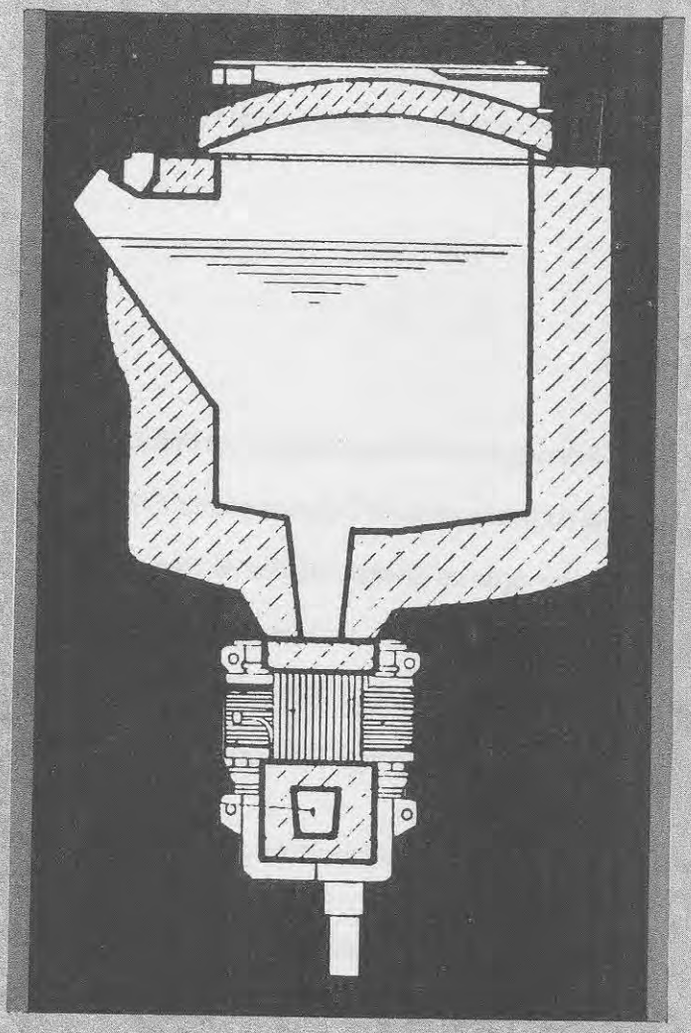
LIV 088
PROCEL
ex.2

de Conservação
ergia Elétrica

Fornos Elétricos a Indução



PROCEL

PROGRAMA NACIONAL DE
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

DIRETORIA ELETROBRÁS

- Presidente – Mario Penna Bhering
- Diretor de Coordenação – Marcos José Marques
- Diretor de Planejamento e Engenharia – José Luiz Alqueres
- Diretor de Gestão Empresarial – Carlos Alberto Pádua Amarante
- Diretor de Operação e Sistemas – José Marcondes Brito de Carvalho
- Diretor Econômico-Financeiro – Luiz Aníbal de Lima Fernandes

PUBLICAÇÕES

– Manual de Conservação de Energia Elétrica em Prédios Públicos e Comerciais

– Relatório Final do II Seminário de Conservação de Energia Elétrica

– Manual de Conservação de Energia Elétrica na Residência

– Anais do Seminário Internacional de Conservação de Energia Elétrica

– Manual de Conservação de Energia Elétrica em Condomínios Residenciais

– Manual de Conservação de Energia Elétrica em Estabelecimentos Comerciais e de Serviços (alta tensão)

– Manual de Conservação de Energia Elétrica em Estabelecimentos Comerciais e de Serviços (baixa tensão)

– Manual de Conservação de Energia Elétrica na Indústria (alta tensão)

– Manual de Auto-Avaliação dos Pontos de Desperdício de Energia Elétrica no Comério e Serviços

– Manual de Auto-Avaliação dos Pontos de Desperdício de Energia Elétrica na Indústria

– Panorama da Eletrotermia

– Manual de Conservação de Energia Elétrica – Fornos Elétricos a Arco Direto

– Manual de Conservação de Energia Elétrica – Fornos Elétricos a Arco Subm

– Manual de Conservação de Energia Elétrica – Fornos Elétricos a Resistênci

Reg.41829
Manual de conservaç
LIV 088 PROCEL ex.2

IN
088

Manual de Conservação de Energia Elétrica

Fornos Elétricos a Indução

Eletrobrás/Procel
ACERVO DOCUMENTAL
DO/DOM
REG. 088
DATA: 13/11/97

COORDENAÇÃO : CNBE

Eng. Luiz Eduardo Lima
Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia - FDTE

Eng. Silvio Koscky da Matta
Aços Villares

Eng. Aristidis Betzios
Asea Brown Boveri

EQUIPE TÉCNICA

Coordenação Geral
Eng. Fernando de Souza Alves Ramos

Coordenação Técnica
Eng. Carlos Alberto Schoeps

AUTORES

Eng. Antonio Klein Neto
Inductotherm Indústria e Comércio Ltda.

Eng. Lauro da Costa
General Motors do Brasil S.A.

Eng. Maurício Franco Ramos
Metal Leve S.A.

Eng. René Angelini
Borlem S.A. Empreendimentos Industriais

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

F83 Fornos elétricos a indução / Antonio Klein Neto ... [et al.]. — Rio de Janeiro : PROCEL, 1989
(Manual de conservação de energia elétrica)

1. Energia elétrica - Conservação. 2. Fornos de indução - Consumo de energia. 3. Fornos elétricos - Consumo de energia. I. Klein Neto, Antonio. II. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Brasil). III. Serie.

CDD - 333.7932
333.7917
621.4025
621.31
CDU - 621.8.037
621.316.1
621.365

89-0891

APRESENTAÇÃO

Em nosso país, os processos eletrotérmicos têm responsabilidade por cerca de 30% do consumo total de eletricidade na indústria, e estudos recentes do Comitê Nacional Brasileiro de Eletrotermia – CNBE mostram um potencial imediato de conservação da ordem de 1.500 gWh como resultado, principalmente, de medidas simples, de caráter gerencial, na operação dos fornos a arco, redução e indução.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, com o objetivo de orientar o usuário de fornos elétricos na otimização de sua utilização, com conseqüente aumento de sua produtividade, assinou convênio com o CNBE para a elaboração de Manuais de Conservação de Energia Elétrica em Fornos Elétricos.

Foi elaborado um conjunto de quatro manuais, concebido dentro de conceitos eminentemente práticos, de forma a facilitar o seu emprego por engenheiros e técnicos diretamente envolvidos com a operação dos tipos de fornos elétricos mais utilizados no Brasil: a resistência, a indução, a arco direto e a arco submerso.

Este Manual trata especificamente da conservação de energia em Fornos Indutivos, que, pela elevada quantidade de unidades instaladas no Brasil, oferecem um grande potencial de conservação de energia elétrica.

Deve-se registrar, ainda, o reconhecimento do PROCEL à equipe técnica que elaborou o presente texto, e a expectativa de que esta publicação atenda plenamente ao interesse e às necessidades dos usuários.

Atenciosamente,

Marcos José Marques
Diretor de Coordenação da ELETROBRÁS
Secretário Executivo do GCCE/PROCEL

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 5

2 PRINCÍPIOS DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA 7

3. FORNOS DE INDUÇÃO 10
3.1. Introdução 10
3.2. Comparação entre os fornos de indução e fornos a combustível quanto ao consumo de energia 10
3.3. Fornos de indução a canal 11
3.3.1. Características principais 11
3.3.2. Aplicação de fornos de indução a canal 13
3.4. Fornos de indução a cadinho 15
3.4.1. Caracterísiticas principais 15
3.4.2. Frequência de alimentação 15
3.4.3. Forno a cadinho de frequência de rede 16
3.4.4. Forno de indução a cadinho de média frequência 21
3.4.5. Operação de forno, de média frequência com e sem pé de banho 22
3.4.6. Aplicação de fornos de indução a cadinho 22

4. PERDAS ENERGÉTICAS EM UMA INSTALAÇÃO DE FUSÃO POR INDUÇÃO 25
4.1. Perdas energéticas em processo de fundição 25
4.1.1. Perdas de energia indiretas 25
4.1.2. Perdas diretas 25
4.2. Perdas de energia em fornos de indução 26
4.2.1 Balanço energético de uma instalação de fusão por indução 27
4.2.2 Perdas no transformador 28
4.2.3. Perdas nos cabos de alimentação e nas conexões 29
4.2.4 Perda nos capacitores 29
4.2.5 Perdas na bobina indutora 29
4.2.6. Perdas pelas paredes do forno 31
4.2.7. Perdas elétricas na estrutura metálica do forno 31
4.2.8. Perdas de energia pela tampa do forno 31

5. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM OPERAÇÕES QUE ANTECEDEM À FUSÃO EM UM FORNO DE INDUÇÃO 34
5.1. Introdução 34
5.2. Conservação de energia na preparação da carga metálica 34
5.2.1. Limpeza e secagem da carga metálica 34
5.2.2. Preaquecimento da carga metálica 34
5.3. Carregamento de fornos de indução como fator de conservação de energia 36
5.3.1. Partida de um forno de indução a cadinho com carga fria 36
5.3.2. Carregamento de um forno de indução 38
5.3.3. Reaproveitamento de retorno quente 39
5.3.4. Operação conjunta fornos de indução e fornos a combustível 39
5.3.5. Carregamento não mecanizado 39

6. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA FUSÃO POR INDUÇÃO E NAS OPERAÇÕES SUBSEQUENTES
6.1. Introdução
6.2. Programação da produção e a conservação de energia
6.3. Operação ótima de um forno de indução
6.4. Conservação de energia no vazamento do metal fundido
6.5. Conservação de energia no transporte do metal fundido
6.6. Conservação de energia em fornos de manutenção de temperatura
6.7. Conservação de energia no tratamento térmico

7. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE MEDIDAS DE ORDEM ADMINISTRATIVA
7.1. Acompanhamento das contas mensais de energia
7.2. Monitoramento do consumo
7.3. Estabelecimento de índices de consumo
7.4. Responsáveis pelo gerenciamento de energia
7.5. Avaliação da participação da energia elétrica nos custos de produção
7.6. Conhecimento da forma como a energia é usada
7.7. Horários de trabalho
7.8. Sistemática de operação do forno
7.9. Parâmetros de controle de operação
7.10. Intercâmbio de experiências
7.11. Treinamento
7.12. Envolvimento dos funcionários e divulgação dos resultados de economia

8. MANUTENÇÃO EM FORNOS DE INDUÇÃO
8.1. Planejamento da manutenção de um forno de indução
8.2. Manutenção em uma instalação de fusão por indução
8.2.1. Manutenção nos equipamentos auxiliares de um forno de indução
8.2.2. Manutenção do forno de indução propriamente dito

9. RECOMENDAÇÕES PARA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

1 INTRODUÇÃO

Nos processos industriais de fundição de metais, a fusão, propriamente dita, é responsável pela maior parte do consumo de energia. As demais atividades, tais como aquecimentos de panelas , moldagem e macharia, manutenção de temperatura, tratamento térmico e operações auxiliares, como por exemplo: acabamento e limpeza de peças, exaustão, despoeiramento, transporte, iluminação, etc.,individualmente, são menos relevantes, quanto ao consumo de energia.

De uma forma geral, principalmente nas pequenas e médias fundições que utilizam fornos de indução, o que se constata são grandes perdas de energia, não só na fusão, mas também nas operações complementares. Inclusive, pode-se dizer que parte das perdas de energia na fusão por indução são decorrentes das condições em que ocorrem as operações complementares. Operações adequadas de preparação da carga metálica a ser fundida, do seu carregamento no forno, de vazamento do metal líquido, de seu transporte e programação otimizada da produção de peças fundidas podem reduzir o consumo de energia elétrica no processo de fusão, tanto quanto a melhoria das condições operativas do forno de indução.

Sendo assim, as sugestões para se conservar energia elétrica em uma instalação de fusão por indução, expostas nesse manual, não se aterão à operação do forno, mas também serão estendidas às operações complementares à fusão, em particular a preparação da carga metálica, o carregamento do forno, o vazamento e transporte do metal fundido, à operação dos fornos de manutenção de temperatura e a manutenção do forno, com destaque para o seu revestimento refratário, bem como dos seus equipamentos e instalações auxiliares.

2 PRINCÍPIO DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, este fica circundando por um campo magnético, cuja intensidade é proporcional à intensidade da corrente elétrica. Por outro lado, todo corpo condutor de eletricidade colocado em um campo magnético é percorrido por correntes elétricas chamadas correntes induzidas. Como todo condutor percorrido por corrente elétrica se aquece por efeito Joule, o corpo condutor colocado em um campo magnético e, consequentemente, percorrido por correntes induzidas, se aquece. A este fenômeno chama-se de aquecimento por indução eletromagnética. A figura 1 mostra, esquematicamente, o campo magnético produzido pela circulação de uma corrente elétrica em um condutor.

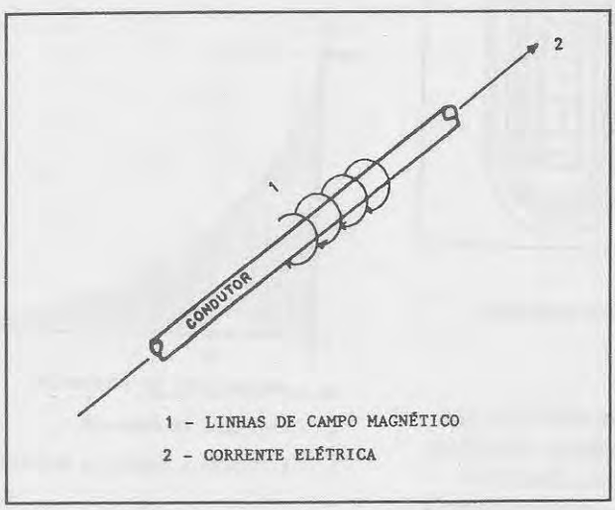


Figura 1
Campo magnético gerado pela circulação de corrente elétrica em um condutor

No caso particular de um condutor em forma de bobina, quando se aplica em seus bornes uma tensão alternada, a corrente alternada que circula na bobina cria, interna e externamente à bobina, um campo magnético variável. Se um corpo condutor de eletricidade for introduzido no interior da bobina, a variação do campo magnético produz um variação do fluxo magnético que atravessa o corpo e induz uma força eletromotriz. Esta força eletromotriz gera correntes induzidas no interior do corpo, aquecendo-o por efeito Joule. A bobina constitui o circuito primário, ou indutor, e o corpo a ser aquecido colocado em seu interior, o circuito secundário, ou induzido. A figura 2 mostra o campo magnético criado pela circulação de corrente elétrica em uma bobina.

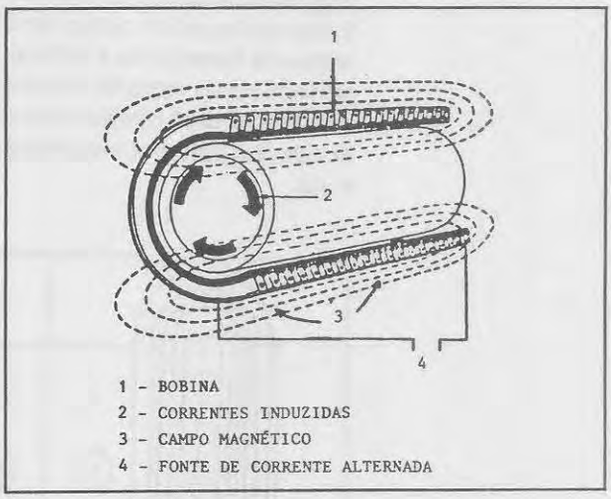


Figura 2
Campo magnético criado em uma bobina

A densidade do fluxo magnético não é constante ao longo de toda a bobina, sendo grande em suas proximidades e gradualmente decrescente em direção ao centro da bobina. Todas as linhas de força presentes no interior da bobina se fecham no seu exterior, conforme mostra a figura 3.

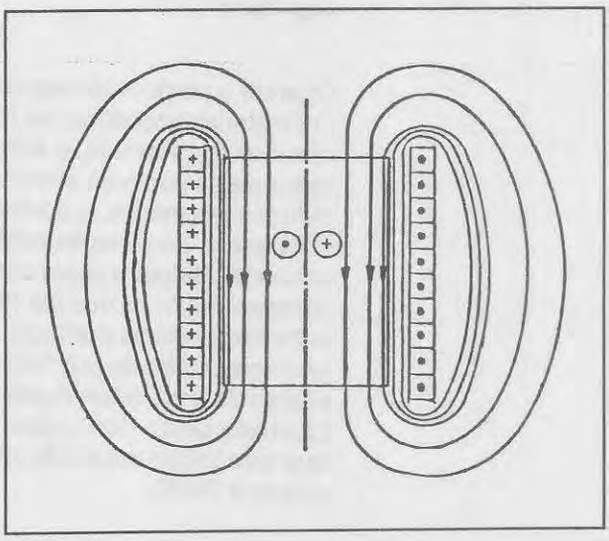


Figura 3
Linhas de força de um campo magnético

Para se evitar a dispersão do fluxo magnético externo à bobina são colocados núcleos magnéticos contra os flancos externos da bobina. Estes núcleos têm como finalidade concentrar as linhas de força junto à bobina e ao mesmo tempo servem como suporte mecânico. A figura 4 representa uma bobina com núcleos magnéticos instalados para concentrar as linhas de força junto a ela.

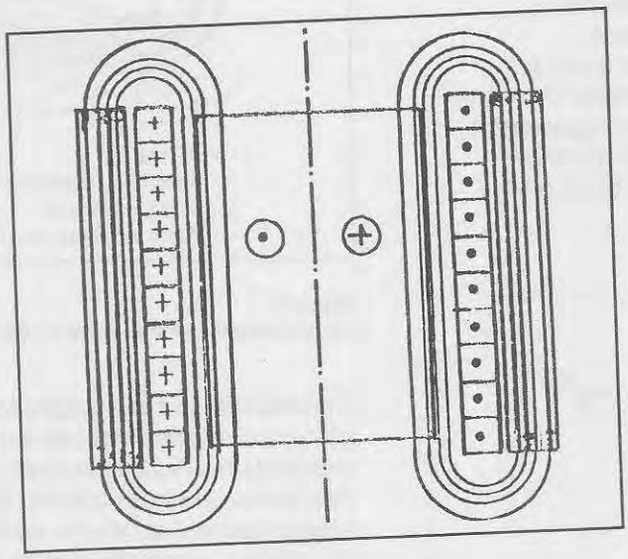
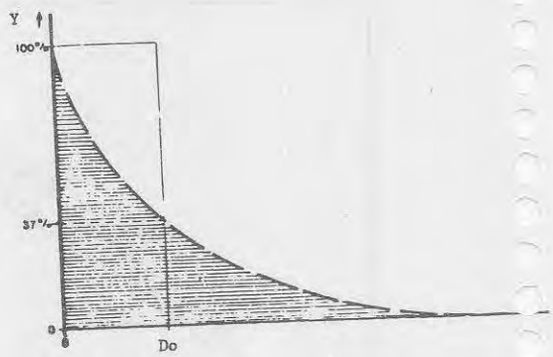


Figura 4
Linhas de força de um campo magnético com núcleos magnéticos

Quando o corpo a ser aquecido é constituído por um material magnético, tal como o ferro, cobalto e diversos tipos de aço, o efeito térmico devido à histerese se soma ao efeito térmico produzido pela indução magnética. A potência dissipada por histerese é, geralmente, muito menor que a potência dissipada pelas correntes induzidas, não ultrapassando, na maioria dos casos, a 10% do valor dessa última potência. Deve-se notar, que a potência dissipada por histerese intervem somente abaixo de uma determinada temperatura, chamada ponto Curie, que depende do material que está sendo aquecido, que, por exemplo, para o ferro é 750°C.

Quanto mais elevada a frequência da corrente no indutor, maior a tendência da corrente indutiva se concentrar na superfície da peça a ser aquecida. Potanto, a densidade de corrente induzida decresce da periferia para o centro da peça. Este fenômeno é conhecido pelo nome de efeito pelicular. pode-se demonstrar, em uma primeira aproximação, que a densidade de corrente decresce de forma exponencial da periferia da peça para o seu centro. Portanto, as correntes induzidas fluem na camada superficial do corpo produzindo uma elevada taxa de aquecimento superficial. Este calor gerado na superfície se difunde para o interior do corpo por condução térmica.

Denomina-se profundidade de penetração a espessura da camada superficial do corpo aquecido onde circula 63,2% da corrente i... Como a potência dissipada no corpo é proporcional ao quadrado da corrente induzida nessa camada superficial, cuja espessura é a profundidade de penetração, dissipa-se 86,5% da potência total transmitida ao corpo. A figura 5 mostra a relação existente entre a densidade de corrente e a distância a partir da superfície do corpo metálico para o seu interior.



Do - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

Y - DENSIDADE DE CORRENTE

X - DISTÂNCIA A PARTIR DA SUPERFÍCIE

Figura 5
Variação da densidade de corrente induzidas em... em função da distância da superfície para o seu ce...

A profundidade de penetração depende das propriedades elétricas e magnéticas do material aquecido (resistividade e permeabilidade magnética relativa) e da frequência do campo magnético induzido, sendo que, para essa grandeza a profundidade de penetração diminui com a elevação da frequência. Dessa forma, para um determinado material a ser aquecido, é importante a escolha da frequência.

A Tabela 1 mostra os valores aproximados para as profundidades de penetração para diferentes materiais e frequências.

Tabela 1
Valores aproximados para as profundidades de penetração para diferentes materiais e frequências

material	aço a 20°C $\mu r = 40$	aço a 20°C $\mu r = 100$	aço a 800°C	cobre a 20°C	cobre a 800°C	alumínio a 20°C	alumínio a 500°C
f(Hz)	Profundidade de penetração em mm						
50	5,03	3,12	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4
60	4,99	2,9	61,34	8,54	17,7	10,8	17,7
100	3,56	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	13,4
10^3	1,124	0,71	14,6	2,9	4,26	2,66	4,26
10^4	0,356	0,225	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34
10^5	0,112	0,071	1,46	0,209	0,42	0,266	0,426
10^6	0,035	0,0225	0,475	0,066	0,0134	0,084	0,134
10^7	0,011	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0226	0,043

Obs.: μr é a permeabilidade magnética relativa

3 FORNOS DE INDUÇÃO

3.1 - Introdução

O forno de indução é uma aplicação do aquecimento indutivo, que, no Brasil, é responsável por grande parte de energia elétrica consumida por esse tipo de aquecimento. Esses fornos são utilizados para fundir metais ferrosos e não ferrosos, a partir de uma carga sólida, bem como para manter a temperatura ou sobreaquecer metais em estado líquido.

Existem dois tipos de fornos de indução: fornos a canal, também chamados fornos com núcleo magnético, e fornos a cadinho, ou fornos sem núcleo magnético.

Os fornos de indução são equipamentos mais eficientes que os fornos a combustível. Os fornos a cadinho operam com uma eficiência elétrica de, aproximadamente, 75%. O seu rendimento energético global, incluindo as perdas térmicas, situa-se em torno de 60%. Um rendimento energético de, aproximadamente 60%, resulta em um consumo de energia elétrica de cerca de 570 KWh por tonelada para fusão de ferro.

Os fornos de indução a canal operam com rendimento superiores aqueles dos fornos a cadinho, em decorrência do melhor acoplamento magnético entre a bobina indutora e o metal líquido. A eficiência elétrica desses fornos varia de 90 a 95%, enquanto a eficiência energética global é de, aproximadamente, 75%. Esta eficiência energética resulta em um consumo de cerca de 450 KWh por tonelada para ferro fundido.

Os rendimentos acima, tanto para o forno a cadinho como para o forno a canal, são válidos para fornos bem projetados e bem construídos e que são operados adequadamente. Caso contrário, os rendimentos são menores e os consumos específicos mencionados são superiores.

3.2 - Comparação entre fornos de indução e fornos a combustível quanto ao consumo de energia

Para se comparar os consumos específicos de energia entre fornos de indução e fornos a combustível, foi montada a tabela 2, que relaciona os consumos de energia para se fundir uma tonelada de alumínio, uma de cobre e uma de f cinzento. Na primeira coluna da tabela são mostrados os consumos teóricos de energia necessários para se fundir uma tonelada de ca metal considerado, partindo-se de uma carga sólida à temperatura ambiente. Na coluna se são indicadas as necessidades energéticas por tonelada para os fornos a combustível, basead em rendimentos energéticos dos fornos normalmente utilizados para cada tipo de meta Na coluna seguinte são apresentados os consumos de energia elétrica para se fundir tonelada dos metais considerados, tomando-s uma média entre os consumos específicos dos fornos a cadinho e a canal, bem construídos e bem operados.

A última coluna relacionada a energia primá...a necessária para gerar a energia elétrica con na fusão de uma tonelada dos metais listados, produzida por uma termoelétrica de rendimento energético igual a 35%. Para uma usina termoelétrica com rendimento igual a 35%, são necessários 2.500 Kcal de combustível para produzir um KWh, que é consumo usualme encontrado em termoelétricas em operação

A tabela mostra, comparando-se a segunda última coluna, que, mesmo com energia elétri produzida por termoelétrica, os fornos de indu consomem menos energia primária para a ...s de alumínio e cobre.

No que se refere a ferro fundido, os fornos cu que foram os considerados para a fusão d ferro cinzento, a tabela mostra que os fornos de indução consomem mais energia primária. Contudo, quando se considera todo o pro s fusão para o ferro fundido, ou seja, incluindo-sobreaquecimento e a manutenção de temperatura, a diferença das necessidades energia primária, entre os fornos de indução cubilô, torna-se pequena. Na verdade, o rendimento energético de um forno cubilô, se considera toda a fase de fusão, cai para a faixa de 30 a 40%.

Tabela 2
Consumo energético para se fundir uma tonelada de metal

Metal	Teórica (Mcal)	Fornos a combustível (Mcal)	Fornos de indução (KWh)	Energia primária(1) (Mcal)
Alumínio	255	1.260 a 1.215	500	1.260
Cobre	164	1.360	335	860
Ferro Cinzento	293	480	500	1.260

(1) Entende-se como energia primária, aquela contida no combustível, necessária para gerar a energia elétrica consumida por um forno de indução para produzir uma tonelada de metal.

3.3 - Fornos de indução a canal

3.3.1 - Características principais

Os fornos de indução a canal são compostos, essencialmente, de:

- Um reservatório de metal líquido que se comunica com as duas extremidades do canal; este reservatório, ou cadinho, é provido de revestimento refratário, que contém a parte superior do metal;

- Um canal cheio de metal líquido, que apresenta um formato curvo, cujas extremidades se comunicam com o fundo de cadinho;

- Uma bobina indutora enrolada em torno de um núcleo magnético feito de aço silício laminado; o canal envolve este núcleo magnético.

A figura 6 mostra, esquematicamente, um forno de indução a canal e a figura 7 mostra o diagrama trifilar deste forno. A figura 8 mostra o esquema de um forno multicanal.

O metal se aquece no canal por efeito joule, pela ação das correntes induzidas. A circulação de metal líquido no canal ocorre por efeito termosifão e por efeito eletromagnético, possibilitando, dessa forma, a transferência de calor do canal para o cadinho. Esta migração do metal entre o canal e o cadinho cria uma leve movimentação do banho metálico, muito menos intensa do que aquela que ocorre nos fornos a cadinho. Esta agitação é mais sensível no fundo do forno do que na sua superfície, onde a agitação é fraca.

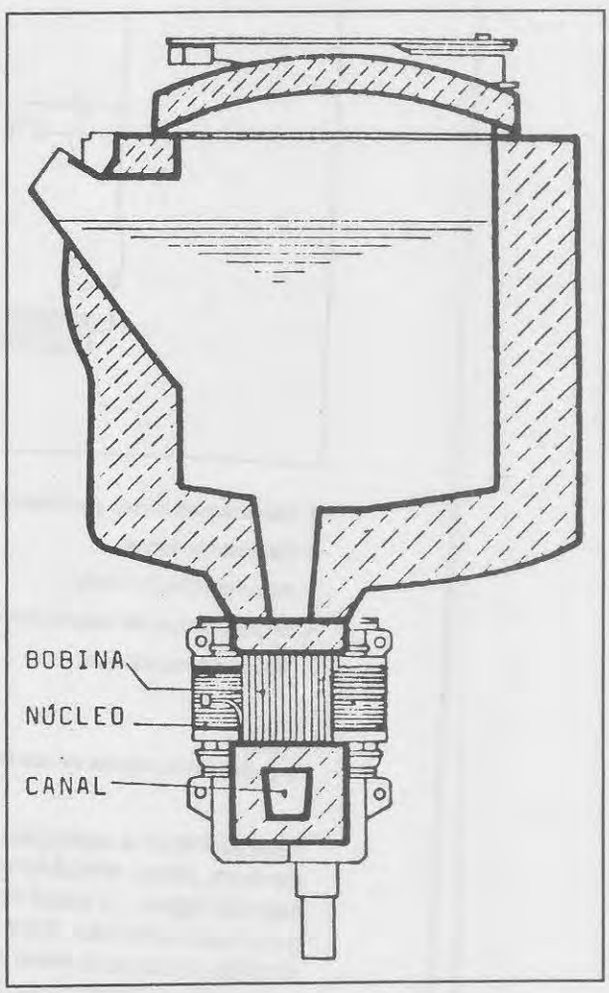
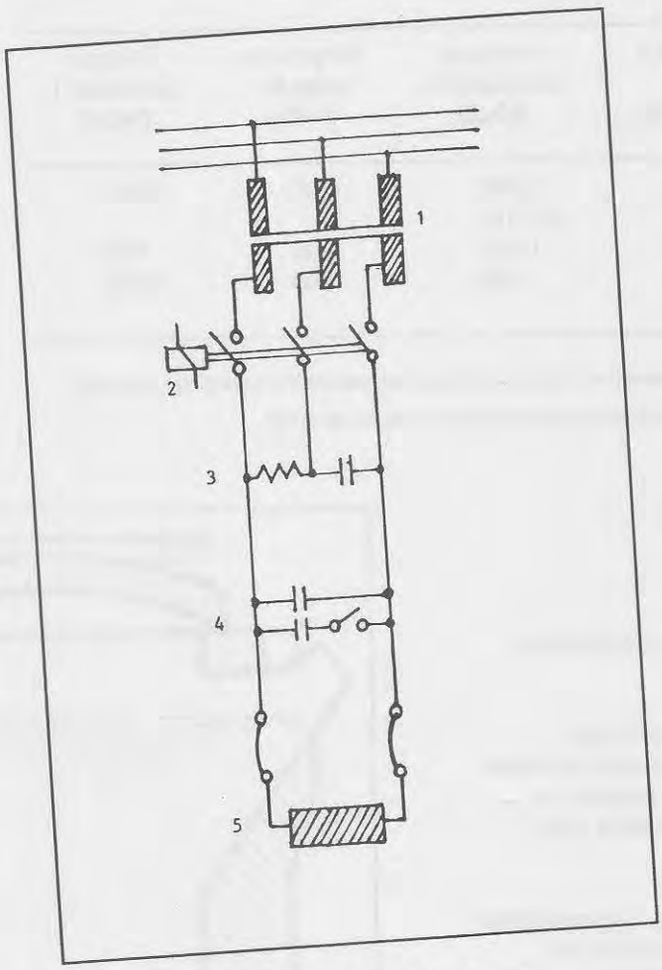


Figura 6
Forno de Indução a canal



1. Transformador com comutador de Tapes
2. Contator principal
3. Instrumentos de medição
4. Equipamentos de balanceamento de fases
5. Banco de capacitores

Figura 7
Circuito elétrico típico de um forno de indução a canal

Para se iniciar a operação de um forno a canal, deve-se, antes, enchê-lo com metal líquido e em seguida ligá-lo. O metal líquido se aquece no canal e começa a circular. Para este forno funcionar, o circuito secundário deve estar fechado e, portanto, não se deve deixar que o metal dentro do canal se solidifique. Nos períodos em que eles são utilizados, deve-se deixá-los com potência reduzida, a fim de que o metal contido no canal seja mantido em estado líquido. Estes fornos podem ser esvaziados, mas este tipo de operação é muito prejudicial à durabilidade do refratário.

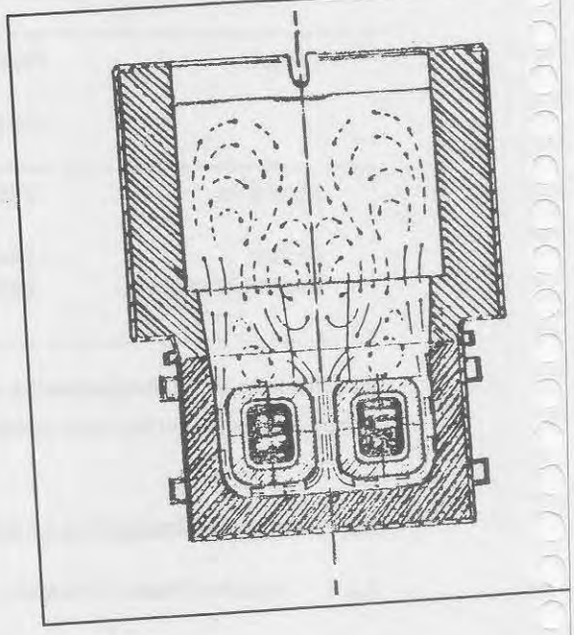


Figura 8
Forno multicanal

As correntes induzidas que circulam no veio metálico contido no canal produzem um fe... de contração. Em certos casos este efeito ... provocar uma ruptura do veio metálico. Co... canal, geralmente, está sob uma grande quantidade de metal líquido, a pressão ex... pelo banho tende a anular este efeito de r...

Para se evitar este fenômeno de ruptura d... metálico e um aquecimento muito grande ... canal, limita-se a potência específica do forn... Para se aumentar a potência de um forno ... este deve ser construído com vários indu... seja, com vários canais. A figura 8 mostra u... forno de indução multicanal

O desenvolvimento tecnológico destes forn... possibilitou, graças a uma forma adaptada ... canal, transmitir potências mais elevads, ... de, no máximo, 300 Kw por canal.
O sobreaquecimento do metal no canal é limitado a 30°C.

■ Vantagens dos fornos a canal

- produção de metais de alta qualidade;
- boa homogeneidade das ligas produz... graças a temperatura uniforme e à movimentação do banho metálico;
- vazamento isento de escória;

- preço relativamente baixo;
- equipamentos elétricos auxiliares simples;
- bom fator de potência (de 0,5 a 0,7);
- fornos limpos e silenciosos;
- emissão de poeira e gases muito reduzida.

■ Desvantagens

- revestimento refratário caro e delicado (para o caso de metais ferrosos);
- necessidade de operação contínua, pela necessidade imperativa de se manter um pé de banho, que varia de 15% a 20% da capacidade do forno;
- impossibilidade de se mudar, rapidamente, a liga produzida;
- tempo de fusão relativamente longo em razão da densidade de potência limitada.

3.3.2 - Aplicação de fornos de indução a canal

Pelo fato de apresentarem potências específicas, relativamente, pequenas, os fornos de indução a canal são muito utilizados para manutenção de temperatura e sobreaquecimento de metal líquido, Contudo, em muitas indústrias, estes fornos são usados para a fusão de metais em particular de não ferrosos.

■ Manutenção de temperatura de aço e ferro fundido

Nas indústrias que produzem aço, os fornos a canal podem ser aplicados para manutenção em duplex com outros equipamentos de fusão. Esta limitação se deve ao fato dos aços serem, normalmente, produzidos a uma temperatura de l600°C e, se o forno a canal for utilizados para a fusão, o sobreaquecimento do metal no canal seria de 100 a 150°C, que acarretaria uma temperatura excessiva para uma boa conservação do refratário.

Nas fundições de ferro utiliza-se com frequência, fornos de indução a canal para manutenção de temperatura, operando em conjunto com fornos de fusão, principalmente, a cadinho ou cubilô. Estes fornos de manutenção operam como amortecedores entre a fusão e a moldagem, o que possibilita uma interdependência entre as duas operações, boa homogeneização do metal fundido e possibilidades de correção da liga produzida. este tipo de operação apresenta consumos de energia, frequentemente, mais elevados do que aqueles que se poderia esperar para este tipo de forno, pelo fato de ter que estar, permanentemente, em funcionamento.

A figura 9 relaciona a potência necessária para a manutenção de temperatura em função da capacidade do forno a canal para ferro fundido.

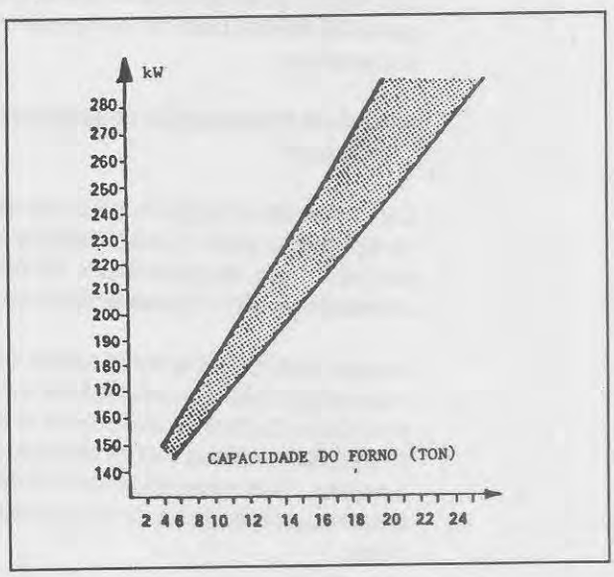


Figura 9
Potência necessária de um forno a canal para manutenção de ferro fundido

A figura 10 mostra a relação entre a potência e a produção de ferro em toneladas por hora para diversas temperaturas de sobreaquecimento para fornos a canal para sobreaquecimento de ferro fundido.

Os fornos a canal, as vezes, são aplicados para a fusão de ferro, em particular, nas fundições que produzem peças pesadas. Nesses casos, os fornos são operados de tal forma que nos períodos do dia em que as tarifas são mais elevadas, as suas potências são reduzidas a um mínimo necessário e suficiente.

Em certos fornos a canal utilizados para manutenção de temperatura, o vazamento se faz por pressão de um gás, geralmente o ar, sobre a superfície do banho e o metal vaza por um sifão. a figura 11 mostra um forno a canal de vazamento automático pela pressão de ar.

■ Fusão de ligas de alumínio

A maior parte dos fornos de indição a canal para a fusão de ligas de alumínio, apresenta potência entre 20 a 200 kW, com capacidade de 300 a 1500 Kg. O campo magnético existente no canal provoca um fluxo metálico que agita e mistura o banho metálico, que homogeneiza a composição e a temperatura da liga.

O consumo específico para a fusão é da ordem de 550 kWh/t para os fornos pequenos e se reduz para 430 kWh/t para os fornos de maior capacidade.

■ Fusão e manutenção de temperatura de cobre e suas ligas

Os fornos de indução a canal são bastante empregados para a fusão de ligas de cobre, pois, nestes fornos, as densidades de potência necessárias são obtidas facilmente.

Apesar dos fornos a canal serem os equipamentos mais eficientes, sua utilização é mais restrita à produção de bronze fosforosos e latões com produção contínua na forma de lingotes ou peças fundidas. São revestidos com refratário de alta alumina, pois as ligas de cobre tendem a reduzir a sílica.

Os fornos a canal são utilizados como fornos de manutenção de temperátura e de vazamento em duplex com fornos de indução a cadinho de frequência de rede ou média frequência.

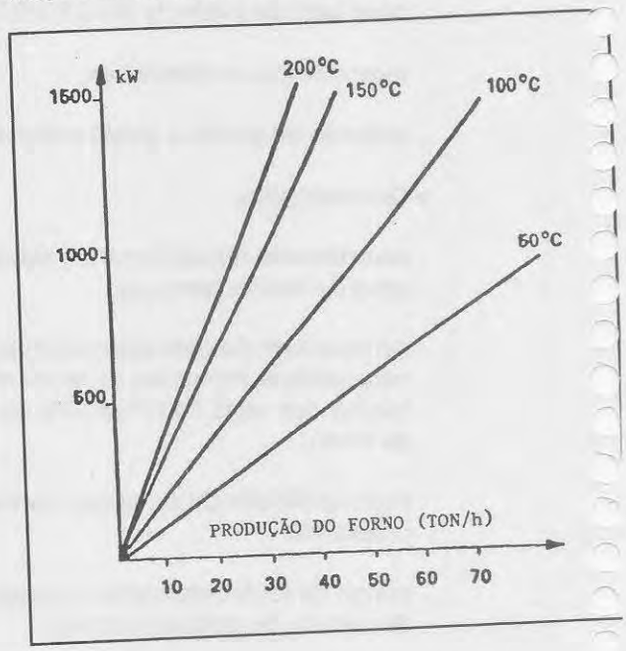


Figura 10
Potência de um forno a canal para sobreaquecimento de ferro fundido

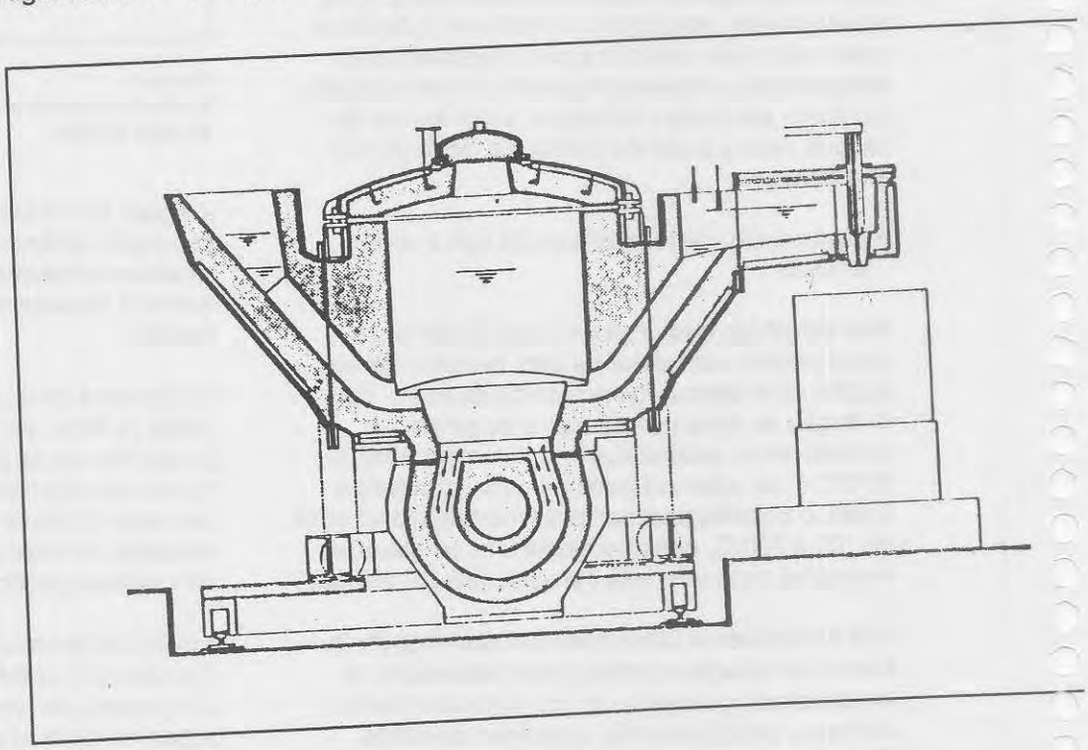


Figura 11
Forno a canal de vazamento automático por pressão de ar

- Fusão e manutenção de temperatura de ligas de zinco

Os fornos de indução a canal são encontrados em numerosas fundições de zinco. Eles são, por exemplo, utilizados para a refusão de catodos como fornos de vazamento.

A capacidade dos fornos pode ser elevada, mais 100 toneladas para a fusão de catodos, bem como possuir até quatro indutores, como potência de 400 a 500 Kw por indutor.

O consumo específico para a fusão se situa na faixa de 90 a 120 kWh/t. A potência para fornos de manutenção é reduzida, da ordem de 100 KW para um forno de 60 toneladas.

3.4 - Fornos de indução a cadinho

3.4.1 - Características principais

O forno de indução a cadinho é constituído por uma bobina indutora que possui em seu interior um cadinho de material refratário, onde é colocada a carga metálica a ser fundida.

Para que o acoplamento magnético, entre a bobina indutora e o metal a ser fundido, seja o melhor possível, a espessura do revestimento refratário do cadinho e do seu isolamento térmico deve ser a menor possível. Um revestimento espesso reduz o acoplamento magnético entre o indutor e o banho, reduzindo a eficiência elétrica do forno.

Para se evitar que as estruturas metálicas externas à bobina sejam sobreaquecidas pela ação do campo eletromagnético disperso, a bobina é circundada por núcleos constituídos de lâmina de aço sílicio, que conduzem o campo externo, evitando a sua dispersão. A instalação ótima desses núcleos, constituídos de aço silício adequado, eleva o rendimento elétrico do forno. A figura 12 mostra um forno a cadinho.

Ao conjunto constituído pelo cadinho, pela bobina, pelos núcleos magnéticos e pelas estruturas metálicas dá-se o nome de panela. O revestimento do cadinho tem vida útil, que depende de sua construção, do tipo de liga fundida, da operação do forno, etc. Dessa forma, de tempos em tempos, é necessário reparar ou refazer o revestimento refratário. Esta operação exige, via de regra, muito tempo, muitas vezes semanas. A fim de se minimizar os tempos improdutivos para a troca ou reparo do revestimento refratário, ou outros eventuais reparos, é aconselhável ter-se uma panela de reserva. Com a disponibilidade de uma panela que deve ser reparada e a instalação da panela reserva.

3.4.2 - Frequência de alimentação

Para um determinado metal, a profundidade de penetração das correntes induzidas é inversamente proporcioanl à raiz quadrada da frequência, ou seja, quanto maior a frequência, menor será a profundidade de penetração e, consequentemente, maior será a densidade de correntes induzidas na superfície do metal a ser fundido.

Por outro lado, o campo magnético induzido é paralelo à bobina somente próximo ao seu centro. Nas suas extremidades as linhas magnéticas convergem para o exterior da bobina. Consequentemente, as forças magnéticas que atuam sobre o banho metálico são perpendiculares ao eixo da bobina em seu centro e mudam de direção a medida que se aproxima das extremidades da bobina.

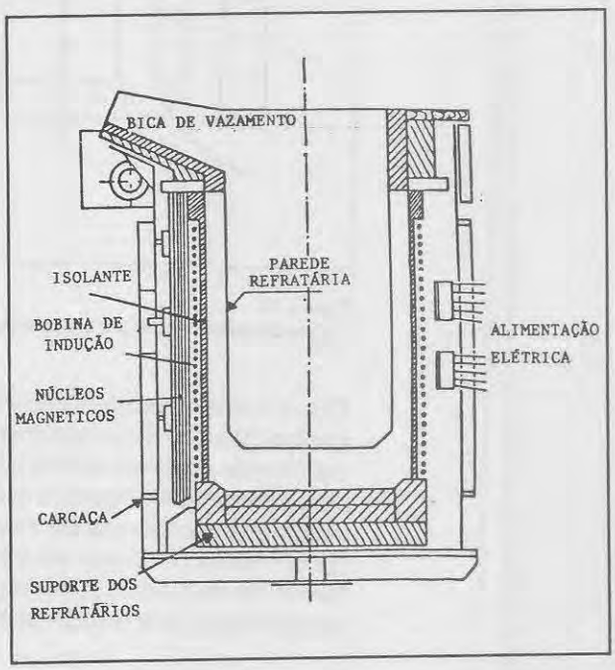


Figura 12
Forno de Indução a Cadinho

Em razão da modificação da direção das forças magnéticas, o banho metálico se movimenta. Para um dado metal e um dado forno a agitação do banho é diretamente proporcional à potência induzida e inversamente proporcional à frequência da tensão de alimentação do forno. Esse movimento de metal líquido no forno dá uma formação abaulada a sua superfície. A esta formação denomina-se menisco. A figura 13 mostra as forças mecânicas em um campo magnético e a figura 14 mostra a movimentação do banho metálico e a formação do menisco em forno a cadinho.

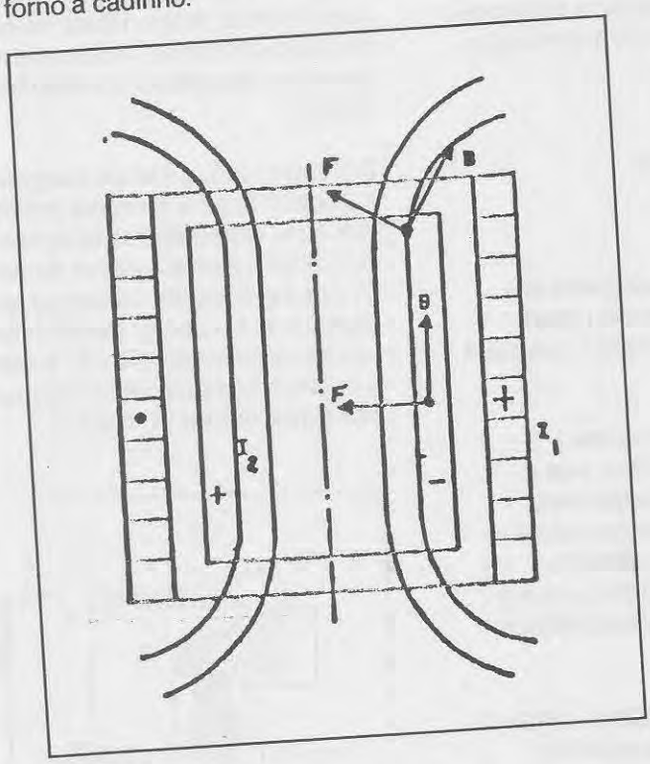


Figura 13
Forças mecânicas em um campo magnético

Dessa forma, a frequência de alimentação da bobina indutora é um parâmetro importante para a escolha de um forno de indução. A sua definição está, intimamente, ligada à aplicação do forno. Por esse motivo, os fornos de indução a cadinho são classificados em fornos de frequência de rede e fornos de frequência superior a frequência de rede, em particular de média frequência.

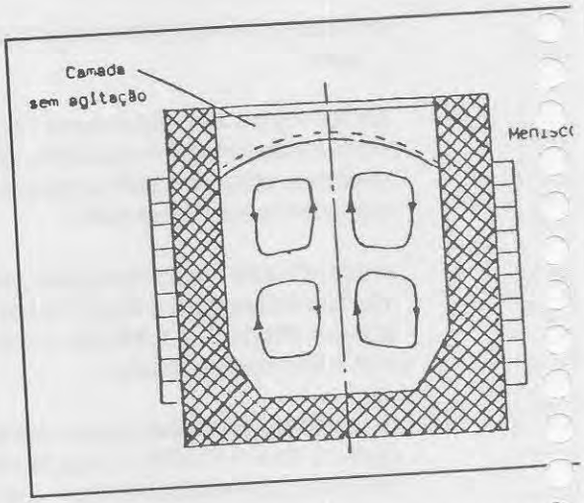


Figura 14
Movimentação do banho metálico em um forno a ca

3.4.3 - Forno a cadinho de frequência de rede

Um forno de indução, além do conjunto bob a indutora e cadinho, é constituído de:

- um transformador ligado no sistema de m tensão, com comutador de tapes no seu secundário, para possibilitar a variação da potência a ser transferida para o forno;

- um contador, instalado na saída do transformador, que opera o forno;

- um banco de capacitores fixos e um reator, balancear o circuito trifásico, pois a bobina indutora é uma carga monofásica;

- um banco de capacitores variáveis, para compensar a potência reativa indutiva s pela bobina indutora, que varia ao longo do processo de fusão da carga metálica.

A figura 15 mostra o circulo elétrico típico fornos de indução de frequência de rede.

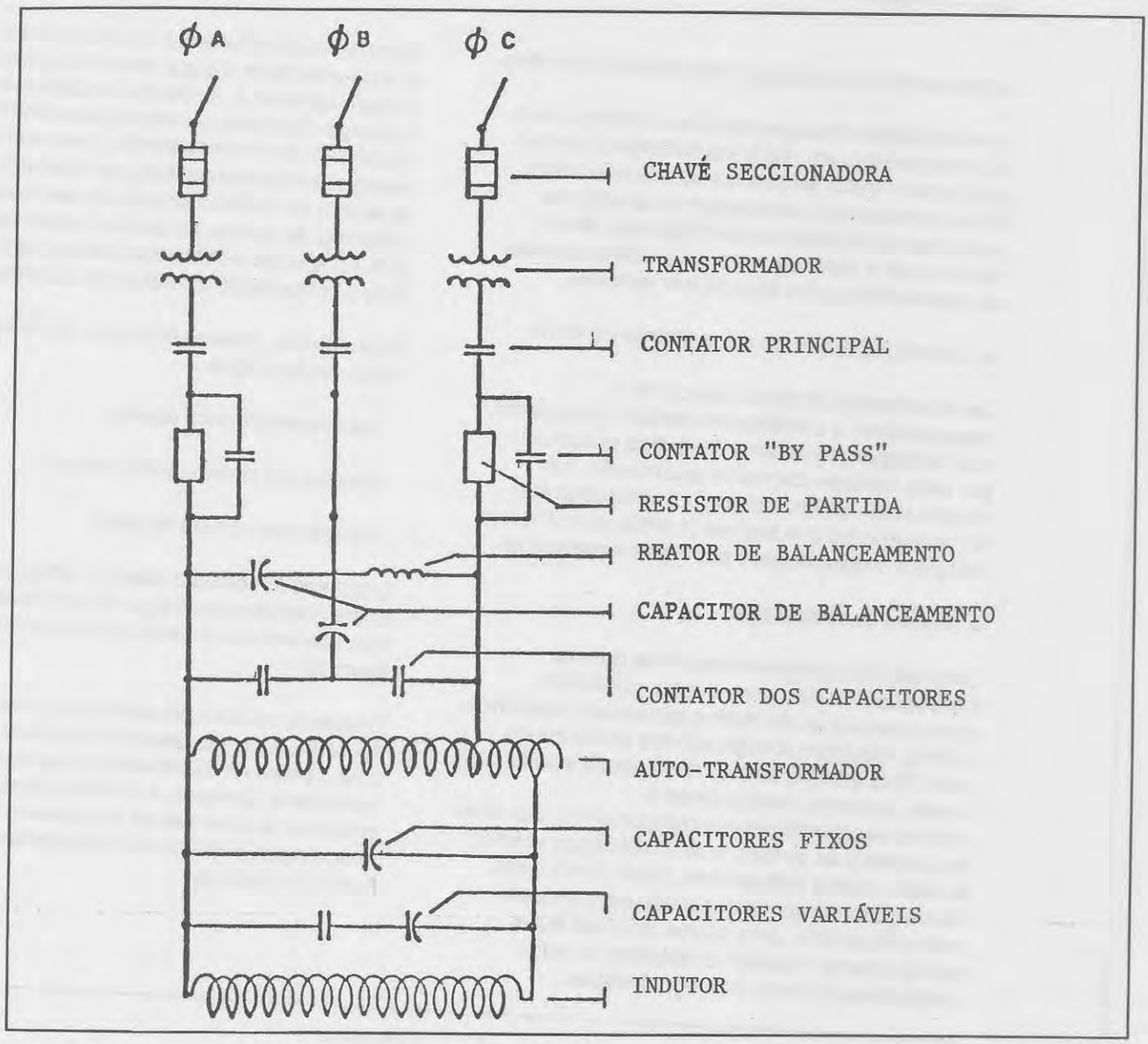


Figura 15
Circuito Elétrico típico de um forno a cadinho de frequência de rede

■ Operação com pé de banho

Os fornos a cadinho de frequência de rede, normalmente, devem operar com um pé de banho metálico de, no mínimo, 30% da capacidade do cadinho, entre corridas. Este tipo de operação se deve a elevada profundidade de penetração das correntes induzidas, que torna muito lenta a fusão de carga fria. Entre corridas, para se obter a taxa de fusão máxima, o pé de banho deve ocupar 70% da capacidade do cadinho. Entende-se como operação com pé de banho, aquela em que, entre corridas, permanece sempre uma quantidade residual de metal líquido no forno, ou seja ele não é vazado totalmente. Por exemplo um forno a canal sempre opera com pé de banho.

■ Movimentação do Banho Metálico

A movimentação do banho metálico, que é inversamente proporcional à frequência de alimentação, é acentuada nos fornos de frequência de rede, possibilitando uma boa homogeneização da liga metálica produzida. Devido a esta característica, estes fornos são muito utilizados para a produção de ferro cinzento, maleável e de grafite esferoidal.

■ Necessidade de variação da potência capacitiva

A resistividade da carga metálica aumenta com a sua temperatura e a reatância da bobina diminui conforme o metal vai se fundindo. Sendo assim, torna-se necessário compensar a variação da potência reativa indutiva solicitada pelo forno, variando-se a potência reativa capacitiva através do chaveamanto dos capacitores variáveis.

■ Sistema hidráulico de acionamento do forno

Os movimentos do forno, tais como o basculamento e a abertura da tampa, geralmente, são feitos por um sistema hidráulico constituído por uma unidade compacta que contém um tanque reservatório, um conjunto motobomba, filtros e válvulas que suprem pressão aos cilindros hidráulicos responsáveis por esses movimentos.

■ Sistema de refrigeração.

Cada um dos componentes ativos de uma instalação de fusão por indução, por serem condutores de eletricidade e possuirem resistência elétrica, dissipam energia elétrica em forma de calor. Esta energia térmica deve ser dissipada para o meio ambiente, para impedir o sobreaquecimento desses componentes, que além de aumentar as perdas, pois a resistência elétrica aumenta com a temperatura, pode danificá-los. Para alguns componentes utiliza-se o ar como meio refrigerante, para outros utiliza-se água, principalmente, quando a refrigeração exige coeficientes de troca de calor elevados.

Entre estes componentes de um forno de indução, a bobina indutora é a que maiores perdas de energia apresenta. As perdas na bobina se devem à energia dissipada por efeito joule devido a circulação de corrente elétrica, bem como a energia térmica transmitida por condução do metal aquecido no cadinho através de seu revestimento refratário. As perdas na bobina variam de 20% a 40% da energia elétrica consumida pelo forno. Para a refrigeração do indutor é utilizada água.

Basicamente, existem três tipos de sistemas de refrigeração a água:

- sistema em circuito aberto;
- sistema em circuito semi-aberto;
- sistema em circuito fechado.

O sistema em circuito aberto é utilizado quando existe abundância de água de boa qualidade e o forno de indução é de pequena potência. Ver figura 16.

O sistema em circuito semi-aberto, mostrado na figura 17, é de uso bastante difundido, tendo em vista a pequena quantidade de água de reposição necessária. Contudo, é o sistema que exige mais cuidados para se manter a qualidade da água de refrigeração, evitando-se incrustações, corrosão formação de lama.

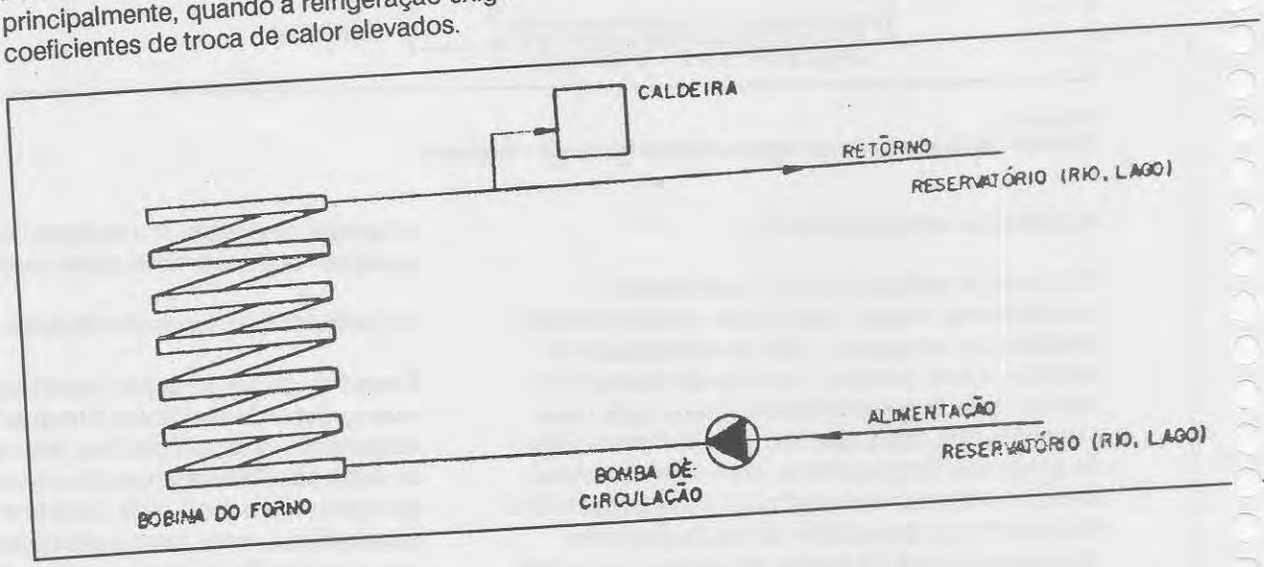


Figura 16
Sistema de Refrigeração em um circuito aberto

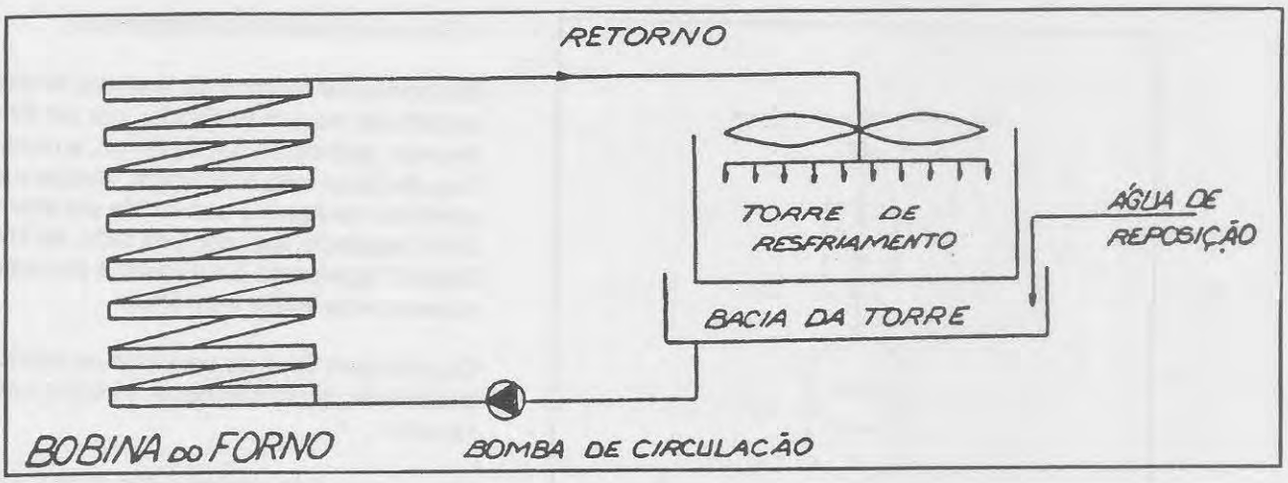


Figura 17
Sistema de Refrigeração em sistema semi-aberto

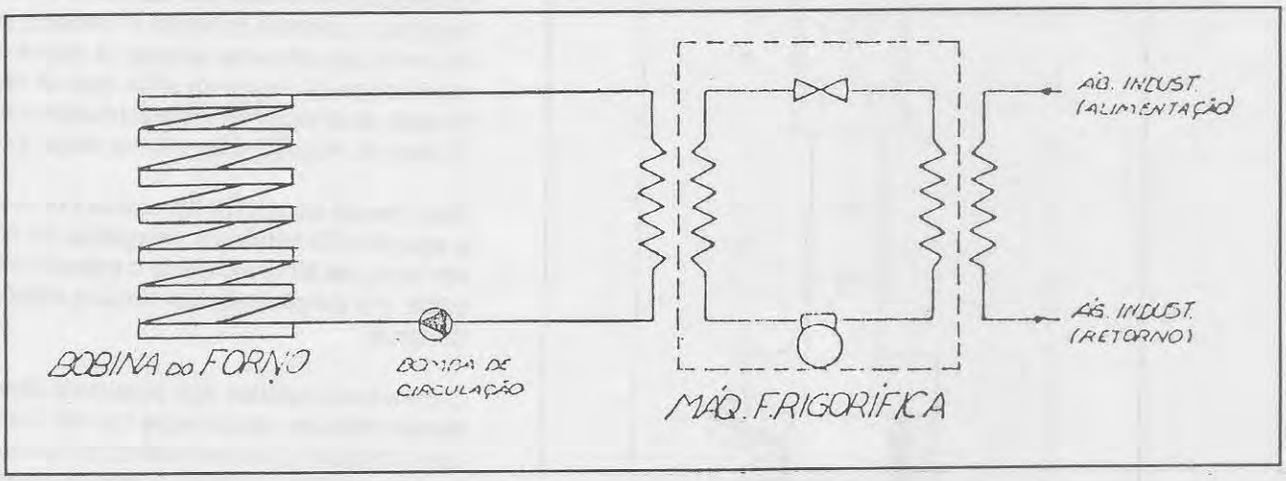


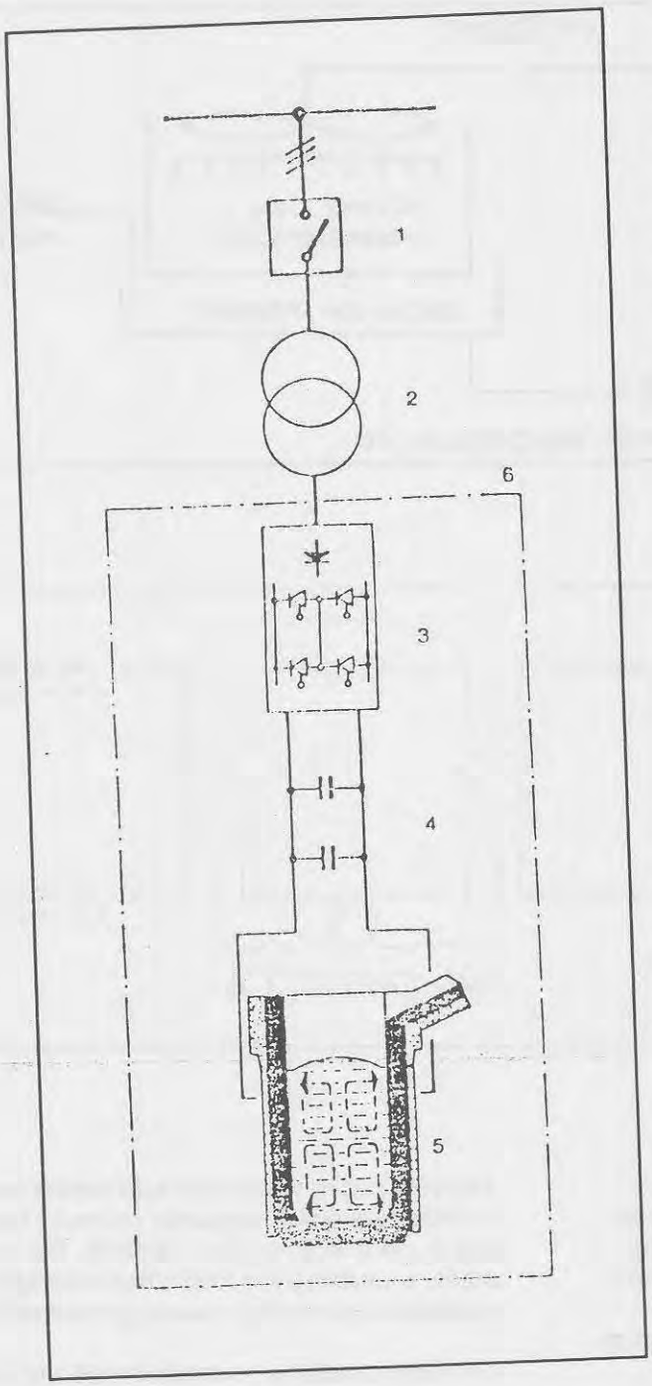
Figura 18
Sistema de Refrigeração em circuito fechado

Até há alguns anos, os fornos de indução de média frequência eram de pequena capacidade (até uma tonelada de ferro fundido) e de baixa potência (até 500 KW). Este panorama se alterou substancialmente em decorrência do desenvolvimento tecnológico dos conversores de frequência estáticos, pois, atualmente, já se fabricam fornos de média frequência de até 15 toneladas de capacidade e com potência de 7.500 KW, para ferro fundido.

Ao contrário do forno a cadinho de frequência de rede, o de média frequência pode partir com carga fria, a plena potência, desde que a carga seja densa, não necessitando de blocos de partida ou pé de banho de metal líquido.

Também não necessita que seja mantido metal fundido para o ciclo seguinte, podendo, dessa forma, ser descarregado totalmente. Por essa razão, o usuário pode fundir diferentes ligas metálicas durante uma mesma jornada de trabalho.

Um forno a cadinho de média frequência é muito similar ao de frequência de rede e deste apresenta a diferença de ser alimentado por um transformador de isolação comum, não necessitando de transformadores especiais, nem de capacitores e reatores de balanceamento, contudo necessita de um conversor de frequência. A figura 19 mostra, esquematicamente, o circuito elétrico típico de um forno de indução de média frequência.



1. Disjuntor
2. Transformador
3. Conversor de frequência
4. Banco de capacitores
5. Forno de média frequência
6. Unidade modular

Figura 19
Circuito elétrico de um forno a cadinho de média frequência

■ Conversor estático de frequência

Um conversor estático, de maneira simplificada, é constituído por um retificador, por um filtro e um inversor controlado. Dessa forma, a corrente de frequência de rede é retificada, filtrada e a corrente contínua resultante é convertida em alternada, com frequência superior à da rede, no inversor. A figura 20 apresenta um diagrama de blocos de um conversor de média frequência.

Os principais tipos de conversores utilizados, atualmente, são o conversor série e o conversor paralelo.

Nos conversores estáticos tipo série a alimentação é feita em tensão trifásica, geralmente 440 V ou 480 V, que é retificada por retificadores não controlados e filtrada por capacitor filtro. Em seguida a corrente contínua é invertida em um inversor, que alimenta a carga, a qual é composta pela bobina de forno em série com os capacitores tanque, através de um transformador, cuja função é casar as impedâncias entre a carga e o inversor.

Este tipo de conversor apresenta como vantagem a sua elevada eficiência energética na conversão, em torno de 92%, incluindo o transformador de saída, e a simplicidade do circuito eletrônico de potência.

O conversor estático tipo paralelo é alimentado em tensão trifásica, via de regra ou 440 V ou 480 V, que é retificada em um retificador controlado e filtrada por filtro indutivo. A corrente contínua, em seguida é alternada em um inversor comutado pela carga, que é composta pela bobina indutora e os capacitores tanque ligados em paralelo.

As vantagens deste tipo de conversor são decorrentes de sua elevada eficiência energética, geralmente superior a 95%, da não necessidade de transformador de saída, bem como a simplicidade do circuito eletrônico de potência.

Um sistema de refrigeração em circuito fechado, mostrado na figura 18, é composto de uma torre de resfriamento e de um trocador de calor. A água que é resfriada na torre em circuito aberto, passa por um lado do trocador de calor e o fluido refrigerante circula em circuito fechado do outro lado do trocador. Com este sistema a qualidade do fluido refrigerante é mantida.

Para instalações de elevada potência, deve-se refrigerar também os condutores maleáveis alimentadores do forno e os capacitores. Esta refrigeração pode ser feita com ar, instalações menores, e com água para instalações de maiores portes.

3.4.4 - Forno de indução a cadinho de média frequência

Os fornos de indução a cadinho, no início de sua aplicação, operavam somente a frequência de rede. Com o desenvolvimento tecnológico, associado às vantagens para determinadas aplicações, passou-se a utilizar frequências mais elevadas que a de rede, começando por utilizar-se multiplicadores de frequência.

A seguir, foram utilizados conversores eletrônicos a válvula e sistemas moto-geradores, sendo que estes sistemas atingiram eficiências bastantes razoáveis, entre 70% a 80%. Os conversores de frequência moto-geradores ainda são fabricados, bem como existem muitas unidades operando com estes sistemas.

Com o desenvolvimento dos semicondutores de potência, começaram a ser produzidos os conversores estáticos de frequência. Atualmente, os conversores estáticos são de potências elevadas e possibilitam a variação de frequência de alimentação do forno, de tal forma que o fator de potência, que varia durante a fusão da carga metálica, possa ser compensado sem haver necessidade de chaveamento dos capacitores, como nos fornos de frequência de rede.

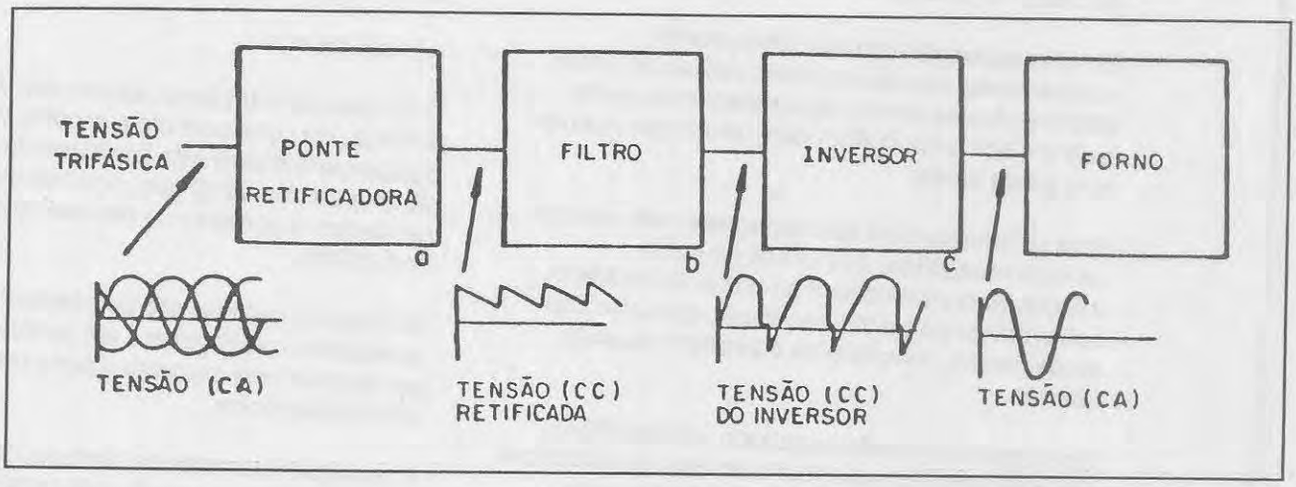


Figura 20
Diagrama de blocos de um conversor de frequência

Como desvantagens, pode-se mencionar a necessidade de perfeito casamento de impedâncias entre o inversor e a carga e a complexibilidade do circuito de controle.

A figura 21 mostra o esquema de um conversor tipo série e um conversor tipo paralelo.

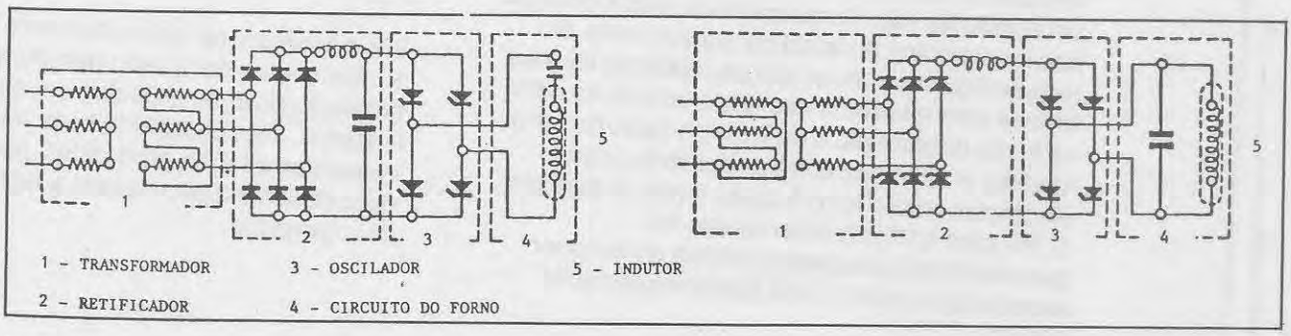


Figura 21
Esquema de conversores de frequência tipo série e tipo paralelo

3.4.5 - Operação de fornos de média frequência com e sem pé de banho

O forno de média frequência, quando opera sem pé de banho, apresenta um rendimento médio superior do que quando opera com pé de banho. Este rendimento médio superior se deve ao fato da carga fria apresentar maior resistência elétrica do que quando está em estado líquido.

Para baixas taxas de produção, os fornos de média frequência, que operam com pé de banho, consomem cerca de 130 KWh/t a mais que os fornos de média frequência que operam sem pé de banho. Esta diferença pode chegar a 250 KWh/t, dependendo da produção do tamanho do forno e do modo de operação.

Em uma operação de três turnos diários, normalmente, são encontrados valores de 540 a 585 KWh/t para fornos que operam com pé de banho e 505 a 550 KWh/t para fornos que operam sem pé de banho.

Para se ter uma idéia das vantagens, sob o ponto de vista energético, dos fornos de média frequência operados sem pé de banho metálico sobre fornos de média frequência operados com pé de banho, considere-se o exemplo exposto abaixo.

Dois fornos de média frequência, um de 700 Kg, 500 KW e 250 Hz, para fusão de ligas de alumínio e outro de 6 toneladas, 3500 KW e 250 Hz, para produção de ferro fundido.

Medições de consumo de energia elétrica mostraram que, no início da operação, sem pé de banho, os rendimentos dos dois fornos foram de 20% a 30% mais elevados do que aqueles verificados quando as cargas metálicas já estavam em estado líquido. Como resultado desta elevação dos rendimentos no início do aquecimento, em relação àqueles com as cargas metálicas líquidas, teve-se uma eficiência média aumentada de 4,5% na fusão de alumínio e de 7,5% na fusão do ferro fundido. A diferença entre os aumentos das eficiências para o ferro fundido e para o alumínio (7,5% para 4,5%) deve-se ao fato da permeabilidade magnética relativa do ferro ser elevada até o ponto Curie (aproximadamente 750°C).

Estes fatos mostram o menor consumo de energia elétrica quando se opera fornos de média frequência sem pé de banho. O consumo menor de energia elétrica quando se opera um forno de média frequência sem pé de banho deve ser ressaltado, pois é muito frequente as fundições, principalmente as pequenas e médias, operarem os fornos de média frequência com pé de banho.

Pelo fato dos fornos de indução a cadinho de frequência de rede operarem com pé de banho, estes fornos apresentam um rendimento energético inferior aos fornos de média frequência que operam sem pé de banho. A diferença será tanto maior quanto menor for o fator de utilização dos fornos.

3.4.6. Aplicações de fornos de indução a cadinho

■ Fusão de aço

Os fornos de indução a cadinho são utilizados em fundição de aços,contudo a escolha destes equipamentos para esta finalidade deve ser objeto de uma análise detalhada, pois tais fornos não satisfazem o conjunto de necessidades deste tipo de fundição.

Os fornos a cadinho não se adaptam bem às operações metalúrgicas e em particular, ao refino por escória, pois somente a parte metálica do banho é aquecida.

A densidade de potência, limitada dos fornos a cadinho de frequência de rede, implica em tempos relativamente longos para a fusão, o que limita a produtividade e, às vezes, pode ser prejudicial à durabilidade dos refratários, pois são mantidos por longos períodos a altas temperaturas. Este tipo de forno é, pois, pouco utilizado, salvo para a produção de aços destinados à produção de peças grandes.

Por outro lado, os fornos de média frequência são equipamentos de refusão bem adaptados à produção de aços especiais em quantidades limitadas, com possibilidade de mudanças frequentes de ligas produzidas, pois ele apresenta velocidade de fusão elevada a facilidade de partir com carga fria.

As potências específicas dos fornos de média frequência variam de 1000 KW/t de capacidade, para fornos pequenos, e 700 KW/t para os maiores. A potência específica dos fornos de frequência de rede varia de 250 a 400 KW/t. O consumo específico nominal é de ordem de 700 KWh/t para fornos pequenos, e 650 KWh/t para os maiores. Contudo,o consumo específico médio observado na prática se situa, geralmente, entre 850 KWh/t e 750 KWh/t, para os fornos mais modernos, que utilizam conversores estáticos de frequência triristorizado.

■ Fusão de ferro

Os fornos de frequência de rede são muito utilizados para produção de ferros cinzentos, maleáveis e de grafite esferoidal. Para produção menores e para a elaboração de ferros especiais, os fornos de média frequência se impõe, geralmente, pela sua flexibilidade.

A potência é da ordem de 250 a 450 KW/t de capacidade para fornos de frequência de rede. O consumo específico nominal é da ordem de 500 KWh/t a 1500°C, contudo o consumo médio varia, na prática, entre 550 a 750 KWh/t em função de como a fundição é operada, do número de turnos diários, da temperatura de vazamento, da capacidade do forno, da forma como ele é operado, de sua potência específica, etc.

Os fornos de frequência de rede também são utilizados em duplex com outro tipo de forno, em particular o arco ou o cubilô.

Dessa forma o forno a cadinho de frequência de rede opera como um amortecedor entre a fusão e a moldagem. Estes fornos de manutenção são utilizados para sobreaquecer o metal. As potências específicas destes fornos de manutenção são, geralmente, menores do que aquelas dos fornos utilizados para a fusão. Tais potências variam de 100 a 200 KW/t.

■ Fusão de alumínio e magnésio

Os fornos a cadinho de frequência de rede são bastante utilizados para a fusão de ligas de alumínio, onde se fabrica, de preferência somente um tipo de liga e em grandes quantidades, geralmente mais de 700 kg/h.

A oxidação é mínima e os metais produzidos são homogêneos em composição e em temperatura.

A durabilidade do cadinho é elevada, de dois a três anos. O carregamento pode ser facilmente mecanizado e a operação muito flexível.

O consumo específico, na maioria dos casos, situa-se entre 500 a 550 KWh/t, podendo chegar a 600 KWh/t ou mais.

A utilização de fornos de média frequência tem se desenvolvido muito em fundição de alumínio de produção horário, relativamente, pequena ou que apresenta jornada de trabalho igual ou inferior a dois turnos de 8 horas, pois as instalações são mais compactas e a partida com carga fria é fácil.

As fundições que produzem ligas de magnésio em grandes quantidades empregam também, frequentemente, forno a cadinho. Contudo, é indispensável utilizar-se cadinho de aço no lugar de cadinho com revestimento refratário para se evitar a reação do magnésio com refratário. Se a espessura do cadinho é grande, de 50 a 60 mm, as correntes induzidas se desenvolverão quase que exclusivamente no cadinho de aço, pois a profundidade de penetração, a 60 Hz, para o aço a 800°C, é da ordem de 60 mm. O aquecimento da carga se dá de forma indireta. O peso do cadinho é elevado e a inércia térmica é grande. No caso de se desejar reduzir estas duas grandezas deve-se utilizar cadinhos mais finos de 8 a 12 mm de espessura. Neste caso, o aquecimento, na sua maior parte, ocorre de forma direta. O rendimento, entretanto, é ligeiramente menor do aquele que se verifica em cadinho de maior espessura, pois a resistividade do magnésio é baixa.

■ Fundição de ligas de cobre

Os fornos de frequência de rede são bastante utilizados em fundições de ligas de cobre para as produções grandes de um só tipo de liga ou para produção de peças pesadas como hélice de navios. No primeiro caso, as potências específicas são elevadas da ordem de 200 a 300 KW/t de capacidade, no segundo ela é bem menor, de 30 a 100 KW/t. A movimentação do banho permite obter-se ligas homogêneas, mesmo que ela seja composta de componentes de densidades bastante diferentes. O forno a cadinho de frequência de rede tem no forno canal um grande concorrente, pricipalmente, para produção de ligas de ponto de fusão relativamente baixo, como o latão.

O consumo específico prático varia sensivelmente com as ligas produzidas e suas temperaturas de vazamento. Varia de 400 a 500 KWh/t para cobre puro. Para o latão o consumo é de 300 a 350 KWh/t. Para o bronze, o consumo se situa entre o do latão e o do cobre.

Os fornos de média frequência são muito utilizados em pequenas e médias fundições de ligas de cobre, sobretudo para os metais vazados a altas temperaturas. O cadinho é revestido de refratário ou de grafite. A flexibilidade de partida destes fornos lhes confere uma vantagem inegável nas fundições que produzem ligas muito diversificadas.

4 PERDAS ENERGÉTICAS EM UMA INSTALAÇÃO DE FUSÃO POR INDUÇÃO

Nos processos de fundição, além das perdas nos fornos de fusão, existem outras nas operações complementares. Nesse capítulo serão descritas, com detalhes, as perdas nos fornos de indução, com recomendações para minimizá-las, bem como de forma mais suscinta, as perdas nas operações subsequentes à fusão.

4.1 - Perdas energéticas em processos de fundição

As perdas de energia, que ocorrem nos processos de fundição, podem ser classificadas como diretas e indiretas.

4.1.1 - Perdas de energia indiretas

- Perdas energéticas devido a peças defeituosas refugadas.

As perdas indiretas são representadas pelos montantes de energia agregados às peças defeituosas e refugadas. Portanto, um passo muito importante a ser dado em um programa de conservação de energia em uma fundição é reduzir-se a um mínimo aceitável o volume de peças refugadas. Pode-se, também, incluir como perdas indiretas a energia agregada aos canais e massalotes, resultantes da alimentação dos moldes.

- Perdas de energia nos canais e massalotes

Em uma fundição é essencial a obtenção de peças fundidas sem vazios internos provocados pelas contrações que o metal sofre no estado líquido, após a fusão, e na solidificação. Para isto, no sistema de alimentação dos moldes existem reservas de metal líquido para compensar estas contrações, chamadas massalotes.

Os massalotes e canais se constituem nos componentes mais importantes no rendimento metálico, que é dado pela relação entre o peso da peça fundida e o peso total do metal vazado no molde.

Sendo assim, os massalotes e os canais são responsáveis pela sanidade das peças fundidas e, consequentemente, pela taxa de refugo. Por outro lado, eles se constituem em massa excedente de metal que tem que ser fundida e, consequentemente, consomem energia. Portanto, sob o ponto de vista de conservação de energia, os canais e massalotes ideais são aqueles que exigem a menor quantidade possível de metal líquido e garantam peças perfeitas. Grande parte das fundições brasileiras utilizam método prático na determinação do sistema de alimentação dos moldes, embora existam métodos e cálculos científicos de sistema de alimentação, relativamente, fáceis de serem aplicados. Isto não quer dizer que os métodos são sempre anti-econômicos e que os métodos técnicos sejam sempre infalíveis. Na verdade, na definição de um bom sistema de alimentação, os dois métodos se complementam.

Em um projeto do sistema de fundição de peças, executado por um projeto que tenha boa vivência prática, se forem utilizados métodos de maior base científica, na certa os resultados serão melhores do que aqueles decorrentes de um projeto baseado somente na prática tradicional.

4.1.2 - Perdas diretas

As perdas diretas de energia são aquelas que ocorrem no processo de fundição com um todo, desde a fusão do metal, o seu sobreaquecimento a manutenção da temperatura do metal líquido, o seu transporte em panelas, a sua moldagem até a usinagem e tratamento térmico das peças fundidas.

As operações, que ocorrem após a fusão da carga metálica, apresentam perdas de energia substanciais, decorrentes da ultilização de equipamentos e métodos operativos inadequados. Nessas operações, as perdas de energia se destacam no transporte de metal líquido, nos fornos de manutenção de temperatura e no tratamento térmico das peças fundidas.

- Perdas no transporte de metal líquido

No transporte de metal líquido para a alimentação dos moldes, ou para os fornos de manutenção de temperatura dos sistemas de alimentação de moldes permanentes, as perdas de energia são significativas, principalmente, em decorrência de:

panelas mal isoladas termicamente e, usualmente, operadas sem tampas isoladas que resultam em perdas por condução, convecção e principalmente, por irradiação;

- utilização de um número de panelas acima do necessário e suficiente, provocando o esfriamento das mesmas no aguardo para o transporte do metal líquido, acarretando um consumo de energia acima do necessário;

- demora no carregamento das panelas, por motivos operacionais;

- percurso longo das panelas carregadas com metal líquido, até os locais da operação de alimentação dos moldes, ou dos fornos de manutenção de temperatura;

- forma de transporte das panelas, que normalmente o torna demorado e, consequentemente, aumentando as perdas energéticas.

■ Perdas nos fornos de manutenção de temperatura

Normalmente, os fornos de manutenção de temperatura do metal líquido apresentam elevadas perdas térmicas em razão do mau isolamento térmico e da ausência de tampas isolantes. Como, via de regra, o tempo de permanência de metal nestes fornos é grande e, devido as suas condições, as perdas resultantes são consideráveis.

■ Perdas nos fornos de tratamento térmico

O consumo de energia para o tratamento térmico de peças fundidas é considerável. As perdas de energia neste processo se devem, principalmente, à programação inadequada das peças a serem tratadas, a duração exagerada do ciclo de tratamento, ao arranjo físico das peças no forno, além de perdas inerentes a cada forno em particular.

4.2 - Perdas de energia em fornos de indução

Apesar do forno indutivo ser um equipamento de elevada eficiência energética, suas perdas são consideráveis e podem ser minimizadas a partir de uma análise detalhada de suas carcterísticas e da aplicação de algumas medidas operacionais.

As perdas de energia, em uma aproximação simplificada, podem ser divididas em três grandes grupos:

- perdas inerentes ao processo: caracterizadas por serem próprias do processo, como por exemplo, as perdas na bobina indutora;

- perdas devido às características do equipamento: São aquelas ocasionadas pelo projeto, dimensionamento e tipo do forno;

- perdas na operação: são provocadas pela operação não omitizada do forno, como por exemplo, as perdas por irradiação pela abertura da tampa do forno.

A ação sobre cada um destes tipos de perdas deve ser específica, objetivando minimizar a sua somatória e melhorar o desempenho econômico da instalação de fusão.

Com relação às perdas inerentes ao processo produtivo pouco se pode fazer, além de um gerenciamento eficaz do sistema de modo a assegurar que estas perdas sejam as menores possíveis para cada fase ou condição da fusão. Projetos de recuperação de calor devem ser cuidadosamente analisados para tais casos, reconhecendo-se, a priori, as limitações destas soluções.

As perdas devido aos vícios ou descuidos operacionais representam um potencial considerável de economia de energia. As ações neste caso devem ser voltadas, principalmente, para o treinamento dos operadores, supervisores e todos os funcionários envolvidos na operação dos fornos de indução.

Uma análise, muitas vezes, não desenvolvida pelos responsáveis pela operação de uma instalação de fusão por indução, diz respeito às características próprias do equipamento em uso. É muito comum se adquirir um forno com capacidade de produção muito superior à necessária, para se fazer frente a uma expansão futura da produção. Esta prática, além de exigir um investimento inicial maior, provoca maior consumo de energia e, consequentemente, maiores perdas de energia elétrica.

Para nova instalações, ou ampliações, ao se adquirir um novo forno, deve-se analisar bem e encontrar uma solução que atenda as expansões futuras e consuma o mínimo de energia elétrica possível.

Nesse capítulo serão analisadas as principais perdas de energia em uma instalação de fusão por indução, bem como serão apresentadas sugestões para minimizá-las.

4.2.1 - Balanço energético de uma instalação de fusão por indução

Em um programa de redução do consumo de energia, a primeira ação consite em se determinar, mesmo que de forma aproximada, identificando-se as fontes de energia, o fluxo de energia e as perdas que ocorrem no processo. Cada um destes itens devem ser avaliados e quantificados de forma a se ter uma idéia geral do sistema.

A quase totalidade da energia consumida em uma instalação de fusão por indução é consumida pelo forno, propriamente dito. Outros consumidores são os sistemas de refrigeração, com bombas e ventiladores, o sistema de acionamento, com motores e bombas, o sistema conversor de frequência, o transformador, os cabos alimentadores e os capacitores.

Um roteiro simplificado para o desenvolvimento de um balanço energético de um forno de indução é o seguinte:

- determinação do montante de energia consumida por toda a instalação de fusão por indução;
- avaliação da energia absorvida pela carga, que pode ser calculada em função de tipo de carga e de suas propriedades físicas;
- avaliação da energia consumida pelos motores de seus sistemas auxiliares;
- avaliação das perdas de energia nos seus equipamentos e instalações auxiliares;
- avaliação das perdas na bobina indutora;
- avaliação das perdas pelas paredes e tampa do forno

O objetivo do balanço térmico é conhecer as fontes, a energia útil e as perdas, de forma a identificar ações para minimizar o consumo de energia.

A figura 22 apresenta um balanço térmico simplificado de forno de indução a cadinho de baixa frequência.

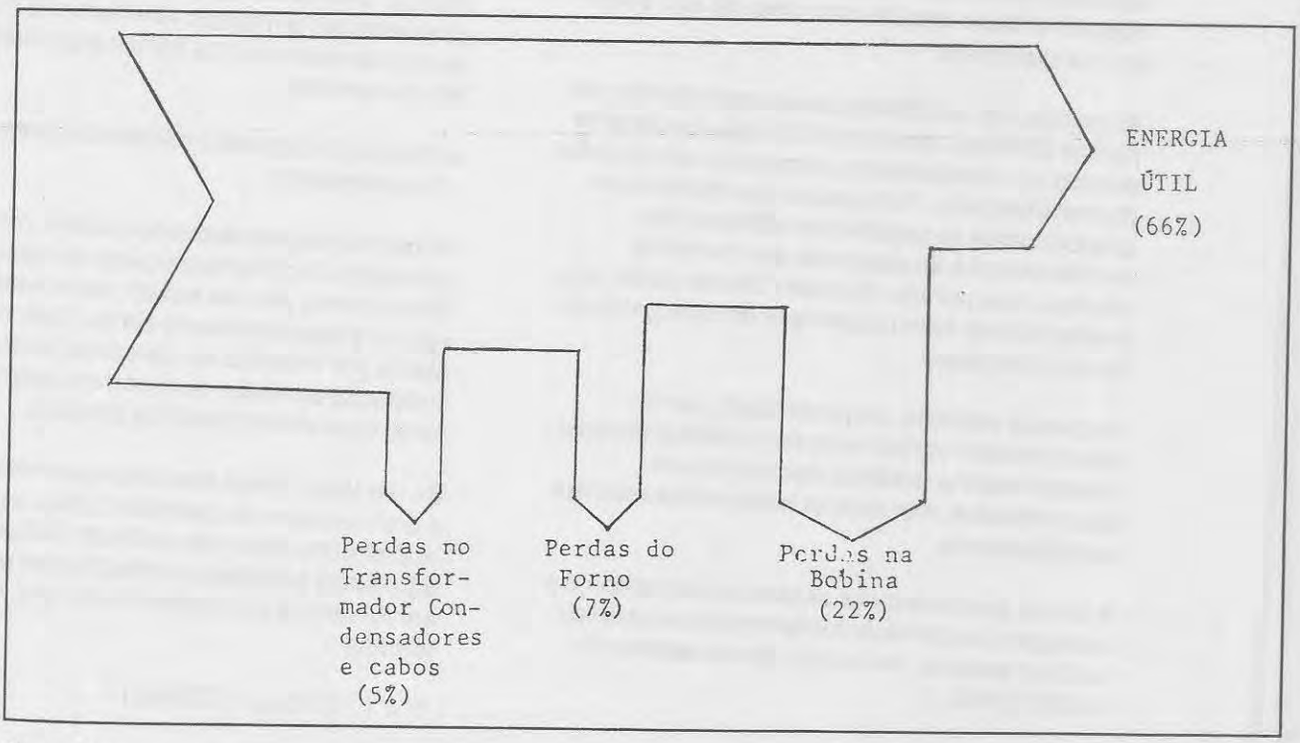


Figura 22
Balanço Energético de um forno a cadinho de frequência de rede

4.2.2 - Perdas no transformador

O transformador do forno de indução é um equipamento destinado a abaixar a tensão do sistema de média tensão da concessionária, quando a indústria estiver ligada diretamente nele, ou no sistema de média tensão da indústria, quando esta estiver ligada ao sistema de alta tensão da concessionária, para a tensão de operação do forno.

Um transformador apresenta dois tipos de perdas: perdas em seu núcleo magnético, também chamadas perdas no ferro, e perdas em seus enrolamentos, conhecidas como perdas no cobre.

As perdas no ferro se devem às perdas ôhmicas devido às correntes induzidas que circulam nas chapas de aço-sílico,as quais constituem o núcleo do transformador, e as perdas histeréticas, pois o núcleo é constituído de material ferro-magnético. Para um dado transformador, as perdas no núcleo independem do carregamento do transformador, ou seja, são as mesmas, quer o transformador esteja a plena carga, quer esteja em vazio. Os transformadores fabricados atualmente, apresentam perdas no ferro menores do que aqueles construídos no passado, pois seus núcleos utilizam chapas mais finas de aço silício de boa qualidade.

As perdas nos enrolamentos são constituídas por perdas ôhmicas, devido a circulação de corrente elétrica nos enrolamentos primários e secundários do transformador. Tais perdas são diretamente proporcionais as resistências elétricas dos enrolamentos e ao quadrado das correntes elétricas que por eles circulam. Sendo assim, tais perdas variam com o quadrado do carregamento do transformador.

As perdas relativas, ou porcentuais, de um transformador variam com sua potência nominal. Quanto maior a potência nominal de um trasnformador, menores as suas perdas relativas, ou porcentuais.

A tabela 3 apresenta as perdas no enrolamento e no núcleo de diversos transformadores imersos em óleo isolante, de relação de transformação 13.200 V/480 V.

Tabela 3
Perdas em transformadores

Potência (KVA)	Perdas em Watts no núcleo	no enrolamento	total
200	760	2.110	2.870
500	1.600	4.700	6.300
1.000	2.800	7.900	10.000
2.500	5.800	16.500	22.300
5.000	11.000	31.000	42.000

Para transformadores de elvadas potências, as perdas nos enrolamentos, com o transformador à plena carga, são maiores que as perdas no núcleo. Em transformadores de potências nominais acima de 220 KVA, as perdas nos enrolamentos, a plena carga, chegam a ser de 3 a 4 vezes superiores às perdas no núcleo.

■ Redução das perdas no núcleo do transformador

As perdas no núcleo independem do carregamento do transformador, ou seja, são constantes e existem desde que o transformador esteja ligado com carga ou não. Para se reduzir estas perdas de energia elétrica, deve-se sempre desligar o transformador quando este não estiver operando por um tempo relativamente longo, como por exemplo, nos turnos improdutivos e nos fins de semana.

■ Redução nas perdas nos enrolamentos de transformador

As perdas nos enrolamentos variam com o quadrado da corrente de carga do transformador. Dessa forma, para se reduzir estas perdas deve-se reduzir a sua corrente de carga. Essa redução é obtida por medidas de conservação de energia na instalação de fusão, bem como operando-se o forno com elevado fator de potência.

Se um forno opera com uma determinada potência e com um fator de potência $COS\varphi_1$ e passa a operar com o fator de potência $COS\varphi_2$, sem alterar a potência solicitada, a redução das perdas nos enrolamentos do transformador será dada pela fórmula:

$$R = 1 - (COS\varphi_1 / COS\varphi_2)^2$$

Para exemplificar, seja um dado forno que opera com um fator de potência igual a 0,7, se esse fator de potência for corrigido para 0,85 a redução das perdas nos enrolamentos do seu transformador será:

$R = 1 - (0,70 / 0,85)^2$

R = 0,32 ou 32%

4.2.3 - Perdas nos cabos de alimentação e nas conexões

Os cabos de alimentação de um forno, como todo condutor, apresentam resistências elétricas. Sendo assim, ao circular corrente elétrica por eles, ocorrem perdas por efeito joule, chamadas de perdas ôhmicas. As perdas ôhmicas em um condutor são dadas pelo produto de sua resistência elétrica pelo quadrado da corrente elétrica que por ele circula.

No circuito alimentador do forno existem conexões elétricas. Como todas as conexões, apresentam resistências elétricas chamadas de resistências de contato. Ao circular corrente elétrica por elas há perdas por efeito joule. Essas perdas são tanto maiores, quanto maior a resistência de contato.

A redução das perdas ôhmicas nos cabos alimentadores de um forno é conseguida pela redução da corrente de carga do forno e pela operação deste com alto fator de potência.

Em instalações de porte, a potência dissipada nos cabos de alimentação são tão elevadas, que estes precisam ser refrigerados. Se esta refrigeração for deficiente, a resistência elétrica dos cabos se eleva, aumentando as perdas ôhmicas, podendo danificá-los. Sendo assim, deve-se dar atenção ao sistema de refrigeração para se evitar perdas de energia e, principalmente, danos nos cabos alimentadores.

Para se reduzir as perdas nas conexões elétricas do circuito alimentador deve-se, além de se reduzir a corrente elétrica na operação do forno, reduzir as resistências de contato das mesmas. Para se reduzir tais resistências de contato é muito importante, durante uma manutenção preventiva, dar atenção às conexões, reapertando-as adequadamente ou substituindo os conectores quando danificados.

4.2.4 - Perda nos capacitores

Os capacitores estáticos são equipamentos que apresnetam resistências elétricas internas, que apesar de pequenas, provocam perdas elétricas Estas perdas existem enquanto os capacitores estiverem ligados e deixam de existir, quando forem desligados. Estas perdas são pequenas apesar de em algumas instalações de porte exigirem sistemas de refrigeração.

4.2.5 - Perdas na bobina indutora

Na bobina indutora de um forno de indução há dois tipos de perdas: as perdas térmicas e as perdas elétricas. As perdas térmicas são decorrentes da transmissão de calor da carga metálica aquecida através do revestimento refratário do forno. As perdas elétricas na bobina indutora é dado pelo produto da resistência elétrica da bobina, pelo quadrado da intensidade da corrente elétrica que por ela circula. Na verdade as perdas térmicas não ocorrem na bobina propriamente dita e sim são perdas a elas transmitidas pelo metal aquecido através do revestimento isolante do forno. Contudo, por tradição, são consideradas como perdas na bobina indutora.

O indutor, portanto, deve ser feito de um metal de baixa resistividade, como o cobre eletrolítico muito puro, que é utilizado para a fabricação da grande maioria das bobinas indutoras. Todavia a densidade de corrente não é uniforme dentro do indutor e o efeito pelicular deve ser levado em conta na determinação da resistência da bobina indutora. Para esta análise, levando-se em conta o efeito pelicular, dois casos devem ser considerados.

Quando a profundidade de penetração é igual ou superior ao diâmetro do condutor, a resistência do indutor pode ser calculada pela fórmula usual (que dá o seu valor em função da resistividade do material com o qual o indutor é feito, da sua transversal e do seu comprimento). Este caso ocorre para frequências baixas e uma seção transversal do indutor não muito grande. Nestes casos, para se reduzir as perdas, deve-se aumentar a seção transversal do indutor.

Quando a profundidade de penetração é muito inferior ao diâmetro útil do indutor, a corrente se concentra na superfície do indutor, principalmente naquela voltada para o cadinho onde se encontra

a carga metálica. A seção a ser utilizada para o cálculo da resistência é igual ao produto da largura de uma espira pela profundidade de penetração. Esta situação é encontrada em fornos de alta e média frequência. Dessa forma é inútil aumentar-se a espessura do indutor para se reduzir as perdas elétricas por efeito joule na bobina indutora em fornos de média e alta frequência.

■ Redução das perdas elétricas na bobina indutora

As perdas energéticas relativas ou percentuais da bobina indutora dependem de numerosas variáveis. Contudo, a observação de algumas regras possibilita a sua redução

- utilizar um indutor feito de material de baixa resistividade e limitar a sua temperatura, tendo em vista que a resistividade cresce com a elevação da temperatura; o sistema de refrigeração de uma bobina serve para remover a energia dissipada no indutor, evitando que essas elevem e, principalmente, danifiquem a bobina;

- assegurar um bom acoplamento entre o indutor e a carga metálica a ser fundida, reduzindo-se ao máximo a distância entre a carga e a bobina, ou seja, o revestimento refratário deve ser o mais fino possível;

- utilizar todo o comprimento do indutor, ou seja, o nível da carga não deve ser inferior àquele correspondente ao da espira superior da bobina;

- operar com uma carga, de tal forma que a relação da espessura de seus componentes e a profundidade de penetração seja pelo menos superior a 4, para com isto se ter fator de transmissão de potência elevada.

A redução das perdas térmicas é conseguida pela melhoria do isolamento térmico entre o indutor e a carga metálica. Esta melhoria do isolamento térmico não pode implicar no aumento da espessura do revestimento refratário e isolante do forno, pois, provoca a redução do rendimento do forno. Na verdade, a redução das perdas térmicas é conseguida pela operação adequada do forno, evitando-se superaquecimentos desnecessários e a permanência da liga já pronta dentro do forno por muito tempo. Portanto, a corrida deve ser a mais rápida possível e o superaquecimento deve ocorrer quando necessário. Para um determindado forno as perdas na bobina indutora dependem do metal ou liga metálica e de como o forno é operado. Em média as perdas na bobina, em função dos metais produzidos, são:

Metal/liga metálica	Perdas em % do consumo total
Ferro fundido e aço	22%
Alumínio	32%
Cobre	38%

Estas perdas diferenciadas se explicam em função das resistividades diferentes dos metais fundidos, bem como pelo fato do ferro fundido e do aço serem materiais ferromagnéticos.

Uma operação do forno com rendimento elétrico abaixo do nominal, com baixo fator de potência, apresentando vazamento do metal fundido lento, com superaquecimento da carga metálica demorado, acima de valores aceitáveis e, às vezes, desnecessários, provoca um aumento das perdas energéticas pela bobina indutora.

■ Recuperação de energia dissipada pela bobina indutora

O calor dissipado pelo transformador, pelos condensadores, pelos cabos alimentadores do forno e pelo conversor de frequência tem importância secundária na recuperação de calor que pode ser aproveitado para aquecimento de ambientes. No brasil, praticamente, esta fonte de calor não tem aplicação.

O calor dissipado pelo circuito de refrigeração da bobina indutora representa a maior parte das perdas de um forno de indução. Estas perdas, normalmente, são dissipadas no meio ambiente exterior à fundição.

Duas técnicas podem ser utilizadas para recuperar a energia contida na água de refrigeração do indutor: a bomba de calor e trocadores de calor.

A bomba de calor se constitui em um processo muito eficiente sob o ponto de vista energético, mas exige investimentos muito elevados para a sua instalação. Como os investimentos iniciais para a instalação de trocadores de calor são muito inferiores, esta técnica é a preferida.

Para a maioria dos fornos de indução a temperatura da água de entrada não deve ser inferior a 30°C e a de saída não deve ser superior a 60°C.

A uma temperatura de saída da água de refrigeração próxima a 60°C, é possível recuperar-se a energia do sitema de refrigeração da bobina para diversas aplicações. Na saída dos trocadores de calor, a água pode ser elevada facilmente de 45 a 55°C.

As aplicações mais usuais são:

- água para processos;

- água para banhos;

- aquecimento de ambientes.

Antes de se decidir investir na instalação de um sistema de recuperação de calor proveniente da refrigeração de uma instalação de fusão por indução, principalmente da bobina indutora, deve-se fazer uma análise técnica e econômica criteriosa.

4.2.6 - Perdas pelas paredes do forno

Em um forno de indução há perdas térmicas pelas paredes do forno. Estas perdas dependem do isolamentro térmico, da área das paredes externas, bem como da temperatura da carga. Para reduzí-las, deve-se melhorar o isolamento térmico do cadinho. Contudo, para isto deve-se levar em conta que, para se ter um rendimento elétrico bom, a espessura da parede do cadinho deve ser a menor possível. Portanto, medidas voltadas para a melhoria do isolamento térmico do forno devem levar em conta a necessidade de se minimizar a espessura do cadinho.

Além dessas perdas, ocorrem outras pelo orifício da bica e na área em volta da tampa. A figura 23 mostra esquematicamente estas perdas em forno a cadinho. As perdas pelas paredes dependem do tamanho do forno, de sua potência e da temperatura do metal fundido. Normalmente variam de 2% para fornos grandes, a 10% para fornos pequenos.

4.2.7 - Perdas elétricas na estrutura metálica do forno

Todas as linhas de força presentes no interior da bobina se fecham no seu exterior. Essas linhas podem induzir elevadas correntes na estrutura metálica, que forma o corpo do forno. Para se evitar esse inconveniente, são colocados núcleos magnéticos contra os flocos externos da bobina, com a finalidade de concentrar as linhas de forças, evitando que elas atinjam a estrutura metálica, aquecendo-os e, consequentemente, aumentando as perdas.

Esses núcleos magnéticos precisam ser construídos com aço silício de boa qualidade e dispostos em torno da bobina de forma adequada.

4.2.8 - Perdas de energia pela tampa do forno

Todo o corpo aquecido perde energia térmica por irradiação. a potência irradiada pelo corpo é diretamente proporcioanl à área de sua superfície, a sua emissividade e a quarta potência de sua temperatura. Para um determinado corpo, quanto maior for a área de sua superfície radiante e, principalmente, quanto mais elevada for a sua temperatura, maior a potência por ele irradiada. Por exemplo, a potência irradiada por ferro fundido a 1500°C é de, aproximadamente, 400 KW por metro quadrado.

Tendo em vista a elevada temperatura da carga metálica, que é submetida no processo de fusão em um forno de indução, se este tiver a sua tampa aberta, a superfície da carga emite grandes quantidades de energia. Estas perdas por irradiação são mais elevadas quando a carga metálica estiver em estado líquido e serão tanto maiores quanto mais elevada for a sua temperatura.

Para se ter idéia das perdas de energia por irradiação, devido a abertura da tampa de um forno de indução, são apresentados resultados de medição de consumos de energia elétrica em três fornos de indução utilizados para a fusão de ferro fundido, operando com as tampas abertas em todo o processo e com as tampas permanecendo fechadas, o máximo de tempo possível, durante o processo.

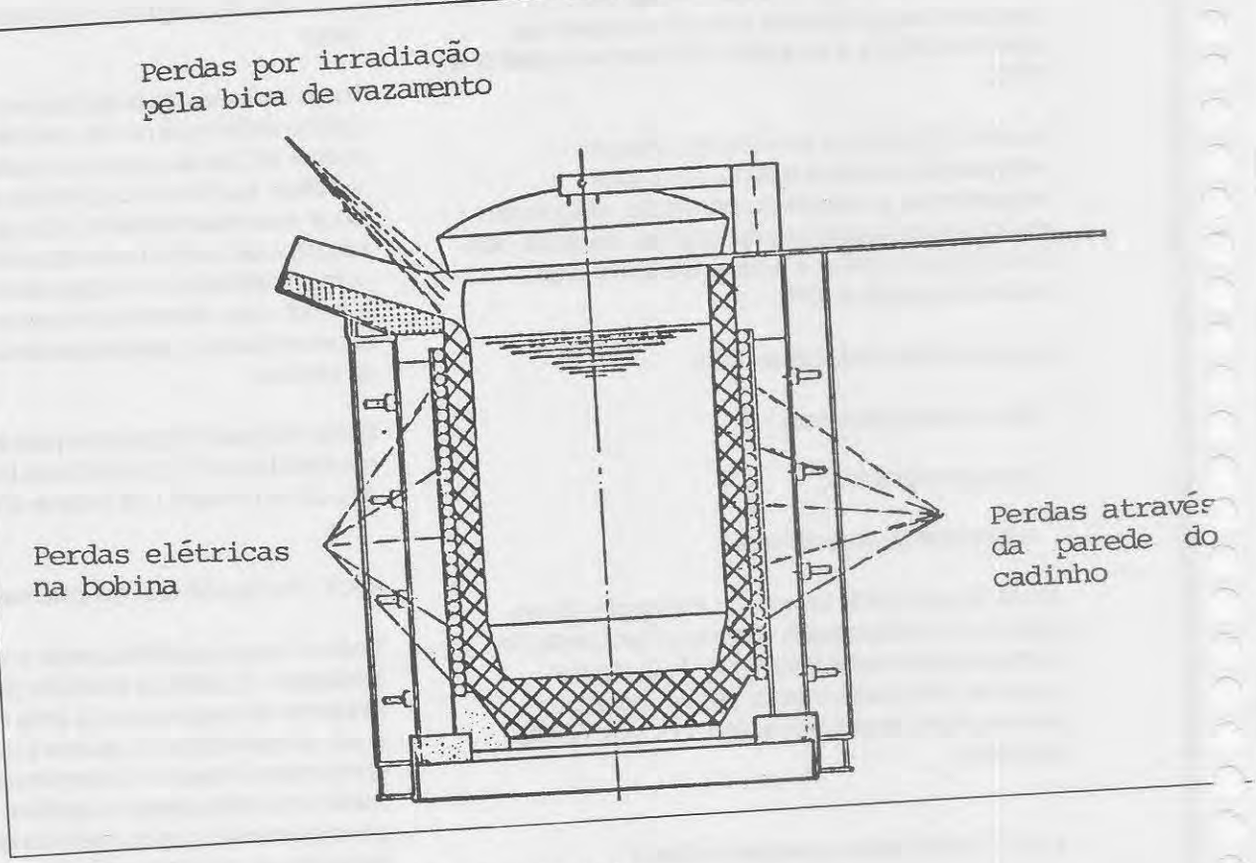


Figura 23
Perdas de energia em um forno a cadinho com tampa fechada

Capacidade	Potência (KW)	Consumo de energia na fusão (KWh/t)		Consumo adicional com tampa aberta (KWh/t)	
		Aberta	Fechada		
1,0	500	655	520	135	26%
2,5	1.500	640	510	130	25,5%
5,0	2.500	572	495	77	15,5%

Como se pode notar pelo exemplo acima, as perdas, por se operar um forno de indução com a tampa aberta, podem alcançar valores muito elevados, superiores a 25%. Em fornos menores que os apresentados no exemplo, estes tipos de perdas são mais elevadas, em decorrência de suas características construtivas, pois a relação da área da superfície da carga metálica exposta por tampa aberta, em relação à capacidade do forno, cresce com a redução da capacidade do forno. Este fato é agravado pelos descuidos operacionais com fornos pequenos, pois, via de regra, operam c tampa aberta. Esta prática é tão comum, que a: pequenas fundições, quando procuram um fabricante, comumente pedem cotação para forno com tampa e forno se tampa.

Um forno de indução, durante o processo d fusão, tem sua tampa removida por diversos motivos, tais como o carregamento da carga metálica, a remoção da escória, a colheita d amostra de metal líquido, etc.

Muitas vezes a tampa permanece aberta por sobrecarregamento e, principalmente, por descuidos operacionais.

Estas aberturas frequentes da tampa, por períodos relativamente longos, provocam perdas de energia por indução que, em alguns casos, podem atingir porcentagens elevadas da energia consumida por corrida.

Redução das perdas por irradiação devido a abertura da tampa

Se um forno for bem operado, estas perdas podem ser reduzidas significativamente. Abaixo são representadas algumas sugestões operacionais para se reduzir as perdas por irradiação, motivadas pela abertura do forno:

- efetuar o carregamento do forno de forma mecanizada. através de cestos; caso a fundição não disponha de meios mecanizados para o carregamento, este deve ser feito de forma mais rápida possível, sendo que se deve dar atenção para o cobrimento rápido da superfície líquida, com isto se reduz a temperatura da superfície do banho;

- deve haver um entrosamento perfeito entre o operador do forno e o operador dos dispositivos mecanizados de transporte, para que a operação de carregamento do forno seja no menor tempo possível;

- somente se deve abrir a tampa do forno quando necessário;

- quando possível, carregar lingotes por calhas apropriadas;

- quando se carregar lingotes no forno, deve-se transportar toda a carga para próximo do forno, na posição adequada, para que o carregamento seja rápido e na quantidade ideal; se possível solicitar a colaboração de um ajudante para esta tarefa;

- fazer o carregamento do forno de tal forma que a quantidade de material introduzido seja o necessário e suficiente; com isto se reduz o número de carregamentos por corrida e se elimina a possibilidade de não se fechar a tampa do forno por excesso de carga;

- fazer a retirada da amostra do metal fundido o mais rapidamente possível.

Deve-se frizar que, as perdas pelas aberturas são, via de regra, as maiores encontradas na operação de um forno de indução e que qualquer programa de conservação em uma instalação deve se dar muita atenção a operação da tampa do forno.

A figura 24 mostra esquematicamente as perdas por irradiação através da tampa de um forno a cadinho.

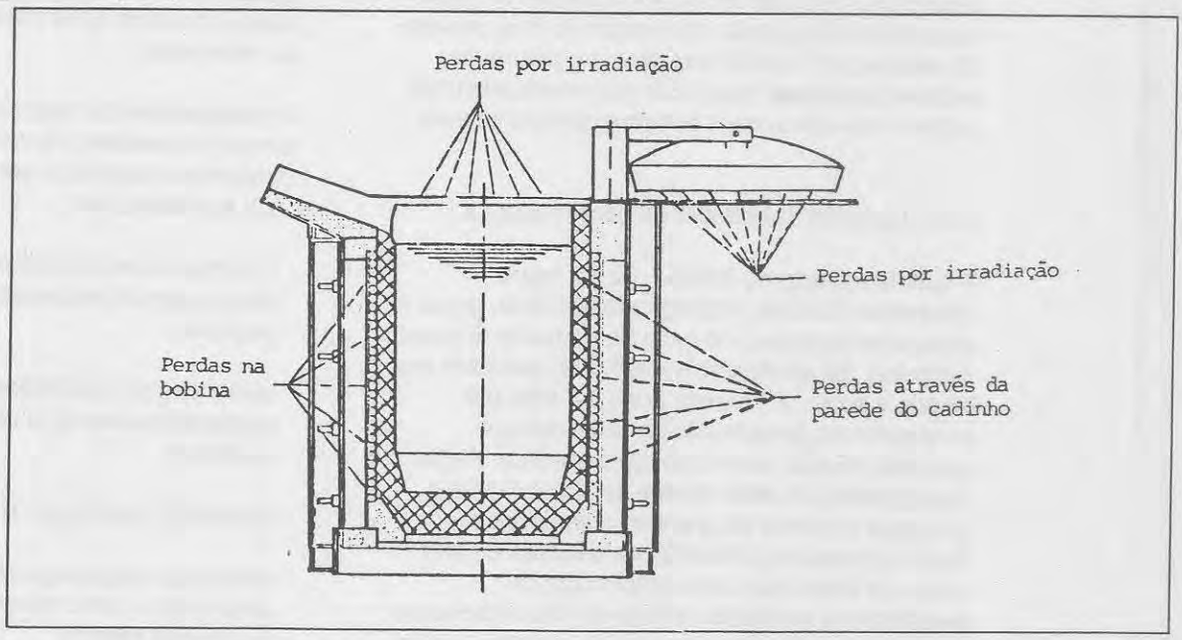


Figura 24 - Perdas de energia em um forno a cadinho com tampa aberta

5 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM OPERAÇÕES QUE ANTECEDEM À FUSÃO EM UM FORNO DE INDUÇÃO

5.1. Introdução

Em uma fundição existe uma série de operações que antecedem à fusão que são fundamentais, não só quanto a produtividade, mas também quanto ao consumo de energia elétrica. Estas operações, quando adequadamente realizadas, podem resultar em consideráveis reduções do consumo de energia elétrica no forno de indução. As operações abordadas neste capítulo são: preparação da carga metálica e carregamento de carga metálica no forno.

Se estas operações não forem realizadas de forma adequada, mesmo que a operação do forno seja otimizada, os resultados referentes a conservação de energia em um forno de indução ficarão longe do seu potencial.

5.2. Conservação de energia na preparação da carga metálica

O processo de fundição tem uma característica, entre os processos de conformação de metais, que é a elevada capacidade de reaproveitamento de materiais metálicos degradados internamente ou por terceiros. Do total do metal fundido pelas fundições, cerca de 30% correspondem a metais secundários (lingotes) e os restantes 70% provem de sucata própria e de terceiros. Logicamente, existem fundições, que pelas suas características utilizam menos ou mais sucata e retorno interno.

5.2.1. Limpeza e secagem da carga metálica

A sucata e o retorno interno, via de regra, se encontram úmidos, impregnados de óleo, graxa e areia, com sujeira e, no caso de materiais ferrosos, oxidados. Esses materiais metálicos precisam ser limpos e secos. A limpeza pode ser feita por escovamento, jateamento de areia ou com granalha de aço, ou decapagem química. Peças impregnadas de areia devem ser limpas, pois a presença no forno de grandes quantidades desílica causam a formação de escórias de alto ponto de fusão que, em contato com o revestimento refratário, podem se depositar sobre ele, provocando o fechamento do cadinho com o passar do tempo. Este fato reduz o rendimento elétrico do forno e a sua produtividade. A umidade pode ser removida por aquecimento ou processos mecânicos, como por exemplo a centrifugação, seguidos de secagem por calor.

Os processos mecânicos de remoção de umidade, seguidos de secagem, consomem muito menos energia, no total, do que aqueles que somente utilizam secagem por aquecimento.

No que se refere a materiais secundários, normalmente em forma de lingotes, estes devem ser armazenados em locais isentos de umidade sujeira e, quando forem carregados no forno, devem estar limpos e bem secos.

5.2.2. Preaquecimento da carga metálica

O preaquecimento da carga metálica é, particularmente, importante quando ela é constituida de sucata, cavacos e refugos de material fundido e, principalmente, quando o forno de indução opera com pé de banho.

Os sistemas de preaquecimento são de dois tipos de simples secagem e aqueles de preaquecimento, propriamente dito.

A principal razão do sistema de secagem simples é a segurança, pois a sucata pode conter umidade e outros contaminantes, que podem causar explosão no forno, quando emergida no metal líquido. Com a secagem simples por preaquecimento estes materiais contaminantes são removidos.

O preaquecimento, propriamente dito, além de remover os materiais contaminantes da sucata apresentam vantagens econômicas entre as quais pode-se mencionar:

- o consumo de energia para se elevar a sucata até a temperatura desejada é relativamente pequeno;
- aumenta a produtividade do forno e, conseqüentemente, a capacidade da instalação existente;
- possibilita a utilização de sucata de menor custo;
- melhora a segurança operacional e o controle atmosfera e, principalmente, reduz o consumo de energia elétrica.

O preaquecimento, que eleva a temperatura da carga metálica para a faixa de 300°C a 750°C, pode ser feito por óleo combustível, ou gás. Mesmo que o rendimento energético dos preaquecedores seja baixo em relação ao rendimento do forno de indução, os aspectos econômicos devem ser avaliados.

Para o caso de preaquecimento para simples secagem a temperatura deve se situar na faixa de 100°C a 300°C e deve ser feita de tal forma que seja possível se elevar a temperatura de toda a carga, no mínimo até 100°C. Este tipo de preaquecimento está ligado somente a segurança operacional, não tendo influência na capacidade de fusão da instalação, nem na redução do consumo de energia elétrica pelo forno de indução.

O preaquecimento da carga metálica é feito, comumente, em cestos ou em calhas.

■ Preaquecimento em cestos

O preaquecimento em cestos é o mais antigo e, ainda hoje, é amplamente empregado. Nesse tipo de aquecimento, o ar quente é injetado na parte inferior ou superior do cesto carregado com a carga metálica. A injeção pela parte superior é a forma mais comumente encontrada para se proceder a secagem da carga. O ar quente passa pela carga, aquecendo-a, e sai pelas laterais próximas ao fundo do cesto.

O preaquecimento em cesto apresenta as seguintes vantagens em relação ao processo de preaquecimento por calhas vibratórias:

- o fluxo de ar quente da carga, principalmente, quando ocorre do fundo para a superfície do cesto, possibilita troca de calor eficiente;
- o espaço para a instalação do preaquecimento é pequeno;
- os queimadores de combustível são de fácil manutenção;
- as perdas de temperatura da carga metálica são reduzidas, uma vez que esta, após ser preaquecida, é imediatamente transferida para o forno.

Por outro lado, o preaquecimento em cestos apresenta as seguintes desvantagens:

- a densidade da carga metálica, que se altera de uma carga para outra, pode afetar o fluxo de ar quente através do cesto, impedindo o aquecimento uniforme da sucata;
- para se obter temperaturas na carga da ordem de 300°C a 750°C, sem se elevar em demasia a temperatura na entrada do cesto, é necessário um longo período de tempo para se atingir a temperatura desejada;
- os cestos, com entrada de ar quente pela superfície e saídas laterais inferiores, tendem a deixar a carga do fundo sem se aquecer adequadamente;
- com o calor o cesto pode sofrer deformações, danificando-se;
- os sistemas com cestos não possibilitam a eliminação de finos e sujeiras contidas na carga.

■ Preaquecimento em Calhas Vibratórias

O preaquecimento em calhas vibratórias consiste em uma calha, propriamente dita, na qual se carrega uma camada de sucata que, em decorrência da vibração, passa por um túnel, que possui uma série de queimadores de alta potência, capazes de elevar a temperatura até 600°C, em poucos minutos.

Estes sistemas apresentam as seguintes vantagens:

- obtenção de elevadas temperaturas na carga em poucos minutos;
- maior eficiência energética do que aquela obtida por preaquecimento em cestos;
- a carga aquecida apresenta temperatura mais uniforme;
- possibilita a eliminação de finos e sujeiras, reduzindo a deposição de escórias no revestimento refratário do forno.

As desvantagens destes sistemas são:

- exigem maior espaço para serem instalados, do que os sistemas de preaquecimento com cestos;
- a carga pode sofrer sobreaquecimento e se oxidar;

exigem maior manutenção.

Após a carga ter sido aquecida pelo sistema de calha vibratória, ela pode ser carregada no forno através de cestos, que é o mais comumente usado, ou por uma segunda calha, que leva o material aquecido da calha vibratória diretamente para o forno. A figura 25 mostra um carregamento de um forno de média freqüência através de uma calha vibratória.

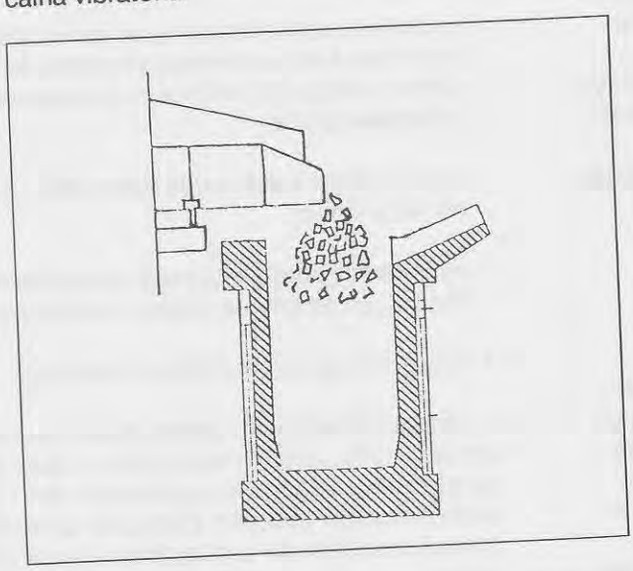


Figura 25
Carregamento de um forno a cadinho, através de uma calha transportadora

O carregamento de um forno sem preaquecimento da carga, requer o uso de materiais limpos e, principalmente, secos. Para isto, deve haver facilidade de estoque, que garanta que o material permanecerá seco. Mesmo assim, no carregamento de sucata fria há riscos maiores de explosão, se comparado com o carregamento de sucata preaquecida.

Se uma fundição dispõe de gases quentes como por exemplo de forno a arco, o preaquecimento da sucata pode ser feito com a utilização desses gases, que pode representar economias de energia consideráveis. Para instalações deste tipo os aspectos econômicos devem ser avaliados.

O preaquecimento acima de 300°C, além de eliminar a umidade e sujeira contidas na carga, possibilita uma redução do consumo de energia elétrica no forno de indução, bem como a produtividade do forno.

Para se ter idéia da redução do consumo de energia elétrica e do aumento da produtividade do forno, abaixo são apresentados resultados de uma instalação de preaquecimento da carga metálica para um forno de 3 toneladas e 2.500KW, para ferro fundido.

Temperatura da carga metálica	Produtividade (t/h)	Consumo (KWh/t)
temperatura ambiente	2,9	517
300°C	3,3	455
500°C	3,72	403
700°C	4,81	312

Como se nota, a produtividade aumenta e o consumo de energia diminui com a elevação da temperatura da carga metálica preaquecida. Esses valores podem ser significativamente alterados conforme a operação do forno de indução.

5.3. Carregamento de fornos de indução como fator de conservação de energia

O carregamento de um forno de indução é uma operação muito importante que pode afetar o consumo de energia elétrica, a produtividade, a integridade física de seu revestimento refratário e a segurança da operação de fusão.

5.3.1. Partida de um forno de indução a cadinho com carga fria

Ao contrário dos fornos a canal, os fornos a cadinho, podem partir com carga fria, ou seja, sem pé de banho.

Em um forno a cadinho que parte com carga fria, a potência transmitida aos diversos componentes que compõem a carga metálica depende das espessuras desses componentes e da profundidade de penetração das correntes induzidas. Para cada componente da carga, a relação entre a sua espessura e a profundidade de penetração afeta a potência a ele transmitida de um fator F, chamado de fator de transmissão de potência. A figura 26 mostra a variação do fator de transmissão de potência (F) em função da relação

entre o diâmetro (d) de uma peça cilíndrica e a profundidade de penetração (do).

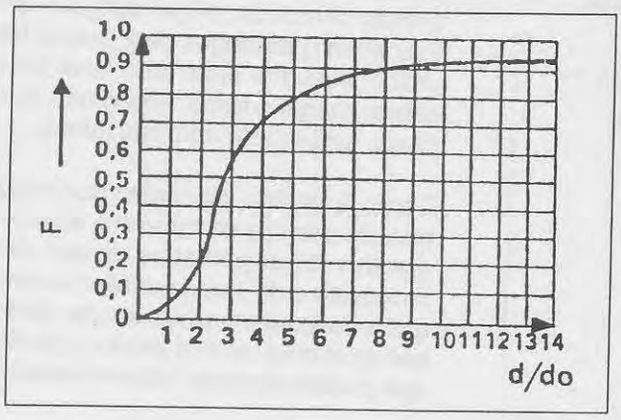


Figura 26
Fator de transmissão de potência em uma peça cilíndrica

Verifica-se pela figura que para relações d/do iguais ou superiores a 4, o fator de transmissão de potência é igual ou superior a 0,7. Para valores d/do inferiores a 4, o fator F decresce acentuadamente e para valores da relação superiores a 4, o fator F cresce lentamente. Como o rendimento elétrico cresce com a elevação do fator de transmissão de potência, quanto maior for a relação d/do, maior a eficiência do forno.

Para uma peça de forma de paralelepípedo, a variação do fator de transmissão de potência em função da relação entre a menor dimensão da peça (a) e a profundidade de penetração (do) é mostrada na figura 27.

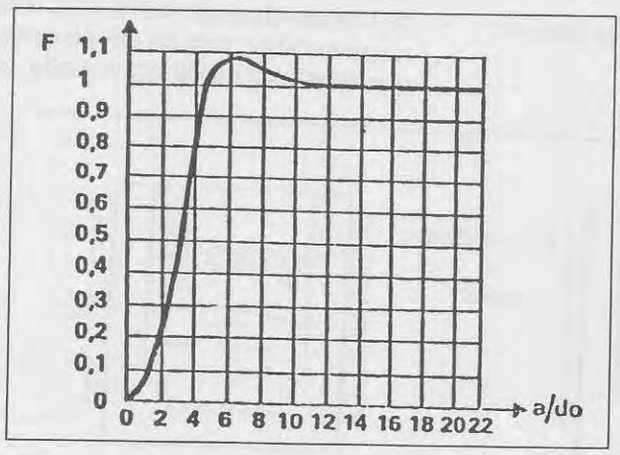


Figura 27
Fator de transmissão de potência em uma peça em forma de paralelepípedo

Da mesma forma que para uma peça cilíndrica, a figura mostra que abaixo de uma relação igual a 4, o fator F cai acentuadamente, reduzindo sobremaneira o rendimento do forno.

Extrapolando-se o que foi dito acima, para peças de qualquer formato, pode-se dizer que para se operar um forno de indução a cadinho, que parta com carga fria, com rendimento alto, as relações entre as espessuras dos componentes da carga e a profundidade de penetração devem ser iguais ou superiores a 4. Como a profundidade de penetração das correntes induzidas na carga metálica depende dos materiais que a constituem, e da freqüência de alimentação do forno, existem, para cada valor de freqüência e para cada tipo de material, dimensões adequadas para os componentes da carga. Esta limitação desaparece quando a carga metálica se torna líquida.

Sendo assim, os fornos de freqüência de rede quando partem com carga fria, devem ser carregados com peças volumosas, que podem ser obtidas pelo lingotamento do pé de banho do forno, quando ele for esvaziado, antes de ser desligado por um período de tempo relativamente longo.

Para partida com carga fria de fornos de média freqüência as espessuras dos componentes da carga devem ser adequados para se ter um bom rendimento. Quando a carga metálica apresenta componentes de diversos tamanhos, é interessante iniciar-se o carregamento com sucata fina e leve e sobre esta carregar-se a sucata pesada, de tal forma que a sucata leve fique compactada, tornando a carga inicial densa. Com isto obtém-se melhor rendimento elétrico, diminui-se o número de carregamento, elevando-se a produtividade do forno.

Nos fornos de freqüência de rede, após a partida com carga fria, a espessura dos componentes da carga para os carregamentos subseqüentes não interferem no rendimento do forno.

Em períodos não produtivos, manter-se pé de banho em forno de freqüência de rede (no lugar de esvaziá-lo e carregá-lo com cárga fria no período produtivo seguinte) depende de vários fatores, tais como: o período que o forno ficará desligado, o número de turnos produtivos, a capacidade do forno, as ligas fundidas, etc. Com um forno a cadinho de média freqüência, não é interessante manter-se pé de banho em períodos não produtivos.

A figura 28 mostra o carregamento de um forno de média freqüência com carga leve compactada com sucata pesada.

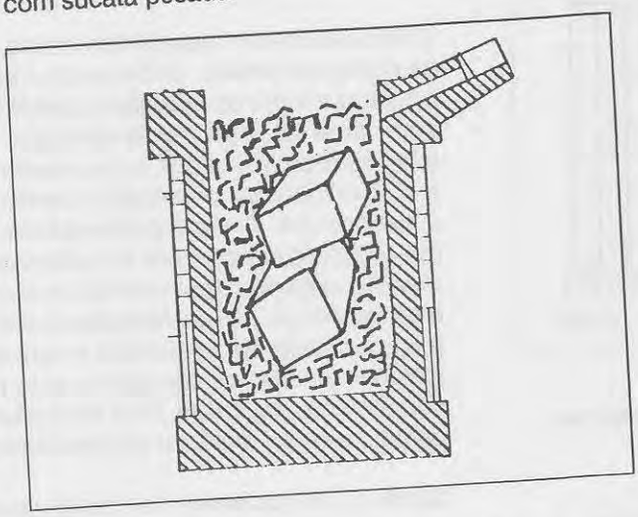


Figura 28
Partida a frio de um forno a cadinho com carga leve caompactado por carga pesada

5.3.2. Carregamento de um forno de indução

O carregamento de um forno de indução deve ser feito de forma cuidadosa, para evitar a queda de sucata de grandes alturas, evitando danos no revestimento refratário do forno. No carregamento deve-se tomar muito cuidado para formação de engaiolamento. O engaiolamento, mostrado na figura 29, provoca o superaquecimento do banho sob as peças que o formam, além de danificar o revestimento refratário.

É uma prática muito comum nas fundições fazer o carregamento dos fornos manualmente, utilizando-se pás, carrinhos de mão e, muitas vezes, somente as mãos. O carregamento manual é muito demorado, o que obriga a tampa do forno ficar aberta por longos períodos de tempo durante uma corrida. Por outro lado, também é comum sobrecarregar o forno, impedindo que o mesmo possa ser fechado com sua tampa.

Como já foi visto, as perdas por irradiação, quando a tampa do forno fica aberta, são muito grandes. Essas perdas se elevam com a temperatura da carga metálica e com o tempo em que a tampa permanece aberta. Sendo assim, o carregamento manual provoca perdas de energia, que podem alcançar valores elevados.

O carregamento mais adequado para um forno de indução é o mecânico, feito com cestos apropriados. Com isto, consegue-se carregar o forno rapidamente com carga ncessária e suficiente. Com esta operação mecanizada a tampa do forno é aberta por muito pouco tempo, pois ela somente é acionada no momento em que o cesto está na posição para a descarga, sendo imediatamente fechada após o carregamento. Conseqüentemente, as perdas por irradiação, apontadas no parágrafo anterior, são reduzidas a um valor mínimo.

Outro fator de conservação de energia, no carregamento de um forno de indução é o perfeito entrosamento entre o operador do forno e o operador dos equipamentos mecanizados de transporte, principalmente, pontes rolantes. O desentrosamento entre estes dois operadores, t[illegible] como conseqüência perdas de energia e redução de produtividade do forno, pois o transporte da carga metálica, fora do tempo certo e com a quantidade de carga inadequada, atrasa o

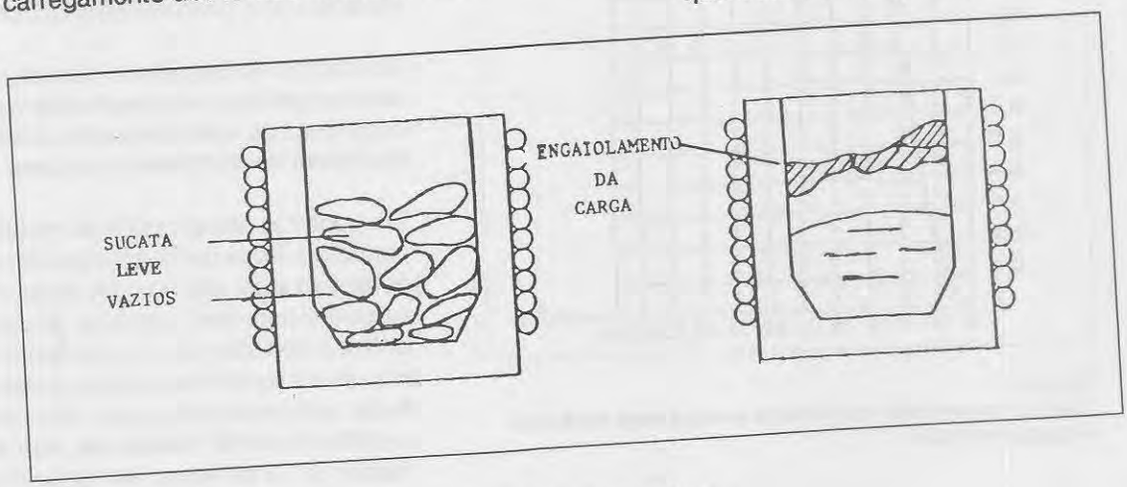


Figura 29
Formação de engaiolamento por carregamento inadequado do forno

carregamento do forno aumentando o tempo necessário para a corrida.

Quando se carrega o forno com lingotes, a melhor forma de se proceder é instalar uma calha apropriada para esta finalidade. Com o carregamento de lingotes em calhas não só se evita a abertura da tampa, como também a formação de respingos. Esse tipo de carregamento possibilita a redução apreciável de perdas de energia por irradiação pelo fato de não ser necessário a abertura da tampa do forno.

O carregamento do forno a cadinho deve ser tal que o nível do metal líquido seja aquele correspondente ao da espira superior da bobina indutora. Com esta prática se consegue um rendimento elétrico ótimo para o forno.

Em um forno a canal, pelo fato da existência do pé de banho metálico necessariamente presente, pode-se carregá-lo com materiais de formas diversas. Contudo, cargas finas e leves tem a tendência de se aglomerarem e apresentarem uma constituição similar a uma esponja, que se aggregam nas paredes do cadinho onde flutuam sobre o banho. A remoção desses materiais é muito difícil.

5.3.3. Reaproveitamento de retorno quente

Outra forma de se conservar energia, através de um carregamento otimizado do forno é estabelecer uma rotina do carregamento de retorno, ainda quentes, no forno, logo após a quebra das peças fundidas em coquilhas. Esses canais de retorno devem ser movidos de caçambas especiais, que transporte o material rapidamente para junto do forno. Esse tipo de carregamento, além de aproveitar o calor remanescente, dispensa o pre-aquecimento para secagem.

5.3.4. Operação conjunta fornos de indução e fornos a combustível

Em fundições que, além de fornos de indução, possuem fornos a combustível, as sucatas e os retornos mais inadequados para os fornos de indução, podem ser fundidos nos fornos a combustível. Posteriormente o metal líquido pode ser transferido para o forno de indução, servindo como pé de banho. Esse tipo de operação possibilita a utilização de sucatas inadequadas para o forno de indução, bem como permite o vazamento total deste último. Nestas fundições, quando operam em um ou dois turnos diários, é comum iniciar a fusão nos fornos a óleo antes do início da operação dos fornos de indução, de tal forma que, quando estes começam a operar, o fazem com pé de banho proveniente dos fornos a óleo. Esta prática elimina a dificuldade de partida de fornos de indução, principalmente os de freqüência de rede, com carga fria, aumentando a produtividade e reduzindo o consumo de energia elétrica.

5.3.5. Carregamento não mecanizado

Nem sempre uma fundição, principalmente de pequeno porte, está capacitada a atender as recomendações descritas acima seja por não dispor de carregamento mecanizado ou por não dispor de recursos para sua carga metálica, mesmo que feito manualmente, deve ser feito de forma a se desperdiçar o mínimo de energia possível. Para estas instalações recomenda-se:

- com pé de banho, e nas cargas subseqüentes à partida, o carregamento deve ser feito de tal forma que a carga cubra, rapidamente, a superfície do banho líquido. Com este procedimento, reduz-se, significativamente, as perdas por irradiação. Para que este carregamento possa ser feito, rápida e adequadamente, deve-se preparar a carga junto à boca do forno, de tal forma que, tão logo a tampa do forno seja aberta, a carga seja nele introduzida e cubra a superfície do banho em pouco tempo;

- o volume de carga introduzida no forno não deve impedir o fechamento de sua tampa;

- a carga final deve ser tal que o banho líquido atinja o nível de rendimento elétrico e produtividade máximos;

- deve-se observar as recomendações para a partida com carga fria, tanto para os fornos de freqüência de rede como para os fornos de média freqüência, bem como a maioria das recomendações descritas no ítem 5.2.2.

6 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA FUSÃO POR INDUÇÃO E NAS OPERAÇÕES SUBSEQUENTES

6.1. Introdução

O rendimento operacional de um forno de indução é, basicamente, função das perdas de energia devidas ao seu projeto e características construtivas e das perdas provocadas pela operação do forno.

Dependendo da programação da produção e das técnicas operativas empregadas, cada um destes tipos de perdas influencia de maneira própria o consumo total da instalação e o seu rendimento energético.

Muitas vezes, se julga que as técnicas de operação pouco influenciam o consumo de energia, no entanto, a experiência de muitas empresas mostra que uma parcela significativa de energia é desperdiçada por emprego de sistemática de trabalho não voltada para a conservação de energia.

Isto ocorre com maior freqüência do que se costuma imaginar, uma vez que a maioria dos procedimentos operativos foram desenvolvidos em épocas em que o custo da energia não era importante nos custos de produção. Além deste fato, as técnicas de operação são transmitidas para os novos operadores através do contato diário com funcionários mais antigos, perpetuando os maus hábitos desenvolvidos.

Nesse capítulo serão apresentadas sugestões de técnicas simples que podem evitar consumos desnecessários de energia.

É importante salientar, que cada fundição apresenta características próprias e, conseqüentemente, deve adequar as recomendações contidas neste manual à sua realidade, bem como desenvolver procedimentos próprios para que os resultados de um programa de conservação de energia elétrica possam ser os melhores possíveis.

6.2. Programação da produção e a conservação de energia

A programação da fusão da carga metálica deve ser a melhor possível, de tal forma que, tão logo a carga esteja fundida e a liga metálica pronta, haja o vazamento. O tempo necessário para uma corrida, quando não há um forno de manutenção operando em conjunto com o forno de fusão está intimamente ligado ao tempo requerido para a moldagem da corrida anterior. Sendo assim, as potências a serem aplicadas ao forno devem ser programadas, de tal forma que o vazamento ocorra em função do tempo necessário para a moldagem da corrida precedente. Por exemplo, quando as peças a serem moldadas são de pequeno porte, a operação de moldagem é mais demorada. Dessa forma, a programação da corrida seguinte deve ser tal que a liga fundida não fique no interior do forno de indução, aguardando o vazamento. Se por acaso, ocorrer um descompasso na programação e o material fundido permanecer no forno aguardando o vazamento, e houver necessidade de um sobreaquecimento do banho metálico, este deverá ser feito somente imediatamente antes do vazamento.

Em fundições onde há fornos de manutenção de temperatura ou holding e produzem peças fundidas de diversos tamanhos, deve haver uma programação das peças a serem produzidas de tal sorte que os fornos de manutenção de temperatura cumpram a sua função de tornar independente o setor de fundição do setor de moldagem. Se por exemplo, durante um determinado período só se produz peças pequenas, que implique em longos períodos de tempo para esgotar o material de uma corrida, mesmo com um forno de manutenção de temperatura, a produção dos fornos de fusão será afetada.

A programação da produção em uma fundição é muito importante na determinação da demanda de potência solicitada da empresa concessionária de energia elétrica, bem como para melhorar o fator de carga da indústria. Consegue-se com isto redução dos custos com energia elétrica.

Com a introdução das tarifas horo-sazonais, para as quais as tarifas de demanda de potência e consumo de energia são diferenciadas conforme o período do dia, para se conseguir custos mínimos com energia elétrica e boa produtividade é fundamental uma programação de produção bem elaborada.

Para fundições que operam em um único turno a demanda de potência solicitada e o consumo de energia elétrica devem ser reduzidos a um mínimo no horário de ponta. Dessa forma a programação

de produção deve proporcionar o desenvolvimento de corridas ao longo da jornada de trabalho, de tal forma que a última termine pouco antes do início do horário de ponta. Se a programação não for adequada, ou a última corrida terminar muito antes do horário limite, sem tempo para uma subseqüente, reduzindo a capacidade diária de produção do forno, ou a corrida derradeira deverá ser interrompida no horário limite, causando consideráveis perdas de energia, ou ainda se arcará com os custos com energia elétrica decorrentes da operação do forno no horário de tarifas mais elevadas.

Para fundições que operam com dois turnos diários, com um intervalo entre eles, deve-se fazer coincidir o período morto entre os turnos e o horário de ponta, bem como tomar os mesmos cuidados para não se desperdiçar energia ou se reduzir a produtividade conforme descrito no parágrafo anterior.

Quando uma fundição opera em dois turnos consecutivos, ou em três turnos, a redução da demanda de potência e do consumo de energia elétrica no horário de ponta está intimamente ligada a custos com energia elétrica, produção diária necessária, custos de produção, etc. Ou seja, a viabilização desta redução deve ser estudada sob o ponto de vista econômico e de produção. Uma vez definida a redução possível, a programação da produção deve ser feita em sua função, para que seja otimizada a operação dos fornos de indução.

6.3. Operação ótima de um forno de indução

Um forno de indução para fusão, pelas suas características e pelo valor do investimento inicial para adquirí-lo e instalá-lo, é um equipamento que deve ser operado de tal forma que apresente a maior produtividade possível e o mínimo de consumo de energia elétrica. Sendo assim, desde que não haja restrições quanto ao tempo necessário para uma corrida, o forno deve ser operado com sua potência máxima.

A operação do forno deve ser tal que seu fator de potência seja o maior possível, não só para que os valores médios mensais da indústria sejam iguais ou superiores a 0,85, em cada segmento horo-sazonal, mas também para se reduzir as perdas elétricas no forno e nos seus equipamentos auxiliares, ou seja, no transformador e nos cabos alimentadores. Em fundições que reduzem o seu consumo de energia no segmento horo-sazonal de ponta, muita atenção deve ser dada ao fator de potência, para que ele não fique abaixo de 0,85, para se evitar acréscimos nas contas mensais de energia elétrica, devido ao ajuste do fator de potência.

Durante a campanha de um forno, deve-se tomar os cuidados necessários com deposição de escórias no revestimento refratário do cadinho pois esta deposição, além de prejudicar o revestimento, reduz o rendimento do forno, aumentando o consumo de energia elétrica e reduzindo a produtividade do forno.

Durante operação de fusão da carga metálica, a temperatura do banho deve ser controlada, para se evitar o seu sobreaquecimento desnecessário, principalmente, no caso de fornos de média freqüência. Sendo assim, deve-se acompanhar constantemente a temperatura de banho, para que esta seja mantida conforme a programação. Para isto, é muito importante que os pirômetros estejam bem aferidos, para que a temperatura medida seja a mais próxima da temperatura real. Deve-se tomar cuidado com operadores muito experientes, que estimam a temperatura pelas características apresentadas pelo banho metálico, prescindindo da utilização dos pirômetros. Esta prática provoca, quase sempre, sobreaquecimento do banho, desperdiçando energia elétrica e comprometendo o revestimento refratário do forno.

A seguir será descrito procedimento para uma operação ótima de fornos de indução de freqüência de rede e média freqüência. Tais procedimentos são genéricos, podendo variar de uma instalação para outra, dependendo das características próprias de cada fundição. Para a descrição dos procedimentos deve-se considerar partida com o forno frio e corridas subseqüentes com o forno quente.

- ligar o transformador média tensão/baixa tensão do forno, pois este deve ficar desligado quando o forno não estiver operando por períodos longos;

- ligar todo o serviço auxiliar do forno, ou seja, a bomba de circulação de água de refrigeração, resfriador, etc.;

- ligar o disjuntor do conversor, para fornos de média freqüência;

- carregar o forno com metal a ser fundido, conforme descrito no capítulo sobre carregamento do forno;

- fechar a tampa do forno;

- ligar o forno;

- aplicar potência reduzida, ir aumentando-a, gradativamente, para evitar choque término no revestimento refratário do forno. Nas corridas subseqüentes deve-se partir o forno com a potência máxima, para se obter a maior produtividade possível;

- quando o nível da carga abaixar em decorrência da fusão do metal, carregar novamente o forno;

- a quantidade de metal introduzido no forno em cada carregamento deve ser tal que o número de carregamentos seja ótimo, evitando-se muitas aberturas da tampa do forno;

- quando o metal estiver fundido, deve-se remover a escória e retirar material para amostra e medir a temperatura do banho; para a execução dessas operações, às vezes, é necessário desligar-se o forno, ou reduzir a sua potência, em decorrência da agitação do banho;

- elevar a temperatura do banho metálico até a temperatura de vazamento e corrigir a liga;

- para o vazamento do metal, liga-se a bomba do sistema hidráulico de acionamento e aciona-se a válvula de basculamento; caso o basculamento do cadinho não seja hidráulico, utiliza-se o mecanismo manual;

- nas corridas subseqüentes, não será necessário manter-se pé de banho para fornos de média freqüência; para fornos de freqüência de rede é imperativo a manutenção de pé de banho, que para se atingir a máxima taxa de fusão deve ser de, aproximadamente, 70% da capacidade do candinho;

- a carga metálica, principalmente para fornos que operam com pé de banho, deve estar isenta de umidade, para se evitar explosões;

- no fim de cada jornada de trabalho, o forno de média freqüência deve ser descarregado totalmente, para que o metal não se solidifique no seu interior, a água de refrigeração deve continuar circulando até que a temperatura do forno se reduza para cerca de 80°C, para que a sua bobina indutora não seja danificada;

- em seguida deve-se desligar o transformador do forno;

- para fornos de freqüência de rede, se o período, entre uma jornada e outra, não for muito grande, deve-se manter um pé de banho no forno de, no mínimo, 30% de sua capacidade, com o forno operando com baixa potência; se o período entre uma jornada e outra for grande, como por exemplo fim de semana, deve-se analisar para cada caso a conveniência de se conservar pé de banho no forno;

- para fornos a canal deve-se, sempre, conservar pé de banho no forno, mesmo que o período entre uma jornada e outra seja grande.

6.4. Conservação de energia no vazamento do metal fundido

O vazamento do metal fundido deve ser realizado da forma mais racional possível para se reduzir o consumo específico de energia.

A fusão do metal e a sua manutenção no estado líquido à temperatura constante, embora sendo operações inteiramente diversas, que exigem equipamentos diferentes, são, com freqüência, executados em um único forno.

A fusão exige potência térmica, relativamente alta, para que seja possível uma elevada produção de metal líquido com baixo consumo específico de energia. Portanto, o forno destinado à fusão deve ser um equipamento potente e deve operar, sempre que possível, com sua potência máxima.

Na operação de manutenção de temperatura do metal líquido, a potência necessária é bem menor, pois ela se destina à compensação das perdas e à regulação da temperatura o mais precisamente possível.

Sendo assim, um forno que é utilizado tanto para a fusão, como para a manutenção de temperatura, com raras excessões, opera, parte do tempo, fora de suas condições ótimas de rendimento energético.

Se um forno para fusão é utilizado para a manutenção de temperatura do metal líquido, apresenta as seguintes desvantagens:

- a manutenção de temperatura do banho metálico, dentro de estreitos limites, é extremamente difícil, tendo em vista a elevada potência do forno, gerando refugos e elevando o consumo específico de energia;

- a potencialidade de fusão do forno não é aproveitada, pois parte do tempo ele fica, somente, mantendo a temperatura do metal líquido.

Portanto, a execução separada das operações de fusão e manutenção de temperatura em fornos diferentes e projetados especificamente para as duas finalidades é vantajosa, do ponto de vista da produtividade, da qualidade do produto e, principalmente, da conservação de energia.

Nas instalações onde não há fornos de manutenção de temperatura entre o forno de fusão e o sistema de alimentação dos moldes, deve-se dar atenção e este sistema de tal forma que a alimentação dos moldes seja a mais rápida possível. Para isto, deve-se reestudar o lay-out do sistema de moldagem, bem como a sistemática de operação das panelas de transporte do metal líquido aos moldes e aos fornos de manutenção de temperatura em sistemas de moldes permanentes.

6.5. Conservação de energia no transporte do metal fundido

O transporte do metal líquido do forno de fusão, ou do forno holding quando existe, para o setor de moldagem, ou para os fornos de manutenção de temperatura para sistemas de moldes permanentes, ocorre, quase sempre por panelas.

Essas panelas, via de regra, são mal isoladas termicamente e não possuem tampas isoladas, bem como percorrem longos percursos e são utilizadas em número superior ao necessário.

Para se reduzir as perdas no transporte do metal líquido sugere-se:

- utilizar o número necessário e suficiente de panelas;

- melhorar o seu isolamento térmico e provê-las de tampas isoladas;

- mantê-las sempre tampadas, mesmo quando não estejam com carga metálica, aguardando o seu carregamento;

- reduzir o tempo de percurso das panelas, melhorando o lay-out do setor de moldagem.

Para a transferência do metal líquido do forno de fusão para o forno de manutenção de temperatura, em algumas fundições mais modernas, são usados sistemas de canais termicamente isolados e dotados de cobertura aquecida por resistências elétricas, que distribuem o metal líquido diretamente dos fornos de fusão para os fornos de manutenção de temperatura, ou para as máquinas de câmara quente por gravidade. Em instalações deste tipo, as perdas por irradiação no transporte são praticamente eliminadas.

6.6. Conservação de energia em fornos de manutenção de temperatura

Os fornos de manutenção de temperatura do metal líquido são muito importantes em razão da elevação da produtividade, da melhoria do produto e da conservação de energia que eles proporcionam.

Além dos fornos de manutenção que operam em conjunto com os fornos de fusão, existem aqueles que operam em fundições com moldes permanentes. Para este tipo de operação, os fornos de manutenção devem apresentar as seguintes características:

- devem ser fixos;

- a superfície do banho deve ser isolada da fonte de calor, se esta for proveniente de combustíveis;

- o isolamento térmico deve ser, extremamente, bem cuidado, em razão do tempo prolongado de manutenção do metal líquido no forno;

- deve possuir um controle preciso de temperatura.

Uma das principais causas da perda de energia nos fornos de manutenção de temperatura é a radiação térmica da superfície do banho metálico. Quanto maior a presença de drosses na superfície do banho maior a energia radiada. A limpeza da superfície do banho é essencial tanto para retirar a drosse formada, quanto para evitar a sua formação.

Contudo, mesmo o metal líquido limpo emite grandes quantidades de energia e esta têm que ser resposta para que a temperatura do banho se mantenha no nível prefixado. Para se evitar estas

perdas de energia, que são representativas, deve-se utilizar tampas com isolação térmica sobre os fornos.

É muito fácil tampar um forno de manutenção de temperatura acoplado a uma máquina de fundição sobre pressão de câmara quente. Contudo, é muito difícil fazê-lo em fornos de onde o metal é retirado manualmente por meio de conchas, como no caso de fundição em moldes permanentes por gravidade, ou sob pressão em máquinas de câmara fria. Neste caso, o operador precisa ter fácil acesso ao banho metálico no forno. Esta dificuldade pode ser superada através da mecanização do vazamento. Entre as diversas possibilidades de se mecanizar o vazamento do forno de manutenção, pode-se ressaltar:

- panela dosadora de transferência com válvula, que se move verticalmente, para entrar e sair do forno de manutenção, permitindo o uso de tampa com uma pequena abertura (figura 30);

- bomba de pistão, construída com cerâmica, coberto de silício, ou grafite, que fica permanentemente imersa no banho, possibilitando que o forno permaneça constantemente tampado (figura 31);

- pressurização do forno, principalmente quando o forno de manutenção é um forno de indução a canal (figura 32).

Para a manutenção de temperatura tem sido muito interessante a utilização de fornos a resistência elétrica, desde que o forno seja tampado e a atmosfera entre o banho e a sua temperatura possibilite a instalação de resistores sob a tampa. Este tipo de forno necessita de pequenas potências para a manutenção da temperatura do banho metálico.

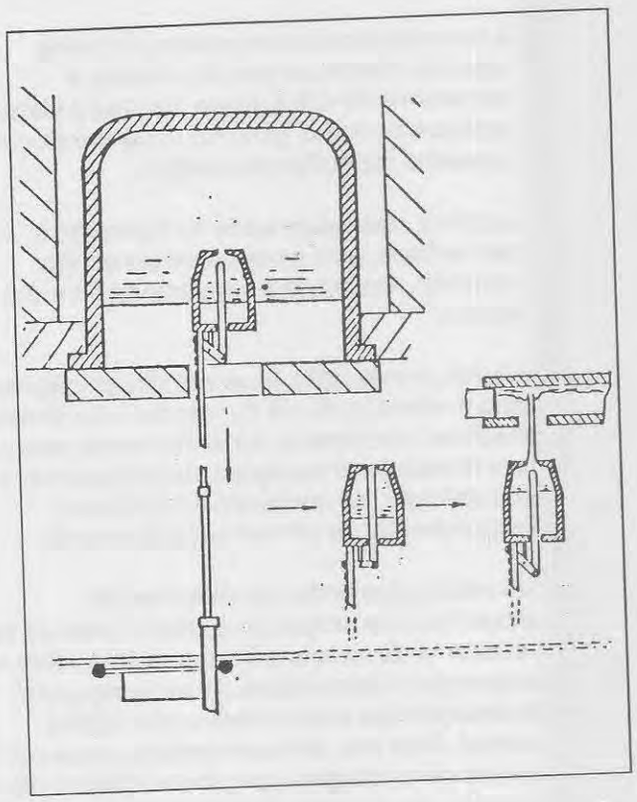


Figura 30
Panela dosadora

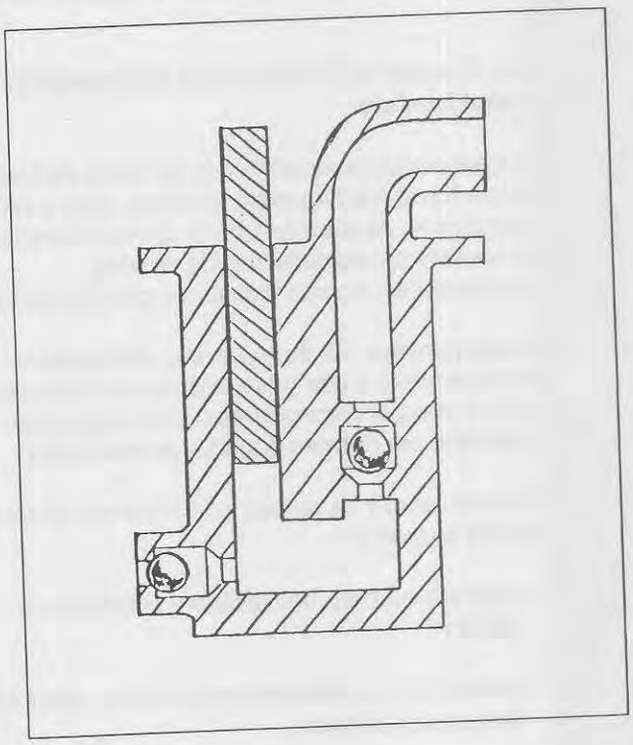
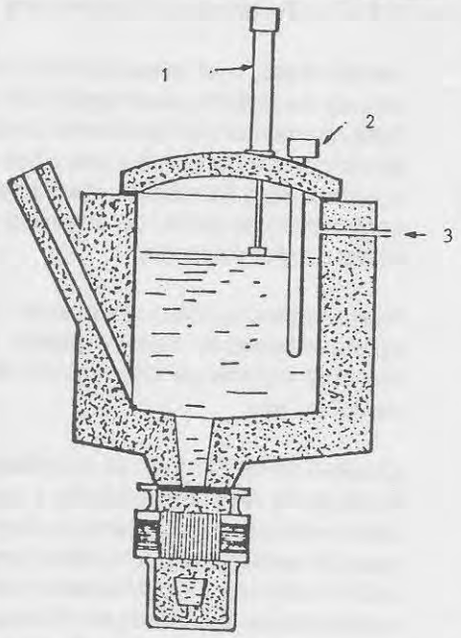


Figura 31
Bomba de pistão



- SENSOR DE NÍVEL
- PIRÔMETRO
- AR OU NITROGÊNIO SOB PRESSÃO

ura 32
no a canal pressurizado para vazamento

6.7. Conservação de energia no tratamento térmico

A conservação de energia em tratamento térmico pode ser obtida através da operação e manutenção adequadas do forno, programação de cargas adequada, bem como pela aplicação de técnicas de transmissão de calor e de metalurgia de tratamento térmico.

A programação de cargas deve ser tal que a carga seja composta de peças homogêneas, para que seja aplicado um ciclo de tratamento térmico adequado para o tipo de carga. O carregamento deve ser tal que a carga do forno seja máxima admitida pelo forno. O forno não deve ser subcarregado, nem sobrecarregado. Uma carga composta por peças não homogêneas, o tratamento térmico adotado deverá ser aquele requerido pelas peças que exigem ciclos mais longos e onerosos.

Outra possibilidade de conservação de energia está na programação do tratamento térmico de cargas consecutivas, quando uma carga aproveita o aquecimento do revestimento refratário ocorrido no ciclo anterior.

A carga deve ser disposta no forno de tal forma que todas as peças se aqueçam simultaneamente. Com isto, consegue-se reduzir o ciclo de tratamento térmico.

Deve-se procurar estabelecer ciclos curtos de tratamento térmico, visando menor consumo de energia desde que se evitem rejeições de peças tratadas devido a tratamentos térmicos incompletos.

7 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE MEDIDAS DE ORDEM ADMINISTRATIVA

A melhoria do rendimento energético de uma instalação industrial depende diretamente do apoio dos escalões administrativos da empresa. Quanto maior for o apoio e interesse neste assunto, tanto melhores tendem a ser os resultados alcançados.

É importante que a conservação de energia seja também um dos objetivos da organização, sendo indispensável o estabelecimento de parâmetros de consumo e de metas a serem alcançadas.

Existe uma série muito grande de medidas de ordem administrativa que podem ser adotadas, diversas delas tem como objetivo o fornecimento de parâmetros para administração e controle. Outras serão voltadas para a obtenção de resultados diretos de economia, conforme será visto a seguir.

7.1. Acompanhamento das contas mensais de energia

Qualquer programa de conservação de energia elétrica se inicia pelo acompanhamento das contas de energia, que tem como objetivos conhecer as despesas mensais com este insumo e a evolução do custo do kWh consumido.

Em muitas empresas, a fatura de energia elétrica é conhecida somente pelas áreas responsáveis pelo seu pagamento e contabilização. É importante que as áreas técnicas também a acompanhem de modo a identificar e combater aumentos anormais de consumo.

Outro ponto a ser mencionado é que o conhecimento detalhado das características do sistema tarifário empregado para cálculo da fatura de energia elétrica proporciona diversas possibilidades de gerenciar o consumo de eletricidade, reduzindo as despesas com este insumo.

Para o acompanhamento mensal das contas de eletricidade recomenda-se o emprego de um formulário que resuma todas as grandezas envolvidas. Existem vários tipos e modelos que as concessionárias de energia elétrica usam e distribuem a seus clientes, que poderão ser utilizadas por qualquer empresa.

7.2. Monitoramento do consumo

Muitas vezes, o acompanhamento do consumo através das contas de energia não é suficiente para um melhor conhecimento de como a eletricidade é consumida nos diversos equipamentos instalados, qual a participação de cada um no consumo da empresa e sua influência sobre o valor da conta.

Nestes casos se torna necessário um acompanhamento mais freqüente, diário ou semanal, através da leitura direta dos medidores de consumo.

Quando as instalações da empresa apresentam maior porte ou complexidade, a análise das características de consumo podem ser dificultadas quando se dispõe de um único ponto totalizando todo o consumo. É conveniente, então, a instalação de medidores em diversos locais, segundo seções, galpões, circuitos ou até máquinas, se for o caso. Via de regra os fornos de indução possuem medidores de energia. Caso não possuam, deve-se providenciar a instalação de um.

Este procedimento permite acompanhar não só o consumo de eletricidade, mas também fornecer informações que possibilitam determinar a forma como a energia é consumida. Tal conhecimento é fundamental para priorizar os pontos a serem atacados e identificar ações a serem empregadas para redução do consumo.

7.3. Estabelecimento de índices de consumo

Para um melhor gerenciamento do consumo de energia elétrica ao longo do tempo é importante o estabelecimento de índices que indiquem a quantidade de energia necessária para cada unidade produzida na empresa.

Diversos índices podem ser estabelecidos, como por exemplo:

- kWh por quilograma de peça fundida
- kWh por corrida, por tipo de liga fundida
- kWh por unidade produzida

É importante que o índice escolhido tenha condições de refletir os diferentes tipos de produto da empresa, bem como suas peculiaridades de processo.

Uma vez estabelecido o índice deve-se acompanhá-lo ao longo do tempo, estabelecendo parâmetros máximos e mínimos admissíveis e metas para sua redução.

7.4. Responsáveis pelo gerenciamento de energia

A estrutura administrativa da maior parte das empresas não prevê o concurso de profissionais dedicados exclusivamente ao gerenciamento do uso de energia.

Para as empresas de menor porte, muitas vezes, torna-se difícil ter um funcionário que execute exclusivamente esta função. Neste caso pode-se aproveitar quem cuida da manutenção ou da produção para executar esta tarefa.

Nas indústrias de maior porte a presença de um profissional experiente no gerenciamento do consumo de energia pode levar à obtenção de economias expressivas de energia.

De uma forma ou de outra, este profissional deve ter como funções: o acompanhamento da evolução do consumo de energia; a fixação de parâmetros de consumo e metas para sua redução; a análise dos processos que usam energia, identificando ações para redução do consumo; implementação de projetos para economias de energia; divulgação dos resultados obtidos juntos às diversas áreas da empresa.

7.5. Avaliação da participação da energia elétrica nos custos de produção

Os efeitos do rápido crescimento dos custos de energia em muitos casos não têm sido avaliados convenientemente. Isto faz com que não se conheça com exatidão a participação da energia elétrica nos custos de produção. Em um grande número de casos esta participação é subestimada.

Conseqüentemente, é importante a análise e avaliação da participação da eletricidade nos custos de produção de cada tipo ou família de produtos, de modo a poder priorizar as ações a serem empreendidas no tocante à conservação de energia, bem como avaliar a importância de tais ações.

7.6. Conhecimento da forma como a energia é usada

Em diversas instalações é comum não se conhecer muito bem a quantidade de energia consumida em determinadas áreas, quanto de energia é efetivamente necessária para execução de um certo processamento e quanta energia está sendo disperdiçada.

É necessário e conveniente analisar-se o fluxo de energia, identificar a sua aplicação e desenvolver cálculos teóricos para determinar a quantidade de energia necessária para o processamento, comparando-o com os montantes efetivamente utilizados.

O conhecimento dos fluxos de energia, e a forma como é utilizada são ferramentas básicas para o desenvolvimento de projetos de redução do consumo de energia elétrica.

7.7. Horários de trabalho

Com a introdução das tarifas horo-sazonais para o faturamento de energia elétrica, onde a energia apresenta custos variáveis ao longo das horas do dia e épocas do ano, é importante planejar os horários de trabalho, as trocas de turno e a entrada em operação de equipamentos, observando-se também os horários em que as tarifas são mais baratas.

Durante o horário de ponta do sistema elétrico, em muitas cidades compreendido entre 17h30 e 20h30, convém minimizar o consumo de energia elétrica. Este é um bom intervalo para programar-se as trocas de turno, refeições para a área produtiva ou outras ações que venham a reduzir o consumo neste horário.

Para as empresas de menor porte, com um único turno de produção, pode-se antecipar o início da jornada de trabalho para encerrá-la por volta das 17h00. Neste caso deve-se estar atento para a execução de horas-extra, que podem provocar acréscimos elevados nos custos de energia.

Outro tipo de ação corresponde à alteração de horário de trabalho nas áreas administrativas, para encerramento do expediente às 17h00. Este procedimento pode proporcionar significativa redução na demanda de ponta.

7.8. Sistemática de operação do forno

Um dos fatores que contribui decisivamente para o desperdício de energia é a falta de um método de operação dos fornos de indução que indique, com precisão, a melhor seqüência de procedimentos, o tempo adequado para execução de cada tarefa, o tempo correto para cada etapa de aquecimento, a seqüência de potência a ser dissipada pelo forno, etc.

O desenvolvimento de estudos de tempos e métodos pode perfeitamente identificar sistemáticas de trabalho que irão proporcionar maior produtividade e menor consumo específico do forno.

Naturalmente, a experiência acumulada pelos operadores dos fornos deve ser usada nesta tarefa e a introdução das alterações identificadas deve ser efetuada com cuidado, evitando-se choques culturais que prejudiquem os resultados esperados.

7.9. Parâmetros de controle de operação

Uma vez estabelecida uma sistemática de operação do forno elétrico deve-se desenvolver mecanismos que permitam acompanhar, com facilidade, a execução das rotinas e procedimentos pré-estabelecidos.

Diversas são as sistemáticas que podem ser utilizadas, mas uma das maneiras mais simples de se executar esta tarefa consiste no estabelecimento de parâmetros de tempos máximo e mínimo a serem gastos para execução de um certo processamento térmico. O operador então acompanha o tempo dispendido na execução de um ciclo de processamento e se este tempo estiver fora da faixa especificada ele emite um relatório justificando o porquê do desvio.

Com a prática, este intervalo de tempo pode ser estreitado de modo que todos os operadores executem suas tarefas o mais próximo possível da condição de eficiência máxima e mínimo consumo.

7.10. Intercâmbio de experiências

As soluções para racionalizar o consumo de energia são inúmeras. Quanto maior for o número de profissionais envolvidos no assunto, maior tende a ser o número de idéias para ações a serem implantadas.

Neste sentido, conhecer as medidas de economia e os procedimentos desenvolvidos por outras empresas pode enriquecer consideravelmente os conhecimentos dos profissionais da área e pode acelerar a obtenção de resultados mais expressivos.

O intercâmbio de experiências na área de conservação de energia é um instrumento precioso para a consecução dos objetivos de maximização do rendimento energético.

7.11. Treinamento

Da mesma forma que nas diversas áreas de trabalho, o treinamento se constitui num excelente meio para o desenvolvimento das atividades de conservação de energia.

Os programas de treinamento devem objetivar o aperfeiçoamento dos diversos níveis envolvidos no uso da energia, como operadores de fornos, supervisores, gerentes de produção e manutenção, etc.

7.12. Envolvimento dos funcionários e divulgação dos resultados de economia

Os programas de racionalização do consumo de energia dependem muito do envolvimento dos diversos profissionais responsáveis direta ou indiretamente pelo uso da energia.

Portanto, o engajamento do maior número de profissionais nessa tarefa deve ser um objetivo constante do programa.

Outra ação importante consiste na quantificação e divulgação periódica dos resultados de economia alcançados e, sempre que possível, deve-se distinguir as ações que proporcionaram resultados mais expressivos. Os profissionais responsáveis por tais resultados devem merecer uma menção ou até mesmo algum tipo de premiação.

A divulgação sistemática dos resultados tem como objetivo principal estimular a continuidade dos esforços para economia de energia.

8 MANUTENÇÃO EM FORNOS DE INDUÇÃO

8.1. Planejamento da manutenção de um forno de indução

O forno de indução, tendo em vista a sua importância em uma fundição, quer sob o ponto de vista do atendimento à produção, quer pelo valor do investimento que representa, é um equipamento que necessita de manutenção adequada.

O objetivo da manutenção no forno de indução é assegurar a sua disponibilidade, de tal forma que a programação da produção seja atendida.

Para uma manutenção adequada, é imprescindível um planejamento e o estabelecimento de um cronograma bem feito.

As vantagens de um planejamento e programação de manutenção ótimos são:

- estimativa adequada do tempo necessário para a execução dos serviços programados;
- estabelecimento de métodos e procedimentos de manutenção melhores;
- estabelecimento de prioridades para a manutenção;
- melhorar coordenação dos recursos humanos e materiais para a execução dos serviços de manutenção;
- medição otimizada da carga de trabalho;
- emissão de ordens de serviço com detalhamento dos serviços a serem realizados e recursos humanos e materiais necessários.

O planejamento da manutenção preventiva deve ser elaborado em função da experiência estatística acumulada na operação do forno, recomendações do fabricante e das necessidades de se atuar no equipamento quando é constatada alguma anomalia pela produção ou pela manutenção.

8.2. Manutenção em uma instalação de fusão por indução

Em uma manutenção de uma instalação de fusão por indução, especial atenção deve ser dada, além do forno propriamente dito, aos seus equipamentos e instalações auxiliares, pois uma anomalia em um desses equipamentos ou instalações, pode provocar uma parada do forno, trazendo grandes prejuízos à produção.

8.2.1. Manutenção nos equipamentos auxiliares de um forno de indução

■ Manutenção no Transformador

Por ser um equipamento estático, o transformador não é crítico em uma programação de manutenção. Contudo, sua manutenção não pode ser descuidada. Deve-se dar atenção aos seguintes pontos:

■ Óleo Isolante

Deve-se atentar para seu estado no que se refere à contaminação por umidade, à oxidação e a gases nele dissolvidos. Para se evitar a contaminação por umidade, o transformador deve possuir um sistema de remoção de vapor de água no ar do meio ambiente e que nele penetra em função da contração do volume do óleo isolante. Este sistema deve estar sempre em perfeitas condições de operação. Para transformadores de potência elevada, de tempos em tempos, deve-se verificar o grau de oxidação do óleo, a sua rigidez dielétrica e se nele há gases dissolvidos, que possam indicar problemas na parte ativa do transformador.

■ Sistema de Refrigeração

Como já foi visto, o transformador apresenta perdas em forma de calor que precisam ser dissipadas para o meio ambiente, para evitar que a sua temperatura atinja valores acima do permitido. O sistema de refrigeração de transformadores, usualmente utilizados em uma instalação de fusão por indução, baseia-se na ventilação natural ou forçada sobre os seus radiadores. Sendo assim, para que haja uma troca de calor boa com o meio ambiente, os radiadores devem estar isentos de sujeira e contaminantes que possam prejudicar essa troca de calor. O ambiente onde o transformador está instalado deve ser bem ventilado. No caso de utilização de ventilação forçada, atenção especial deve ser dada aos ventiladores em uma manutenção.

■ Seletor de Tensão

Existem transformadores, principalmente aqueles utilizados para fornos de freqüência de rede, que possuem seletor de tensão. Como este dispositivo não é estático, deve merecer atenção especial em uma manutenção do transformador, pois se apresentar alguma anomalia pode provocar a paralização do forno.

■ Manutenção nos Disjuntores

Os disjuntores, principalmente os de média tensão, devem sofrer manutenção adequada e regular. Especial atenção deve ser dada ao seu mecanismo de acionamento e às resistências de contato.

■ Revisão das Conexões

As conexões, principalmente aquelas localizadas no circuito de baixa tensão, devem ter atenção especial em uma manutenção, para se evitar elevadas resistências de contatos, que podem provocar grandes perdas de energia por efeito Joule, bem como danificá-las. Todas as conexões devem ser revisadas e reapertadas e os conectores que se apresentem em mau estado devem ser substituídos.

■ Manutenção no Sistema Conversor de Freqüência

Fornos de freqüência superior à freqüência da rede necessitam de conversores de freqüência. Os conversores modernos são dispositivos complexos, que apesar de confiáveis, podem apresentar defeitos, que precisam ser reparados rapidamente, para evitar a paralização do forno por longos períodos. Para se evitar tais paralizações, as peças em estoque devem ser as adequadas e em quantidade compatível, em função das recomendações do fabricante e, principalmente, baseado na experiência do setor de manutenção. A equipe de manutenção deve ser treinada para atender os casos de anomalias mais freqüentes, deixando para a assistência técnica de terceiros os casos mais complicados e menos freqüentes. O setor de manutenção deve estar preparado tecnicamente para recuperar os circuitos e placas eletrônicas, evitando-se a compra destes materiais, quase todos de elevado custo. Especial atenção deve ser dada à refrigeração dos conversores, apesar de apresentarem perdas relativamente pequenas. Esta refrigeração normalmente se dá por ventilação natural, para fornos de potências não muito elevadas e por água para os maiores.

■ Manutenção no Sistema de Refrigeração

O forno e seus equipamentos auxiliares precisam ser refrigerados para dissipar as suas perdas para o meio ambiente. A bobina indutora de praticamente todos os fornos é refrigerada por água. Para fornos de potências muito elevadas, também os capacitores e os cabos de alimentação são refrigerados por água.

Nos sistemas de refrigeração por água é fundamental o seu tratamento para se evitar incrustações, corrosão e formação de lama.

O tratamento químico básico da água baseia-se na adição de:

- dispersantes para se evitar incrustações;
- produtos a base de cromatos, fosfatos, polifosfatos, etc, para o combate à corrosão;
- cloros e bioácidos para se combater a lama.

Para se remover a lama dispersa no sistema, circula-se uma porcentagem de 2 a 5% da vazão horária por um filtro de areia, ou também efetuando-se descargas.

Como a eficiência do tratamento é função do resíduo de produto mantidos no sistema, faz-se necessário o controle analítico da água. Para se quantificar os resultados obtidos são colocados corpos de prova no sistema para se medir a taxa de corrosão e deposição e dessa forma, acompanhar a evolução do tratamento.

A presença de lama no sistema de refrigeração pode ser constatada pela observação das perdas de carga, que é medida pela diferença de leituras entre um manômetro instalado na entrada e outro na saída do circuito.

■ Manutenção nos Capacitores

Os capacitores são dispositivos estáticos que praticamente não necessitam de manutenção. Contudo, deve ser dada atenção especial ao seu sistema de refrigeração, em particular, quando se trata de instalação de potência elevada, quando a refrigeração ocorre por água. Quando a refrigeração ocorre por ventilação, deve-se dar

atenção para a limpeza dos capacitores, para facilitar a troca de calor com o meio ambiente.

- Manutenção nos Painéis de Comando e Auxiliares

Em uma manutenção nos painéis, deve-se proceder uma revisão e limpeza dos contatores, relés, fusíveis e fiação. Em instalações onde o nível de empoeiramento é muito elevado é interessante manter-se o ambiente, onde se encontram os painéis e outros equipamentos energéticos, pressurizado, para se evitar a penetração e deposição de pó.

8.2.2. Manutenção do forno de indução propriamente dito

- Manutenção na Bobina Indutora

Deve ser estabelecido um procedimento sistemático de aperto das culatras da bobina com o forno quente, para se evitar deformações da bobina e, consequentemente, paradas no forno.

Deve-se proceder inspeções constantes nas mangueiras que interligam a bobina ao sistema de refrigeração. Deve-se verificar as conexões das mangueiras, bem como o seu estado para se evitar vazamentos de água.

- Cuidados a Serem Tomados Com o Revestimento Refratário

A vida útil do revestimento refratário e, economicamente, muito importante na fusão por indução, não só pelo custo do revestimento, mas principalmente, pela paralização do forno, necessária para repará-lo ou substituí-lo. O revestimento refratário para o forno de indução a cadinho deve ser o mais fino possível, de tal forma que a distância entre a bobina indutora e a carga metálica seja mínima. Um revestimento grosso reduz o acoplamento eletromagnético entre o indutor e a carga, reduzindo a eficiência elétrica do forno.

O revestimento refratário do forno de indução a canal apresenta, via de regra, vida útil consideravelmente maior do que aquele do revestimento do forno a cadinho. Há várias razões para este fato, a principal é que o revestimento pode ser mais grosso, por causa do melhor acoplamento magnético entre o indutor e o metal líquido existente no forno de indução a canal.

Os fornos a canal modernos são construídos em duas seções que podem ser separadas uma da outra: a unidade indutora e o cadinho superior. A vida útil típica do revestimento da unidade indutora é da ordem de 12 meses. Não é raro a vida útil atingir 24 meses para algumas aplicações do forno. Para o cadinho superior, quando o revestimento é periodicamente reparado, a sua vida útil pode atingir de 12 a 36 meses. A vida útil do cadinho superior, entre outros fatores, depende muito da característica química da escória formada na superfície do banho e de como ela é manuseada. A figura 33 mostra um forno a canal construído de duas seções.

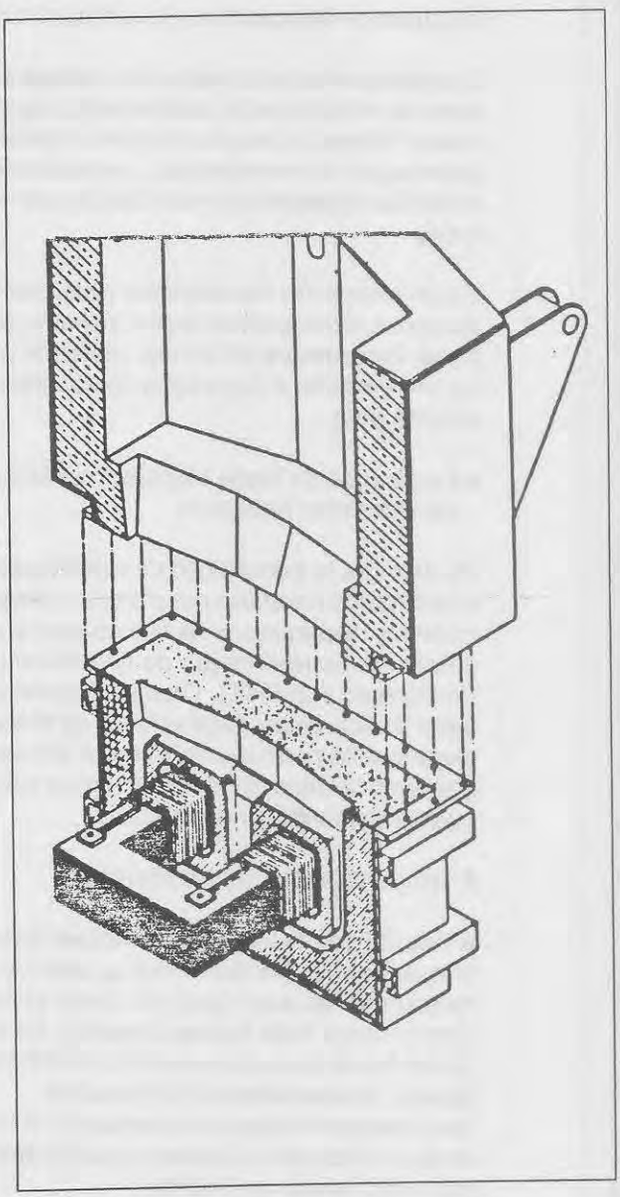


Figura 33
Forno a canal com duas seções

Dada a importância da vida útil do revestimento refratário de um forno de indução, é indispensável para a confecção do revestimento o uso de materiais de alta qualidade e adequados ao tipo de forno a ao tipo de liga a ser fundida. Deve-se ressaltar que o desempenho do material refratário depende tambçem da execução e da sinterização do revestimento. O revestimento deve se apresentar com boa compactação e ser homogeneamente sinterizado para resistir aos ataques da escória, impactos e outros esforços mecânicos normais da operação de fusão de metais.

■ Causas de Desgaste no Revestimento Refratário

O desempenho do revestimento refratário de um forno de indução está, basicamente, ligado a quatro fatores: operação do forno, instalação e sinterização do revestimento, propriedades dos materiais empregados e concepção construtiva do forno.

Os problemas no revestimento refratário são causados, principalmente por: penetração de metal, temperatura do banho, materiais estranhos no revestimento e deposição de escória no revestimento.

■ Penetração de Metal Líquido Através do Revestimento Refratário

Via de regra, a penetração de metal líquido no revestimento refratário ocorre pela utilização de materiais inadequados na sua confecção, deficiência na elaboração do revestimento e sinterização imperfeita. Quando a penetração do metal líquido se propaga através de trincas até o revestimento permanente e se solidifica devido ao gradiente térmico do revestimento, o cadinho tem que ser demolido e reconstruído.

■ Temperatura do Banho Metálico

A vida útil do revestimento refratário depende da temperatura do banho metálico, sendo assim, recomenda-se que a fusão da carga se faça com temperaturas mais baixas possíveis. Se houver necessidade de superaquecimento do metal líquido, deve-se elevar a temperatura imediatamente antes do vazamento, ou seja, deve-se evitar que o banho superaquecido fique por muito tempo no cadinho.

Nos fornos de indução a cadinho, principalmente os de alta freqüência, o metal líquido pode ser superaquecido com fácilidade, podendo ultrapassar o ponto de fusão da maioria dos materiais que constituem o revestimento refratário. Em razão deste fato, é imprescindível o controle apropriado sobre a operação do forno, principalmente com relação à temperatura do banho metálico. Para uma operação correta é indispensável a medição da temperatura do metal líquido por meio de pirômetro, para que não haja sobreaquecimento desnecessário do banho.

■ Materiais Estranhos no Refratário

Durante o manuseio dos materiais que constituem o revestimento refratário, bem como na confecção do cadinho, deve-se tomar cuidado para a não introdução de materiais estranhos no revestimento, pois tais materiais poderão ser consumidos pelo metal líquido, deixando cavidades no revestimento. Portanto, durante o preparo da área onde ocorre o manuseio dos materiais e a confecção do revestimento deve-se cuidar para ela estar sempre livre e isenta de sujeira.

■ Deposição de Escória No Revestimento Refratário

Durante a fusão de metais em fornos de indução é inevitável a formação de escória. A escória é formada por interação química do revestimento refratário com o metal líquido e outros elementos contidos na carga metálica. A intensidade da corrosão por escória depende da composição química do refratário e do produto formado, bem como da temperatura em que a reação ocorre, da quantidade de escória gerada, da densidade, da viscosidade, etc. Também, a porosidade do material do revestimento afeta a intensidade da corrosão, pois facilita a penetração da escória nos vazios dos poros e trincas.

A deposição da escória sobre as paredes do cadinho é comum e não se constitui em uma erosão, bem como não se relaciona com o desgaste prematuro do revestimento. A figura 34 mostra uma forma de deposição de escória sobre as paredes do revestimento refratário em forno de indução a cadinho.

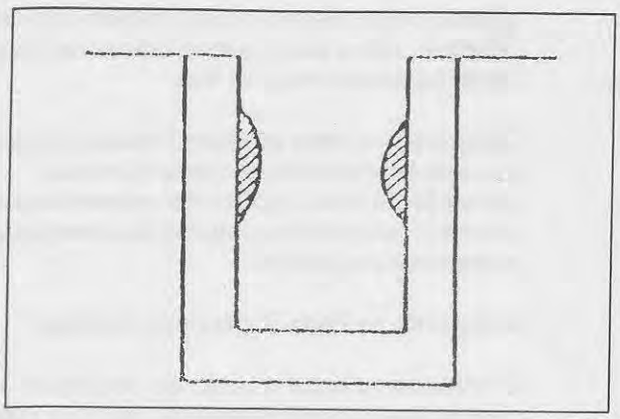


Figura 34
Deposição de escória sobre as paredes do revestimento refratário

O acúmulo de escória aumenta a espessura da parede do revestimento refratário, provocando efeitos negativos sobre as características elétricas do forno, pois reduz o acoplamento magnético entre a bobina indutora e a carga metálica, reduzindo o rendimento elétrico e sua produtividade. Se a desposição de escória não puder ser removida, pode-se chegar a uma quantidade tal de escória depositada que se torna necessário a demolição do cadinho.

A escória de baixo ponto de fusão, que resulta da operação do forno em temperaturas baixas, deposita-se na parte superior do cadinho. Esse tipo de escória pode ser eliminada com relativa facilidade. Para isto, deve-se elevar o nível do banho até encobrir a deposição e, em seguida, deve-se aumentar a temperatura do banho para cerca de 1550°C, no caso fornos para a fusão de ferro fundido. Com isto a escória se dissolve e flutua na superfície do banho metálico, de onde pode ser removida facilmente.

Para remoção de escórias com alto ponto de fusão, pode-se aplicar a mesma técnica com a utilização de fundentes, como a soda cáustica, a fluorita e outros. Esta forma de remoção de escória deve ser empregada com muito cuidado, pois os fundentes, também, atacam o revestimento do forno. Deve-se utilizar pequenas quantidades destes produtos, procurando-se eliminar a deposição gradualmente.

A remoção da escória através da utilização de dispositivos que submetam o refratário a esforços mecânicos, como por exemplo talhadeiras, são perigosos.

O melhor modo de agir quando ocorre deposição de escória nas paredes do cadinho, é determinar-se a causa e eliminar a sua origem. A deposição de escória pode ser atribuída às seguintes causas:

- uso de retornos de fundição sujos;
- emprego de sucata com alto teor de silício;
- formação de mulita;
- emprego de carga com componentes oxidados;

A seguir, são relacionadas algumas sugestões para se evitar a deposição de escória nas paredes do revestimento refratário do forno:

- otimizar a temperatura do processo de fusão, medindo-se a temperatura do banho com pirômetro bem aferido;
- manter o nível do banho o mais alto possível;
- manter a superfície do banho com menos escória possível;
- jatear o retorno de fundição;
- não coagular a escória, ainda no forno, com areia;
- jatear o material de carga, excessivamente oxidado;
- manter em bom estado as partes do forno revestidas com materiais contendo alumínio;
- não incluir na carga do forno restos do metal líquido desoxidado com alumínio, particularmente se a panela for revestida com material aluminoso.

■ Manutenção e Reparos do Revestimento Refratário

A manutenção preventiva do revestimento refratário de um forno de indução deve ser tal que as manutenções corretivas sejam reduzidas a um mínimo. As paradas do forno para a realização de manutenção corretiva prejudicam, sobremaneira, a produção. Os defeitos no revestimento refratário, principalmente nos fornos de indução a cadinho, são potencialmente perigosos, podendo provocar explosões violentas, causando grandes prejuízos materiais e acidentes pessoais.

A inspeção visual do revestimento refratário deve ser feita tantas vezes quanto possível. Quando houver dúvidas quanto ao estado do revestimento, deve-se medir o desgaste.

A manutenção deve ser programada de tal maneira que não haja interrupções na seqüência dos trabalhos de reparo.

O revestimento refratário, sempre que possível, deve ser consertado e não renovado totalmente, por inúmeras razões, entre as quais deve-se mencionar:

- o tempo dispensado para o conserto e sinterização é menor do que aquele para a execução de um revestimento novo;
- os custos de materiais e de mão-de-obra são menores, pois uma parte do revestimento refratário velho é aproveitada;
- o conserto da parte superior do cadinho pode ser feito com o metal líquido no forno;
- o material isolante é aproveitado, se for consertado apenas o revestimento de sílica;
- quando se efetua consertos se introduz menos água e, portanto o tempo para a sinterização é menor.

Os desgastes e os defeitos do revestimento devem ser cuidadosamente examinados, para se determinar o tipo de conserto necessário.

■ Determinação do Tipo de Conserto do Revestimento

As cavidades ou trincas na parede do cadinho não devem apresentar dimensões tais que possibilitam a penetração de metal líquido, no reinício da operação do forno. Devem ser medidas e determinadas as profundidades e a direção das trincas e cavidades para se verificar a necessidade ou não do conserto do revestimento.

As trincas finas que, geralmente, aparecem após o resfriamento do forno, via de regra, não precisam ser consertadas tendo em vista que normalmente se fecham quando o forno é reaquecido. Contudo, recomenda-se cuidado para que partículas de areia provenientes do próprio refratário não penetrem nas trincas. Este fato pode impedir o seu fechamento quando o forno for reaquecido. Quando do carregamento do forno, após uma parada longa que provoque o esfriamento do refratário, não é aconselhável utilizar-se como carga cavacos e material fino.

Desgastes ou áreas erodidas localizadas ou sulcos que aparecem no revestimento durante a operação do forno, podem ser consertados com cimento refratário de composição correspondente ao material do cadinho.

■ Conserto na Parte Superior do Cadinho

O conserto na parte superior do cadinho revestido com refratário de sílica pode ser de duas maneiras: a frio ou a quente.

Para o conserto a frio utiliza-se um gabarito em forma de anel com altura correspondente ao desgaste. A área erodida deve ser descascada e o gabarito, que deve ter um diâmetro um pouco inferior ao do forno, deve ser colocado junto a área descascada entre o revestimento refratário a ser reparado. O anel deve ser vedado, em sua parte inferior, com cimento refratário. O preenchimento do espaço entre o revestimento e o anel deve ser feito com massa de sílica e a sua compactação pode ser manual ou mecânica. A figura 35 mostra esquematicamente o conserto a frio na parte superior do cadinho.

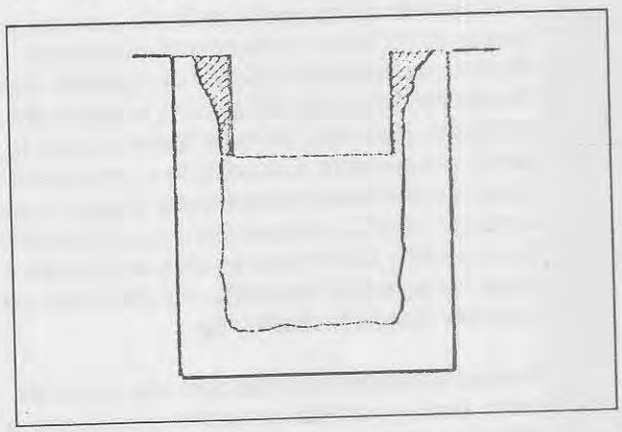


Figura 35
Conserto do revestimento refratário na parte superior do cadinho

No conserto a quente não há necessidade de gabarito e o reparo é feito aplicando-se a massa refratária sobre a zona desgastada, através de projeção pneumáticas. Este tipo de conserto é mais adequado para fornos grandes.

■ Conserto na Parte Inferior do Cadinho

O conserto na parte inferior do cadinho é executado de maneira semelhante ao da parte superior. Neste conserto, deve-se limpar o fundo e as áreas desgastadas das paredes e, em seguida, refaz-se o revestimento do fundo e coloca-se um gabarito em forma de anel junto a área erodita da parede. Preenche-se o espaço entre a parede e o anel com a mistura e compacta-se com martelete pneumático. A figura 36 mostra esquematicamente este tipo de conserto.

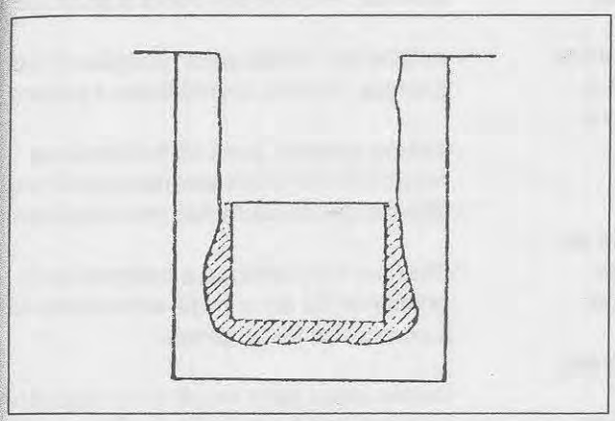


Figura 36
Conserto do revestimento refratário na parte inferior do cadinho

Quando a erosão ocorre somente no fundo do cadinho o conserto pode ser feito preenchendo-se com soquete de cabeçote chato. A figura 37 mostra este tipo de conserto.

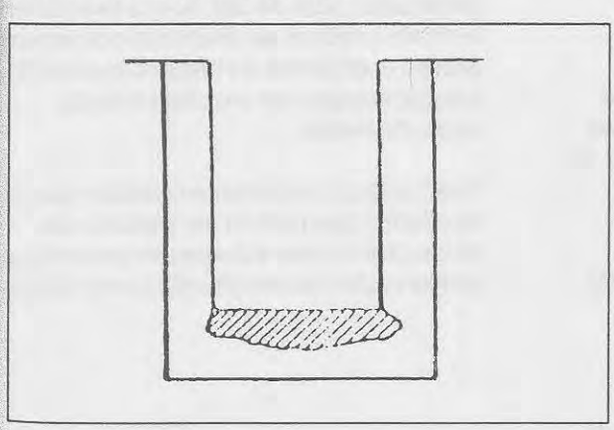


Figura 37
Conserto do revestimento refratário no fundo do cadinho

■ Conserto Geral, ou Tipo, do Cadinho

O conserto geral é aquele em que a parede e o fundo do revestimento são descascados até o material semisinterizado. Este descascamento é feito com o auxílio do marteletes e talhadeiras. A área descascada não deve possuir pontos pretos, material sinterizado solto e deve ficar isenta de poeira.

A compactação deve ser iniciada pelo fundo, adicionando-se o material de silício em quantidade suficiente, para que após a compactação (manual ou por vibrador) assegura a espessura suficiente nivelando o fundo na altura correspondente à do gabarito.

Após a nivelação do fundo, o gabarito é colocado, centrado e fixado, de maneira a se evitar o seu deslocamento durante a compactação. Em seguida preenche-se o espaço entre o gabarito e a parede descascada e procede-se a compactação. A figura 38 mostra esquematicamente o conserto geral do revestimento de um cadinho.

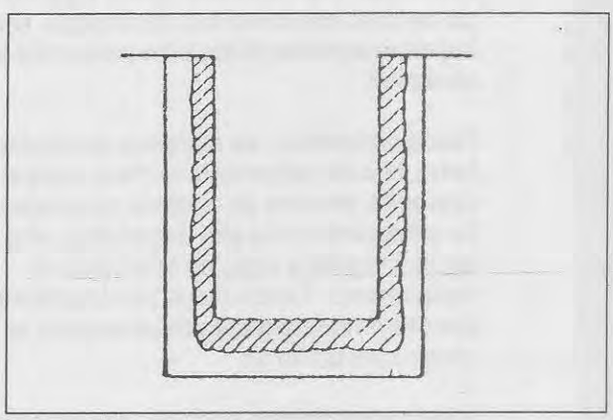


Figura 38
Conserto geral do revestimento refratário

9 RECOMENDAÇÕES PARA IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Os temas abordados neste manual mostram que inúmeras são as oportunidade de economia de energia na operação de fornos elétricos a indução. A maior parte delas refere-se à aplicação do bom senso e ao uso adequado das recomendações operacionais mais comuns.

Para implementar um programa de redução de desperdício de energia elétrica é muito importante conhecer as aplicações e os equipamentos que consomem esta energia. De posse de tais informações deve-se procurar identificar os pontos onde ocorrem desperdícios de energia elétrica e onde é possível obter maiores economias com a implantação de um programa de ação desta natureza.

O trabalho deve ser iniciado reunindo os dados de consumo de energia elétrica dos últimos meses. Liste a seguir os aparelhos de aquecimento e os principais fornos elétricos disponíveis na instalação. Normalmente, esses equipamentos são os maiores consumidores de energia, sendo importante conhecê-los bem para torná-los mais eficientes.

Procure identificar os materiais que compõem o forno, tipo de isolamento térmico, temperatura de operação, sistema de controle de temperatura, etc. Se estes dados não são disponíveis, eles podem ser conseguidos junto ao fabricante do equipamento. Esses dados são importantes para identificar necessidades de alterações na construção do forno.

Estude atentamente as sugestões apresentadas nos capítulos precedentes, colocando em prática todas as medidas possíveis, objetivando reduzir ao máximo seu consumo de energia.

Para obter o máximo aproveitamento possível, estabeleça um plano de ação que poderá constar dos seguintes ítens:

- leia as sugestões enumeradas neste manual;
- percorra todas as instalações da fábrica e anote os ítens que possam ser aplicados;
- coloque imediatamente em prática as medidas que não exijam providências adicionais;
- nomeie alguém como supervisor geral da implantação do programa de conservação de energia;
- indique um responsável em cada área de atividade da fábrica pela execução do programa;
- nomeie um fiscal para verificar se as determinações estabelecidas estão sendo cumpridas corretamente;
- estabeleça índices máximos de consumo de energia, levando em conta a produção mensal;
- estabeleça metas para redução do consumo de energia, fixando quantidades e prazos;
- instrua prêmios para os funcionários responsáveis pelos setores que alcançarem ou ultrapassarem as metas pre-estabelecidas;
- divulgue amplamente a campanha de conservação de energia entre todos os funcionários da empresa;
- instale urnas para recolher as sugestões dos funcionários e estabeleça prêmios para aqueles que apresentarem sugestões que redundem em significativas economias de energia;
- coloque placas, cartazes e avisos em pontos estratégicos para estimular a conservação de energia.

Deve-se desenvolver ainda um sistema de prioridades para decidir novos investimentos que venham a reduzir as despesas com energia. A análise econômica do dispêndio envolvido deve resultar sempre em uma boa relação custo/benefício.

Finalizando, é importante ressaltar que os resultados que podem ser obtidos são proporcionais aos esforços empreendidos na conservação de energia nos fornos elétricos.

PROCEL

PROGRAMA NACIONAL DE
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Ministério das Minas e Energia

Eletrobrás

Centrais Elétricas Brasileiras SA