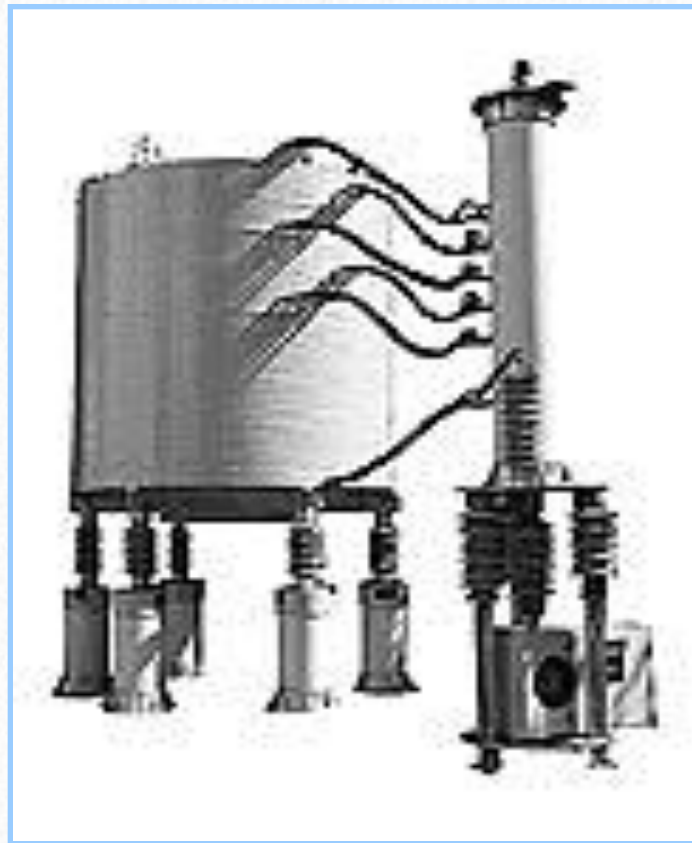
5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

5. Instalações para aquecimento num electrólito; elas operam segundo o princípio de utilização do calor de uma descarga eléctrica que aparece a tensão de 200-400 V num gás (hidrogénio) cavitando na superfície de um objecto quente, que serve de cátodo numa electrólise de alcalinos ácidos ou carbonatos de metais alcalinos
6. Instalações de aquecimento a base de bombardeamento de electrões nos quais energia de alta tensão (10-35 kV) campo eléctrico é convertido em energia cinética de electrões rápidos que é dissipada em forma de calor quando bombardeia a superfície do metal que está a ser aquecido.



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral

7. Instalações de aquecimento por laser



Forno eléctrico de arco



5 - Fornos eléctricos, leis básicas e descrição geral



Forno eléctrico de Indução



Forno eléctrico tipo contentor



5.1- Conceitos

Um forno a operar pelo método de aquecimento eléctrico deve ser abastecido de energia eléctrica dentro de certos parâmetros.

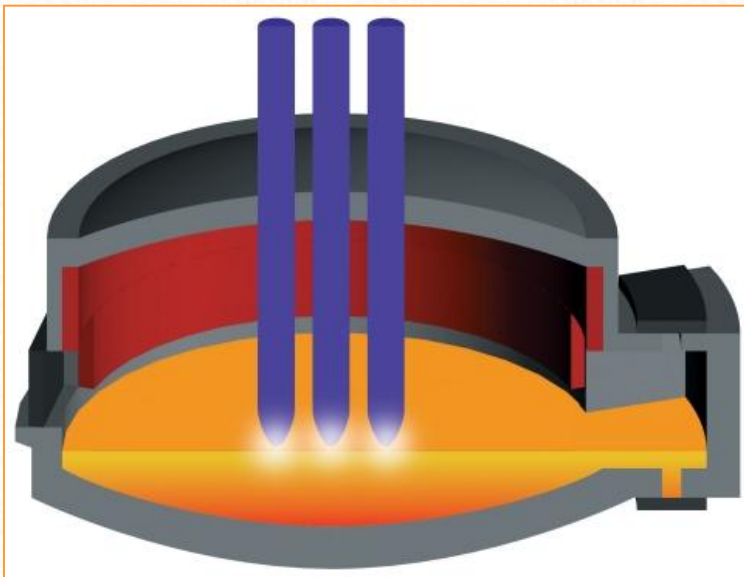
Por exemplo um forno de arco-eléctrico de uma aciaria é alimentado de corrente de grande intensidade em AC com uma frequência industrial de (50 Hz) a relativamente baixa tensão, mas como a energia eléctrica transmite-se mais eficientemente a alta tensão estes fornos têm um transformador abaixador de tensão.

Os fornos de indução são alimentados por energia eléctrica de elevada frequência deste modo requerem conversores de frequências.



5.1- Conceitos

Os fornos eléctricos de arco a vácuo funcionam com energia de DC de baixa tensão acima de 75 V. As Instalações de fornos electrónicos são providas de um transformador elevador de tensão e um rectificador de alta tensão produzindo corrente contínua de alta tensão entre 10 a 25 kV.



Forno eléctrico de arco



Forno eléctrico de Indução



5.1- Conceitos

Uma instalação eléctrica de fusão é um complexo de equipamento eléctrico e térmico que geralmente é constituída por três partes principais:

- O próprio forno no qual a energia eléctrica é convertida em calor e o metal ou outro material é aquecido pelas leis de transferência de calor.
- Uma subestação eléctrica que acomoda as fontes de energia e o equipamento eléctrico
- Um painel de controle com botões e interruptores para controlar o forno eléctrico e o seus mecanismos auxiliares e instrumentos de medição e controle.



5.1- Conceitos



Painel de Controle de um Forno Eléctrico



5.2- Características

As características principais de um forno eléctrico de aquecimento ou de fusão são as seguintes:

- O conversor de energia empregue, ou a potência proporcional fornecida ao forno;
- As dimensões do forno (por exemplo o seu volume);
- A capacidade (dimensão) da operação periódica do forno (isto é a quantidade de material aquecido ou fundido descarregado pelo forno por ciclo de operação) ou a produtividade horária (t/h) de um forno contínuo.



5.2- Características

Os fornos eléctricos diferem dos de chama pelas seguintes razões específicas:

1. Durante a operação de um forno eléctrico de aquecimento ou fusão a energia se perde de duas maneiras, como calor (no espaço da fornalha) e como energia eléctrica (em outros componentes da instalação). Por isso, a equação de balanço tem de ser complementada pelo balanço de energia de um dos dois seguintes tipos:
 - a) O balanço de energia que compare a quantidade de energia eléctrica fornecida ao forno durante um certo período, com o consumo dessa energia nesse período;



5.2- Características

$$W_s = W_{cp} + W_{aux} + W_{per} + W_{ele} = \frac{1}{\eta_e} (W_{cp} + W_{aux} + W_{per}) \quad (5.2)$$
$$= \frac{W_{cp}}{\eta_o} \quad (\text{ MJ ou kW} \cdot \text{h})$$

- b) O balanço de potência que compara a potência retirada do fornecedor de energia num dado momento, com a consumida pelo forno eléctrico.

$$P_s = P_{cp} + P_{aux} + P_{per} + P_{ele} \quad (\text{MW}) \quad (5.3)$$



5.2- Características

Onde:

- **$W_s (P_s)$** - é a energia eléctrica (potência) retirada da fonte para consumir os processos;
- **$W_{cp}(P_{cp})$** - é a energia eléctrica (potência) útil consumida no processo;
- **$W_{aux} (P_{aux})$** - é a energia eléctrica (potência) consumida no aquecimento das linhas de transmissão e na estrutura do forno;
- **$W_{ele} (P_{ele})$** - é a energia eléctrica (potência) usada para compensar as perdas de energia eléctrica nos componentes e circuitos do forno;



5.2- Características

- W_{per} (P_{per}) - é a energia eléctrica (potência) para compensar o calor perdido do espaço do forno;
- η_e e η_o - são respectivamente os rendimentos eléctrico e total da instalação.

As duas fórmulas de balanço têm dados de entrada e saída similares mas podem ter magnitude diferente nos vários momentos de operação do forno.



5.2- Características

A produtividade anual de um forno eléctrico é dada pela seguinte expressão:

$$Q_m = \frac{m_o}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} T(1 - 0,01\alpha) \quad (\text{t/ano}) \quad (5.4)$$

Onde:

m_o – é a massa da carga (t);

T – é o fundo de tempo anual (8760 para operação de 24 horas por dia);

α – é a percentagem do total do tempo de paralisações a quente e a frio do forno;

τ_1 – tempo em que o forno está em preparação para aquecer (h);

τ_2 – tempo de fusão ou aquecimento do metal (h);

τ_3 – tempo para o processo de tratamento (por exemplo: tempos de redução ou oxidação da carga fundida, tempo de recozimento etc..) (h);



5.2- Características

Do balanço de energia para o período de aquecimento tem-se:

$$\tau_2 = \frac{i \cdot m_o + P_{per} \cdot \tau_1}{\bar{P}_r - P_{per}} \quad (\text{h}) \quad (5.5)$$

Onde:

i - é a energia teoricamente requerida para aquecer ou fundir uma unidade de massa de carga, por exemplo a entalpia unitária kW·h/t;
 P_r - é a potência média fornecida ao forno

$$\bar{P}_r = k_{ut} S_r \cos \varphi \eta_e \quad (\text{kW}) \quad (5.6)$$

Onde:

- S_r - é a potência taxada da fonte de energia (kVA)
- k_{ut} - é o coeficiente de utilização do elemento de aquecimento durante o período de aquecimento



5.2- Características

$$k_{ut} = \frac{1}{\overline{P_r} \tau_2} \int_0^{\tau_2} P(\tau) \cdot d\tau \quad (6.7)$$

A produtividade de um forno eléctrico de uma instalação metalúrgica é que determina os índices técnico – económicos de operação (consumo unitário de energia, parcela das despesas constantes no custo de produção, parcela das despesas constantes na construção da instalação e em aquisições) dependem de duas grandes características: da massa da carga, m e da potência taxada S_r .



5.2- Características

O consumo de energia eléctrica unitário é determinado do balanço de energia da instalação:

$$W_{un} = \frac{W_s}{m_o} = \frac{1}{n_e} \left(i + i_p + \frac{P_{1per}\tau_1}{m_o} + \frac{P_{2per}\tau_2}{m_o} + \frac{P_{3per}\tau_3}{m_o} \right) \quad (\text{kW}\cdot\text{h/t}) \quad (5.8)$$

Onde:

i_p é a energia teoricamente requerida para o processo tecnológico ser desenvolvido durante o período τ_3 (kW·h/t)



5.3 -Fornos de resistência eléctrica

Instalações de Acção Directa

Nas instalações de acção directa o objecto a ser aquecido é ligado directamente ao circuito eléctrico, o que provoca a libertação de energia eléctrica no material do objecto. A intensidade de libertação de calor pode ser caracterizada pela evolução da densidade volumétrica de calor q_v W/m³ e a equação diferencial da energia toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho} \quad (5.9)$$

5.3 -Fornos de resistência eléctrica

Instalações de Acção Directa

O tempo para um aquecimento praticamente constante do material é:

$$\tau_h = \frac{\bar{c}\rho\Delta T}{q_v} = \frac{m_o\bar{c}\Delta T}{P_h - P_{per}} \approx \frac{m_o\bar{c}\Delta T}{P_h} \quad (\text{s}) \quad (5.10)$$

Onde:

P_h - é a potência eléctrica (W)

P_{per} - é a potência do calor perdido para o ambiente (W)

m_o - é a massa do objecto aquecido (kg)

c - é o calor específico médio do material (kJ/(kg·K))

ΔT - é a diferença de temperatura no início e fim do aquecimento (K)



5.3 -Fornos de resistência eléctrica

Instalações de Acção Directa

Aumentando o P_h consegue-se elevadas, taxas de aquecimento e rendimentos térmicos (acima de 0,9 – 0,95) e baixos consumos unitários de energia eléctrica. Com baixas perdas de calor o forno pode ser construído sem isolamento o que diminui sobremaneira a complexidade do mesmo. A temperatura de aquecimento pode ser alta entre 1250 e 1500 K (para o aço).

5.3 -Fornos de resistência eléctrica

Instalações de Acção Directa

A potência de aquecimento depende das propriedades físicas do material a ser aquecido (condutividade σ) e das dimensões geométricas do corpo (comprimento l e secção transversal s) à tensão dada V :

$$P_h = V^2 \sigma \frac{s}{l} \quad (\text{W}) \quad (5.11)$$

A condutibilidade eléctrica dos condutores varia com a temperatura dos mesmos. Contudo para manter uma dada potência ou para varia-la de acordo com o calor específico é necessário variar a tensão fornecida numa grande escala.



Calor latente de algumas substâncias puras

O calor latente de fusão (L_f) ou (i) de uma substância qualquer é a quantidade de calor (Q) necessária para que 1g desta substância passe do estado sólido para o estado líquido.

substância	Calor latente de fusão (<i>cal/g</i>)
água	80
álcool	25
alumínio	95
cloreto de sódio	124
cobre	49
chumbo	6
enxofre	119
estanho	14
ferro	64
hidrogênio	14
mercúrio	2.7
nitrogênio	6.1
ouro	15
oxigênio	3.3
prata	21
zinco	24



5.4 -Entalpia unitária

A energia teoricamente requerida para aquecer ou fundir uma unidade de massa de carga, por exemplo a entalpia unitária $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ é a energia necessária para aquecer o metal da temperatura ambiente até a temperatura de fusão adicionada do calor latente da substância;

$$i = c_p (t_{\text{fusão}} + t_{\text{amb}}) + L_f \quad \text{kW} \cdot \text{h}/\text{t} \quad (5.12)$$

Onde:

c_p - é o calor específico médio da carga;

$t_{\text{fusão}}$ - é a temperatura de fusão da carga;

t_{amb} - é a temperatura a que se encontra a carga;

L_f - é o calor latente da carga.



Ponto de fusão de alguns metais

Metais	Símbolo	c (J.kg⁻¹.K⁻¹)	Temp. de Fusão °C
Alumínio	Al	896	660
Antimônio	Sb	209	631
Prata	Ag	234	961
Bismuto	Bi	121	271
Cobre	Cu	385	1083
Estanho	Sn	225	232
Ferro	Fe	460	1536
Magnésio	Mg	1030	650
Mercúrio	Hg	138	-38
Níquel	Ni	439	1453
Ouro	Au	130	1063
Platina	Pt	134	1769
Chumbo	Pb	130	327
Silício	Si	753	1410