

EDUCAÇÃO e ————— TECNOLOGIA



Revista do Instituto Politécnico da Guarda

EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA

Propriedade

Instituto Politécnico da Guarda

Director

João Bento Raimundo

Redacção

Serviços Centrais do IPG - Quinta do Zambito

6300 Guarda

tel. 222634 * telecópia 222690

Composição

Gabinete Editorial do IPG

Execução Gráfica e Impressão

Secção de Reprografia do IPG

Periodicidade

Semestral

Tragem

1.000 ex.

Depósito Legal

nº 17.981/87

PARA ALÉM DA MEMÓRIA ...

Mercê de um esforço determinado, orientado desde o início por princípios de valorização do potencial humano e regional, foi possível, ao longo dos últimos seis anos, dotar a região com a realidade que é actualmente o Instituto Politécnico da Guarda.

Concretizámos igualmente a abertura do Pólo de Seia deste Instituto; para além do seu alcance cultural e social, ficou bem evidenciado que, quando há diálogo, empenho colectivo, preocupação pelos interesses da comunidade, o progresso resulta no tempo presente e imprime perspectivas de futuro. Partilhamos assim da opinião de João de Araújo Correia, *"não é preciso que os homens sejam anjos. Mas o tempo que a mesquinhez desperdiça em mesquinhas, se fosse aproveitado, cinquenta por cento que fosse, em elevadas missões, faria de meio fruste um grande meio e, de meio grande, um meio sublime"*.

O Instituto Politécnico da Guarda — com toda a sua estrutura humana, técnica e administrativa — protagonizou a mudança, integrou-se na comunidade regional, assumiu-se como motor de desenvolvimento nas suas múltiplas facetas; caracterizou nesta interligação real, permanente, o símbolo do Portugal moderno e do papel de grande responsabilidade que incumbe ao ensino superior politécnico. Tal responsabilidade passa também por uma actividade editorial que seja incentivo constante a novos trabalhos, à reflexão e à investigação. É esse o desafio que a nossa Revista deixa em cada edição, entrelaçando-se na obra que está consubstanciada neste Instituto Politécnico.

Como escreveu o Padre António Vieira, *"as razões próprias nascem do entendimento, as alheias vão pegadas à memória, e os homens não se convencem pela memória, senão pelo entendimento"*.

João Raimundo
Presidente da Comissão Instaladora
do Instituto Politécnico da Guarda

GESTÃO DE ENERGIA EM FORNOS ELÉCTRICOS

António Silvestre Dias Braga*

Sumário:

- 1 - Introdução no contexto da gestão de energia
 - 2 - Abordagem teórica da evolução $\theta(t)$ dum forno eléctrico
 - 3 - Caracterização da evolução $\theta(t)$ dum forno eléctrico
 - 4 - Simplificações
 - 5 - Apresentação dos dados experimentais
 - 6 - Algoritmo de controlo de gestão de energia em fornos eléctricos
 - 7 - Fluxograma (simplificado)
 - 8 - Conclusões
- Bibliografia

1 - INTRODUÇÃO NO CONTEXTO DA GESTÃO DE ENERGIA

A gestão de energia tem actualmente um papel importante na economia nacional, sendo Portugal um país com uma forte dependência energética do exterior (importação de grandes quantidades de petróleo, carvão e, em quantidade mais diminuta, electricidade), e onde a elasticidade do consumo de energia em relação ao produto interno bruto (PIB) é de aproximadamente 1.3, colocando deste modo Portugal, em relação a este factor, na cauda dos países pertencentes à Comunidade Europeia. Torna-se por isso necessário a aplicação de métodos de utilização racional de energia "designado como o primeiro recurso energético" que nos permite reduzir a elasticidade do consumo de energia em relação ao PIB.

* Assistente da ESTG.

A Gestão de Energia visa deste modo obter economia de energia, através de uma melhor eficiência energética, prevendo-se que, em Portugal, ao ser cumprido o que está definido pela política energética comunitária, se deverá obter até ao ano de 1995 uma economia de 20% de energia primária consumida.

Esta economia de energia obtida por uma maior eficiência energética, para além de obter benefícios a nível nacional, proporciona ao consumidor mais directo grandes vantagens tais como:

- redução da factura energética;
- acréscimo da produtividade da empresa (e nos benefícios de exploração) em quaisquer sectores da actividade;
- aumento da competitividade no mercado interno e externo ou aumento de disponibilidade para outros fins;
- conhecimento mais profundo das instalações e do custo energético de cada fase, processo ou sistema;
- acesso a participações financeiras directas ao investimento a fundo perdido quando da implementação de acções de URE;
- aumento da eficácia do sistema energético.

Para proporcionar o investimento em acções de utilização racional de energia, foram criados os seguintes meios comunitários:

- Sistema de incentivos à URE (SIURE), que financiam a execução de Auditorias Energéticas e Planos de Racionalização Energética:

- Programa VALOREN;
- Alguns subprogramas do PEDIP;
- Programa THERMIE.

E foram criados instrumentos regulamentares tais como:

- Política de preços;
- Novo tarifário energético;
- Regulamento de Gestão do Consumo de Energia.

Neste contexto, existem grandes empresas como as siderurgias e outras de menor dimensão que têm como principais intervenientes no seu processo de fabrico Fornos Eléctricos; estas empresas apresentam normalmente um elevado consumo energético. Por isso, neste tipo de empresas será exigido futuramente, segundo os regulamentos comunitários, uma melhor gestão dos consumos energéticos.

O trabalho a desenvolver insere-se num Plano de Racionalização Energética, o qual inclui a utilização de um Sistema Integrado de Gestão de Energia Eléctrica que deverá ser aplicado em empresas idênticas às atrás referidas.

Este Sistema Integrado de Gestão de Energia Eléctrica já desenvolvido e aplicado em algumas unidades industriais apresenta algumas funções das quais destaco as seguintes:

- Monitorização, registo de consumos e acontecimentos;
- Supervisão da instalação;
- Controlo da Potência Tomada mensal;
- Correção do factor de potência.

A Gestão de Energia em Fornos Eléctricos é um trabalho que se insere neste Sistema Integrado de Energia Eléctrica na função de Controlo da Potência Tomada Mensal, e que consiste em desenvolver um algoritmo de controlo, tendo como base a verificação das evoluções térmicas $\theta(t)$ dos fornos que se querem gerir.

2 - ABORDAGEM TEÓRICA DA EVOLUÇÃO $\theta(t)$ DUM FORNO ELÉCTRICO

Dos dados experimentais, conhece-se a evolução $\theta(t)$ da resposta ao degrau dum forno eléctrico, e por intermédio da fórmula de Bureau obtêm-se os valores de $\theta_{\text{máx}}$ e de τ (constante de tempo) que nos permitem obter as expressões das curvas exponenciais:

$$\theta(t) = \theta_{\text{máx}} \cdot (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad - \text{Forno Eléctrico Ligado}$$

$$\theta(t) = \theta_{\text{máx}} \cdot e^{-t/\tau_2} \quad - \text{Forno Eléctrico Desligado}$$

Para um determinado forno eléctrico é possível, em função de um determinado erro, linearizar as curvas exponenciais da resposta ao degrau; esta linearização vai ser bastante útil porque deste modo é possível fazer o tratamento da evolução térmica $\theta(t)$ por sectores, em que cada sector é caracterizado por um determinado declive. Esta utilidade é constatada quando é feito o estudo matemático na zona de funcionamento do forno, ou seja, na zona de temperaturas controlada pelo termostato. Aqui verifica-se, devido à pequena percentagem da variação das temperaturas ($\theta_{T\text{máx}} - \theta_{T\text{mín}}$) em relação à temperatura nominal θ_n , que a curva exponencial é praticamente uma recta.

A linearização destas curvas exponenciais é:

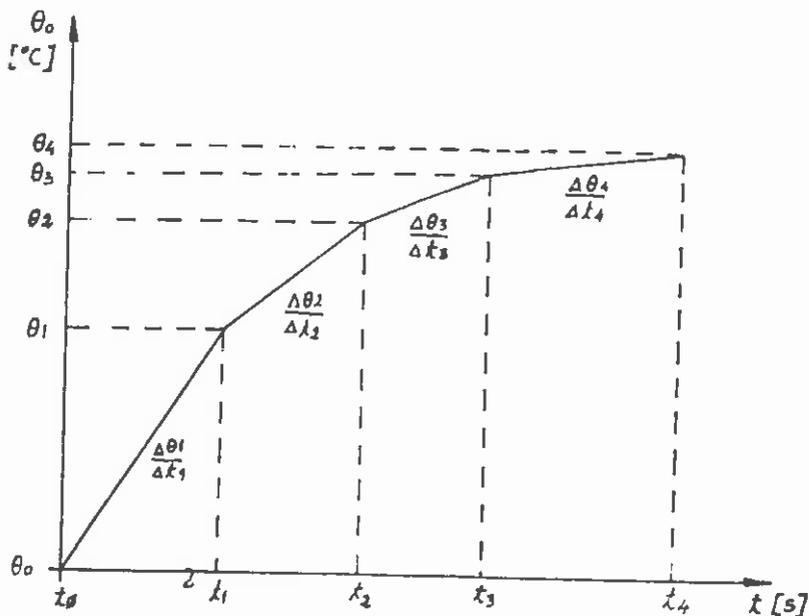


Fig. 1 - Exponencial Linearizada - Forno Eléctrico Ligado

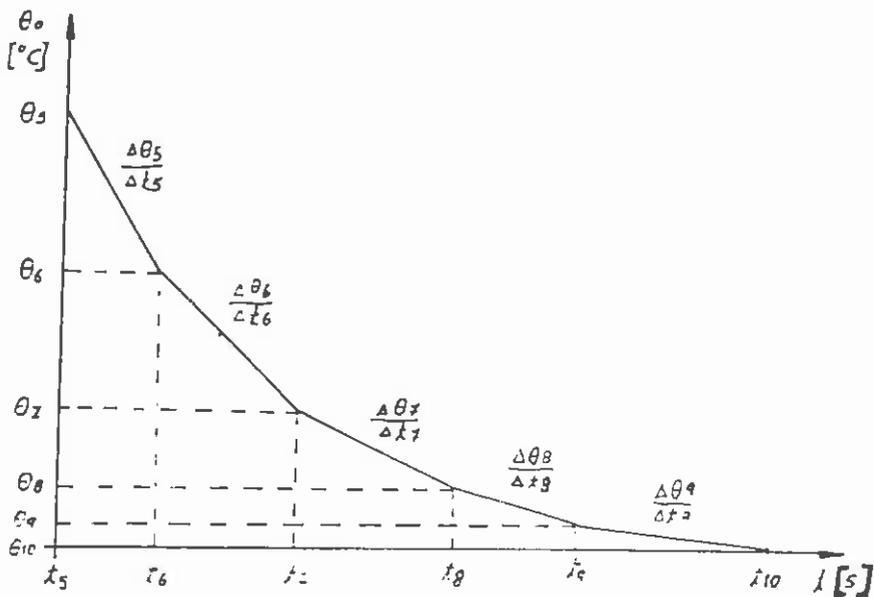


Fig. 2 - Exponencial Linearizada - Forno Eléctrico Desligado

O forno eléctrico é normalmente utilizado para funcionar a uma dada temperatura designada de temperatura nominal, a qual irá ser controlada por um termóstato. O termóstato, devido às suas características, actuará dentro de um determinado intervalo de temperaturas $\Delta\theta$, delimitado pelas temperaturas $\theta_{Tm\acute{a}x}$ (valor de temperatura no qual o termóstato desliga o forno) e $\theta_{Tm\acute{i}n}$ (valor de temperatura no qual o termóstato liga o forno).

Desta forma, tem-se a evolução $\theta(t)$ do forno eléctrico indicada a seguir, na qual se verifica a existência da zona de funcionamento do forno eléctrico.

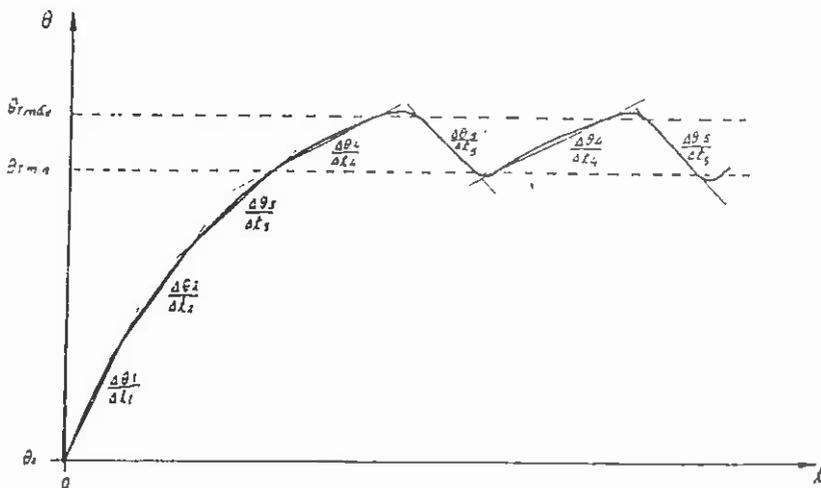


Fig. 3 - Resposta do Sistema Térmico - Forno Eléctrico com Controlo por Termóstato. Linearização.

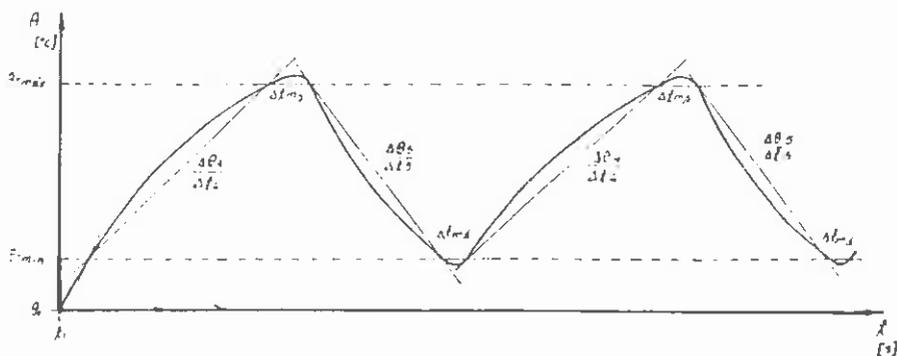


Fig. 4 - Zona de Funcionamento do Forno Eléctrico para uma temperatura nominal θ_n (Controlo por Termóstato). Linearização.

Dentro do limite de variação do termóstato, pode-se considerar que a evolução $\theta(t)$, curva exponencial ascendente e descendente, são aproximações lineares com os declives referenciados na figura. Estas aproximações são as correspondentes às da resposta ao degrau dentro desse limite de variação.

Nessa zona de funcionamento do forno eléctrico existem as designadas zonas mortas, devidas à inércia do forno. Estas são definidas por:

- declive nulo;
- Δt_{ms} duração da zona morta quando o forno eléctrico é desligado;
- $\Delta \theta_{ms}$ variação da temperatura;
- Δt_{md} duração da zona morta quando o forno eléctrico é ligado;
- $\Delta \theta_{md}$ variação de temperatura.

Estes valores permanecem constantes nesta zona de funcionamento.

Tem-se deste modo a aproximação linear indicada na figura seguinte:

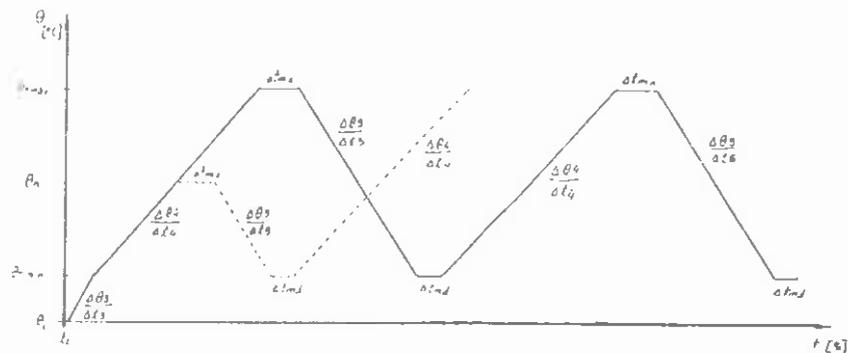


Fig. 5 - Linearização da Zona de Funcionamento. Exemplo do Controlo Automático (Gestão de Energia).

O forno eléctrico antes de atingir a sua zona de funcionamento apresenta uma evolução $\theta(t)$ idêntica à da resposta ao degrau, daí a sua linearização ser a mesma. O mesmo acontece quando se desliga o forno. No entanto, quanto às zonas mortas, estas podem-se considerar constantes dentro dum determinado intervalo de temperaturas, isto com algum erro; isto é possível através dos ensaios efectuados no forno eléctrico, dos quais se

podem tirar os valores que permitem definir essas zonas (Δt_m e $\Delta \theta_m$).

A figura seguinte dá um exemplo desse andamento:

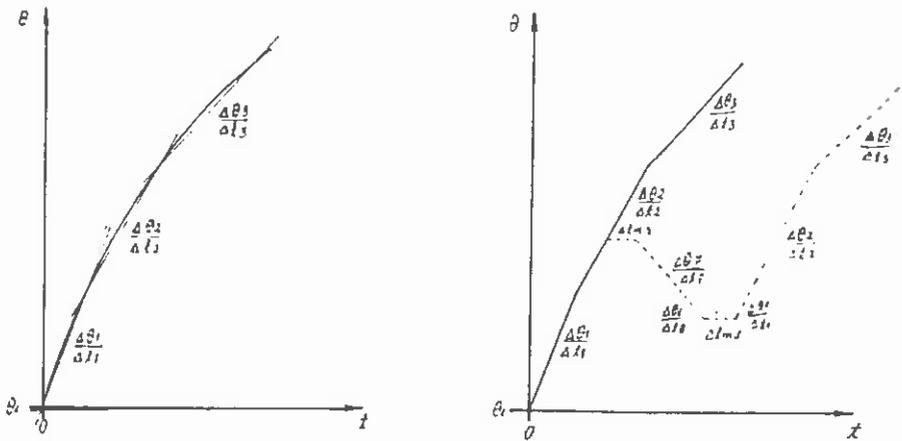


Fig. 6 - Linearização da Exponencial antes de atingir a zona de Funcionamento. Exemplo do Controlo Automático (Gestão de Energia).

Caracterizada a evolução $\theta(t)$ dum determinado forno eléctrico, é agora possível prever em qualquer instante o seu andamento real, o que vai ser extremamente útil para o objectivo que se pretende atingir, porque, deste modo, pode-se actuar no forno eléctrico (ligar ou desligar), sabendo-se previamente o comportamento que se irá obter.

Assim, quando se pretende controlar um grupo de fornos eléctricos, os quais já se encontram caracterizados, estes sobre determinadas condições de funcionamento podem ser geridos de forma a que, num dado periodo de tempo, só possam consumir um dado valor de energia pré-fixado.

Este processo de controlo de energia dum grupo de fornos eléctricos irá ser realizado por um algoritmo de controlo, do qual constam todos os dados dos fornos eléctricos que foram obtidos pelos ensaios experimentais, as aproximações lineares atrás referidas, assim como o método de controlo.

3 - CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO $\theta(t)$ DUM FORNO ELÉCTRICO

Com base na análise teórica efectuada nos pontos anteriores, têm-se os dados que permitem caracterizar a evolução

térmica $\theta(t)$ linearizada dum forno eléctrico. A linearização divide a curva exponencial que caracteriza a evolução real do forno eléctrico em várias zonas. Cada zona é definida pelos seguintes dados:

- Declives:

- declive positivo, $\Delta\theta_s/\Delta t_s$ retirado da linearização da resposta ao degrau com o forno eléctrico ligado;
- declive negativo, $\Delta\theta_d/\Delta t_d$ retirado da linearização da resposta ao degrau com o forno eléctrico desligado.

- Zonas Mortas:

- Δt_{ms} , zona morta após o forno eléctrico ser desligado;
- Δt_{md} , zona morta após o forno eléctrico ser ligado.

Estes valores são retirados dos dados experimentais sobre o forno eléctrico em estudo.

O estudo para a construção do algoritmo de controlo de gestão de energia dum grupo de fornos eléctricos, incidirá principalmente sobre a zona de funcionamento dos fornos eléctricos, ou seja, na zona controlada pelo termóstato.

Assim, o forno eléctrico será caracterizado pelos seguintes dados, relativos à sua zona de funcionamento:

θ_n [° C], temperatura nominal de funcionamento do forno eléctrico;

$\Delta\theta_{nm}$ [° C], variação de temperatura em torno do valor nominal (controlo por termóstato);

$\theta_{Tmáx}$ [° C], temperatura máxima. Temperatura em que o termóstato desliga o forno eléctrico;

$\theta_{Tmín}$ [° C], temperatura mínima. Temperatura em que o termóstato liga o forno eléctrico;

$\Delta\theta_s/\Delta t_s$ [° C/min], declive positivo (forno eléctrico ligado);

$\Delta\theta_d/\Delta t_d$ [° C/min], declive negativo (forno eléctrico desligado);

Δt_{ms} [min], tempo de duração da zona morta, após o forno ser desligado. Supõe-se o declive nulo;

Δt_{md} [min], tempo de duração da zona morta, após o forno ser ligado. Supõe-se o declive nulo.

4 - SIMPLIFICAÇÕES

Despreza-se a variação da temperatura nas zonas de inércia do funcionamento do forno eléctrico (zonas mortas). Essa variação é relativamente pequena, na ordem de algumas unidades de graus centígrados. Por isso considera-se que nas zonas mortas a temperatura será constante (declive nulo), e igual à temperatura a que o controlo automático de temperatura (termóstato ou sistema integrado de gestão de energia de fornos eléctricos) actua (liga ou desliga). Só é considerada a evolução do tempo Δt_{ms} [min] e Δt_{md} [min].

As expressões matemáticas das curvas exponenciais da evolução térmica $\theta(t)$ do forno eléctrico estão construídas de forma a darem valores de temperatura a partir e para 0 (° C), mas na realidade tal não acontece, já que a temperatura inicial do forno eléctrico será a temperatura ambiente no seu interior, assim como a temperatura limite quando o forno é desligado. No entanto, tendo em conta que, normalmente, os fornos eléctricos têm a sua zona de funcionamento próxima da zona final de temperaturas, nestas zonas as expressões matemáticas consideradas são praticamente adaptáveis, dando valores próximos dos reais.

A inércia inicial da evolução $\theta(t)$ do forno eléctrico não é considerada.

5 - APRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Material utilizado:

* FORNO ELÉCTRICO DE RESISTÊNCIA

Marca - HERAEUS

U= 220 [V] (monofásico)

I= 4.5 [A]

f= 50 [Hz]

com Termóstato incluído:

$\theta T_{m\acute{a}x}$ =250 [° C]

variação de escala - [0,250] [° C]

* TERMÓMETRO DIGITAL

Marca - ELCOMETER 213

Tipo de Sensor - Thermocouple K

Calibre - [-50,1100] [° C]

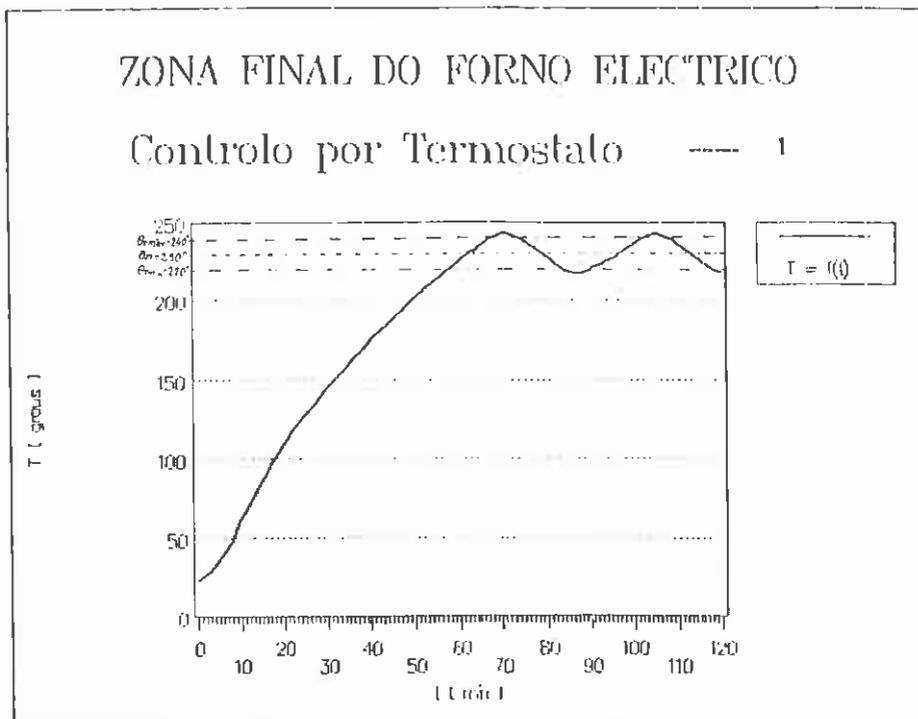
Resolução - 1 [° C]

5.2 - Apresentação dos resultados e curvas $\theta(T)$ dos ensaios experimentais

Apresenta-se nas próximas folhas os resultados dos ensaios experimentais, os quais vão permitir caracterizar a evolução térmica $\theta(t)$ do forno eléctrico acima referido nas suas várias fases de funcionamento.

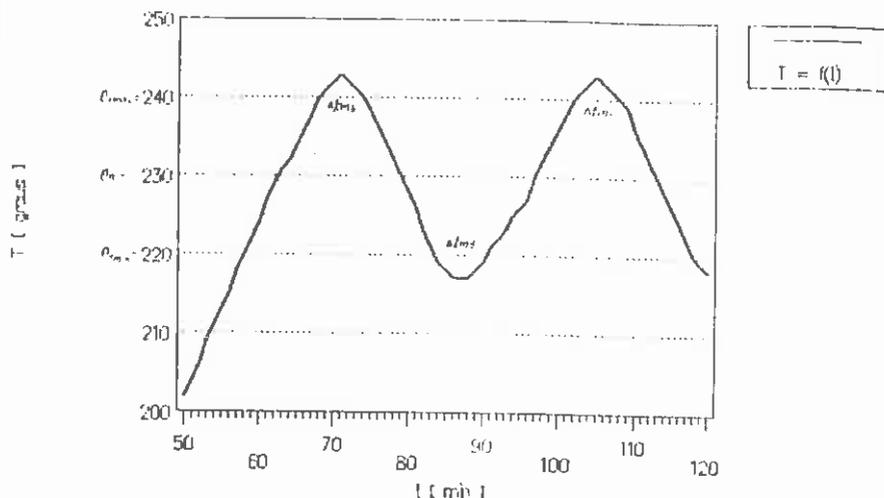
Os ensaios experimentais efectuados foram os seguintes:

- Forno eléctrico com controlo por termostato próximo da zona final (zona de funcionamento).
- Simular o ligar e desligar do forno eléctrico no interior da zona de funcionamento (simulação da actuação do sistema de gestão de energia de fornos eléctricos).



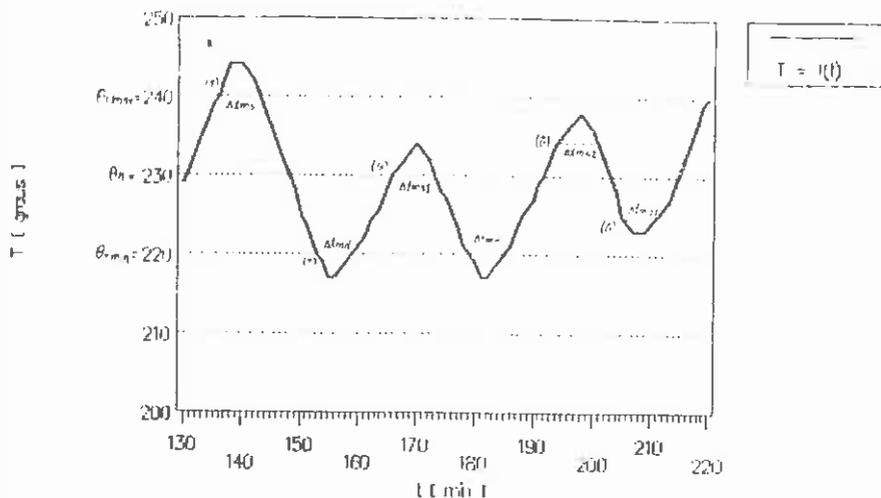
ZONA FINAL DO FORNO ELECTRICO

Zona de funcionamento --- 2



ZONA FINAL DO FORNO ELECTRICO

Similar o Controlo Automatico --- 3



6 - ALGORITMO DE CONTROLO DE GESTÃO DE ENERGIA DE FORNOS ELÉCTRICOS

O algoritmo de controlo tem como principal objectivo manter o consumo de vários fornos eléctricos abaixo de um valor de energia durante um determinado período de tempo. Estes valores são previamente fixados e situam-se dentro dum intervalo de valores, os quais são retirados do histórico dos diagramas de carga dos diversos fornos.

A metodologia deste algoritmo baseia-se nos estudos teóricos e experimentais efectuados nos pontos anteriores, que caracterizam a evolução de temperatura de cada forno $\theta(t)$, permitindo dum forma simplificada e com algumas aproximações a construção do algoritmo de controlo de gestão de energia dum grupo de fornos eléctricos.

Apresenta-se seguidamente as partes principais do algoritmo de controlo, assim como o significado das variáveis utilizadas.

Dados de Energia Disponível

Com base nos valores previamente estudados relativos ao funcionamento e consumos dos fornos eléctricos, é possível fixar, para um determinado período de tempo dt_n (minutos), um valor de energia ED_n (kwh). Estes valores são dados no início do algoritmo e após o fim do período de tempo anterior, e termina o incremento destes períodos de tempo até que o operador assim o deseje.

Variáveis:

ED_n — Energia Disponível [kwh]
 dt_n — Período de Tempo [minutos]

Dados de cada Forno Eléctrico (m)

Cada forno eléctrico é caracterizado pelos parâmetros referidos no ponto 3. e pelo valor da sua potência nominal:

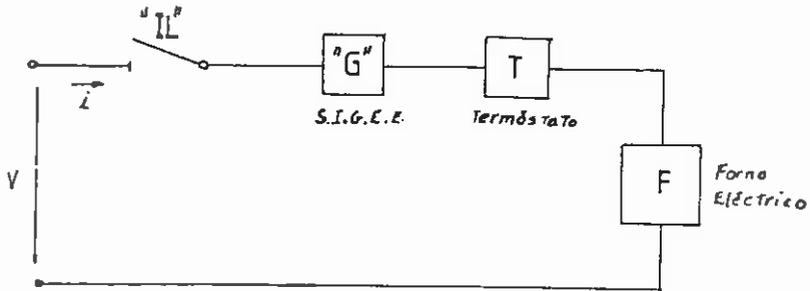
P_{nm} [w]

Situação de cada Forno Eléctrico

A situação de cada forno eléctrico é localizada através de sensores e por controladores de tempo de passagem pelos diversos contactos que actuam durante o funcionamento do forno eléctrico. Assim, quando o forno eléctrico é inicialmente ligado

ou quando o termóstato actua, ou quando o sistema integrado de gestão de energia eléctrica actua, os sensores captam essas passagens e controlam o tempo de passagem.

O circuito simplificado que indica o modo como o forno eléctrico se encontra em relação aos outros componentes é o seguinte:

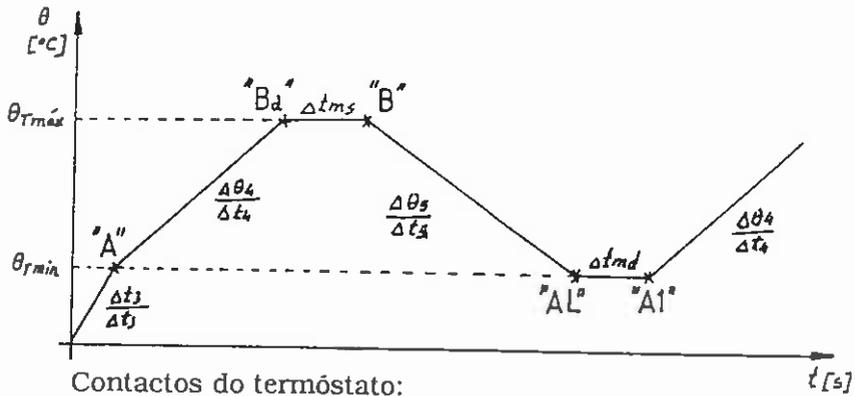


aonde se tem que:

"IL" - contacto do interruptor geral que liga e desliga o forno eléctrico de forma manual.

"G" - contacto automático do sistema integrado de gestão de energia eléctrica.

Exemplifica-se na figura seguinte a actuação do termóstato quando o forno eléctrico se encontra na sua zona de funcionamento, indicando-se os respectivos contactos do termóstato.



"A" - primeira passagem pelo contacto do termóstato que identifica θ_{Tmin} (o termóstato não actua).

"Bd" - contacto do termóstato que identifica $\theta T_{\text{máx}_m}$ (o forno eléctrico é desligado).

"B" - passagem pelo contacto do termóstato que identifica $\theta T_{\text{máx}_m}$ (o forno eléctrico encontra-se desligado).

"AL" - contacto do termóstato que identifica $\theta T_{\text{mín}_m}$ (o forno eléctrico é ligado).

"A1" - passagem pelo contacto do termóstato que identifica $\theta T_{\text{mín}_m}$ (o forno eléctrico encontra-se ligado).

Para cada forno eléctrico (m) são determinados:

tac [min] - tempo actual, tempo que decorreu após a passagem por um dos contactos do termóstato;

$\Delta\theta_m/\Delta t_m$ [° C/min]- declive de $\theta(t)$ neste instante;

θ_{ac} [° C]- cálculo da temperatura actual;

t_{dm} [min]- tempo que o forno eléctrico permaneceria desligado, se fosse desligado no instante tac;

t_{lm} [min]- tempo que o forno eléctrico permaneceria ligado, se fosse desligado em tac;

E_{fm}- variável que identifica se o forno está ligado ($E_{fm} <> 0$) ou desligado ($E_{fm} = 0$);

ΔE_{fm} [wh]- valor da energia poupada por cada forno eléctrico.

Energia consumida durante dt_n

Identificam-se os fornos eléctricos que se encontram ligados ($E_{fm} <> 0$).

El_m [wh] - energia consumida por cada forno eléctrico.

E_{tL} [wh] - energia total consumida pelos fornos eléctricos.

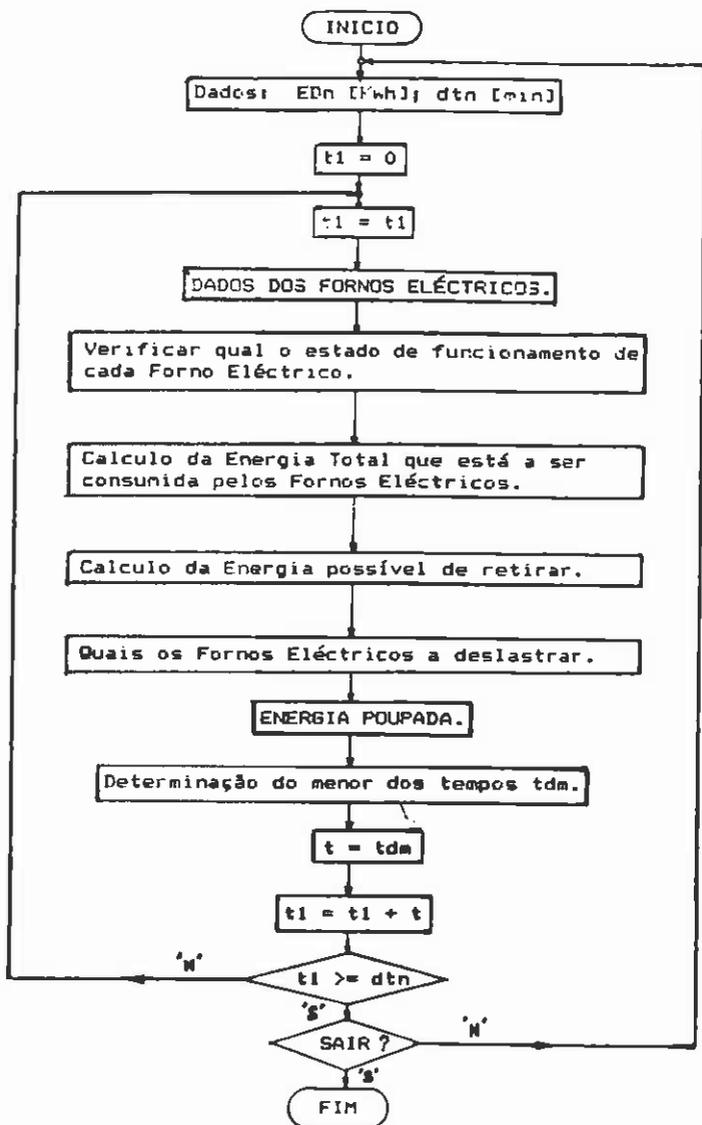
E_{rn} [wh] - energia a retirar durante dt_n

Deslastre de Fornos Eléctricos

Se $E_{rn} > 0$, processa-se o deslastre de fornos eléctricos de modo a garantir somente o consumo da energia disponível (controlo da ponta).

E_t [wh] - energia poupada durante d_{tn}

7 - FLUXOGRAMA (simplificado)



8 - CONCLUSÕES

A utilidade apresentada por este estudo sobre gestão de energia, situa-se no controlo que é efectuado sobre a ponta de energia duma instalação industrial, onde são utilizados sistemas térmicos eléctricos como por exemplo: fornos eléctricos, câmaras frigoríficas ou outros equivalentes.

Numa unidade industrial, o Sistema Tarifário a aplicar para determinação da potência a facturar (PF), normalmente é o seguinte (fórmula de cálculo):

$$PF = PC - K (PC - PT)$$

PT- potência tomada num período mensal, é a maior potência média verificada em qualquer intervalo de 15 minutos durante esse período.

PC- potência contratada, é igual ao valor que figura no respectivo contrato, sendo este valor actualizado para o valor da potência tomada, sempre que esta exceda a potência contratada; a actualização tem efeitos no mês em que se verificar tal facto e nos meses seguintes.

K- valor fixado pelo tarifário.

Verifica-se deste modo o interesse do controlo da potência tomada ou da ponta de energia numa unidade industrial.

A aplicação do algoritmo de controlo, aqui desenvolvido, será incluída num Sistema Integrado de Gestão de Energia Eléctrica; deverá permitir a obtenção dos resultados já referidos, assim como uma possível redução da potência tomada mensal, devido à poupança de energia verificada em cada período de integração. Desta forma, poderá haver uma redução da factura energética, o que poderá levar a uma diminuição da potência contratada duma unidade industrial.

Termino por referir que o algoritmo de controlo necessita de ser traduzido para uma linguagem de programação compatível com a utilizada no Sistema Integrado de Energia Eléctrica.

O algoritmo de controlo está estruturado para efectuar a gestão de energia dos fornos eléctricos quando estes se encontram a funcionar na zona controlada pelo termóstato. No entanto, poderá ser possível um controlo mais eficaz, ou seja, o controlo noutras zonas de funcionamento, através de um algoritmo mais desenvolvido.

Bibliografia:

ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO, Katsuhiko Ogata, 1990.

FORNOS, J. D. Gilchrist.

FORNOS ELÉCTRICOS DE INDUÇÃO, Manuel Jazolino Vieira Costa.

Caderno de Divulgação 6 do Ministério de Indústria e Energia. "Política Energética e Plano Nacional", Mira Amaral, 1989.

Caderno de Divulgação 11 do Ministério da Indústria e Energia. "Utilização Racional de Energia em Portugal. O primeiro Recurso Energético do País", Nuno Ribeiro da Silva, 1990.