

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Eliane Bezerra de
Carvalho E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 26/03/98.



ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Otimização da Operação de Fornos Elétricos de Arco Direto

Autora : **Eliane Bezerra de Carvalho**
Orientador: **Mario Oscar Cencig**
Co-orientador: **Paulo de Barros Correia**

03/1998

C253o

34140/BC

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

Otimização da Operação de Fornos Elétricos de Arco Direto

Autora : Eliane Bezerra de Carvalho
Orientador: Mario Oscar Cencig
Co-orientador: Paulo de Barros Correia

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 1998

S.P. - Brasil



8662185

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	C2530
V.	Es.
TOMBO BC/	34140
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	8.511,00
DATA	05/06/98
N.º CPD	

CM-00112433-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C2530 Carvalho, Eliane Bezerra de
Otimização da operação de fornos elétricos de arco
direto. / Eliane Bezerra de Carvalho.--Campinas, SP:
[s.n.], 1998.

Orientadores: Mario Oscar Cencig, Paulo de Barros
Correia

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

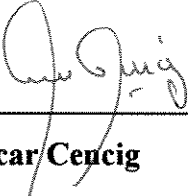
1. Fornos elétricos. 2. Programação dinâmica. I.
Cencig, Mario Oscar. II. Correia, Paulo de Barros. III
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Otimização da Operação de
Fornos Elétricos de Arco
Direto**

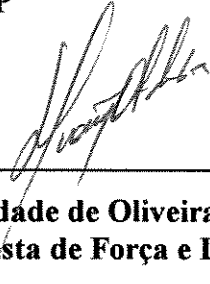
**Autora : Eliane Bezerra de Carvalho
Orientador: Mario Oscar Cencig
Co-orientador: Paulo de Barros Correia**



**Prof. Dr. Mario Oscar Cencig
NIPE/UNICAMP**



**Profa. Dra. Francisca Aparecida de Camargo Pires
FEEC/UNICAMP**



**Dr. Moacyr Trindade de Oliveira Andrade
Companhia Paulista de Força e Luz**

Campinas, 26 de março de 1998

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 O FORNO ELÉTRICO DE ARCO	3
2.1 O forno elétrico de arco na indústria siderúrgica	3
2.2 Evolução tecnológica dos fornos elétricos de arco	4
2.3 Consumo de energia	8
2.4 Ciclo de operação.....	9
2.5 Sistema de alimentação elétrica.....	11
2.6 Controle dos eletrodos	13
2.7 Distúrbios causados pela operação.....	14
2.7.1 Distorção da forma de onda	15
2.7.2 Flutuação de tensão	17
CAPÍTULO 3 CURVAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS FORNOS DE ARCO E BALANÇO DE ENERGIA	19
3.1 O arco elétrico.....	19
3.2 O circuito elétrico.....	23
3.3 Teste de curto-circuito	27
3.4 Curvas de carga características	28
3.5 Reatância operacional.....	33
3.6 Programas de potência	35
3.7 Balanço simplificado de energia.....	38
3.7.1 Perdas térmicas para a água de refrigeração	38
3.7.2 Perdas pelo sistema de exaustão de gases.....	39
3.7.3 Equação de balanço de energia.....	40

CAPÍTULO 4	MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE ARCO	41
4.1	Programação dinâmica	41
4.2	Formulação do modelo	44
4.2.1	Introdução	44
4.2.2	Função objetivo	44
4.2.3	Restrições	47
CAPÍTULO 5	ESTUDO DE CASO	49
5.1	Introdução	49
5.2	Dados do forno.....	49
5.2.1	Características gerais	49
5.2.2	Tensões do transformador do forno	50
5.2.3	Teste de curto-circuito.....	50
5.3	Aplicação do modelo de otimização	51
5.4	Resultados e discussões	55
CAPÍTULO 6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	69
ANEXO	PROGRAMAÇÃO MULTI-OBJETIVO	71
REFERÊNCIAS	BIBLIOGRÁFICAS	74

Lista de Figuras

Figura 2.1 Forno elétrico de arco de corrente alternada	5
Figura 2.2 Esquema de alimentação elétrica	12
Figura 3.1 Regiões do arco elétrico	20
Figura 3.2 Características tensão x corrente de um forno elétrico de arco durante a fusão perturbada e no final da fusão, com carga fundida	22
Figura 3.3 Oscilogramas de tensão e corrente de arco durante a fusão perturbada e no final da fusão, com a carga fundida	23
Figura 3.4 Representação esquemática de uma fase de um forno elétrico de arco	24
Figura 3.5 Circuito equivalente monofásico	24
Figura 3.6 Circuito equivalente simplificado	25
Figura 3.7 Diagrama vetorial das resistências do circuito da figura 3.6	25
Figura 3.8 Curvas de carga para um forno de arco de 20 MVA com circuito balanceado ...	30
Figura 3.9 Diagrama circular das potências aparente, ativa e reativa, com fatores de potência e tensões secundárias como parâmetros	33
Figura 3.10 Reatância operacional normalizada em termos da reatância de curto-circuito em função do fator de potência	34
Figura 3.11 Programa de potência típico, com dois carregamentos para um forno elétrico de arco, utilizado para fusão	36
Figura 4.1 Representação esquemática de estratégias de decisões	42
Figura 4.2 Estrutura básica da programação dinâmica determinística	43
Figura 4.3 Custos operacionais de um forno elétrico de arco	45
Figura 5.1 Circuito equivalente levantado a partir do teste de curto-circuito	50

Figura 5.2 Fluxograma do programa de otimização da operação do forno elétrico de arco utilizando o algoritmo de programação dinâmica <i>backward</i>	53
Figura 5.3 Estados admissíveis em cada estágio do ciclo de fusão e sobre-aquecimento....	54
Figura 5.4 Diagramas de potência para o forno do circuito da figura 5.1	55
Figura 5.5 Soluções eficientes para o caso 1.....	56
Figura 5.6 Soluções eficientes para o caso 2.....	60
Figura 5.7 Soluções eficientes para o caso 3.....	61
Figura 5.8 Soluções eficientes para o caso 4.....	64
Figura 5.9 Soluções eficientes para os quatro casos simulados	67

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Comparação entre fornos de arco elétrico de corrente contínua e alternada	7
Tabela 2.2 Nível médio de harmônicas produzidas por fornos de arco, em % da fundamental	16
Tabela 2.3 Comparação entre as técnicas e equipamentos de compensação de <i>flicker</i>	18
 Tabela 3.1 Gradientes de tensão do arco	21
Tabela 3.2 Valores de K_{term} para algumas condições operacionais	39
 Tabela 5.1 Tensões do transformador do forno	50
Tabela 5.2 Variáveis de controle e dados do modelo para cada estágio	51
Tabela 5.3 Valores de K_{term} em cada estágio, em kW/m ²	52
Tabela 5.4 Tarifa de consumo, em R\$/MWh, para o subgrupo A2 (88-138kV)	52
Tabela 5.5 Casos utilizados nas simulações	56
Tabela 5.6 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 1	57
Tabela 5.7 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ igual a 0,001	57
Tabela 5.8 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ igual a 0, 1	58
Tabela 5.9 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ variando de 0,2 a 0,3	58
Tabela 5.10 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ variando de 0,4 a 0,999	59
Tabela 5.11 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 2 ...	60
Tabela 5.12 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 3 ...	61
Tabela 5.13 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ igual a 0,001	62
Tabela 5.14 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,1 a 0,2	62

Tabela 5.15	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,3 a 0,4.....	63
Tabela 5.16	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,5 a 0,7.....	63
Tabela 5.17	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,8 a 0,999.....	64
Tabela 5.18	Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 4 ...	65
Tabela 5.19	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ igual a 0,001.....	65
Tabela 5.20	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ variando de 0,10 a 0,20.....	65
Tabela 5.21	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ igual a 0,3.....	66
Tabela 5.22	Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ variando de 0,4 a 0,999.....	66

Resumo

CARVALHO, Eliane Bezerra, *Otimização da Operação de Fornos Elétricos de Arco Direto*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 78 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho apresenta um modelo de otimização da operação de fornos elétricos de arco direto que utilizam sucata como principal matéria-prima. Para a modelagem se requer o conhecimento do circuito elétrico no qual o forno está conectado, além das características construtivas e operacionais do equipamento. Utiliza-se um algoritmo de programação dinâmica *backward* segundo uma abordagem multi-objetivo. Os objetivos considerados são a minimização dos custos com energia e a minimização do tempo de operação. Os resultados demonstram a grande atratividade desta abordagem na identificação de soluções de compromisso entre a melhoria de produtividade e a redução do consumo de energia. O modelo também permite a quantificação do potencial de conservação de energia propiciado pela otimização do programa de potência sem custos adicionais.

Palavras Chave:

- Fornos elétricos de arco direto, programação dinâmica e conservação de energia.

Abstract

CARVALHO, Eliane Bezerra, *Optimisation of the Operation of Direct Arc Electric Furnaces*,
Post-graduate course on the Planning of Energy Systems, State University of
Campinas - UNICAMP, 1998, 78 p., M.Sc. Thesis.

An optimisation model for the operation of direct arc electric furnaces that use scrap as the main raw material is presented in this thesis. A knowledge of the electric circuit to which the furnace is connected, as well as the design and operational characteristics of the equipment, are required for the modelling. A backward dynamic programming routine is employed, in a multi-objective approach. The objectives considered are the minimisation of energy consumption cost and the minimisation of the furnace operation time. The results obtained prove the attractiveness of this approach in identifying trade-offs between improving productivity and reducing energy consumption. The proposed model also allows the calculation of the energy conservation potential provided by the power optimisation programme, at no extra cost.

Key - words:

- Direct arc electric furnaces, dynamic programming and energy conservation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A substituição de grandes quantidades de refratários das paredes dos fornos por painéis refrigerados a água reduziu os consumos de refratários e de eletrodos e melhorou, simultaneamente, a produtividade.

A melhoria de produtividade norteou outras mudanças na forma de exploração do forno elétrico de arco: a utilização crescente de energia química - através de lanças de oxigênio, queimadores, injeção de finos de carvão, combustíveis fósseis -, a utilização de escórias espumantes e a metalurgia secundária em fornos-panela.

Todavia, a operação com potências mais elevadas e arcos longos, proporcionada graças às inovações tecnológicas citadas anteriormente, redundou numa elevação do consumo específico de energia.

O objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta de otimização para definir uma política de operação para o forno elétrico de arco que contemple dois objetivos conflitantes: minimizar o consumo de energia e minimizar o tempo de operação.

O segundo capítulo faz uma descrição do equipamento e as principais evoluções tecnológicas incorporadas desde a sua invenção. O ciclo de operação para a fusão da sucata é dividido em fases bem características, cujos parâmetros elétricos devem ser ajustados pelo operador e pelo sistema de controle de posicionamento dos eletrodos. Aborda-se, também, as técnicas aplicáveis para minorar os distúrbios provocados pela operação dos fornos elétricos de arco.

No capítulo 3, apresenta-se as curvas características de operação dos fornos e os métodos de levantamento das mesmas. A partir do conhecimento do comportamento da potência entregue ao forno, do fator de potência, da tensão e da corrente do circuito alimentador do forno é possível determinar a regulação ótima para a operação sob o ponto de vista elétrico.

Os capítulos 2 e 3 apresentam as bases necessárias para se implementar uma política ótima de operação garantindo a qualidade do aço produzido com o menor distúrbio possível à rede. Isto é atingido a partir da seleção de ajustes adequados do sistema de controle de eletrodos e das tensões do transformador do forno em cada fase de operação.

O capítulo 4 apresenta o modelo de otimização proposto para definir uma política de operação para a fusão de sucata, em um ciclo típico com dois carregamentos. Esta política é pautada na minimização do custo com energia - energia elétrica e oxigênio - e na minimização do tempo de operação. Os dois objetivos são conjugados através de uma abordagem multi-objetivo que utiliza o método dos pesos.

No capítulo 5 aplica-se o modelo proposto para uma instalação real e simula-se quatro situações. Em cada uma delas, avalia-se o efeito da tarifa de energia elétrica e o efeito da isolamento térmica do sistema de refrigeração do forno.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões atingidas ao término da pesquisa, bem como algumas sugestões de assuntos que foram identificados como importantes para serem explorados em pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

O FORNO ELÉTRICO DE ARCO

2.1 O forno elétrico de arco na indústria siderúrgica

O primeiro relato sobre a utilização de energia elétrica para a fabricação de aço data de 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno de arco indireto constituído de dois eletrodos dispostos horizontalmente através da parede de um cadinho. Os eletrodos criaram um arco sobre a carga, aquecendo-a por irradiação.

Um ano depois, Siemens patenteou um forno de arco direto no qual um único eletrodo, disposto verticalmente, passava através da tampa do cadinho, enquanto o outro eletrodo, ou condutor, era instalado no fundo desse mesmo cadinho.

Todavia, a difusão destes equipamentos, como alternativa tecnológica para a produção de aço, encontrou grandes barreiras naquela época e a mais importante foi a escassez de energia elétrica.

Na França, no período de 1888 a 1894, Paul Heroult utilizou a energia elétrica em fornos para a produção de ferroligas, alumínio e carbureto de cálcio. Em 1899, Heroult instalou o primeiro forno elétrico de arco direto para a produção de aço.

Em 1909 surgiu o primeiro forno elétrico de arco trifásico nos Estados Unidos, que foi instalado na Illinois Steel Company. O equipamento utilizava a primeira carcaça com formato circular, que é utilizada até hoje (RAMOS & PUGLIESE, 1989).

A produção de aço bruto teve um considerável crescimento a partir dos anos 50, variando de aproximadamente 150 milhões de toneladas em 1950 para cerca de 725 milhões de toneladas em 1993. Neste mesmo período, a participação dos fornos elétricos de arco na produção total de aço bruto saltou de 6,5 para 31 por cento (WEC, 1995). No Brasil, a parcela de aço produzida por fornos de arco elétrico correspondeu a 20,3 por cento em 1994 (IBS, 1995).

Desde meados da década de 70, a produção mundial de aço bruto estabilizou-se no patamar de 700 milhões de toneladas anuais. As explicações para esta estagnação são a

utilização de outros materiais concorrentes do aço que tiveram importantes desenvolvimentos como o alumínio, os derivados de plásticos e, principalmente, os materiais cerâmicos.

2.2 Evolução tecnológica dos fornos elétricos de arco

No final da década de 60 e início da década de 70, os fornos de arco tiveram grande desenvolvimento tecnológico. Esta evolução foi caracterizada pela maximização da potência concentrada por tonelada produzida e por técnicas voltadas para a otimização da operação e consequente aumento de produtividade.

De acordo com Betzios (1987), os fatores que possibilitaram este desenvolvimento, sem dúvida, foram uma somatória de evoluções tecnológicas nos principais componentes e materiais utilizados. Pode-se citar:

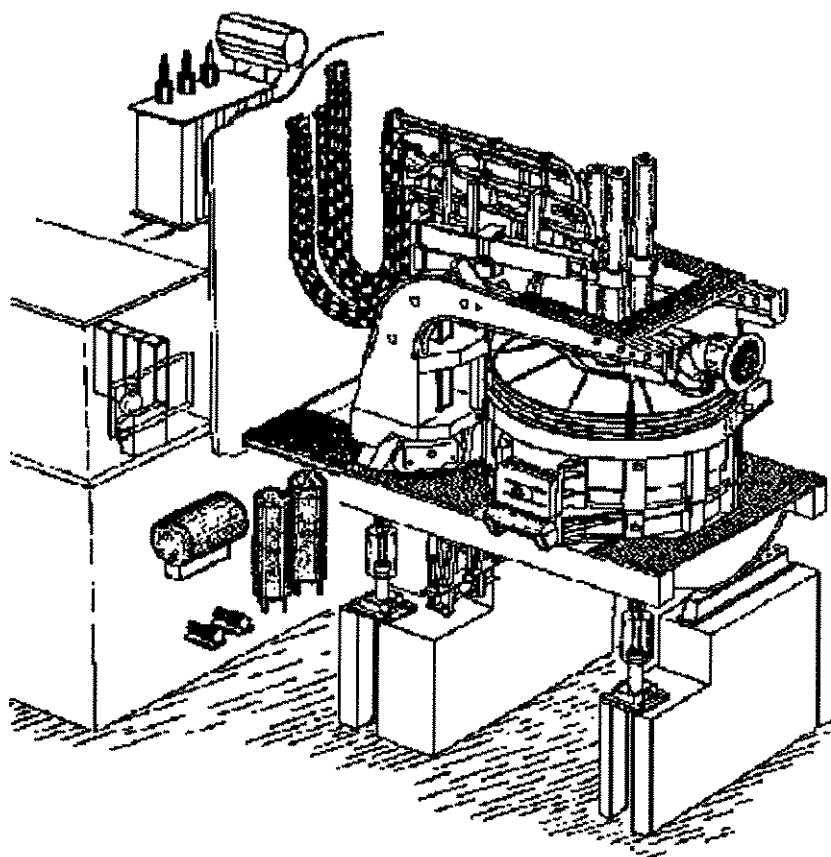
- (i) a utilização de eletrodos de grafite para altas densidades de corrente, possibilitando maior transferência de energia à carga;
- (ii) os cabos condutores flexíveis passaram a ser refrigerados a água, com o mesmo objetivo anterior;
- (iii) todo o sistema secundário passou por interessantes evoluções em seu projeto, como a configuração triangular ou coplanar modificada para a equalização das três fases e a otimização das reatâncias do sistema em função da operação do forno;
- (iv) a regulação dos eletrodos, através de sistemas eletrônicos comandando válvulas eletro-hidráulicas, proporcionou um controle mais rápido e preciso dos arcos elétricos;
- (v) as paredes do forno de material refratário foram substituídas por painéis refrigerados a água e, posteriormente, as abóbadas também passaram a ser refrigeradas. Assim, os tempos de parada para troca do revestimento foram sensivelmente reduzidos, aumentando a produtividade.

A figura 2.1 mostra um forno de arco elétrico com as técnicas desenvolvidas na década de 70.

A implementação das técnicas citadas anteriormente se refletiu no ciclo de operação do forno. No início da década de 70, um forno com capacidade de 100 toneladas levava mais de 200 minutos para produzir aço comum, contra períodos inferiores a 100 minutos já no início

da década de 80, obtidos por um forno do mesmo porte com as técnicas anteriores devidamente incorporadas.

Atualmente, a prática das aciarias modernas se caracteriza pela utilização do forno de arco apenas como um elemento fusor em combinação com os fornos panela utilizados para o refino do aço.



Fonte: (BETZIOS, 1987)

Figura 2.1 Forno elétrico de arco de corrente alternada

Vários países desenvolveram, nos anos 80, experiências com fornos elétricos de arco de corrente contínua, inicialmente, com o objetivo de redução dos custos operacionais; porém com o decorrer das experiências, verificou-se, também, uma redução dos distúrbios nas redes de alimentação.

Os fornos elétricos de arco de corrente contínua se tornaram uma alternativa viável e atrativa aos fornos de corrente alternada devido ao rápido desenvolvimento dos tiristores de alta potência (BETZIOS, 1993).

A corrente contínua é produzida empregando-se conversores estáticos controlados por tiristores a partir da alimentação trifásica em corrente alternada. A corrente de operação do forno de arco é controlada através da seleção do ângulo de disparo do tiristor.

O arco elétrico do forno de arco de corrente contínua apresenta uma convecção direcional, o que melhora a transferência de calor nos processos metalúrgicos. A corrente contínua suprime a passagem por zero da corrente alternada; consequentemente a estabilidade do arco será melhorada e os distúrbios associados à mesma reduzidos. O método de utilização da corrente elétrica para fusão de metais em um forno de arco de corrente contínua é basicamente o mesmo que em um forno de c.a.¹.

Um menor nível de *flicker*² pode ser esperado em um forno de c.c.³ não somente pela queima mais estável do arco, mas também devido à influência favorável do suprimento de corrente contínua controlável. Quando um forno de arco c.c. com dois eletrodos está operando, a rede de potência “*enxerga*” condições relativamente iguais em todas as 3 fases; neste caso, o efeito *flicker* pode ser reduzido pela metade.

A tabela 2.1 mostra a comparação entre os fornos elétricos de arco de corrente contínua e alternada, segundo alguns aspectos mais relevantes. Na maioria dos casos, a compensação de fator de potência e a redução de *flicker* num forno elétrico de arco c.c. podem ser realizadas através de bancos de capacitores e filtros estáticos; ao passo que o forno c.a. requer equipamentos de compensação controlados por tiristores cujos arranjos são mais onerosos. Assim, o forno c.c. com compensação apresenta um custo de investimento mais baixo que o equivalente c.a.

¹ c.a.: Corrente Alternada

² A variação de tensão no sistema de potência, além de prejudicar o bom funcionamento de equipamentos elétricos, a depender de sua frequência e intensidade, pode provocar variação da luminosidade de lâmpadas - efeito *flicker* - que, por sua vez afeta o sistema visual humano.

³ c.c.: Corrente Contínua

Tabela 2.1 Comparação entre fornos de arco elétrico de corrente contínua e alternada

Item	Forno de arco de c.a.	Forno de arco de c.c.
Eletrodo	3	1
Consumo de eletrodo	Base	40-60% menor
Consumo de energia	Base	5-10% menor
Consumo de refratário	Base	10-30% menor
Redução de <i>flicker</i>	Base	superior a 50%
Eletrodo inferior	Inexistente	Presente
Operação	• Instável • Sucatas não fundidas nas paredes • Utilização de lanças de O₂	• Estável • Fusão homogênea • Banho líquido ativo • Não utiliza lanças de O₂
Equipamento elétrico	Base	Com retificador
Custo equipamento completo	Base	30-50% maior
Custo anterior mais compensação de fator de potência e de <i>flicker</i>	Base	16% menor

Fonte: Elaboração própria a partir de (STENKVIST, 1994) e (SCHUBERT & RETH, 1993)

Os dados da tabela 2.1 demonstram a maior atratividade do forno de corrente contínua em relação ao de corrente alternada. Apesar de todas as vantagens do forno c.c. sobre o c.a., no Brasil não se verificou, ainda, uma acentuada substituição de fornos c.a. pelos de c.c. como se verificou nos países líderes na produção de aço em aciarias elétricas.

As aciarias elétricas das empresas siderúrgicas no Brasil são predominantemente constituídas por fornos de c.a.. Verifica-se que existe um grande potencial de redução de custos de produção a partir da adoção de medidas de baixo custo (RAMOS & PUGLIESE, 1989). Logo, este trabalho é desenvolvido para a otimização da operação em fornos c.a..

Entretanto, a reestruturação pela qual está passando o setor elétrico brasileiro, via privatizações das empresas concessionárias estatais, gera uma expectativa de elevação das tarifas de energia elétrica. Tal tendência, apresenta-se como mais um elemento alavancador para a redução dos custos de produção via substituição dos antigos fornos c.a. pelos fornos c.c..

2.3 Consumo de energia

O consumo específico de energia é influenciado por três fatores principais: tipo de processo produtivo, “mix” de produtos e eficiência energética dos processos. A eficiência pode ser melhorada, enquanto que os outros dois fatores são chamados de estruturais.

Uma maior utilização de fornos elétricos de arco provocou uma redução significativa no consumo de energia na indústria siderúrgica mundial. Estes equipamentos consomem aproximadamente metade da energia consumida pelos outros processos de fabricação de aço, já que o forno de arco elétrico não requer a produção de ferro-gusa que é altamente energo-intensiva.

Os fornos de arco elétrico contribuirão muito, no futuro, para a produção de aço mundial e os esforços em P, D & D têm aumentado para reduzir o seu consumo específico de energia. Para o ano 2.020, espera-se um consumo específico de energia elétrica de 370 kWh/t (WEC, 1995).

Devido aos custos crescentes e a limitada disponibilidade de energia elétrica, nos últimos anos, tem se utilizado combustíveis fósseis como fontes de energia complementares. Desta forma, aproximadamente 50-60 kWh/t de energia elétrica tem sido substituída (RAMOS & PUGLIESE, 1989; STEINS et alii, 1994). Em fornos de baixa potência, os queimadores de oxigênio/combustível podem ser utilizados como uma fonte adicional de energia, ao passo que, em fornos de alta potência, eles podem ser utilizados para aquecer os pontos frios, promovendo uma fusão mais uniforme da carga. Os combustíveis utilizados nos queimadores são o querosene, óleos leves e gás natural.

Existem várias vantagens associadas à utilização de oxigênio para fins de fusão da carga. Durante esta etapa do processo, 1 Nm³ O₂/t substitui aproximadamente 2-3 kWh/t de energia elétrica, este valor pode atingir 4 kWh/t com a carga líquida. A fusão com escória espumante também exige o uso de oxigênio. As aciarias utilizam, em média, 25-35 Nm³ O₂/t (KLEIN et alii, 1994).

2.4 Ciclo de operação

A seqüência dos procedimentos para a produção de aço, através de sucata, é denominada ciclo de operação ou corrida. A duração de uma corrida é função das práticas adotadas pelas aciarias e dos níveis de automação das várias manobras.

O material a ser fundido, composto de sucatas e minérios, que são previamente selecionados em função do tipo de aço que se pretende obter, é carregado no forno através de cestos especiais levados por pontes rolantes.

Uma vez completada a carga, fecha-se o forno através de movimento de elevação e rotação de todo o conjunto formado pela tampa ou abóbada, eletrodos, cabos de alimentação e de refrigeração.

Inicia-se a operação do forno através da ignição, que consiste de um curto-circuito entre os eletrodos e a sucata. Para isso, fecha-se o disjuntor do transformador do forno, e comanda-se os eletrodos para descer sobre a carga. O primeiro eletrodo toca na sucata e pára. O segundo ao tocar na sucata fecha um curto-circuito bifásico através da carga. Imediatamente os eletrodos recuam estabelecendo-se, assim, arcos elétricos entre a ponta dos eletrodos e a sucata. O terceiro eletrodo ao tocar na carga, já encontra um curto-circuito fechado através dos arcos dos dois eletrodos, processando-se a ignição do seu arco.

Deve-se ter o cuidado de proteger o material refratário do miolo da abóbada da ação do arco, furando-se os primeiros 40 a 50 centímetros da carga com um arco médio a uma baixa potência.

Denomina-se de fusão “perturbada”, a fase que se inicia logo após a ignição do arco, na qual ocorrem as maiores variações de potência do forno e, portanto, as maiores perturbações no sistema elétrico. A fusão “perturbada” termina quando a carga em volta dos eletrodos é fundida formando crateras na sucata que irão proteger as paredes do forno da irradiação de calor dos arcos.

À medida em que o arco vai perfurando a sucata, o material fundido se acumula no fundo da cuba, ficando a escória, as impurezas e os óxidos na superfície.

A fusão corresponde à fase mais crítica de operação elétrica devido às grandes variações de correntes de um meio ciclo para outro. Essas variações são responsáveis pelos principais distúrbios provocados pelo forno, ou seja, flutuação e distorção das ondas de tensão e corrente.

Após a primeira fusão, é usual completar o volume útil do cadinho com uma ou duas recargas, antes de iniciar a fase de refino. Essas recargas se justificam devido ao reduzido volume que o material fundido ocupa no fundo da cuba, em comparação com o volume inicial ocupado pela sucata bruta. Assim, a segunda e terceira cargas permitem obter um melhor aproveitamento da capacidade do forno para cada corrida.

O intervalo entre duas recargas é de apenas alguns minutos; o suficiente para abrir a tampa, despejar a nova carga, fechar a tampa e provocar a reignição.

Uma vez completada a fase da fusão, tem início o refino quando são adicionados, em geral, outros componentes metalúrgicos como carbono, manganês, etc. O refino pode se processar no próprio equipamento ou no forno panela, que é um forno elétrico de arco de menor potência, já que sua função é manter a temperatura do aço líquido, enquanto ajusta os teores dos elementos na liga a ser produzida.

Como o material fundido apresenta uma superfície aproximadamente uniforme, o arco elétrico pode ser ajustado e mantido em níveis bem mais estáveis do que durante a fusão. No entanto, os esforços eletromagnéticos e de convecção dos gases forçam o arco a se deslocar permanentemente em movimentos complexos em torno dos eixos de cada eletrodo. Observa-se, portanto, uma baixa conversão de energia elétrica em térmica e o rendimento total desta fase é da ordem de 40 por cento (JACCARD, 1987).

Durante a fusão, enquanto houver sucata sólida dentro do forno, esta funcionará como uma barreira protetora contra os efeitos dos arcos longos, porém, à medida que toda a carga se funde, essa proteção desaparece. A escória espumante foi criada para contornar essa dificuldade. Deste modo, os refratários do forno e os painéis refrigerados estão protegidos da radiação do arco.

A escória espumante possui normalmente alta basicidade e cerca de 30 a 35 cm de espessura. O termo “espumante” é devido ao grande volume de gás contido em seu interior, que faz com que ela aumente de espessura e tenha o aspecto de espuma. Para a formação de escória espumante, é necessário, fundamentalmente, uma fonte geradora de carbono que, reagindo com o oxigênio, produz gás CO e CO₂. Esse gás interagindo com a escória é que dá o aspecto espumante à mesma. As fontes de carbono geralmente empregadas podem ser diversas, tais como: coque, carvão, carbono e grafite (RAMOS & PUGLIESE, 1989).

Desde o fim da década de 60, é prática corrente a utilização de escória espumante para melhorar o rendimento da conversão de energia elétrica em térmica.

A remoção da escória e o controle de qualidade do material fundido são tarefas conduzidas durante o refino. O tempo de refino é muito variável e depende, basicamente, do tipo de aço produzido.

2.5 Sistema de alimentação elétrica

Se por um lado, a grande capacidade do forno exige do sistema principal um elevado nível de curto-circuito, disponível em geral apenas na rede de alta tensão - acima de 138 kV, por outro lado, o controle do arco exige baixas resistências, ou seja, elevadas correntes de arco - dezenas de kA.

Em consequência dessas premissas, o sistema de alimentação do forno utiliza, em geral, dois níveis de abaixamento de tensão:

- (i) um transformador abaixador, que reduz a tensão primária da ordem de 138kV para níveis da ordem de 22 a 34kV;
- (ii) o transformador do forno, que reduz a tensão de 22-34kV para valores nominais em torno de 600V.

Os transformadores empregados em fornos elétricos de arco são projetados para operar em condições mais rigorosas do que aqueles utilizados em outras aplicações, devido, principalmente, aos elevados esforços mecânicos decorrentes do início da fusão da carga metálica. Além disso, esses transformadores estão sujeitos a comutações frequentes de taps que, dependendo do programa de potência utilizado para a fusão da carga, podem chegar a dezenas de vezes em um mesmo dia.

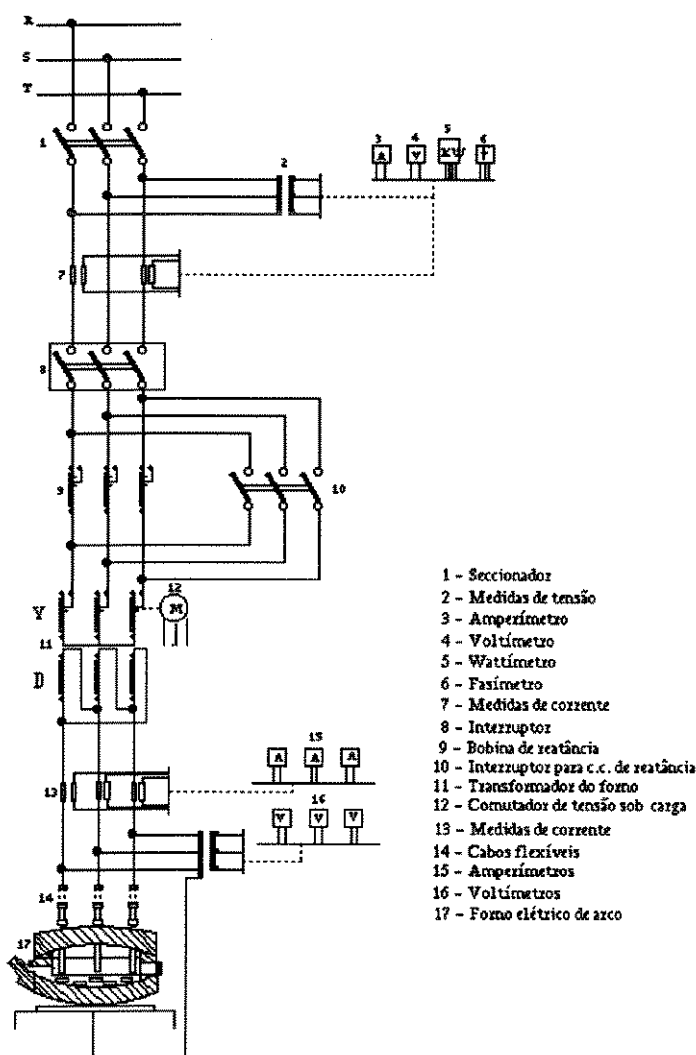
A ocorrência de curto-circuitos, bem como a existência de determinado grau de desbalanceamento, típico da operação de fornos elétricos, fazem com que surjam esforços mecânicos e aquecimento adicionais no interior do transformador. Para se ter a flexibilidade de alterar os níveis de potência durante a operação do forno, o transformador deve dispor de vários taps de tensão. Uma boa seleção de taps de tensão deve ser aquela que permita alcançar a potência desejada com valores de corrente que resultem em uma boa estabilidade do arco elétrico e menores perdas de energia.

A tensão de arco, que corresponde, aproximadamente, à queda de tensão através do arco elétrico é, portanto, inferior a 600V. Sabe-se que, para estabelecer um arco voltaico

neste nível de tensão é necessário promover o curto-circuito dos contatos. Essa é a razão pela qual a ignição do arco só é factível, colocando-se os eletrodos em curto-circuito através da sucata a ser fundida.

A figura 2.2 mostra um sistema de alimentação típico. Neste esquema, está previsto um reator-série para limitação da corrente de curto. O transformador do forno, usualmente conectado em Δ no secundário e Y no primário, permite prever um dispositivo de controle da derivação, em função das condições de operação do forno.

A associação do secundário em Δ tem como objetivo reduzir os efeitos de desequilíbrio, restringindo a circulação da sequência zero de corrente, além de repartir a enorme corrente de arco entre os ramos do Δ .



Fonte: (STASI, 1981).

Figura 2.2 Esquema de alimentação elétrica

2.6 Controle dos eletrodos

O controle efetivo dos eletrodos é um fator determinante na operação do forno de arco elétrico, pois o consumo de energia, o tempo de fusão e o fator de potência dependerão fortemente da velocidade e precisão com que os eletrodos são controlados.

Este controle é imprescindível durante a fusão, visto que o comprimento do arco varia erráticamente, devido ao movimento da sucata, às forças magnéticas e às correntes de convecção dos gases.

Os eletrodos ao penetrarem na carga, geralmente, provocam curto-circuitos quando o metal circunvizinho desmorona sobre eles. Os inconvenientes de curto-circuitos e interrupções durante a fusão da carga são consideráveis.

As interrupções significam perda de tempo, porque, nesta situação, nenhuma energia é transferida à carga. Os curto-circuitos representam tanto perda de tempo quanto de energia, pois, nesta situação, somente uma porcentagem muito pequena da potência de curto-circuito é utilizada para a fusão, ao passo que a maior parte é dissipada nos cabos e transformadores.

Os curto-circuitos e as interrupções provocam distúrbios e variações de tensão no sistema de potência, além de prolongar os períodos de fusão acarretando em maiores desgastes dos eletrodos. Portanto, consideráveis economias de tempo, energia e custos com eletrodos e refratários podem, então, ser alcançadas através do controle dos eletrodos.

O objetivo do controle dos eletrodos é regular o comprimento do arco, de modo que a potência consumida seja o mais constante possível durante a operação.

Como o forno de arco é alimentado por uma fonte de tensão constante, a condição de potência constante é atendida se a resistência do arco não varia. Já que o arco é parte de um circuito com resistência e reatância constantes, o mesmo resultado é atingido se a impedância do arco permanecer inalterada.

Assim, o regulador deve ser sensível a variações de impedância e estar acoplado a um servo-mecanismo que opere os eletrodos com elevadas velocidade e aceleração em resposta aos sinais de controle (FURRERI, 1978).

A filosofia de controle está pautada em duas políticas: de curto e longo prazos. A política de longo prazo consiste no ajuste manual da potência de entrada do forno durante a corrida. Este controle é realizado por meio da seleção dos taps do transformador do forno.

A dinâmica de controle de curto prazo consiste na manutenção de uma impedância de arco pré-selecionada através do ajuste da posição do eletrodo em resposta aos distúrbios. Cada eletrodo é posicionado individualmente, através de um controlador de posição que procura manter uma impedância de arco de referência compatível com a potência de entrada programada pelo controle de longo prazo.

Assim, o controle de posição dos eletrodos procura manter a resistência média do arco por fase, a mais uniforme possível. Esse controle é obtido através da realimentação dos sinais de tensão e corrente de arco, para cada uma das fases.

O circuito de medição da impedância do arco compara valores eficazes de correntes e tensões secundárias do transformador e produz um sinal de erro ε que o servo-posicionador tenta anular:

$$\varepsilon = \kappa [aI - bV] \quad (2.1)$$

Para o controle tipo PI, resulta em regime $\varepsilon = 0$, logo:

$$aI = bV \quad (2.2)$$

$$R_a = V/I = a/b = \text{cte} \quad (2.3)$$

e, portanto, esse controle tenta manter R_a constante, sendo que R_a inclui a resistência do eletrodo e do próprio arco. Todavia, a resistência instantânea de arco varia muito até mesmo durante um período da onda fundamental. O controle PI dos eletrodos pode ser considerado lento em relação a essas variações da resistência de arco e seu objetivo é o de estabelecer valores de referência que seriam alcançados em condições de regime.

2.7 Distúrbios causados pela operação

A elevada potência requerida pelos fornos de arco e a forma como a mesma é absorvida são responsáveis pelo aparecimento de distúrbios no sistema elétrico no qual encontram-se conectados. Os principais distúrbios provocados pela operação do forno são:

- distorção da forma de onda senoidal;
- flutuação do nível de tensão.

2.7.1 Distorção da forma de onda

Os fornos elétricos de arco apresentam variações de corrente muito rápidas, e operam sob condições de alto consumo de reativos. Assim, tem-se nos correspondentes sistemas elétricos variações bruscas de tensão que necessitam ser reduzidas a níveis aceitáveis.

O forno elétrico de arco apresenta características, notadamente, não lineares, causando distorções nas formas de onda das tensões e/ou correntes. Em consequência desse caráter altamente não linear, a corrente de alimentação do forno apresenta-se distorcida.

A maior parte destas distorções apresentam características harmônicas, isto é, podem ser decompostas, através da análise de Fourier, em frequências múltiplas da frequência nominal do sistema ou fundamental, denominadas frequências harmônicas ou, simplesmente, harmônicas.

De um modo geral, num sistema de potência, a presença de correntes e/ou tensões distorcidas pode causar indução de ruído em sistemas próximos, não só de comunicação, como de sinalização e controle, além de uma série de outros problemas, como o aumento das perdas nos equipamentos dos sistemas de potência, a redução na eficiência de motores C.A., o aumento da demanda de potência reativa, o aumento da necessidade de investimentos para os sistemas, a redução na qualidade de determinados produtos industriais, o aumento nos custos de manutenção, o aumento nas contas de energia elétrica, bem como falhas de equipamentos sujeitos à sobretensões harmônicas devido a ressonâncias.

Medições efetuadas em diferentes instalações de fornos de arco, têm mostrado que o espectro em frequência da corrente do forno não apresenta componentes harmônicas discretas de ordem inteira, mas um espectro contínuo.

Devido à natureza variável da operação dos fornos de arco, a literatura apresenta dados estatísticos para o conteúdo harmônico destas cargas. Pode-se constatar que a amplitude das harmônicas decresce com o aumento da frequência. Estes resultados estão transcritos na tabela 2.2. Observa-se que a amplitude média das harmônicas de ordem ímpar é superior às de ordem par.

Tabela 2.2 Nível médio de harmônicas produzidas por fornos de arco, em % da fundamental

Ordem harmônica	Amplitude média (%)	Máxima (%)
2	4-9	30
3	6-10	20
4	2-6	15
5	2-10	12
6	2-3	10
7	3-6	8
9	2-5	7

Fonte: (PIRES, 1991)

2.7.1.1 Redução dos níveis e ordens harmônicas

Basicamente existem dois métodos utilizáveis para se diminuir ou cancelar os níveis das ordens harmônicas dos sistemas de potência.

O primeiro deles é o mais geral e eficaz para se controlar a injeção de harmônicas nos sistemas C.A., se constitui na instalação de filtros sintonizados em determinadas frequências harmônicas e de filtros passa-alta nas barras onde se localizam as principais fontes de harmônicas, em especial naquelas nas quais se ligam grandes conversores.

Considerando-se a possibilidade de geração de harmônicas não características, assim como, a geração de harmônicas de qualquer ordem por outros tipos de carga especiais, é usual instalar-se filtros para harmônicas de ordens 3 e 9 ou para outras ordens que porventura se façam presentes no sistema.

O outro método de supressão de harmônicas é utilizado apenas em conversores e compensadores estáticos de reativos, e é conhecido como a multiplicação de fases. Isto é conseguido com o emprego de unidades de 6 pulsos, alimentadas por transformadores com diferentes valores de deslocamento angular. A associação usual de 12 pulsos, utiliza transformador com 2 secundários conectados em Y e Δ .

2.7.2 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão no sistema de alimentação do forno e, em particular, no Ponto de Acoplamento Comum - PAC⁴ - está associada à variação da corrente demandada pela carga. O principal efeito, provocado por essa modulação da amplitude da tensão, se manifesta através da cintilação luminosa - *lamp flicker* -, além de outros efeitos indesejáveis sobre cargas sensíveis às oscilações de tensão, como aparelhos de televisão, sistemas computacionais, sistemas de acionamento e dispositivos de proteção ajustados para referência fixa de tensão.

A preocupação principal com o efeito da cintilação, se deve à extrema sensibilidade do olho humano às variações de intensidade luminosa. A característica de sensibilidade visual é função da frequência das oscilações, da taxa de variação, além da amplitude dessa oscilação e de fatores subjetivos do observador.

Verifica-se que oscilações bruscas apresentam limiar mais baixo, ou seja, são mais perceptíveis. Além disso, nota-se que a faixa de percepção do efeito de cintilação está restrito à faixa de 0 - 30Hz. Acima dessa frequência, o olho humano é incapaz de perceber a variação luminosa provocada, por exemplo, pela alimentação C.A. 50 ou 60 Hz. No entanto, em torno da frequência de 10Hz, ocorre o limiar mínimo, ou seja, a sensibilidade visual máxima, que é da ordem de 0,2 por cento de variação de tensão (DECKMANN et alii, 1992).

2.7.2.1 Medidas para diminuir o nível de *flicker*

Algumas das alternativas possíveis para reduzir os distúrbios provocados pela operação de fornos de arco são:

- (i) redução da carga do forno;
- (ii) melhoria do sistema supridor;
- (iii) instalação de equipamentos de compensação.

⁴ Subestação de energia elétrica da empresa concessionária que supre a indústria siderúrgica.

A redução da carga do forno é utilizada, normalmente, como um recurso provisório para reduzir as cintilações provocadas por instalações já em operação, enquanto outras providências são tomadas.

O sistema supridor é fortalecido através da adição de novas linhas de transmissão, aumentando a sua tensão nominal de suprimento ou ambos. Essa opção, normalmente, apresenta um custo elevado.

Quando a compensação é utilizada, a escolha pode ser feita entre diversos tipos de compensadores. Algumas das principais vantagens e desvantagens das técnicas e equipamentos de compensação de flicker estão resumidas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Comparação entre as técnicas e equipamentos de compensação de flicker

Técnica e equipamento de compensação de flicker	Vantagens	Desvantagens
Reator Controlado a Tiristores - RCT	•Resposta rápida •Opera com fases independentes	•Necessidade de capacitores para corrigir o fator de potência •Gera harmônicas
Capacitor Chaveado a Tiristores - C.C.T	•Não gera harmônicas •Não necessita de reatores •Opera com fases independentes	•Velocidade de resposta limitada
Reator Saturado	•Respostas rápidas •Opera com fases independentes •Construção tipo transformador	•Necessidade de grandes bancos de capacitores para correção de fator de potência •Gera harmônicas •Aplicável somente para um forno
Reator saturado com compensação de harmônicas	•Resposta rápida •Gera harmônicas desprezíveis •Construção tipo transformador	•Necessita de capacitores para correção de fator de potência •Transitórios de energização •Não opera com fases independentes
Compensador síncrono	Inexistem	•Manutenção regular •Capacidade limitada de compensação de flicker
Aumento do nível de curto-circuito da rede	•Alta confiabilidade •Expansão futura das cargas	•Custo elevado

Fonte: (MILLER, 1982)

CAPÍTULO 3

CURVAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS FORNOS DE ARCO E BALANÇO DE ENERGIA

A compreensão do funcionamento de um forno elétrico de arco, do ponto de vista de seu circuito elétrico, é realizada a partir do levantamento de suas curvas características. Tais curvas são utilizadas para realizar ajustes operacionais com o objetivo de auferir melhorias de desempenho e controle das perdas. A produtividade, consumo de eletrodos, de refratários e de energia são fatores que estão profundamente relacionados com os parâmetros elétricos utilizados na operação dos fornos elétricos de arco.

3.1 O arco elétrico

O arco elétrico é uma descarga auto-sustentada que apresenta um baixo nível de tensão e capacidade para suportar elevadas correntes. O arco é estabelecido tanto por separação dos contatos em um circuito com corrente, quanto por ruptura do dielétrico no caso de tensão inicial mais elevada.

O arco, num forno elétrico, é uma fonte de calor extremamente concentrada. Por exemplo, um arco dissipando 8.000 kW num forno grande, ocupa um volume de 200 a 400 cm³, o que corresponde a uma densidade média de potência de 20 a 40 kW/cm³ (SCHWABE, 1957).

O meio interposto aos eletrodos torna-se condutor devido ao campo elétrico e, sua condutibilidade é aumentada por efeito da temperatura, que assume valores muito elevados.

No arco, a ionização elétrica não é a única fonte de íons e elétrons, mas outras causas contribuem para intensificar o fenômeno. Entre estas, assumem importância fundamental a ionização térmica e a emissão catódica.

Cada molécula de gás, em condições normais, está em estado eletricamente neutro, mas o seu equilíbrio pode ser rompido, em temperaturas de milhares de graus centígrados. Neste caso, os elétrons adquirem uma energia cinética suficiente para sair da órbita que os liga ao

núcleo, dando lugar à formação de íons e elétrons que, submetidos à ação de um campo elétrico, movem-se seguindo uma direção obrigatória: os íons para o catodo e os elétrons para o anodo. Os íons, chocando-se contra o catodo, cedem no choque sua energia cinética, provocando um aquecimento localizado suficiente para permitir uma emissão de elétrons por efeito termiônico.

O arco, uma vez estabelecido, pode ser mantido mesmo com o decréscimo da intensidade de campo elétrico, pois a ionização térmica e a emissão catódica têm um efeito notável no mecanismo de sustentação desse fenômeno.

A figura 3.1 ilustra as três regiões entre os eletrodos através das quais a corrente flui. São elas: a região anódica, o plasma e a região catódica. As regiões anódica e catódica são caracterizadas por um elevado gradiente de potencial e são pequenas regiões adjacentes às superfícies do anodo e catodo do eletrodo. O plasma ou coluna de arco, que constitui o corpo principal da descarga, é uma coluna bem definida de gás ionizado estendendo-se do anodo ao catodo e é caracterizado por um gradiente de potencial relativamente baixo.

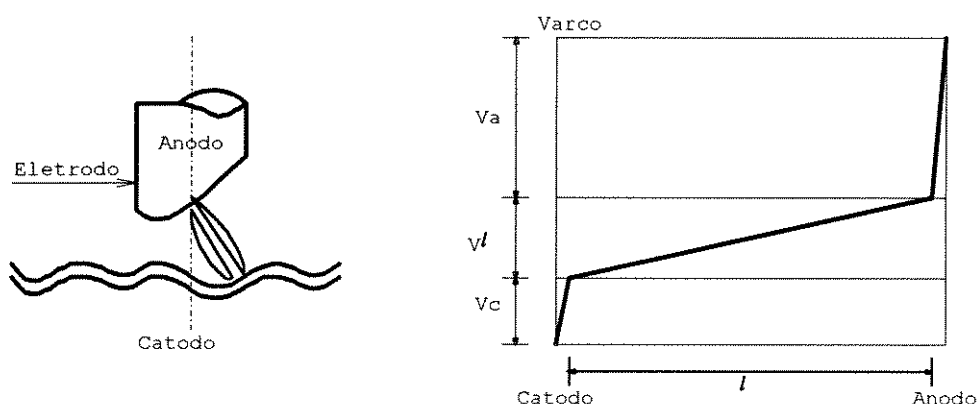


Figura 3. 1 Regiões do arco elétrico

A tensão de arco é a soma das tensões daquelas três regiões. A tensão através do plasma é a maior das três e, geralmente, é a que mais contribui para a tensão de arco. As quedas de tensão anódica e catódica são da ordem de 10V e 30V, respectivamente. A tensão de arco pode ser descrita pela equação simplificada de Hertha Ayrton:

$$V_{arco} = A + Bl \quad (3.1)$$

onde:
A: soma das quedas de tensão anódica e catódica;
B: gradiente de tensão que varia de 5 a 15 V/cm; e
l: comprimento do arco, em cm.

A soma das tensões anódica e catódica representa a tensão mínima necessária para manter o arco.

O valor típico do gradiente de tensão de 10V/cm para baixas correntes de arco, parece se aplicar também para fornos elétricos de arco. A tabela 3.1 apresenta alguns valores de *B*, para diversas correntes de arco. Estes valores demonstram que a tensão de arco é, essencialmente, dependente do comprimento de arco e não do nível da corrente.

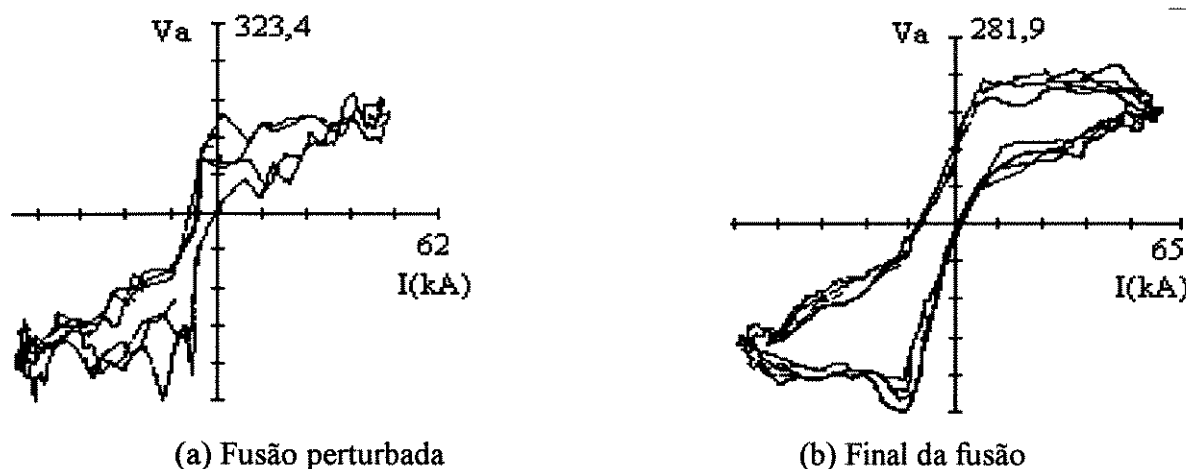
Tabela 3.1 Gradientes de tensão do arco

Gradiente de tensão (V/cm)	Corrente de arco (kA)
10	0,001 - 1
9 - 12	4 - 8
8 - 18	11
10	20 - 30
10	50 - 70

Fonte: (BOWMAN, 1982).

Mantendo-se a corrente e as demais condições constantes, o arco permanece em equilíbrio estável, pois a ionização do meio é garantida pelo calor por ele gerado. Esse equilíbrio é mantido na medida em que o calor cedido ao arco pelo circuito - que é o produto da sua tensão pela corrente que nele passa - é igual ao calor nele retido, mais o calor dissipado para o meio. Todavia, se qualquer parâmetro for modificado de maneira a perturbar essa relação, o arco se ajustará a um novo estado de equilíbrio.

Pode-se observar na figura 3.2, que a resistência em um arco elétrico, num circuito de corrente alternada, é completamente diferente daquela existente para condutores metálicos. Nestes , a tensão é proporcional à corrente, ao passo que a tensão de arco decresce com o aumento da corrente até um valor limite e novamente aumenta se a corrente é diminuída .



Fonte: (BILLINGS et alii, 1979)

Figura 3.2 Características tensão $\times$ corrente de um forno elétrico de arco durante a fusão perturbada e no final da fusão, com carga fundida

Nota-se, na figura acima, o comportamento altamente variável da resistência do arco, que chega a tornar-se negativa em alguns trechos da característica $v \times i$. Em consequência deste comportamento, altamente não-linear da resistência de arco, a corrente de alimentação do forno apresenta-se distorcida.

Uma vez que, para um dado circuito de um forno de arco, a tensão de arco é fixada pelo comprimento do arco, a corrente é, então, determinada pelas características do circuito externo, isto é, pela tensão de suprimento e impedância do circuito.

Adicionalmente, pode-se considerar o arco elétrico como um elemento puramente resistivo, consequentemente, em circuitos de corrente alternada, a tensão de arco pode ser descrita aproximadamente como uma onda retangular em fase com a corrente.

No período da fusão, a instabilidade dos arcos é indicada pelas grandes oscilações nas formas de onda de corrente e tensão de arco. No final da fusão, já com o banho líquido, a tensão e a corrente de arco exibem poucas oscilações e, geralmente, assumem a forma sinusoidal conforme figura 3.3.



(a) Fusão perturbada

(b) Final da fusão

Fonte: (JÄGER et alii, 1991)

Figura 3.3 Oscilogramas de tensão e corrente de arco durante a fusão perturbada e no final da fusão, com a carga fundida

Algumas vezes, as variações de comprimento do arco podem ocorrer com muita rapidez: câmeras cinematográficas de alta velocidade já registraram processos cíclicos de alongamento e extinção do arco, ocorrendo várias vezes no transcorrer de meio período da onda de tensão (JORDAN et alii, 1969).

3.2 O circuito elétrico

O esquema de uma fase de um forno trifásico e o seu circuito monofásico correspondente estão representados nas figuras 3.4 e 3.5, respectivamente, onde:

- E : tensão de alimentação do circuito transformador-forno;
- R_1, X_1 : resistência e reatância do primário do transformador;
- R_o, X_o : resistência e reatância de magnetização do transformador;
- R_2, X_2 : resistência e reatância do secundário do transformador;
- R_c, X_c : resistência e reatância dos condutores de ligação entre o transformador e o forno;
- R_f, X_f : resistência e reatância da parte termicamente inativa do forno, ou seja, porta-eletrodos, placas de contato, eletrodo e sola; e
- R_u : resistência útil do forno ou resistência do arco.

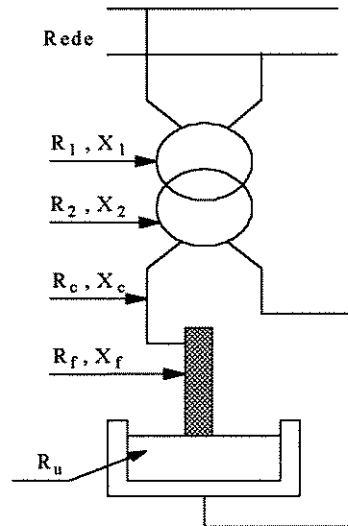


Figura 3.4 Representação esquemática de uma fase de um forno elétrico de arco

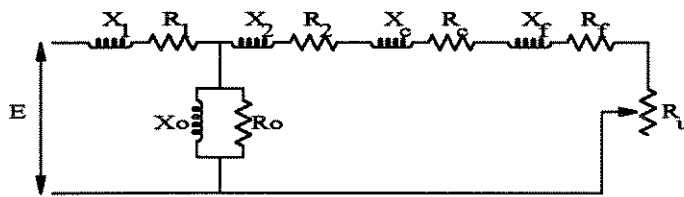


Figura 3.5 Circuito equivalente monofásico

Considerando-se que a impedância de magnetização do transformador é muito elevada e referindo-se as grandezas secundárias em relação ao primário do transformador, reduz-se o circuito equivalente da figura 3.5 a um circuito R_{eq} , X_{eq} série, onde:

$$R_{eq} = R_1 + m^2(R_2 + R_c + R_f + R_u) \quad (3.2)$$

$$X_{eq} = X_1 + m^2(X_2 + X_c + X_f) \quad (3.3)$$

m é a relação de transformação do transformador do forno.

Expressando estes mesmos valores em relação ao secundário do transformador, vem:

$$R_{eq} = R_1/m^2 + R_2 + R_c + R_f + R_u = R_p + R_u \quad (3.4)$$

$$X_{eq} = X_1/m^2 + X_2 + X_c + X_f \quad (3.5)$$

R_p da equação (3.4) é a soma das resistências passivas do circuito transformador-forno. O circuito equivalente série é mostrado na figura 3.6.

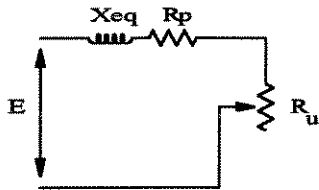


Figura 3.6 Circuito equivalente simplificado

Os valores de X_{eq} e R_p , nos modernos fornos elétricos de arco, são os menores possíveis e podem ser considerados constantes, pois são determinados pelo projeto e construção do forno considerado. A resistência do arco - R_u - obviamente é uma variável, ou seja, é a resistência do arco ou do arco e carga do forno, que, naturalmente, não é constante (CARDOSO, 1987). Para a fusão de aço, a resistência da carga pode ser considerada nula (JACCARD, 1987).

A figura 3.7 mostra o diagrama vetorial das impedâncias do circuito da figura 3.6. Para um determinado tap do transformador do forno, a tensão do forno E e a reatância equivalente são constantes. O ângulo φ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no primário do transformador, e o ângulo θ corresponde ao fator de potência no momento do curto-circuito, isto é, quando $R_u = 0$.

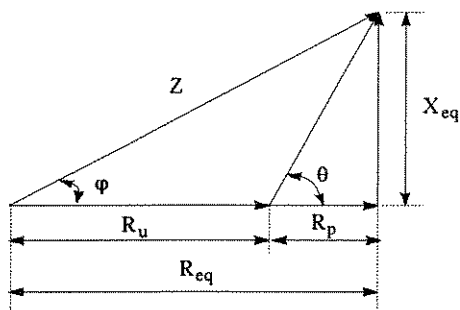


Figura 3.7 Diagrama vetorial das impedâncias do circuito da figura 3.6

A corrente que flui no circuito da figura 3.6 é dada por:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{X_{eq}^2 + R_{eq}^2}} = \frac{E \sin \varphi}{X_{eq}} = \frac{E \cos \varphi}{R_{eq}} \quad (3.6)$$

Seja V a tensão de linha, em um circuito trifásico, aplicada ao circuito da figura 3.6. Do diagrama vetorial 3.7, vem:

$$\frac{V}{\sqrt{3}} \cos \varphi = R_u I + R_p I \quad (3.7)$$

mas,

$$V_{arco} = R_u I \quad (3.8)$$

substituindo as equações (3.6) e (3.8) em (3.7) vem:

$$V_{arco} = \frac{V}{\sqrt{3}} \left(\cos \varphi - \frac{R_p}{X_{eq}} \sin \varphi \right) \quad (3.9)$$

como $\frac{R_p}{X_{eq}} \ll 1$, vem:

$$V_{arco} \cong \frac{V}{\sqrt{3}} \cos \varphi \quad (3.10)$$

A tensão de arco é, portanto, diretamente proporcional ao fator de potência. Assim, para arcos longos o fator de potência é elevado e arcos curtos são obtidos para baixos fatores de potência.

Logo, o fator de potência é uma variável utilizada para a regulação do comprimento do arco voltaico durante a operação dos fornos elétricos de arco. O fator de potência é dado pela seguinte equação:

$$\cos \varphi = \frac{R_{eq}}{Z_{eq}} = \frac{R_{eq}}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}} = \frac{I}{\sqrt{I + \frac{X_{eq}^2}{R_{eq}^2}}} = \frac{I}{\sqrt{I + \frac{X_{eq}^2}{(R_u + R_p)^2}}} \quad (3.11)$$

desprezando-se R_p , resulta:

$$\cos \varphi \cong \frac{I}{\sqrt{I + \frac{X_{eq}^2}{R_u^2}}} = \frac{I}{\sqrt{I + \frac{X_{eq}^2}{\left(\frac{V_{arco}}{I}\right)^2}}} \quad (3.12)$$

Ao se fixar a tensão V , pode-se variar o comprimento do arco para controlar a potência injetada no forno. Pode-se circular uma corrente mais elevada no circuito, para um arco voltaico curto, ou então, uma menor corrente irradiando mais calor com um arco maior.

3.3 Teste de curto-circuito

Os valores da reatância equivalente e da resistência passiva de um forno elétrico de arco podem ser obtidos através do teste de curto-circuito. Nestas condições, devido à inexistência do arco voltaico, as formas de onda da tensão e da corrente são senoidais e a reatância do sistema é conhecida como reatância senoidal.

Este método consiste em se determinar, experimentalmente, as impedâncias do sistema elétrico do forno por medições das tensões entre fases, correntes e potência ativa sob condições de curto-circuito.

As medições são feitas do lado de alta tensão do transformador do forno. Se as medições fossem realizadas no enrolamento de baixa tensão, as tensões seriam inconvenientemente baixas e as correntes extremamente elevadas. Logo, a resistência e a reatância equivalentes medidas do lado de alta tensão poderão ser transferidas para o lado de baixa tensão dividindo-se seus valores pelo quadrado da relação de transformação.

O curto-circuito é produzido por imersão dos eletrodos na carga fundida. Os testes poderão ser bifásicos ou trifásicos. No teste bifásico, os eletrodos são imersos aos pares dentro da carga, enquanto o terceiro está fora do mesmo e desenergizado.

Provavelmente os testes bifásicos são menos confiáveis que os trifásicos, pois durante o teste bifásico um dos braços do eletrodo é elevado a uma posição mais alta do que os outros dois. Assim, os efeitos magnéticos do material do braço influenciam as medições. Além disso, as correntes fluindo somente em duas fases, forçarão os cabos flexíveis de forma diferente daquela em posição normal e desta forma a reatância será alterada. Por estas razões, adota-se, preferencialmente, o teste trifásico (BETZIOS, 1987).

O teste deve ser efetuado após a fusão completa da carga metálica. O banho deve estar isento de sucatas. A tensão do secundário do transformador do forno é escolhida de modo que a corrente de curto-circuito seja igual à de operação normal.

O procedimento operacional é o seguinte:

- (i) ajusta-se o tap do transformador de modo que o regulador ajuste os eletrodos até a obtenção de três arcos estáveis;
- (ii) comanda-se os eletrodos para baixo na mesma velocidade até que eles penetrem aproximadamente uns vinte centímetros na carga, de modo a assegurar um bom contato e leituras estáveis nos instrumentos durante as medições;
- (iii) quando os instrumentos apresentarem valores estáveis, estes devem ser anotados e os eletrodos devem ser elevados novamente, tirando-os da carga.

O fator de potência do circuito durante o teste de curto-circuito está entre 0,15 e 0,30. Assim sendo, os fasímetros normais não podem ler valores tão baixos. Deve-se, então, tomar a leitura dos medidores de potência reativa, ou instalar fasímetros adequados para o teste.

Este teste fornece a impedância média por fase. Sendo P_w a leitura do wattímetro, I_{media} e E_{media} as médias das medidas de corrente e tensão nas três fases, respectivamente; calcula-se a resistência passiva, a reatância equivalente e o fator de potência a partir das seguintes expressões:

$$R_p = \frac{P_w}{3m^2 I_{media}^2} \quad (3.7)$$

$$X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{E_{media}}{\sqrt{3}m^2 I_{media}}\right)^2 - R_p^2} \quad (3.8)$$

$$\cos\varphi = \cos\left[\arctg\left(\frac{X_{eq}}{R_p}\right)\right] \quad (3.9)$$

3.4 Curvas de carga características

Após a determinação dos valores de R_p e X_{eq} , através do ensaio de curto-circuito, pode-se levantar as curvas de carga características dos fornos, utilizando as fórmulas a seguir. Para um determinado tap de tensão do transformador do forno, tem-se a tensão secundária fixada - V_{sec} - e apenas a corrente como variável. Assim, as curvas da figura 3.8, por exemplo, foram determinadas pela aplicação das fórmulas (3.10) a (3.16) para um forno de 20 MVA e

tensão do tap do transformador de 430 V. Para este forno, a reatância equivalente e a resistência passiva, calculadas a partir do teste de curto-circuito valem, 2,5 mΩ e 0,7 mΩ, respectivamente.

Potência aparente:

$$S = \sqrt{3}V_{\text{sec}} I \quad (3.10)$$

Fator de potência:

$$\cos\varphi = \cos\left[\arcsen\left(\frac{\sqrt{3}X_{eq}I}{V_{\text{sec}}}\right)\right] \quad (3.11)$$

Potência ativa:

$$P = \sqrt{3}V_{\text{sec}} I \cos\varphi \quad (3.12)$$

Potência reativa:

$$Q = \sqrt{3}V_{\text{sec}} I \sin\varphi = 3X_{eq} I^2 \quad (3.13)$$

Perdas:

$$P_p = 3R_p I^2 \quad (3.14)$$

Potência útil:

$$P_u = P - P_p \quad (3.15)$$

Rendimento elétrico:

$$\eta = \frac{P_u}{P} = 1 - \frac{R_p}{X_{eq}} \tan\varphi \quad (3.16)$$

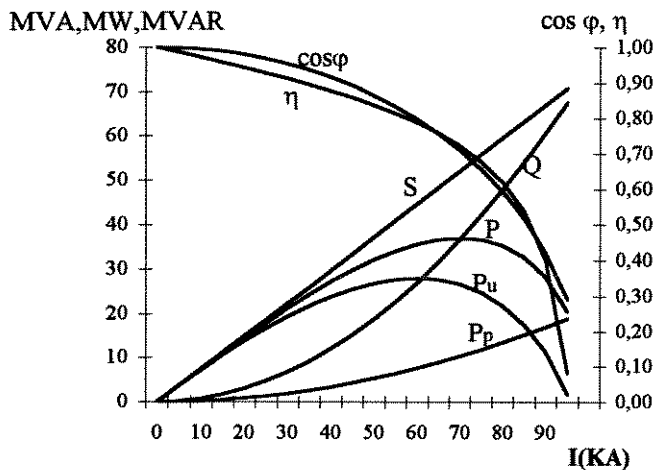


Figura 3.8 Curvas de carga para um forno de arco de 20 MVA com circuito balanceado

A potência ativa absorvida pelo circuito transformador-forno é:

$$P = 3EI\cos\varphi = 3\frac{E^2}{X_{eq}}\sin\varphi\cos\varphi = \frac{V_{sec}^2}{X_{eq}}\sin\varphi\cos\varphi = \frac{V_{sec}^2}{2X_{eq}}\sin 2\varphi \quad (3.17)$$

que é diretamente proporcional ao quadrado da tensão e inversamente proporcional à reatância equivalente.

Considerando-se a tensão e a reatância constantes, a potência ativa máxima é obtida para:

$$\sin 2\varphi = 1 \therefore \cos\varphi = 0,707 \quad (3.18)$$

e assume o seguinte valor:

$$P_{max} = \frac{V_{sec}^2}{2X_{eq}} \quad (3.19)$$

A potência útil ou do arco é igual à potência ativa absorvida pelo circuito transformador-forno menos as perdas ôhmicas na resistência passiva do circuito. A potência de arco pode ser calculada:

$$P_u = \frac{V_{sec}^2}{X_{eq}} \sin\varphi \cos\varphi - 3R_p I^2 = R_u I^2 \quad (3.20)$$

ou,

$$P_u = R_u \left(\frac{V_{sec}^2}{(R_u + R_p)^2 + X_{eq}^2} \right) \quad (3.21)$$

Derivando-se a equação (3.21) em relação à resistência útil, obtém-se o valor da mesma que corresponde à máxima potência útil, ou seja:

$$R_u = \sqrt{R_p^2 + X_{eq}^2} \quad (3.22)$$

e a potência útil máxima, substituindo a equação anterior em (3.20), vem:

$$P_{u_{max}} = \frac{V_{sec}^2}{2(R_p + \sqrt{R_p^2 + X_{eq}^2})} \quad (3.23)$$

Observa-se, na figura 3.8, que ao valor de potência útil máxima, corresponde um valor de potência absorvida da rede além do qual, qualquer elevação da corrente redundará num aumento das perdas de energia e decréscimo da potência útil.

Analisando-se a seguinte expressão:

$$P = P_u + P_p \quad (3.24)$$

pode-se verificar que, após P_u atingir seu valor máximo, a potência útil necessariamente decresce. Se houver um aumento da potência absorvida da rede - P - este foi conseguido às custas de um acréscimo das perdas - P_p . Portanto, é inútil operar o forno com uma potência absorvida da rede superior ao valor correspondente a potência útil máxima; este valor é conhecido como potência-limite e vale:

$$P_{\lim} = \frac{V_{\sec}^2}{2\sqrt{X_{eq}^2 + R_p^2}} \quad (3.25)$$

Como os requisitos de potência, para elaboração de aço, variam ao longo da operação do forno elétrico de arco, os transformadores destes equipamentos possuem comutadores de taps de tensão para realizar ajustes de potência durante todas as fases da operação do forno. Existe, portanto, uma série de curvas de carregamento para cada tap de tensão.

De acordo com a teoria de circuitos em corrente alternada, pode-se traçar, para o circuito da figura 3.6, um diagrama circular para a potência do forno, com a potência reativa na abscissa e a potência ativa e aparente na ordenada. Para tanto, as informações necessárias são as tensões secundárias e a reatância do circuito. Obtém-se desta forma, uma família de curvas, dadas pelas seguintes expressões:

Diagramas de círculo para potência ativa:

$$\left(x - \frac{V_{\sec}^2}{2X_{eq}}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{V_{\sec}^2}{2X_{eq}}\right)^2 \quad (3.26)$$

Diagramas de círculo para potência aparente:

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{V_{\sec}^2}{X_{eq}}\right)^2 \quad (3.27)$$

Na figura 3.9 são traçados os diagramas de círculo das potências aparente, ativa e reativa, com os fatores de potência e tensões secundárias como parâmetros. Observa-se que o diâmetro do círculo corresponde à potência reativa máxima, ou seja:

$$Q_{\max} = \frac{V_{\sec}^2}{X_{eq}} \quad (3.28)$$

e a potência ativa máxima é calculada pela equação (3.19).

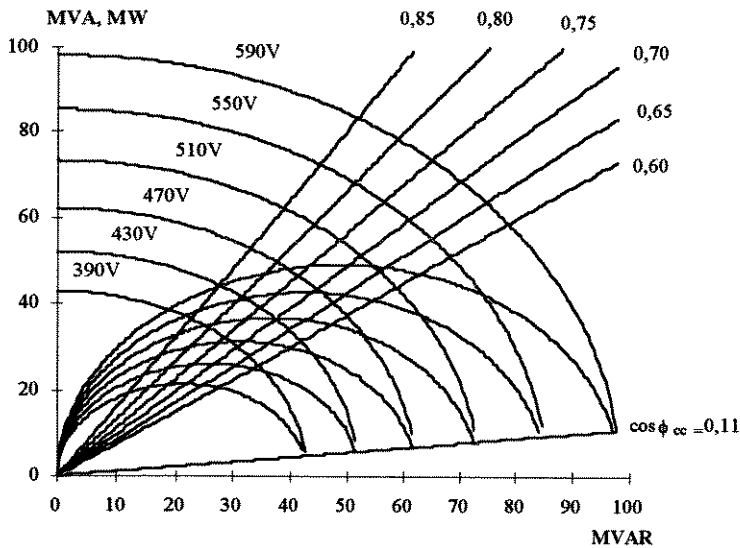


Figura 3.9 Diagrama circular das potências aparente, ativa e reativa, com fatores de potência e tensões secundárias como parâmetros

3.5 Reatância operacional

Durante a operação normal dos fornos de arco, a presença inconstante do arco voltaico, que é uma resistência não linear, introduz ondas harmônicas de variadas frequências no circuito, ocasionando um acréscimo da reatância aparente do mesmo.

O cálculo exato da reatância operacional não pode ser feito com precisão. Porém, através de leituras simultâneas de corrente, tensão, potência ativa e potência reativa dos instrumentos de medição do forno, durante a operação à tensão constante, em intervalos de tempo cronometrados, pode-se atingir uma grande aproximação da realidade de operação do forno.

A partir de medições efetuadas em diversos fornos elétricos de arco de diferentes tamanhos e potências, Bowman e Zamarbide (1986) concluíram que quase todos os fornos podem ser descritos eletricamente por meio de um gráfico reatância *versus* fator de potência.

Portanto, as curvas características traçadas na figura 3.8 deixam de representar as condições normais de funcionamento do forno para representar uma aproximação relativamente correta das mesmas (CARDOSO, 1987).

É bem conhecido que a reatância do forno - X_{op} - chamada de reatância operacional, é maior do que a reatância obtida pelo teste de curto-circuito - X_{cc} - e que a potência absorvida pelo circuito do forno decresce proporcionalmente a X_{op} .

Um forno elétrico de arco pode ser concebido como uma fonte de tensão que conduz uma corrente através do arco elétrico. O arco voltaico está em série com um circuito basicamente reativo, cujo valor da reatância é a reatância operacional (BOWMAN & ZAMARBIDE, 1986). Logo, a potência útil passa a ser expressa pela equação (3.21) ao invés da equação (3.20).

$$P_u = \frac{V_{sec}^2}{X_{op}} \sin \phi \cos \phi - 3R_p I^2 \quad (3.21)$$

A figura 3.10 descreve o comportamento da reatância operacional, normalizada em termos da reatância de curto-circuito. A curva é mais elevada no início do período de fusão e mais baixa no final da corrida, quando os arcos estão cobertos por escória espumosa (BOWMAN, 1988). A operação com escória espumosa protege as paredes do forno das radiações do arco elétrico. A escória também cobre o arco, melhorando as condições de ignição do mesmo. Isto reduz o conteúdo harmônico, que resulta numa reatância operacional mais baixa e, portanto, contribui para um aumento da potência útil.

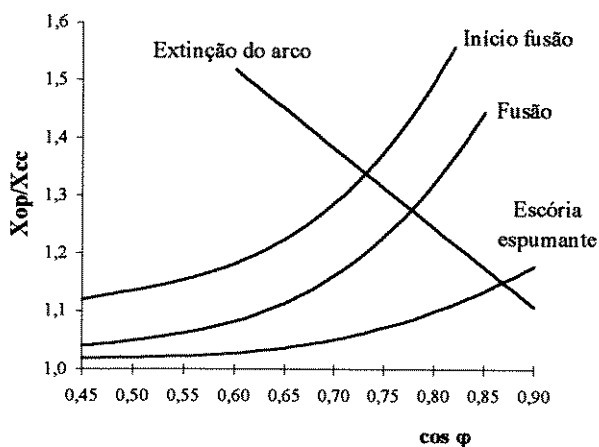


Figura 3.10 Reatância operacional normalizada em termos da reatância de curto-circuito em função do fator de potência

A reta, que cruza as três curvas da figura 3.10, mostra os limites acima dos quais ocorre a extinção do arco. No início da fusão, isto acontece para um fator de potência da ordem de 0,73, enquanto que para a operação com escória espumante o fator de potência pode atingir 0,88, sem que ocorra a extinção do arco. O rápido aumento da reatância operacional, mostrado na figura 3.10, indica que um elevado fator de potência no início da fusão não é desejável do ponto de vista elétrico. Algumas aciarias têm utilizado, recentemente, fatores de potência muito mais elevados do que aqueles praticados no passado, com o objetivo de obter arcos mais longos com menores correntes. Uma estratégia alternativa seria, ao invés de aumentar o fator de potência, inserir uma reatância adicional mantendo o fator de potência dentro da faixa de 0,7 a 0,8 (BOWMAN, 1988). Após cada zero de corrente, em um circuito de corrente alternada, ocorre a reignição do arco. Todavia, a experiência mostra que a definitiva interrupção do arco ocorre para fatores de potência maiores que 0,90. Após este valor, o arco é estendido a um determinado comprimento, no qual a energia suprida não é mais capaz de compensar a energia dissipada por resfriamento (GRÜNBERG & REICHE, 1986).

3.6 Programas de potência

Originalmente, os programas de potência se referiam ao escalonamento da tensão e a seleção de pontos de regulação - MW, kA, $\cos\phi$ - para a corrida. Com o uso de painéis refrigerados a água, já não é tão crítico o uso de tensões elevadas durante a corrida, mas continua existindo a possibilidade de selecionar o fator de potência. Atualmente, fontes secundárias de energia têm sido utilizadas durante a corrida, o conceito de programas de potência deve, então, ser estendido para abarcar outras fontes de energia como, por exemplo, oxigênio e metano.

A figura 3.11 mostra, esquematicamente, um diagrama de potência típico para uma corrida de dois carregamentos num forno de arco, utilizado para a fusão da carga. Na figura 3.11, pode-se identificar as seguintes fases características:

- t_1-t_0 : período de ignição e broqueamento do primeiro carregamento;
- t_2-t_1 : fusão do primeiro carregamento;
- t_3-t_2 : fim da fusão do primeiro carregamento;
- t_4-t_3 : recarga do segundo carregamento;

- t_3 - t_4 : período de ignição e broqueamento do segundo carregamento;
- t_6 - t_5 : fusão do segundo carregamento;
- t_7 - t_6 : fim da fusão do segundo carregamento; e
- t_8 - t_7 : sobre-aquecimento do metal líquido.

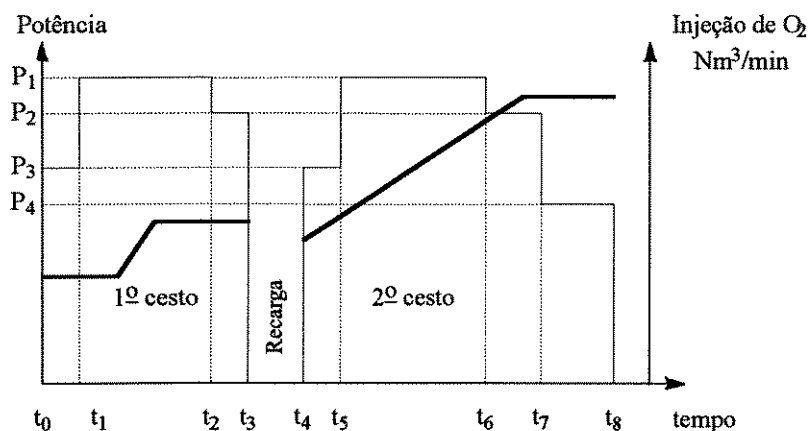


Figura 3.11 Programa de potência típico, com dois carregamentos para um forno elétrico de arco, utilizado para fusão

Durante a ignição do arco voltaico, deve-se operar com uma potência reduzida e tensões mais baixas. Estes ajustes evitam que os arcos longos ataquem a abóboda ou o seu miolo refratário, reduzindo sua vida útil.

Logo que os eletrodos penetrem aproximadamente 500 mm na carga, o tap deverá ser ajustado para a tensão mais elevada, liberando uma maior potência para a fusão do primeiro carregamento.

À medida que a carga vai sendo fundida, a sucata vai cedendo e desprotegendo os painéis refrigerados a água da irradiação dos arcos. A partir deste momento, a temperatura da água dos painéis aumenta sobremaneira, assim como as perdas térmicas associadas, caracterizando o momento de redução da potência.

Antes de se proceder à recarga do forno, podem ser adotadas práticas operacionais diferentes para se conduzir a fusão do primeiro carregamento, que são (CHEVRAND et alii, 1991):

- fundir a primeira carga até reduzir seu volume dentro do cadinho, o suficiente para carregar o segundo cesto. Alguns autores afirmam que este procedimento reduz as perdas térmicas durante a fusão;

- fundir a primeira carga monitorando a temperatura dos painéis refrigerados até quando sua temperatura se elevar rapidamente, a partir deste momento, desliga-se o forno e carrega-se o segundo cesto; e
- fundir totalmente a primeira carga e, então, efetuar o segundo carregamento. Segundo estudos realizados em usinas siderúrgicas japonesas, apesar de haver uma perda inicial de energia, esta prática apresenta o menor consumo global de energia no final da fusão.

A fusão do segundo carregamento é conduzida de forma semelhante ao primeiro. Quando a carga ainda sólida estiver no nível inferior dos painéis refrigerados, o tap do transformador do forno deve ser baixado, evitando, assim, o ataque à linha refratária e as perdas por radiação. O término do período de fusão se dá a uma temperatura do metal líquido de aproximadamente 1550 °C.

Uma vez terminado o período de fusão, eleva-se a temperatura do metal líquido com arco curto para evitar o ataque à linha refratária e reduzir as perdas. Mesmo com a adoção da prática de uma escória espumosa durante o sobre-aquecimento, a potência aplicada deve ser baixa (CHRISTOFF, 1995).

Os equipamentos utilizados para injetar oxigênio num forno elétrico de arco são, basicamente, os queimadores oxigênio/combustível e lanças. Estas últimas podem ser lanças supersônicas ou lanças consumíveis.

Diferente dos queimadores e lanças consumíveis, as lanças supersônicas não são utilizadas para o corte de sucata e fusão, mas para permitir a descarburização do banho e uma operação de refino mais eficaz. Portanto, a utilização das lanças supersônicas para injeção de oxigênio é recomendada para temperaturas superiores a 1550 °C.

As finalidades da injeção de oxigênio são: oxidar o carbono, agitar o banho e produzir energia. A reação básica é:



A energia liberada na reação (3.22) é de 2,75 kWh por Nm³ de oxigênio (DANIELI, 1993).

Recomenda-se que o volume máximo de oxigênio injetado durante uma corrida, ocorra nos períodos de menor rendimento energético.

3.7 Balanço simplificado de energia

O aporte de energia necessário à fusão da sucata é propiciado não só pela energia elétrica, mas, também, por outras fontes secundárias, como o oxigênio e queimadores que utilizam combustíveis fósseis.

Num balanço energético do forno, considera-se que a energia útil é aquela necessária para provocar fusão da sucata a 1550°C e sobre-aquecer o banho líquido. A energia útil requerida para fundir a sucata a 1550°C é de 376 kWh/t. A partir da temperatura de fusão, supõe-se que são necessários 0,22 kWh/t para elevar 1°C do banho líquido. Obviamente, existem perdas neste processo. As perdas elétricas ocorrem na resistência passiva fora do circuito do forno, conforme mencionado na seção 3.5.

As perdas térmicas mais relevantes, para o balanço de energia de um forno elétrico de arco, são atribuídas aos painéis refrigerados a água e ao sistema de exaustão dos gases ou de despoeiramento.

3.7.1 Perdas térmicas para a água de refrigeração

Os fatores que influenciam a magnitude das perdas térmicas dos painéis de refrigeração são:

- (i) A área dos painéis refrigerados nas paredes laterais e na abóbada do forno;
- (ii) A espessura dos “cascões” de escória que aderem na superfície quente dos painéis; e
- (iii) Recobrimento do arco voltaico pela sucata sólida ou por escória espumante.

As perdas térmicas para a água de refrigeração podem ser calculadas pela seguinte fórmula empírica (STENKVIST, 1994):

$$p_{ref} = \frac{K_{term} A t}{Q} \quad (3.23)$$

onde:

K_{term} : constante, em kW/m²;

A : área refrigerada dos painéis, sujeita à irradiação do arco;

t : tempo, em horas; e

Q : carregamento, em toneladas.

Existem saliências na face quente dos painéis, cujo objetivo é o de reter escória para servir como uma barreira isolante, evitando perdas excessivas de energia. De acordo com Bowman e Zamarbide (1986), as diferentes espessuras desta camada de escória explicariam, em parte, as discrepâncias nos consumos de energia entre fornos de mesma capacidade.

A tabela 3.2 mostra os valores de K_{term} de acordo com a espessura dos “cascões” e do recobrimento do arco elétrico. No caso de cobertura total do arco elétrico, seja por sucata sólida, seja por escória espumante, as perdas térmicas são desprezíveis, pois a eficiência térmica é bastante elevada.

Tabela 3.2 Valores de K_{term} para algumas condições operacionais

Espessura dos “cascões”	Painéis expostos	Cobertura parcial do arco	Cobertura total do arco
até 10 mm	234	180	26
30 mm	180	98	20
50 mm	66	36	7

Fonte: Elaboração própria a partir de (STEINVIST, 1994) e (JÄGER et alii, 1991)

3.7.2 Perdas pelo sistema de exaustão de gases

Estas perdas ocorrem devido à seguinte reação química que ocorre no duto de exaustão dos gases:



Estima-se que, cerca de 90 por cento de todo o monóxido de carbono formado no processo, se transforma em dióxido de carbono. As perdas térmicas no sistema de exaustão são compostas pelo poder calorífico do CO contido nos gases, pelo calor sensível do CO e CO₂ que são formados e pelo calor retirado do interior do forno pelo ar frio que infiltra e é aquecido antes de sair pelo duto de exaustão.

O teor de monóxido de carbono nos gases de exaustão é função do conteúdo de carbono na carga e da duração do ciclo de operação. Assim, uma prática corrente nas aciarias é a de adicionar finos de coque de alto-forno, substituindo parte da sucata, para reduzir a emissão de monóxido de carbono e, conseqüentemente, as perdas (LECKIE, 1982).

Alguns estudos apontam que estas perdas são da ordem de 15 a 20 por cento do aporte de energia requerido no processo de fabricação de aço (RAMOS & PUGLIESE, 1989; BETZIOS, 1987). Este fato despertou o interesse para a utilização do calor contido nesses gases para pré-aquecer a sucata, antes de colocá-la no forno. Todavia, o custo do equipamento para pré-aquecimento da sucata e os problemas de manutenção do mesmo foram apontadas como as principais razões para a não adoção generalizada desta prática.

3.7.3 Equação de balanço de energia

A equação (3.24) descreve o balanço de energia para o forno. Do lado esquerdo da igualdade, estão representadas as entradas de energia envolvidas no processo. Este aporte de energia se transforma em energia útil - ΔH - e em perdas térmicas para a água de refrigeração dos painéis e pelo sistema de exaustão dos gases.

$$E_e + E_o + E_q = \Delta H + \frac{K_{term} At}{Q} + p_{exa} \quad (3.24)$$

onde:

E_e : consumo específico de energia elétrica útil, em kWh/t;

E_o : consumo específico de oxigênio, em kWh/t;

E_q : consumo específico dos queimadores, em kWh/t;

ΔH : variação de entalpia de 20°C a temperatura no final da corrida - T_c - ou energia útil, em kWh/t; e

p_{exa} : perdas térmicas pelo sistema de exaustão de gases.

CAPÍTULO 4

MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM FORNO ELÉTRICO DE ARCO

4.1 Programação dinâmica

A programação dinâmica caracteriza-se por ser uma técnica de decisões sequenciais (HILLIER & LIEBERMAN, 1990). Este procedimento é aplicado para determinar a combinação ótima de decisões. Ao contrário da programação linear, não existe uma formulação matemática pré-definida para problemas resolvidos por esta técnica.

A programação dinâmica é baseada no princípio de otimalidade de Bellman: “Uma política ótima possui a propriedade de que, qualquer que seja o estado inicial, as decisões restantes devem constituir uma política ótima, a partir do estado que resulta da primeira decisão”.

Uma política ótima compõe-se de subpolíticas ótimas. Na realidade, existe um sistema com diversos níveis de decisões, onde a cada decisão tomada implica, obrigatoriamente, em uma situação qualquer no próximo nível de decisão. O objetivo final é otimizar a sequência de decisões. Naturalmente, observa-se que cada nível é composto por diversas decisões possíveis, que, relacionando-se com as demais decisões dos outros níveis, compõem uma política admissível.

Para escrever a equação de otimalidade, a partir de um estágio qualquer, deve-se decompor o critério global em critérios elementares relativos aos subproblemas de otimização, basicamente isto é possível quando a função objetivo satisfaz o critério de separabilidade.

O sistema dinâmico pode ser descrito por dois tipos de variáveis: de estado e de controle. As variáveis de estado - que descrevem as condições passadas, presentes e futuras, ou, simplesmente, o estado do sistema; e as variáveis de controle ou decisão, que podem ser especificadas diretamente. As variáveis de controle influenciam o sistema através das variáveis de estado.

As equações de estado descrevem a evolução do sistema ao longo do tempo para uma dada seqüência de controles. As restrições colocam limites nos estados admissíveis e nos controles.

O problema de programação dinâmica, pode ser descrito da seguinte forma: encontrar uma seqüência de controles e uma trajetória - estados para cada estágio - satisfazendo as equações de transição de estados, considerando as condições iniciais e as restrições que minimizem ou maximizem a função objetivo.

Então, a seqüência de decisões e a trajetória - estados a cada estágio - são factíveis quando satisfazem as equações de transição de estados e as restrições simultaneamente, e são ótimas quando minimizam a função objetivo e são factíveis também.

Na figura 4.1, as ligações entre os estados correspondem a possíveis estratégias de decisão. Assim, o efeito da política de decisão em cada estágio é “transformar o estado corrente em um estado associado com o próximo estágio”. O valor associado a cada decisão geralmente pode ser interpretado como uma contribuição à função objetivo ao se adotar uma determinada estratégia de decisão.

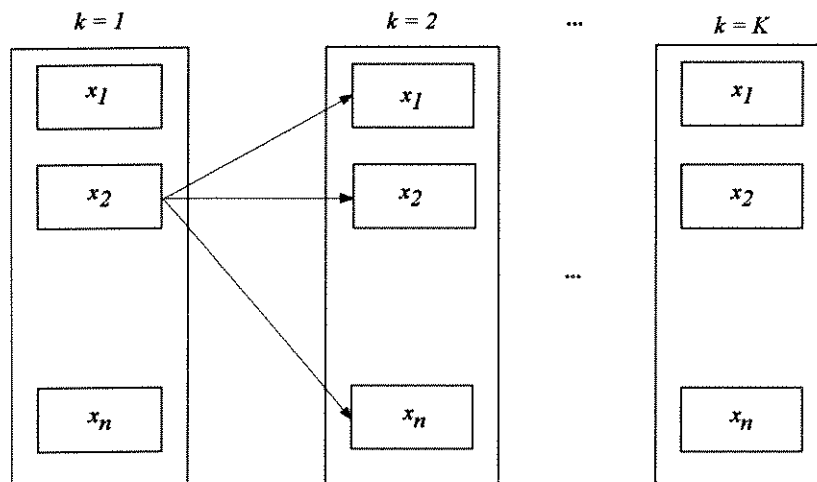


Figura 4.1 Representação esquemática de estratégias de decisões

Na figura 4.2, o sistema está em algum estado x_k no estágio k . Adotando-se uma política de decisão u_k , o estado do sistema será x_{k+1} no estágio $k+1$. Seja $f_{k+1}^*(x_{k+1})$ o valor ótimo da função objetivo no estágio $k+1$. A política de decisão u_k , também contribui para a função objetivo. Logo, para todo k , a função objetivo vale:

$$f_k(x_k, u_k) = c_k(x_k, x_{k+1}) + f_{k+1}^*(x_{k+1}) \quad (4.1)$$

Dado o estado x_k e o estágio k , seja u_k^* o valor que minimiza a função objetivo $f_k(x_k, u_k)$ e seja $f_k^*(x_k)$ o seu valor mínimo, então:

$$f_k^*(x_k) = \min_{u_k} f_k(x_k, u_k) = f_k(x_k, u_k^*) \quad (4.2)$$

Após encontrar a trajetória ótima - u_k^* - e o custo mínimo $f_k^*(x_k)$ para cada valor factível de x_k , o algoritmo move-se *backward*. O procedimento se repete até o estágio inicial no qual se obtém a solução do problema completo.

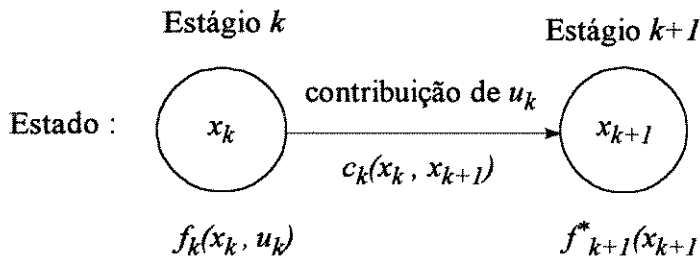


Figura 4.2 Estrutura básica da programação dinâmica determinística

A abordagem da programação dinâmica para problemas determinísticos, é aplicada para problemas cujo estado, no próximo estágio, é completamente determinado pelo estado e estratégia de decisão no estágio corrente. No caso probabilístico, existe uma distribuição de probabilidade associada aos estados.

A programação dinâmica fornece uma grande economia computacional sobre a enumeração exaustiva, para encontrar a melhor combinação de decisões, especialmente para grandes problemas. Por exemplo, se um problema tem 10 estágios, com 10 estados e 10 possíveis decisões em cada estágio, a enumeração exaustiva deve considerar 10^{10} combinações, ao passo que a programação dinâmica precisa fazer não mais que 10^3 cálculos - 10, para cada estado em cada estágio.

Uma característica interessante dos problemas de programação dinâmica é que não há necessidade de se assumir hipóteses rígidas em relação às propriedades analíticas das equações do sistema ou da função objetivo. Estas funções não precisam ser lineares, quadráticas,

diferenciáveis, contínuas, nem mesmo expressas em termos de funções bem conhecidas. Tudo o que é exigido, é a existência de uma regra para determinar os valores destas funções para valores quantificáveis dos estados e controles em cada estágio.

Outra propriedade interessante do procedimento de programação dinâmica, é a facilidade com a qual ele lida com as restrições. As restrições diminuem o tamanho de X_k , o conjunto de estados admissíveis e U_k o conjunto de decisões no estágio k . Portanto, as restrições têm o útil propósito de diminuir o número de estados e/ou controles que devem ser considerados.

4.2 Formulação do modelo

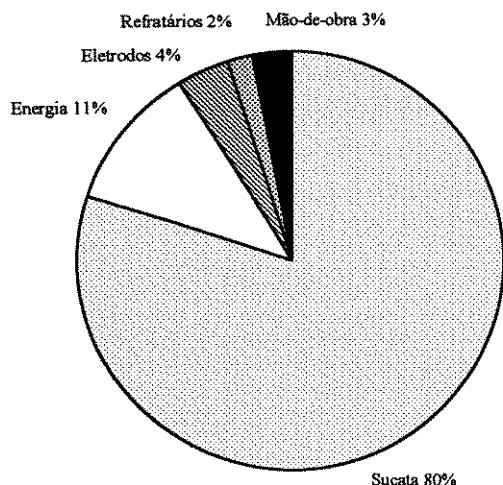
4.2.1 Introdução

As características de operação de um forno elétrico de arco se enquadram como um problema de programação dinâmica. A operação deste equipamento é dada por uma sequência de aportes de energia para levar a sucata - em estado sólido - a um estado líquido, no final da fusão numa temperatura bem determinada.

A fusão da carga do forno está dividida em fases bem características: perfuração da carga sólida, fusão, final da fusão e sobre-aquecimento da carga. Os estágios equivalem às fases de operação e, numa corrida, correspondem aos sete patamares observados na figura 3.11. O consumo específico, em kWh/t, caracteriza, perfeitamente, o estado do sistema, independentemente do tamanho e da potência do forno.

4.2.2 Função objetivo

Excetuando-se o custo da sucata, o item isolado que mais contribui para o custo final de produção de aço, num forno elétrico de arco, é a energia.



Fonte : (CHRISTOFF, 1995)

Figura 4.3 Custos operacionais de um forno elétrico de arco

As inovações tecnológicas, incorporadas aos fornos elétricos de arco, foram motivadas pelo aumento da produtividade. Assim, as aciarias elétricas têm como meta ciclos de fusão cada vez mais curtos.

Todavia, esta redução do tempo da corrida, resultou em perdas crescentes de energia. A operação com arcos de tensão mais elevadas - que se tornou possível graças à substituição dos refratários por painéis refrigerados a água - se traduziu em grandes perdas de energia.

Alguns técnicos do setor siderúrgico afirmam que qualquer aumento nas perdas de energia pode ser compensado por um eventual acréscimo de produtividade. Todavia, é preciso reconhecer que essa afirmação apresenta limites, que precisam ser bem conhecidos e quantificados.

Desta forma, uma função de custo que incorpore estes dois objetivos conflitantes - tempo e custo de energia - é um critério interessante para se avaliar as estratégias de operação para o forno elétrico de arco. Assim, a função multi-objetivo⁵ pode ser escrita como:

⁵ O Anexo Programação Multi-objetivo apresenta um resumo sobre o assunto.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^7 \{ \lambda . ce_k + (1 - \lambda) . t_k \} \quad (4.3)$$

onde:

$$\lambda \in (0, 1)$$

ce_k : custo de energia para cada estágio k ;

t_k : duração de cada estágio k , em minutos.

O custo de energia em cada estágio - ce_k - é a soma dos custos com energia elétrica e oxigênio. A parcela referente a energia elétrica é aquela faturada pela potência ativa absorvida pelo forno. Admite-se que, devido ao porte destes equipamentos e pelo atendimento à portaria específica do DNAEE nº 1569 de dezembro de 1993, exista alguma forma de compensação de reativos. Desta maneira, não incidem multas, nem sobrecustos pela não adequação do fator de potência às normas do setor elétrico.

Não é contabilizada, no custo de energia, a parcela referente à demanda, visto que é necessário o conhecimento da curva de carga da indústria para se calcular a influência do forno na mesma; além disso, esta componente é constante e determinada por contrato com a empresa concessionária, não havendo, portanto, influência no caso de otimização da operação do forno com consequente redução da demanda total na curva de carga da indústria. Assim:

$$ce_k = P \cdot \frac{t_k}{60} \cdot \text{tarifa} + \text{oxi}_k \cdot t_k \cdot c_{\text{oxi}} \quad (4.4)$$

onde:

oxi_k : taxa de injeção de oxigênio, em Nm^3/min , no estágio k ;

tarifa : tarifa de energia elétrica, em $\text{R\$/kWh}$, referente ao nível de tensão do complexo industrial; e

c_{oxi} : custo do oxigênio, em $\text{R\$/Nm}^3$.

4.2.3 Restrições

As restrições do modelo se referem, basicamente, a condições operacionais e a limites matemáticos, relacionados com o número elevado de soluções consideradas, que tornam possível a resolução do modelo, utilizando-se programação dinâmica.

Estados admissíveis para o estágio anterior:

$$\Delta H_{min} \leq \Delta H_k \leq \Delta H_{max} \quad (4.5)$$

Intervalos de tempo, mínimo e máximo, para cada estágio, em minutos:

$$t_{min} \leq t_{k+1} \leq t_{max} \quad (4.6)$$

Para cada estágio ou fase de operação, são fixadas as tensões mínimas e máximas do transformador que alimenta o forno. A comutação do tap de tensão do transformador é feita sob carga, ao longo da operação. Matematicamente:

$$V_{min} \leq V_{tapk+1} \leq V_{max} \quad (4.7)$$

Existe, também, um limite de fator de potência para o qual evita-se a extinção do arco voltaico:

$$\cos\varphi_{k+1} \leq \cos\varphi_{max} \quad (4.8)$$

No modelo admite-se, também, volumes máximos de oxigênio injetados em cada estágio, acima dos quais o rendimento metálico cai drasticamente. Assim:

$$oxi_{k+1} t_{k+1} \leq Volmax_{k+1} \quad (4.9)$$

Finalmente, restringe-se a corrente máxima suportável pelos condutores do circuito secundário do forno. Logo:

$$i_{max} \leq I \quad (4.10)$$

Em função dos estados admissíveis no estágio anterior e das restrições matemáticas e operacionais acima, calcula-se os estados admissíveis no estágio corrente, a partir da seguinte equação de transição de estados:

$$\Delta H_{k+1} = \Delta H_k + \frac{P_{a_{k+1}} (t_{k+1} / 60)}{Q_{k+1}} + \frac{K_{oxi_{k+1}} oxi_{k+1} t_{k+1}}{Q_{k+1}} - \frac{K_{term_{k+1}} A_{k+1} (t_{k+1} / 60)}{Q_{k+1}} - p_{exa_{k+1}} \quad (4.11)$$

onde:

$P_{a_{k+1}}$: potência fornecida pelo arco ou potência útil, em kW;

$K_{oxi_{k+1}}$: constante, em kWh/Nm³;

$K_{term_{k+1}}$: constante de perdas térmicas, em kW/m²;

A_{k+1} : área refrigerada dos painéis exposta à irradiação do arco, em m²; e

p_{exa} : perdas pelo sistema de exaustão de gases ou de despoeiramento, em kWh/t.

A potência de arco - P_a - é calculada a partir da equação (3.21) e, portanto, já considera as perdas elétricas que ocorrem no circuito fora do forno de arco. A reatância operacional, utilizada para o cálculo da potência de arco, em cada estágio, é função do fator de potência e varia de acordo com a figura 3.10.

A equação (4.11) representa um balanço de energia simplificado para o forno elétrico de arco, baseado na equação (3.24). Neste balanço de energia, o aporte total de energia é fornecido por duas fontes: energia elétrica e oxigênio.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Aplica-se, neste capítulo, o modelo de otimização descrito no capítulo 4. O equipamento objeto de estudo é real e os dados construtivos e operacionais foram levantados através de referências bibliográficas e pesquisas de campo junto à aciaria da VIBASA - Villares Indústrias de Base S/A.

A VIBASA possui 3 fornos elétricos de arco, sendo 2 de 100 toneladas e o terceiro de 50 toneladas de capacidade. As simulações, a seguir, referem-se a um dos fornos de maior capacidade.

O modelo de otimização, utilizando o algoritmo de programação dinâmica, foi implementado em Turbo Pascal 7.0.

5.2 Dados do forno

5.2.1 Características gerais

As principais características construtivas do forno e de seu sistema de alimentação estão listadas a seguir:

- Diâmetro da carcaça: 6,0 m
- Potência: 45 MVA
- Tensão primária: 23 kV
- Tensão secundária máxima: 530 V
- Corrente secundária máxima: 59 kA
- Área refrigerada dos painéis laterais: 34,7 m²
- Área refrigerada dos painéis da abóbada: 28,4 m²

5.2.2 Tensões do transformador do forno

O transformador do forno estudado tem 11 taps de tensão, comutáveis sob carga. A tabela 5.1 apresenta os níveis de tensão para cada tap. Como a tensão primária, medida nos testes, é de 22,5 kV, as tensões disponíveis no secundário do transformador do forno valem:

$$V_{\text{sec}} = \frac{22,5}{23} V_{\text{tap}}$$

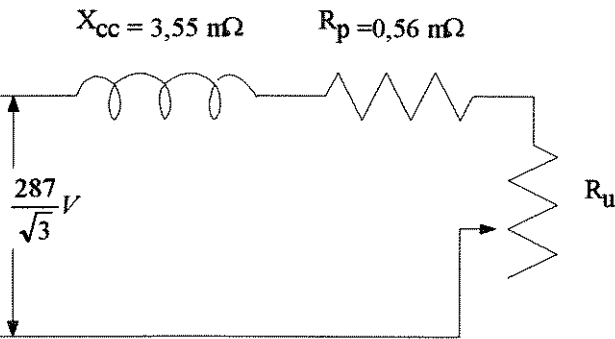
(5.1)

Tabela 5.1 Tensões do transformador do forno

Tap	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tensão(V)	530	497	467	440	405	374	347	309	277	306	287

5.2.3 Teste de curto-circuito

Para a elaboração do programa de potência, é necessário levantar o circuito equivalente através do teste de curto-circuito. Os procedimentos práticos para este teste estão descritos na seção 3.3. CHRISTOFF (1987) realizou as medições em curto-circuito para o tap 11 do transformador do forno e obteve o circuito equivalente da figura 5.1.



Fonte: (CHRISTOFF, 1987)

Figura 5.1 Circuito equivalente levantado a partir do teste de curto-circuito

5.3 Aplicação do modelo de otimização

A figura 5.2 exibe o fluxograma do programa que resolve o problema de otimização exposto no capítulo 4. As principais variáveis de controle e dados requeridos pelo programa para cada estágio estão listados na tabela 5.2 e 5.3.

Utiliza-se, nas simulações, os quatro taps de tensões mais elevadas durante a fusão. Estes níveis de tensão fornecem elevadas potências e, conseqüentemente, garantem uma elevada produtividade. Evita-se, todavia, na fase de sobre-aquecimento do banho, a operação com a tensão mais elevada (CHRISTOFF, 1995).

Tabela 5.2 Variáveis de controle e dados do modelo para cada estágio

Estágio	1	2	3	4	5	6	7
$V_{\min}$ (V)	440	440	440	440	440	440	440
$V_{\max}$ (V)	530	530	530	530	530	530	497
Fase	'I'	'F'	'S'	'I'	'F'	'S'	'S'
$\cos\varphi_{\min}$	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
$\cos\varphi_{\max}$	0,73	0,85	0,85	0,73	0,85	0,85	0,85
K_{oxi} (kWh/Nm ³)	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	4,00
$t_{\min}$ (min)	1	20	5	1	20	5	5
$t_{\max}$ (min)	3	45	25	3	30	25	15
VolO ₂ max (Nm ³)	70	500	260	70	700	500	700
O ₂ (Nm ³ /min)	10-35	10-35	10-35	10-35	10-35	10-35	10-35
Área (m ²)	28,4	63,1	63,1	28,4	63,1	63,1	63,1

Na tabela 5.2, as fases 'I', 'F' e 'S' correspondem às fases de início da fusão ou perfuração da carga, fusão e operação com banho líquido e escória espumante, respectivamente. Esta informação é utilizada para o cálculo da reatância operacional que, conforme visto no capítulo 3, é função do fator de potência e da fase de operação.

O valor máximo para o fator de potência, em cada estágio, é aquele cuja condução do arco é mantida sem que ocorra a extinção do mesmo.

Durante a fase de ignição do arco e perfuração da sucata, a área refrigerada correspondente à abóbada recebe o calor irradiado pelo arco, ao passo que nas demais fases de operação toda a área refrigerada está sujeita à irradiação em menor ou maior grau, dependendo da camada de escória aderente aos painéis.

Assim, a tabela 5.3 apresenta as constantes de perdas térmicas, que dependem da espessura da camada de escória aderente aos painéis na parte interna do cadinho, que foram consideradas nas simulações. As perdas térmicas durante a fusão propriamente dita, ou seja, nos estágios 2 e 5, foram desprezadas.

Tabela 5.3 Valores de K_{term} em cada estágio, em kW/m²

Espessura/Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Isolação
até 10 mm	234	0	180	234	0	180	180	Precária
30 mm	180	0	98	180	0	98	98	Intermediária
50 mm	66	0	36	66	0	36	36	Boa

Os custos utilizados para o cálculo dos custos com energia para o oxigênio é de R\$ 0,15/Nm³ e para a energia elétrica estão listados na tabela 5.4. Como o parque gerador brasileiro é predominantemente hidrelétrico⁶, as tarifas de energia elétrica refletem a disponibilidade da água nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Portanto, a tarifa é mais baixa no período de hidraulicidade favorável - período úmido, que engloba os meses de dezembro a abril - e é mais elevada nos períodos de baixa hidraulicidade - período seco, que corresponde aos meses de maio a novembro. Além desta segmentação sazonal, há uma divisão horária que leva em consideração a solicitação de capacidade ou demanda de ponta das usinas geradoras e dos sistemas de transmissão e distribuição. Desta forma, a tarifa é mais cara nos horários de ponta do sistema, ou seja, durante três horas consecutivas entre as 17:00 e as 22:00 nos dias úteis.

Tabela 5.4 Tarifa de consumo, em R\$/MWh, para o subgrupo A2 (88-138kV)

Período seco		Período úmido	
Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
44,65	31,99	41,65	29,35

⁶ Em 1996, 92 por cento da energia elétrica gerada foi de origem hidráulica contra 8 por cento de geração térmica convencional e nuclear (MME, 1997).

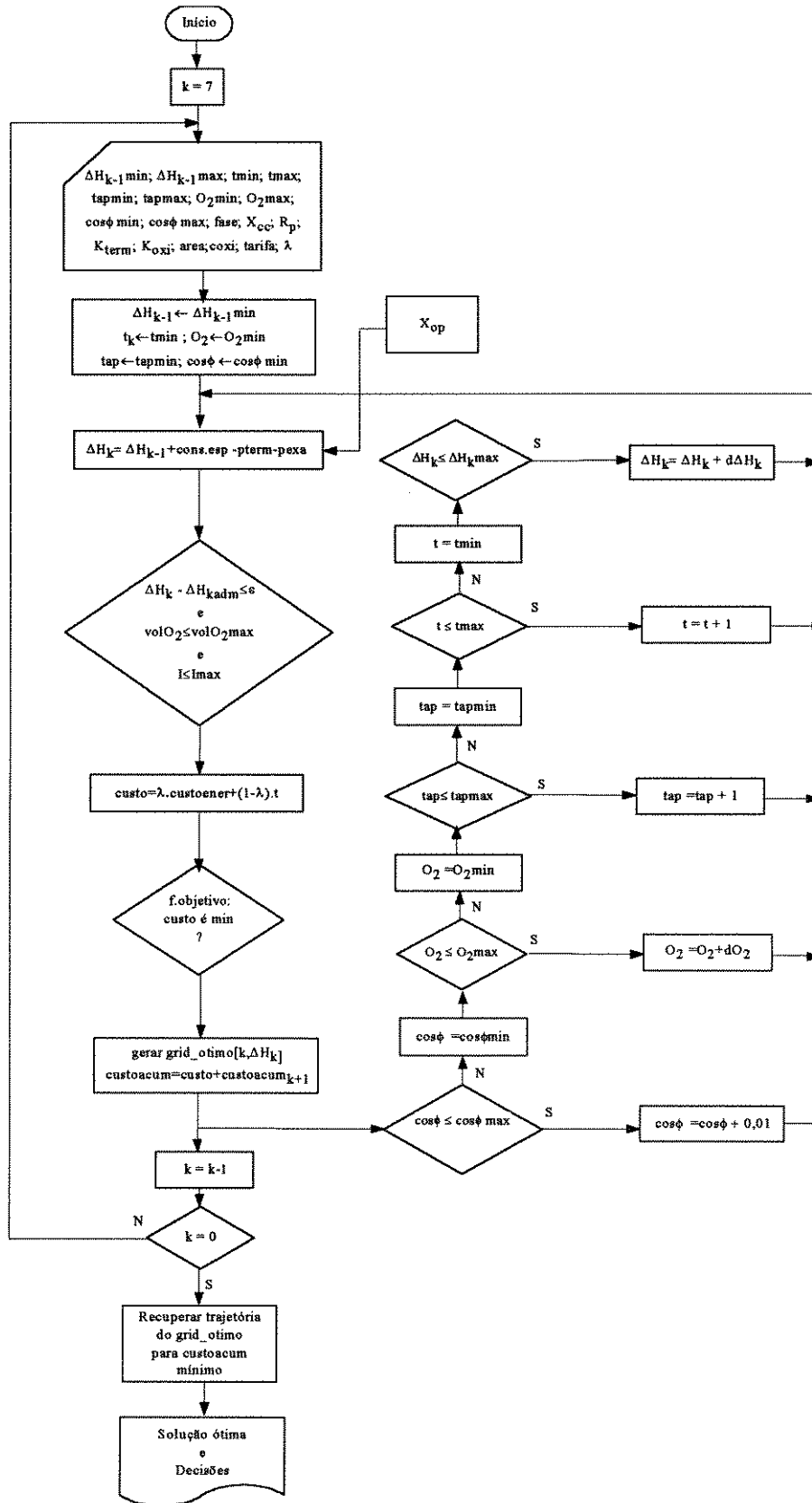


Figura 5.2 Fluxograma do programa de otimização da operação do forno elétrico de arco utilizando o algoritmo de programação dinâmica *backward*

Na figura 5.3 encontram-se listados, esquematicamente, os estados admissíveis em cada estágio do ciclo de operação. O consumo específico de energia nos estágios de final de fusão - $k=3$ e 5 - não deve ultrapassar os 350 kWh/t. Acima deste valor, as perdas térmicas são elevadas devido à exposição dos painéis refrigerados à radiação do arco. São acrescidos 30 kWh/t ao final da fusão de cada cesto, com o objetivo de compensar as perdas pelo sistema de exaustão de gases. Finalmente, o estado final, na fase de sobre-aquecimento do banho, é dependente da temperatura do final da corrida, que está associada ao tipo de aço que se pretende produzir. A temperatura utilizada nas simulações da seção seguinte é de 1640 °C.

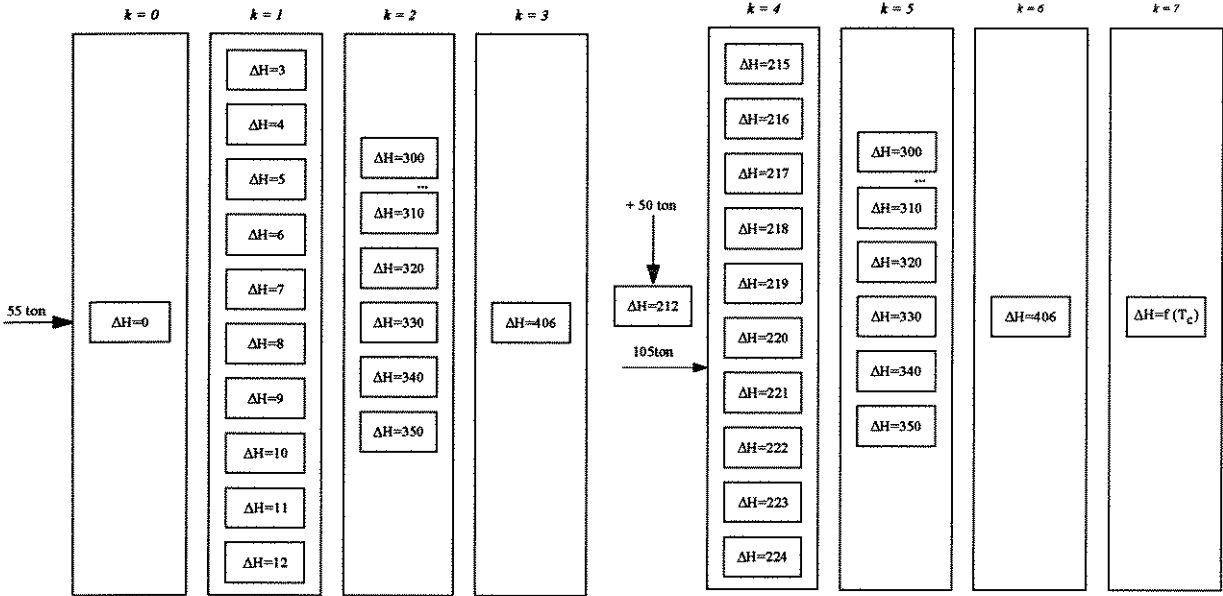


Figura 5.3 Estados admissíveis em cada estágio do ciclo de fusão e sobre-aquecimento

Os diagramas de potência para diversas tensões do transformador do forno, são plotados considerando o circuito da figura 5.1. A região do diagrama que é limitada pelos ajustes de fator de potência, tensões, potência e corrente máxima representa o conjunto de ajustes, dentro do qual se deve buscar aqueles que conduzam a uma operação otimizada.

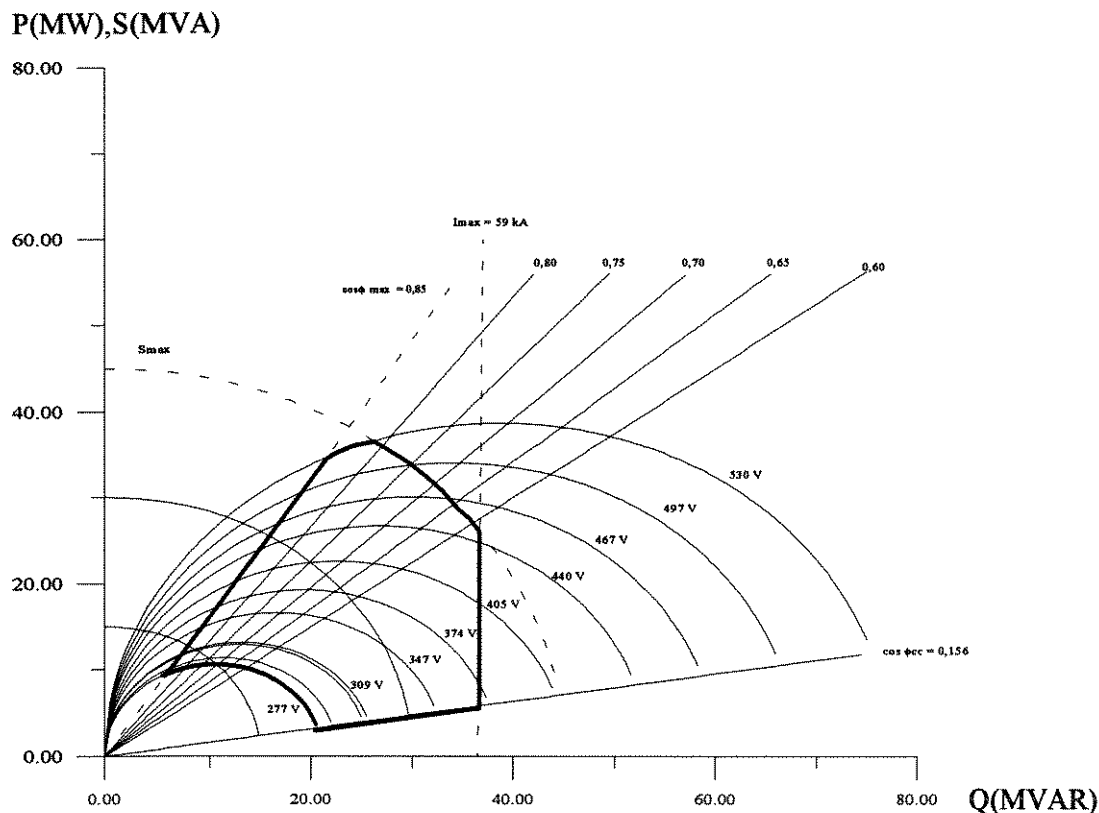


Figura 5.4 Diagramas de potência para o forno do circuito da figura 5.1

5.4 Resultados e discussões

As figuras desta seção apresentam, no espaço dos objetivos, as soluções ótimas para diversos pesos. Assim, os valores de λ - pesos - da função objetivo (4.3) ponderam o custo de energia e o tempo de operação. Como em programação dinâmica, o conjunto das decisões é discreto, não se pode garantir que a reta que une soluções adjacentes contenha soluções igualmente eficientes. Portanto, neste caso, não se pode falar em curva *trade-off*, como se verifica em programação linear. Assim, somente as soluções destacadas nas figuras são eficientes.

A inclinação de cada trecho, entre as soluções eficientes, representa uma taxa de substituição entre os objetivos, quantificando o conflito existente entre eles. Ela representa o incremento de custo de energia, associado à redução do tempo de corrida ou, similarmente, ao aumento de produtividade.

A tabela 5.5 apresenta os quatro casos simulados. Nos três primeiros, aplica-se a tarifa mais barata de eletricidade, ou seja, a tarifa no período úmido e horário fora de ponta.

Passando-se do caso 1 ao 3, deteriora-se a qualidade da isolamento térmica progressivamente para se avaliar os efeitos das perdas térmicas crescentes. Finalmente, no último caso, simula-se uma situação extremamente desfavorável: tarifa de energia elétrica elevada e grandes perdas térmicas.

Tabela 5.5 Casos utilizados nas simulações

Casos	Tarifa	Isolação térmica
1	Fora de ponta, período úmido	Boa
2	Fora de ponta, período úmido	Intermediária
3	Fora de ponta, período úmido	Precária
4	Ponta, período seco	Precária

A figura 5.5 apresenta as soluções eficientes para a tarifa fora de ponta no período úmido, considerando que a espessura dos “cascões” de escória é de 50 mm, o que propicia uma boa isolação térmica, resultando em baixas perdas pelo sistema de refrigeração.

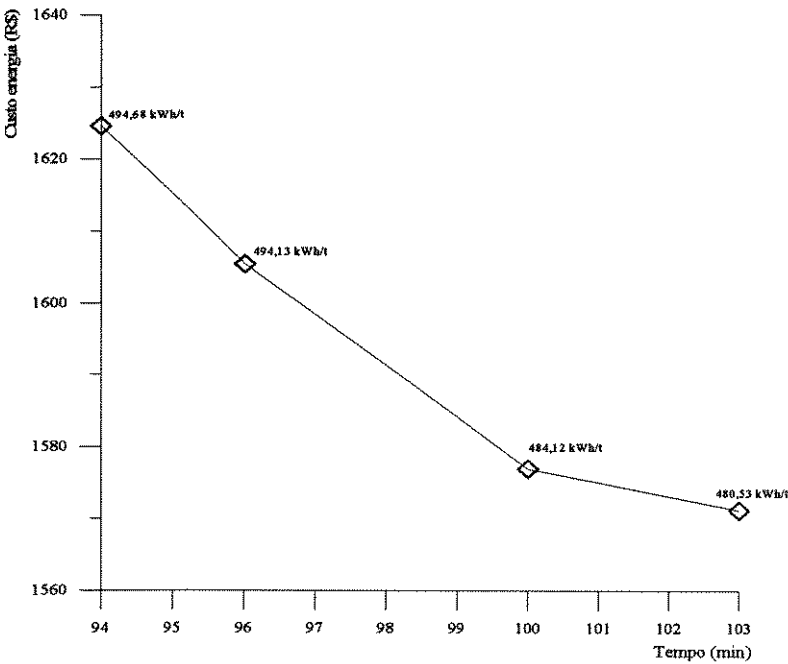


Figura 5.5 Soluções eficientes para o caso 1

Na tabela 5.6, a taxa de substituição para reduzir o tempo de corrida de 103 para 100 minutos é pequena, o que, num primeiro momento, pode estimular o tomador de decisão a escolher aquele ajuste e evitar o de tempo mínimo. Contudo, o “custo do tempo” pode ser crítico em épocas de muitas solicitações dos clientes da aciaria e, em determinadas fases, a

aciaria pode operar com capacidade ociosa. De qualquer forma, o tomador de decisão conhece o custo incorrido ao optar por um determinado ganho de produtividade e tem condições de avaliar se a relação custo/benefício lhe é favorável.

Tabela 5.6 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 1

Duração da corrida (min)	Custo de energia (R\$)	Taxa de substituição ($\Delta R\$/\Delta t$)
94	1624,57	-9,55
96	1605,47	-7,13
100	1576,97	-1,92
103	1571,20	

Nas tabelas 5.7 a 5.10, são listados os controles ou decisões para cada estágio, associados às soluções eficientes da figura 5.5. A partir destes ajustes são calculadas as potências ativa, reativa e aparente; as correntes secundárias e os consumos específicos de oxigênio e energia elétrica.

Tabela 5.7 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ igual a 0,001

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	39	9	1	27	12	5	94
ΔH	8	320	406	216	350	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,69	0,69	0,75	0,73	0,71	0,83	0,85	
V_{tap} (V)	530	497	530	467	530	530	467	
O_2 (Nm ³ /min)	15	10	20	20	20	20	25	
P (MW)	29,71	28,91	35,06	21,93	32,27	31,33	23,21	
I (kA)	47,95	49,75	52,05	37,97	50,61	42,04	34,52	
Ee (kWh)	495,17	18791,5	5259	365,5	14521,5	6266	1934,17	47.632,84
Eo (kWh)	41,25	1072,5	495	55	1485	660	500	4.309,20
							<u>Etot(kWh/t)</u>	<u>494,68</u>

Tabela 5.8 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ igual a 0, 1

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	39	9	2	28	12	5	96
ΔH	8	320	406	221	350	406	425,8	
$\cos\phi$	0,69	0,69	0,75	0,62	0,74	0,83	0,85	
V_{tap} (V)	530	497	530	530	530	530	467	
O_2 (Nm ³ /min)	15	10	20	15	10	20	25	
P (MW)	29,71	28,91	35,06	30,79	31,05	31,33	23,21	
I (kA)	47,95	49,75	52,05	55,3	46,72	42,04	34,52	
Ee (kWh)	495,17	18791,5	5259	1026,3	14490	6266	1934,17	48.262,20
Eo (kWh)	41,25	1072,5	495	82,5	770	660	500	3.621,45
							Etot (kWh/t)	494,13

Tabela 5.9 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ variando de 0,2 a 0,3

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	43	9	2	28	12	5	100
ΔH	6	320	406	221	350	406	425,8	
$\cos\phi$	0,7	0,79	0,75	0,62	0,74	0,83	0,85	
V_{tap} (V)	467	497	530	530	530	530	467	
O_2 (Nm ³ /min)	10	10	20	15	10	20	25	
P (MW)	22,83	24,78	35,06	30,79	31,05	31,33	23,21	
I (kA)	41,22	37,24	52,05	55,3	46,72	42,04	34,52	
Ee (kWh)	380,5	17759	5259	1026,33	14490	6266	1934,17	47.114,55
Eo (kWh)	27,5	1182,5	495	82,5	770	660	500	3.717,00
							Etot (kWh/t)	484,12

Tabela 5.10 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 1 para λ variando de 0,4 a 0,999

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	43	11	2	29	12	5	103
ΔH	6	320	406	219	350	406	425,8	
$\cos\phi$	0,7	0,79	0,78	0,68	0,78	0,83	0,85	
V_{tap} (V)	467	497	497	467	530	530	467	
O_2 (Nm ³ /min)	10	10	10	10	15	20	25	
P (MW)	22,83	24,78	29,9	23,28	28,83	31,33	23,21	
I (kA)	41,22	37,24	45,53	43,26	41,16	42,04	34,52	
Ee (kWh)	380,5	17759	5481,67	776	13934,5	6266	1934,17	46531,80
Eo (kWh)	27,5	1182,5	302,5	55	1196,25	660	500	3.923,85
Etot (kWh/t)								480,53

Analisando-se as tabelas 5.7 a 5.10, verifica-se que para $\lambda = 0,001$, a função objetivo pondera mais o objetivo da minimização do tempo de fusão, em detrimento do custo de energia. Tendo em vista tal objetivo, os ajustes resultantes do modelo são no sentido de se operar com elevados níveis de potência ativa e com baixos fatores de potência. Arcos curtos significam, também, elevadas correntes e, por conseguinte, elevadas perdas ôhmicas o que se traduz em consumos específicos elevados.

No outro extremo, ou seja, para $\lambda = 0,999$, a meta de otimização é a redução dos custos com energia. Assim, observa-se na tabela 5.10 que as tensões de alguns estágios são mais baixas, os níveis de potência ativa também e os fatores de potência são mais elevados que os da tabela 5.7. As correntes secundárias resultantes destes ajustes são menores e, portanto, as perdas ôhmicas são menores. Como a camada de escória aderente aos painéis funciona como uma barreira semi-isolante, as perdas térmicas do sistema de refrigeração não contribuem significativamente para o aumento do consumo específico.

A figura 5.6 mostra as soluções eficientes para a mesma tarifação de energia elétrica da simulação anterior, mas os K_{term} utilizados são aqueles para “cascões” de escória de aproximadamente 30 mm de espessura.

Verifica-se, na figura 5.6, um maior consumo específico de energia, provocado pelo aumento das perdas térmicas no sistema de refrigeração. Percebe-se, também, uma perda de produtividade visto que já não é mais possível encontrar ajustes factíveis para se atingir os 94 minutos da simulação anterior.

As perdas térmicas não são desprezíveis e crescem significativamente com o aumento do tempo de fusão, mas como as perdas ôhmicas são decrescentes, no cômputo final as perdas totais decrescem resultando num consumo específico de energia decrescente ao se deslocar da solução de $\lambda = 0,001$ para $\lambda = 0,999$.

A tabela 5.11 exibe as soluções eficientes e as respectivas taxas de substituição entre os objetivos.

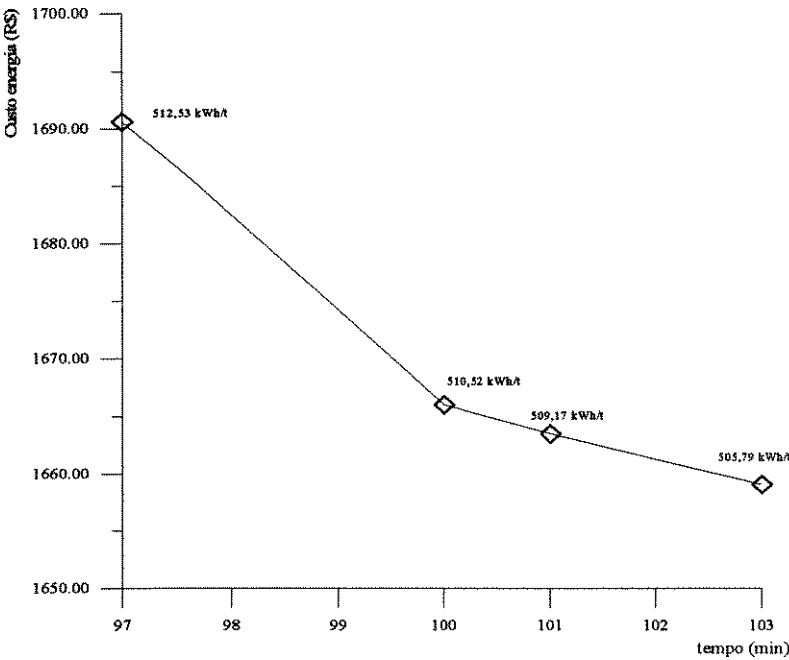


Figura 5.6 Soluções eficientes para o caso 2

Tabela 5.11 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 2

Duração da corrida (min)	Custo de energia (R\$)	Taxa de substituição ($\Delta R\$/\Delta t$)
97	1690,61	-8,21
100	1665,98	-2,53
101	1663,45	-2,21
103	1659,04	

A figura 5.7 apresenta as soluções eficientes, considerando a mesma tarifa das simulações anteriores e uma situação de elevadas perdas pelo sistema de refrigeração, ou seja, a existência de “cascões” pouco espessos nos painéis.

Neste caso, nota-se um aumento significativo do consumo específico de energia e dos custos associados. A partir da tabela 5.12, verifica-se que ao se passar da solução na qual o

custo é mínimo Ou, similarmente, o tempo é máximo e vale 107 minutos para a solução eficiente cujo tempo é de 102 minutos, o tomador de decisão deve estar disposto a pagar R\$5,64 por minuto. Tomada esta decisão, ter-se-ia um acréscimo de R\$ 28,20 no custo de energia; a partir deste ponto para se reduzir mais 5 minutos e atingir a solução de tempo mínimo, a taxa de substituição é bastante elevada - 26,08 R\$/min - exigindo um desembolso de R\$ 130,40.

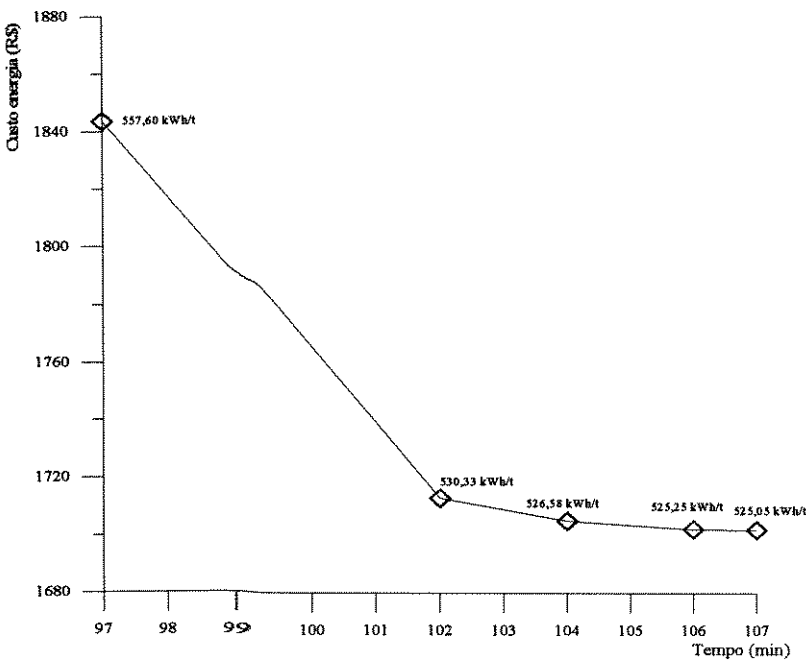


Figura 5.7 Soluções eficientes para o caso 3

Tabela 5.12 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 3

Duração da corrida (min)	Custo de energia (R\$)	Taxa de substituição ($\Delta R\$/\Delta t$)
97	1843,44	-26,08
102	1713,04	-3,92
104	1705,20	-1,40
106	1702,40	-0,32
107	1702,08	

As tabelas 5.13 a 5.17 apresentam os ajustes e as grandezas elétricas no caso de elevadas perdas pelo sistema de refrigeração.

Apesar das perdas térmicas elevadas, o consumo específico de energia não aumenta substancialmente com o tempo de operação. O programa de otimização encontrou soluções

para as quais, à medida em que a importância ou o peso do custo de energia crescia, isto é, λ passava de 0,1 para 0,999, a duração dos estágios que apresentavam as maiores perdas térmicas foi encurtada e naqueles cujas perdas são desprezíveis - $k = 2$ e 5 - o tempo foi prolongado, resultando em perdas decrescentes. Pode-se observar nas tabelas 5.14 a 5.17 que esta redução do tempo em alguns estágios, em detrimento do aumento do tempo em outros, ocorreu sistematicamente.

Tabela 5.13 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ igual a 0,001

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	33	15	1	20	21	6	97
ΔH	5	310	406	216	320	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,65	0,69	0,73	0,72	0,74	0,67	
V_{tap} (V)	467	530	497	530	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	20	15	15	15	30	20	10	
P (MW)	22,56	33,59	31,73	28,25	31,9	35,32	31,78	
I (kA)	40,16	57,54	54,61	43,09	49,34	53,16	56,33	
Ee (kWh)	376	18474,50	7932,50	470,83	10633,33	12362,00	3178,00	53.427,15
Eo (kWh)	55	1361,25	618,75	41,25	1650	1155	240	5.120,85
							Etot (kWh/t)	557,60

Tabela 5.14 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,1 a 0,2

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	38	12	1	26	18	6	102
ΔH	7	330	406	215	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,77	0,85	0,72	0,72	0,8	0,67	
V_{tap} (V)	530	530	530	467	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	10	10	15	10	10	
P (MW)	29,06	29,44	29,9	22,26	31,9	33,08	31,78	
I (kA)	45,57	42,58	39,17	39,07	49,34	46,05	56,33	
Ee (kWh)	484,33	18645,33	5980,00	371,00	13823,33	9924,00	3178,00	52.405,50
Eo (kWh)	68,75	1045	330	27,5	1072,5	495	240	3.279,15
							Etot (kWh/t)	530,33

Tabela 5.15 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,3 a 0,4

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	38	12	2	27	18	6	104
ΔH	7	330	406	220	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,77	0,85	0,71	0,79	0,8	0,67	
V_{tap} (V)	530	530	530	530	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	10	25	15	10	10	
P (MW)	29,06	29,44	29,9	29,06	28,18	33,08	31,78	
I (kA)	45,57	42,58	39,17	45,57	39,72	46,05	56,33	
Ee (kWh)	484,33	18645,33	5980,00	968,67	12681,00	9924,00	3178,00	51.861,60
Eo (kWh)	68,75	1045	330	137,5	1113,75	495	240	3.430,35
							Etot (kWh/t)	526,58

Tabela 5.16 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,5 a 0,7

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	44	8	2	27	18	6	106
ΔH	7	350	406	220	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,74	0,8	0,71	0,79	0,8	0,67	
V_{tap} (V)	530	497	530	530	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	10	25	15	10	10	
P (MW)	29,06	27,3	33,08	29,06	28,18	33,08	31,78	
I (kA)	45,57	43,81	46,05	45,57	39,72	46,05	56,33	
Ee (kWh)	484,33	20020,00	4410,67	968,67	12681,00	9924,00	3178,00	51.666,30
Eo (kWh)	68,75	1210	220	137,5	1113,75	495	240	3.484,95
							Etot (kWh/t)	525,25

Tabela 5.17 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 3 para λ variando de 0,8 a 0,999

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	44	8	2	27	18	7	107
ΔH	7	350	406	220	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,74	0,8	0,71	0,79	0,8	0,77	
V_{tap} (V)	530	497	530	530	530	530	467	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	10	25	15	10	10	
P (MW)	29,06	27,3	33,08	29,06	28,18	33,08	26,71	
I (kA)	45,57	43,81	46,05	45,57	39,72	46,05	43,84	
Ee (kWh)	484,33	20020,00	4410,67	968,67	12681,00	9924,00	3116,17	51.604,35
Eo (kWh)	68,75	1210	220	137,5	1113,75	495	280	3.524,85
							Etot (kWh/t)	525,05

Finalmente a figura 5.8 exibe as soluções eficientes para os mesmos dados do caso anterior, todavia uma tarifa mais alta para se verificar o efeito preço sobre os ajustes e resultados. Na tabela 5.18 verifica-se a elevada taxa de substituição - 33,40 R\$/min - para se passar da solução de tempo 102 minutos para a de tempo mínimo contra a de 26,08 R\$/min do caso anterior. Outro efeito da elevação da tarifa de energia elétrica é a maior utilização de oxigênio em substituição à energia elétrica mais cara, como pode ser visto nas tabelas 5.19 a 5.22 comparando-as com as tabelas 5.13 a 5.17.

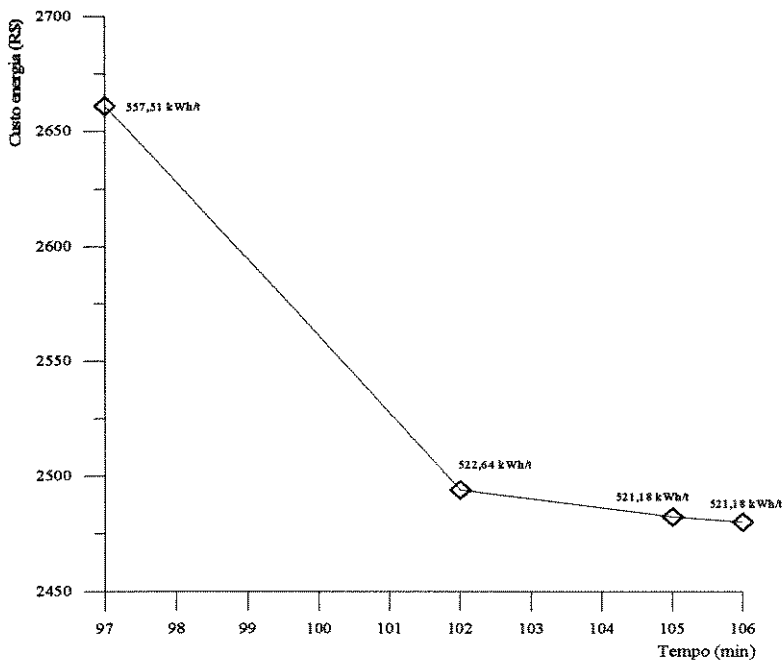


Figura 5.8 Soluções eficientes para o caso 4

Tabela 5.18 Soluções eficientes e taxas de substituição entre os objetivos para o caso 4

Duração da corrida (min)	Custo de energia (R\$)	Taxa de substituição ($\Delta R\$/\Delta t$)
97	2660,87	-33,40
102	2493,86	-3,92
105	2482,11	-2,25
106	2479,86	

Tabela 5.19 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ igual a 0,001

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	33	15	1	20	21	6	97
ΔH	5	310	406	216	320	406	425,8	
$\cos\phi$	0,73	0,65	0,69	0,73	0,72	0,74	0,67	
V_{tap} (V)	440	530	497	530	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	35	15	15	15	30	20	10	
P (MW)	19,47	33,59	31,73	28,25	31,9	35,32	31,78	
I (kA)	35,77	57,54	54,61	43,09	49,34	53,16	56,33	
Ee (kWh)	324,5	18474,5	7932,5	470,83	10633,33	12362	3178	53.375,70
Eo (kWh)	96,25	1361,25	618,75	41,25	1650	1155	240	5.162,85
							Etot (kWh/t)	557,51

Tabela 5.20 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ variando de 0,10 a 0,20

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	44	7	1	25	18	6	102
ΔH	7	350	406	215	340	406	425,8	
$\cos\phi$	0,71	0,74	0,8	0,72	0,74	0,84	0,67	
V_{tap} (V)	530	497	530	467	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	30	10	25	20	10	
P (MW)	29,06	27,3	33,08	22,26	31,05	30,65	31,78	
I (kA)	45,57	43,81	46,05	39,07	46,72	40,62	56,33	
Ee (kWh)	484,33	20020	3859,33	371	12937,5	9195	3178	50.045,10
Eo (kWh)	68,75	1210	577,5	27,5	1718,75	990	240	4.832,10
							Etot (kWh/t)	522,64

Tabela 5.21 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ igual a 0,3

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	44	7	2	27	18	6	105
ΔH	7	350	406	220	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,74	0,8	0,71	0,79	0,84	0,67	
V_{tap} (V)	530	497	530	530	530	530	497	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	30	25	15	20	10	
P (MW)	29,06	27,3	33,08	29,06	28,18	30,65	31,78	
I (kA)	45,57	43,81	46,05	45,57	39,72	40,62	56,33	
Ee (kWh)	484,33	20020	3859,33	968,67	12681	9195	3178	50.386,35
Eo (kWh)	68,75	1210	577,5	137,5	1113,75	990	240	4.337,55
Etot (kWh/t)								521,18

Tabela 5.22 Decisões e grandezas elétricas associadas à solução eficiente do caso 4 para λ variando de 0,4 a 0,999

Estágio	1	2	3	4	5	6	7	Total
tempo (min)	1	44	7	2	27	18	7	106
ΔH	7	350	406	220	340	406	425,8	
$\cos\varphi$	0,71	0,74	0,8	0,71	0,79	0,84	0,73	
V_{tap} (V)	530	497	530	530	530	530	440	
O_2 (Nm ³ /min)	25	10	30	25	15	20	20	
P (MW)	29,06	27,3	33,08	29,06	28,18	30,65	24,5	
I (kA)	45,57	43,81	46,05	45,57	39,72	40,62	45,02	
Ee (kWh)	484,33	20020	3859,33	968,67	12681	9195	2858,33	50.067,15
Eo (kWh)	68,75	1210	577,5	137,5	1113,75	990	560	4.657,80
Etot (kWh/t)								521,18

A figura 5.9 sintetiza as soluções eficientes para os quatro casos simulados. Percebe-se, em todos os casos, o mesmo comportamento em relação aos pesos: a solução de tempo mínimo resulta em consumos específicos de energia elevados e, no outro extremo, a solução de mínimo custo de energia conduz a operações mais demoradas.

Os ajustes que conduzem a uma operação mais rápida fornecem potências ativas elevadas com baixos fatores de potência. Conforme visto anteriormente, baixos fatores de potência significam arcos curtos conduzindo elevadas correntes elétricas que, em última análise, provocam perdas ôhmicas elevadas e altos consumos específicos. Para se atingir a

solução de mínimo custo de energia, opera-se o forno com arco longo e potências menos agressivas.

Todavia, dependendo da programação da produção da aciaria e da tarifa de energia elétrica aplicável, ajustar a operação a um daqueles pontos extremos pode não ser uma boa estratégia. A afirmação de que qualquer ganho de produtividade compensa as perdas de energia associadas deve ser relativizada a partir do conhecimento da curva *trade-off* que fornece soluções intermediárias.

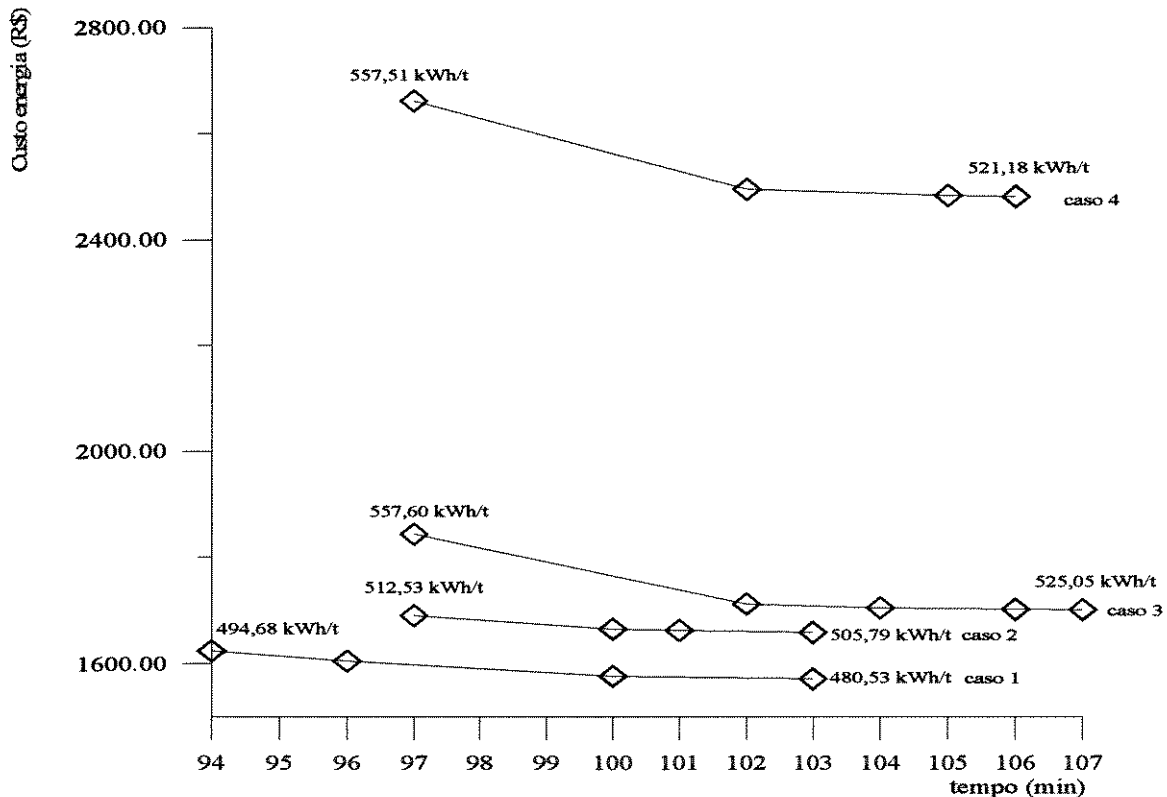


Figura 5.9 Soluções eficientes para os quatro casos simulados

As curvas *trade-off* para os casos 1 e 2 mostram que os desembolsos são relativamente pequenos ao escolher a solução de tempo mínimo em relação à de custo de energia mínimo. Todavia, não se pode afirmar o mesmo para os casos 3 e 4, para os quais as perdas térmicas são elevadas e a tarifa, naquele último, eleva sobremaneira os custos de energia.

Nas curvas *trade-off* 3 e 4 pode-se afirmar que seria uma decisão ingênua ajustar a operação para as soluções de mínimo custo de energia. A operação para minimizar o consumo de energia, naqueles casos, é bastante demorada quando comparada a outras soluções

adjacentes, com reduções de até 5 minutos no tempo e com aumentos desprezíveis de consumos específicos de energia.

Finalmente, é interessante observar que a permuta entre os pontos extremos eficientes da curva *trade-off* fornece uma medida do potencial de conservação de energia. Esta redução no consumo específico pode ser conseguida sem investimentos adicionais, através do ajuste dos parâmetros operacionais do forno. Para os casos 1, 2, 3 e 4, o potencial de redução do consumo específico de energia é de 2,86; 1,32; 5,84 e 6,52 por cento, respectivamente.

Christroff (1987) relata uma corrida, devidamente otimizada, do forno simulado que processou 105 toneladas de sucata, num tempo de 96 minutos e cuja temperatura do banho no final da fusão foi de 1640 °C. As condições de perdas térmicas pela sistema de refrigeração a água são semelhantes ao caso 1 simulado. O consumo específico de energia total - energia elétrica e oxigênio - foi de 505 kWh/t.

Observando-se a figura 5.5, o modelo proposto identificou duas soluções melhores que a prática adotada. A solução de tempo mínimo, que além de reduzir 2 minutos do ciclo de operação, possui um consumo específico cerca de 2 por cento menor, e aquela cujo tempo de operação é de 96 minutos e apresenta um consumo específico de energia 2,15 por cento menor que a prática.

A identificação de soluções melhores que as encontradas por um especialista se deve à vantagem, inerente aos modelos de pesquisa operacional, em analisar um número usualmente muito maior de controles e estados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O modelo de otimização da operação de um forno elétrico de arco direto, desenvolvido neste trabalho, considera aspectos elétricos e metalúrgicos em sua formulação e utiliza uma abordagem abrangente em relação à função objetivo. Os objetivos escolhidos são a redução do custo da energia consumida e o aumento de produtividade. A abordagem multi-objetivo adotada permite a quantificação do conflito existente entre os objetivos em questão.

As mudanças pelas quais está passando o setor elétrico brasileiro cria expectativas de que a tarifa de energia elétrica pressione os custos de produção do aço em aciarias elétricas, mas cria, também, a possibilidade de novas oportunidades de contratos entre as usinas siderúrgicas, que são consideradas consumidores livres, e os novos agentes previstos na reestruturação do setor elétrico. Assim, a variável “tarifa de energia elétrica” ganha uma maior importância na elaboração de contratos entre as usinas siderúrgicas e seus fornecedores potenciais de energia elétrica, que contemplam as empresas distribuidoras locais, outras empresas concessionárias distribuidoras, varejistas não distribuidores, empresas concessionárias geradoras ou produtores independentes.

Hoje, o principal objetivo, perseguido na operação destes fornos, é o aumento de sua produtividade. Apesar de não ser realista afirmar que os fornos serão, no futuro, operados com o objetivo de minimizar o consumo de energia, é bastante razoável supor que a tarifa de energia elétrica coibirá a operação com elevadas perdas e, portanto, alguma solução intermediária deverá ser adotada. A abordagem multi-objetivo explorada neste trabalho permite a identificação de soluções de compromisso entre melhoria de produtividade e redução de consumo de energia.

A possibilidade de se identificar soluções melhores que as encontradas por um especialista se deve à vantagem inerente aos modelos de pesquisa operacional em analisar um número, usualmente, muito maior de controles e estados.

O modelo desenvolvido nesta dissertação permite a quantificação do potencial de conservação de energia que pode ser atingido pelo ajuste de parâmetros operacionais do forno,

sem investimentos adicionais. O valor máximo desta economia é dado pela diferença de consumo entre os pontos extremos da curva *trade-off* das funções objetivo.

Verificou-se, na modelagem, que a espessura da camada de escória aderente aos painéis refrigerados influi de forma decisiva no consumo específico de energia. Portanto, ao se observar uma grande elevação da temperatura da água do sistema de refrigeração, provocada pela diminuição da resistência térmica da barreira semi-isolante de escória, deve-se refazer as saliências, previstas no projeto, na parte interna do cadinho para facilitar a retenção da escória e, com isto, reduzir as perdas.

Constatou-se, durante a execução do trabalho, a escassez de estudos e dados sobre a dinâmica das perdas térmicas no sistema de exaustão de gases. Esta é, portanto, uma área fértil para futuras pesquisas e para o aprimoramento do modelo proposto. Outra possibilidade de refinamento reside no modelamento da injeção de oxigênio. Poder-se-ia utilizar curvas empíricas para encontrar o volume máximo de oxigênio a ser injetado sem comprometer o rendimento metálico da corrida e, adicionalmente, permitir que a taxa de injeção de oxigênio varie dentro de um mesmo estágio. O modelo implementado não permite explorar plenamente as possibilidades de substituição de energia elétrica por oxigênio, tal como ocorre na prática das aciarias.

Além do oxigênio, poder-se-ia simular outras fontes adicionais de energia, durante a corrida, como combustíveis fósseis e a injeção de finos de carvão.

O modelo de otimização da operação de um forno elétrico poderia otimizar a operação de mais de um equipamento em uma mesma aciaria, para encontrar o ótimo global através do encadeamento dos estágios de operação, ao longo do tempo, de cada forno em relação aos demais. Esta solução global é interessante do ponto de vista do gerenciamento da curva de carga da planta industrial e evitar que máximos de potência individuais contribuam negativamente para a ultrapassagem da demanda contratada da planta, elevando os seus custos de produção.

Outrossim, o modelo apresentado pode ser um instrumento de adequação de preços do produto às condições de utilização da aciaria, no intuito de viabilizar “ajustes” de competitividade na busca de maiores fatias do mercado, ou de negociação de prazos junto aos clientes.

ANEXO

PROGRAMAÇÃO MULTI-OBJETIVO

A análise da operação do forno elétrico de arco considerando a produtividade e o consumo de energia levou à formulação de um problema de Programação Multi-Objetivo (PMO) com duas funções objetivo. O problema foi resolvido pelo *método dos pesos* que é apresentado sumariamente a seguir. Detalhes sobre PMO em geral, e sobre o método dos pesos em particular, podem ser encontrados em Steur (1986) e Correia & Berni (1996).

O problema geral de Programação Multi-Objetivo pode ser formulado como segue.

$$\begin{array}{ll} \min z = Cx & \\ \text{s.a. } x \in S & \end{array} \quad (\text{PMO})$$

onde: z é o vetor função objetivo que pertence ao espaço objetivo, $z \in Z$; as linhas da matriz C representam os coeficientes das funções objetivo; x é o vetor decisão que deve pertencer ao conjunto das soluções factíveis $S = \{x \in X: Ax \leq b, x \geq 0\}$ contido no espaço decisão, $S \subseteq X$.

Quando se considera um número muito reduzido de objetivos, o método dos pesos pode ser recomendado para solução do PMO. Porém antes de discutir o método, será conveniente colocar dois conceitos básicos de PMO: *solução eficiente* e *curva de trade-off*. Uma solução factível é eficiente se, partindo-se dela, a melhora de qualquer objetivo implicar na degradação de pelo menos um outro objetivo. Isto é, se $x^* \in S$ é uma solução eficiente então não existirá $x \in S$ tal que $Cx \leq Cx^*$ com $Cx \neq Cx^*$. O mapeamento das soluções eficientes, $x^* \in S$, através da função objetivo, $z = Cx$, resulta em uma curva de *trade-off* no espaço Z . Ela exprime as taxas de substituições entre objetivos, correspondentes às soluções eficientes encontradas no espaço X .

O método dos pesos permite a identificação do conjunto das soluções eficientes, sendo aplicado quando o número de objetivos considerados é reduzido. Ele é aplicado ao PMO pela formulação do seguinte Programa Linear (PL)

$$\begin{array}{ll} \min z = \lambda Cx & \\ \text{s.a. } x \in S & \\ \lambda \in \Lambda & \end{array} \quad (\text{PL})$$

onde $\Lambda = \{\lambda : \sum \lambda_i = 1, \lambda_i \in (0,1)\}$.

Este PL é resolvido parametricamente, fazendo λ variar ao longo do intervalo aberto $(0,1)$. Para cada valor λ fixado, a solução ótima do PL corresponde a uma solução eficiente de PMO (STEUR, 1986). Na realidade, ao invés de variar λ continuamente em todo o intervalo, considera-se apenas os valores de λ correspondente aos pontos extremos eficientes. A curva de *trade-off* no espaço Z também é construída de forma semelhante.

Considere o exemplo de um PMO com duas variáveis de decisão

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

e duas funções objetivos que devem ser minimizadas: o tempo - zc - e o custo com energia - ze .

$$z = \begin{bmatrix} zc \\ ze \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cx \\ ex \end{bmatrix}$$

Consequentemente, a matriz C terá duas linhas e duas colunas.

$$C = \begin{bmatrix} c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ e_1 & e_2 \end{bmatrix}$$

A figura A.1 exibe o conjunto das soluções factíveis S no espaço X juntamente com os vetores c , e , λC . O conjunto das soluções eficientes é formado pelas combinações convexas dos pontos extremos x^1 e x^2 , e dos pontos extremos x^2 e x^3 , como destacado na figura A.1.

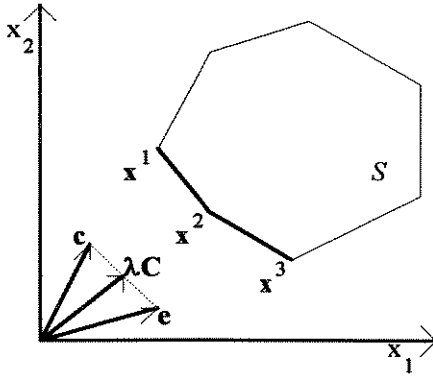


Figura A.1 Soluções eficientes no espaço X .

A figura A.2 mostra a curva de *trade-off* no espaço Z , correspondente às soluções eficientes indicadas na figura A.1. A inclinação de cada trecho da curva de *trade-off* representa uma taxa de substituição entre objetivos, quantificando o conflito existente entre eles. Neste exemplo, ela representaria o incremento de custo associado à redução do tempo.

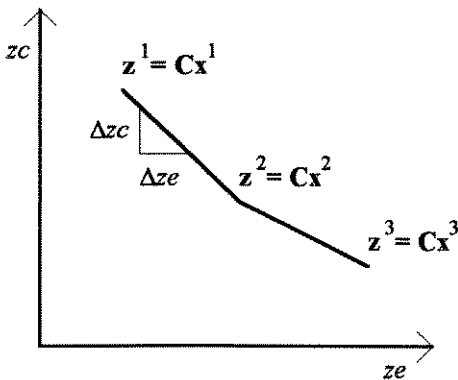


Figura A.2 Curva de *trade-off* no espaço Z

Os resultados oferecidos pelo método dos pesos permitem ao tomador de decisão concentrar sua atenção no conjunto das soluções eficiente, descartando as soluções ineficientes onde os dois objetivos poderiam ser melhorados simultaneamente. A curva de *trade-off* quantifica o conflito existente entre soluções eficientes, informando o tomador de decisão das consequências envolvidas na sua escolha e auxiliando a determinação de uma solução de compromisso que também seja eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLPH, A., PAUL, G., KLEIN, K. H., LEPOUTRE, E., VUILLERMOZ, J. C. & DEVAUX, M. A new concept for using oxy-fuel burners and oxygen lances to optimize electric arc furnace operation, *La Revue de Métallurgie - CIT*, (1):47-53, 1990.
- BETZIOS, A. *Fornos a Arco Elétrico*. ABM, São Paulo, 1987.
- BETZIOS, A. Fornos a arco de corrente contínua: Uma visão geral, *Metallurgia & Materiais*, 49 (424): 1022-31, ABM, São Paulo, 1993.
- BILLINGS, S.A. & NICHOLSON, H. Identification of an electric-arc furnace electrode-control system, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 122 (8): 849-56, 1975.
- BILLINGS, S.A.; BOLAND, F.M. & NICHOLSON, H. Electric arc furnace modelling and control. *Automatica*, 15, 137-148, 1979.
- BOWMAN, B. Choice of power programmes for the modern arc furnace, *Ironmaking and Steelmaking*, (4): 248-52, 1975.
- BOWMAN, B. Solution of arc-furnace electrical circuit in terms of arc voltage, *Ironmaking and Steelmaking*, 9, (4): 178-87, 1982.
- BOWMAN, B. & ZAMARBIDE, J. Programas de potencia y consumo de energía en acerías eléctricas modernas, *Rev. Metal. Madrid*, 22 (6): 373-9, 1986.
- BOWMAN, B. Modelo de computação de operação de forno a arco, *Metallurgia ABM*, 44 (365): 331-8, 1988.

- CARDOSO, J. J. *Eletrotermia - Fornos Elétricos a Arco*. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, vol. 1, Ouro Preto, MG, 1987.
- CARVALHO, E. B. & CORREIA, P. B. A dynamic programming approach to optimise the operation of an AC electric arc furnace. In: European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 4. Porto, Portugal, 1997. *Proceedings*, v.1. INFUB, Porto, Portugal, pp. 203-208.
- CHEVRAND, L.J.S., BOSI FILHO, F.J., MARTINS, T.B., VALLE, A.A., NICÁCIO, P.A.D. & BARROS, N.M. *Aciaria Elétrica*, ABM, São Paulo, 1991.
- CHRISTOFF, B. A. A otimização de fornos a arco. In: Seminário Anual da COFOR, 8. São Paulo, SP. *Anais*. ABM, São Paulo, pp. 225-37, 1987.
- CHRISTOFF, B. A. Fornos a Arco: Fundamentos e características gerais, operação e manutenção. In: Encontro Técnico sobre Fornos Elétricos, Belo Horizonte, MG. *Anais*. CNBE, Belo Horizonte, MG, 1995.
- CORREIA, P. B. & BERNI, M. D. Transporte e emissão de CO₂: Uma análise multi-objetivo para o planejamento energético e ambiental, *Journal of the Braz.Soc. Mechanical Sciences*, 18 (2): 117-26, 1996.
- DANIELI. *The DANARC® AC and DC Arc Furnace Technology*, Technical Report, Buttrio, Italy, 1993.
- DECKMANN, S., CARVALHO, E. B., BONATTO, B. D. & PIMENTEL, C.R.R. *Modelagem de Forno de Arco Elétrico para Simulação da Operação em Sistemas C.A.*, Relatório Técnico nº 1, Convênio CEMIG/FEE/UNICAMP, 1992.
- DUARTE, A. M., CRUZ, C. A. , TEIXEIRA, O. A. C. & OLIVEIRA, S. P. Otimização do consumo de energia elétrica em forno a arco, *Metalurgia e Materiais*, 1, 61-7, 1994.

- EGGELING, H. & HEGEWALDT, F. Special features of the Brown Boveri system of arc furnace electrode control. *The Brown Boveri Review*, 55 (3): 91-7, 1968.
- FURRERI, F. Electronic electrode regulator for arc furnace, *The Brown Boveri Review*, 65(2): 114-7, 1978.
- GRÜNBERG, D. & REICHE, W. Effects of electric arc furnaces on power systems and methods of compensation, *Brown Boveri Review*, (8): 471-480, 1986.
- HILLIER, F.S. & LIEBERMAN, G.J. *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill, 1990.
- IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, *Anuário Estatístico da Indústria Siderúrgica Brasileira*, Rio de Janeiro, 1995.
- INAGAKI, E., IZUMI, K. & ICHIKAWA, M. Integrated oxygen-enrichment control to attain maximum overall economy in steelmaking arc furnaces. In: Congreso Internacional de Electrotermia, 11. Málaga, Spain, 1988. *Proceedings*, v. A 6.2, pp. 1-16
- JÄGER, H., KLEIN, R., MÜLLER, P.; NIKODEM, R. & WIMMER, K. Advanced graphite electrodes - a key to increased electric arc furnace productivity, *Metallurgical Plant and Technology*, nº 6, 1991.
- JACCARD, L. R. Influência dos parâmetros elétricos na operação de fornos elétricos a arco. In: Seminário de Ferroligas, 2. São Paulo, SP. 1987. *Anais*. ABM, São Paulo, pp. 59-70.
- JORDAN, G.R., BOWMAN, B. & FRITZGERALD, F. The physics of high-current arcs. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 798-805, 1969.

- JORDAN, G. R., BOWMAN, B. & WAKELAM, D. Electrical and photographic measurements of high-power arcs, *J. Phys. D.: Appl.Phys.*, 3, 1089-99, 1970.
- KLEIN, K. H., HAAS, J., SCHINDLER, J. E., BLEIMANN, K., HORNBY, S., BERMEL, C. & PERRIN, N. *The Rapid Melting Technology at BSW - A Combined Process of Oxygen, Gas and Coal Injection with ALARC-PC™ Post-combustion*, Dusseldorf, Germany, 1994.
- LECKIE, A. H., MILLAR, A. & MEDLEY, J. E. Short- and long-term prospects for energy economy in steelmaking. *Ironmaking and Steelmaking*, 9 (5): 222-35, 1982.
- MILLER, T. J. *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Ministério das Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional*, Brasília, 1997.
- PIRES, F.A.C. *Uma Contribuição ao Estudo de Harmônicas em Sistemas de Potência*, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, 1991.
- RAMOS, F. & PUGLIESE, M. *Manual de Conservação de Energia Elétrica - Fornos Elétricos a Arco Direto*. PROCEL, Rio de Janeiro, 1989.
- SCHUBERT, M. & RETH, J. *Energy and cost savings with the MAN GHH UNARC® DC electric arc furnace*, Technical Report, MAN GHH, Germany, 1993.
- SCHWABE, W.E. Experimental results with hollow electrodes in electric steel furnaces, *Iron and Steel Engineer*, 34 (6): 84-92, 1957.
- STASI, L. *Fornos Elétricos*. Hemus, São Paulo, 1981.

- STEINS, J., FRITZ, E., BERGER, H. & PICCOLROVAZZI, S. Enhancement of EAF performance by injection technology, Annual McMaster Symposium on Iron- and Steelmaking, 22, Canada, 1994. *Proceedings*.
- STENKVIST, S. E. *Comparison, AC and DC Arc Furnaces Capital Investment and Operating Costs*, Technical Report, ABB Industrie AG, Baden, Germany, 1994.
- STEUR, R., *Multiple Criteria Optimization : Theory, Computation and Application*, John Wiley & Sons, Inc. Texas, USA, 1986.
- WORLD ENERGY COUNCIL, *Iron and Steel, Energy Efficient Improvement Utilising High Technology, An assessment of Energy in Industry and Buildings*, Report and Case-Studies, UK, 1995.