



GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA.

GSI Nº: ART059-09 - CD 382-09



APLICAÇÃO DE UM PROGRAMA DIGITAL PARA OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM UM SISTEMA INDUSTRIAL

João Roberto Cogo*
Hector Arango*
Mauro Paschotto*

*EFEI, Itajubá

Artigo apresentado no III Congresso Brasileiro de Energia
Realizado no Rio de Janeiro - Hotel Glória - Período de 08 a 11/10/84

Revisão 0 - Emissão inicial

Documentos de Referência: ART522-07 - CD 262-07

Páginas: capa+ 10 Nº pág inicial 1 Nº pág final 10

Distribuição

Disponível para o Site da GSI

Rev.	Data/Autor	Data/Verificado	Data/Aprovado	Data/Emissão Original	Observações
0	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	10.01.09 - JRC	Para Informação
a					
b					
c					

1 - OBJETIVO

Este documento tem por objetivo a aplicação de um programa digital para otimização do consumo de energia em um sistema industrial.

2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

2.1 - III Congresso Brasileiro de Energia (CBE) - Anais Proceedings - Aplicação de um Programa Digital para Otimização do Consumo de Energia em um Sistema Industrial - João Roberto Cogo; Hector Arango; Mauro Paschotto - EFEI, Itajubá, Rio de Janeiro, outubro de 1984.

3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

3.1 - SUMÁRIO

Este trabalho tem uma característica de aplicação prática. Desta forma, são desenvolvidos uma metodologia, modelagem matemática, análise e programação para a otimização do consumo de energia de um sistema industrial com auto-geração, adequando o modelo matemático às condições de contorno de ordem prática em cada intervalo de tempo, buscando ao longo de um período típico de operação industrial, o “Ponto Ótimo de Operação”.

A energia elétrica auto-gerada, a energia elétrica fornecida pela CONCESSIONÁRIA e a extração de vapor necessário ao processo industrial serão, desta forma, minimizadas em termos de custo do combustível necessário à auto-geração e o custo da energia elétrica oriunda do sistema de alimentação da indústria.

3.2 - ABSTRACT

This work is mainly directed practical applications. This, the following items are developed, for the “Energy consumption optimization of a self-generating industrial system”:

- working methodology (solution procedure);
- mathematical modelling;
- analysis and computer programming.

The mathematical model is adjusted to the real boundary conditions at each time interval, searching for the “Optimum Operating Point” along a typical working period.

In this manner, the self-generated electrical energy, the electrical energy supplied by the company supplier, and the water steam necessary to the industrial process will be minimized, relative to the costs of both the fuel necessary for the self-generation and the electrical energy from the mains.

Onde, na FIGURA 1, tem-se:

- 1 - Caldeira;
- 2 - Turbina de Contra-Pressão - etapa de alta;
- 3 - Turbina de Contra-Pressão - etapa de média;
- 4 - Gerador;
- 5 - Coletores de vapor;
- 6 - Conversão Custo/Energia Térmica;
- 7 - Barramento do Sistema de Suprimento de Energia Elétrica de Indústria;
- 8 - Pré-Aquecedor;
- 9 - Tratamento de Água;
- C - Custo do combustível (R\$/Ton.);
- P - Potência do Combustível ([MW]);
- P_A - Potência Elétrica Auto-Gerada ([MW]);
- P_C - Potência Elétrica Comprada ([MW]);
- P_D - Potência Elétrica requerida pela Carga ([MW]);
- P_L - Perda de Potência na Transmissão;
- H - Fluxo de Entalpia do Vapor (MJ/h);
- H_B - Fluxo de Entalpia do Vapor (Nível de Contra-Pressão) (MJ/h);
- H_S - Fluxo de Entalpia do Vapor (Nível de Extração) (MJ/h);
- H_L - Perda de Vapor na Tubulação;
- Φ_{ATM} - Vapor descarregado na Atmosfera.

Como se pode observar, a unidade de Auto-Geração mostrada na FIGURA 1, é constituída por um conjunto “Caldeira-Turbina-Gerador”, porém, tal unidade poderá na realidade caracterizar-se por N conjuntos, sem maiores problemas.

6 - FUNÇÃO OBJETIVO

A modelagem matemática está fundamentada na minimização dos custos referentes ao consumo de combustível. Para tanto, deve-se relacionar a Potência advinda do combustível, com a Potência Elétrica Auto-Gerada e a Entalpia do Vapor.

Do exposto, tem-se que o equacionamento do modelo pode ser feito como segue:

$$P_1 = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{PO} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_2 = A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO} \dots\dots\dots (2)$$

$$P_3 = A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + C_{HSO} \dots\dots\dots (3)$$

onde:

P₁ - Parcela advinda do combustível para gerar P_A;

P₂ - Parcela advinda do combustível para extração de H_B;

P₃ - Parcela advinda do combustível para extração de H_S;

A_P, D_P, C_{PO}, A_{HB}, D_{HB}, C_{HBO}, A_{HS}, D_{HS}, C_{HSO} - constantes denominadas “Coeficientes das Funções de Custo” - a serem determinadas.

Das equações (1) a (3), conclui-se que o ajuste utilizado para representação da ligação entre as potências já referidas é o “Ajuste Quadrático”, pois, na prática, o mesmo tem sido muito conveniente em associação ao “Método dos Multiplicadores de Lagrange”.

Além das equações (1), (2) e (3), deve-se elaborar uma equação que mostre as iterações entre P_A , H_B e H_S , a qual é dada por:

$$P_4 = P_A A_{PHB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \dots\dots\dots (4)$$

onde:

P_4 = Parcela adicional de potência para a iteração entre P_A , H_B e H_S ;

A_{PHB} , A_{PHS} , A_{HBS} = Constantes a determinar.

De posse das equações anteriores, é estabelecida a função de consumo, dada por:

$$P = f(P_A, H_B, H_S) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots\dots\dots (5)$$

Elaborando-se as equações para o equilíbrio energético do sistema, tem-se:

$$P_A + P_C - P_L - P_D = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$H_B - H_{DB} - H_{BL} = 0 \dots\dots\dots(7)$$

$$H_S - H_{DS} - H_{SL} = 0 \dots\dots\dots(8)$$

onde seus respectivos significados são dados por:

- (6) - Representa o equilíbrio energético entre as potências elétricas requerida pela carga (P_D), de suprimento das perdas (P_L), auto-gerada (P_A) e adquirida da concessionária de energia (P_C).
- (7) - Representa o equilíbrio energético entre as potências térmicas do vapor requerido em nível de contra-pressão (H_B), do requerido pelo processo em nível inferior de entalpia (H_{DB}) e o de suprimento das perdas (H_{LB}).
- (8) - Representa o equilíbrio energético entre as potências térmicas do vapor requerido, em nível de extração, do requerido pelo processo em nível superior de entalpia (H_{DS}) e o de suprimento das perdas (H_{LS}).

De posse destas equações elabora-se a função a ser minimizada, também chamada “Função Objetivo”. Assim sendo o problema assume a seguinte formulação:

- Minimizar a função:

$$P = f(P_A, H_B, H_S) = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots\dots\dots (9)$$

a qual está sujeita às seguintes restrições:

$$P_A + P_C - P_L - P_D = 0$$

$$H_B - H_{DB} - H_{BL} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$H_S - H_{DS} - H_{SL} = 0$$

onde:

(9) - função objetivo;

(10) - conjunto das equações de restrição.

Observa-se que as equações (9) e (10) constituem-se em um problema tipicamente não linear, sujeito a restrições e, através da resolução do mesmo, determina-se os valores das Potências Elétricas e de Vapor Ótimos requeridos pelo Sistema industrial.

7 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para se determinar os parâmetros da “Função Objetivo”, é necessário utilizar-se de um processo iterativo e, por esta razão, divide-se a solução em duas etapas:

Etapa 1 - não serão consideradas as perdas do sistema, tanto elétricas como térmicas.

Com esta situação, roda-se o programa, armazenam-se os resultados e segue-se para a etapa 2.

Etapa 2 - as perdas já mencionadas serão consideradas e os resultados obtidos com a etapa 1 serão utilizados como condições iniciais para a nova situação.

Em ambas, a metodologia utilizada para a solução da Equação Não-Linear, fundamenta-se na aplicação do “Método dos Multiplicadores de Lagrange”, como alternativa matemática, e após este, utiliza-se o “Método de Newton-Raphson”, para o processo iterativo, encontrando-se os valores das constantes da “Função de Custo”, e também os valores médios ótimos de potência auto-gerada e comprada, no período em estudo.

8 - DETERMINAÇÃO DOS VALORES ÓTIMOS DE ENERGIA

Até então, os valores médios ótimos de Potência Auto-Gerada e Comprada já estão definidos. Objetiva-se agora, distribuí-los entre os conjuntos geradores participantes da unidade de Auto-Geração. Para tanto, divide-se o período global, em estudo, em sub-períodos onde cada um deles caracteriza-se por possuir carga constante (condição esta, fundamental para aplicação do “Método dos Multiplicadores de Lagrange”). A FIGURA 2 ilustra.

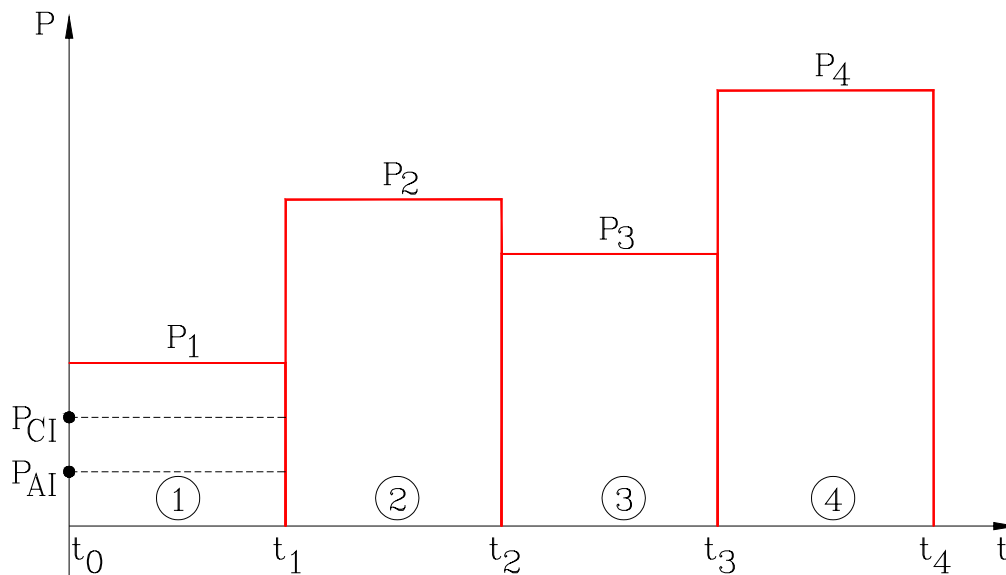


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA À INDÚSTRIA EM UM PERÍODO TÍPICO DE OPERAÇÃO

Na FIGURA 2 observa-se uma divisão do período de operação ($t_0 - t_4$) em quatro sub-períodos, com carga considerada constante.

Tomando como exemplo o sub-período 1, intervalo compreendido entre t_0 e t_1 , a potência elétrica necessária para atender a carga será P_1 e existirão infinitas combinações entre a Potência Comprada (P_C) e a Potência Auto-Gerada (P_A) que satisfarão tal necessidade, porém, apenas uma, atenderá as condições de Custo Mínimo de Operação.

Para se determinar esta combinação única, utiliza-se o “Princípio de Otimalidade de Bellman” e o processo de Programação Dinâmica”, os quais além de definirem os valores de P_{CI} e P_{AI} para o sub-período 1, também distribuem o valor de P_{AI} entre os conjuntos geradores participantes da unidade de Auto-Geração.

O Processo é repetido para os sub-períodos restantes de tal forma que, ao final dos mesmos, obtém-se a estratégia ótima de controle entre a energia elétrica auto-gerada e a comprada da concessionária.

9 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE CUSTO

A determinação dos parâmetros das funções de custo pode ser feita através de ensaios realizados no sistema real em estudo.

Tais ensaios consistem na medição da entrada do combustível injetado na caldeira, em função da quantidade de vapor necessária para a auto-geração de energia, como também da quantidade de vapor em nível de contra-pressão e em nível de extração.

Recordando as equações do “Equilíbrio de Energia” do Sistema tem-se:

$$P_1 = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{PO} \dots\dots\dots(11)$$

$$P_2 = A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO} \dots\dots\dots(12)$$

$$P_3 = A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + C_{HSO} \dots\dots\dots(13)$$

$$P_4 = P_A A_{PHB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \dots\dots\dots(14)$$

Assim, para a determinação dos parâmetros relacionados com P_1 deve-se bloquear as saídas de P_2 , P_3 e P_4 , medindo-se para várias condições de carga, a quantidade de combustível injetado na caldeira e a potência auto-gerada decorrente desta.

Processo análogo seria utilizado para os demais parâmetros, porém tal processo é impraticável dada a impossibilidade de independência das saídas de vapor.

Contudo, sabe-se que o consumo global de combustível é dado por:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \dots\dots\dots(15)$$

Substituindo-se os valores de (11), (12), (13), (14) em (15), tem-se:

$$P = A_P P_A^2 + D_P P_A + C_{PO} + A_{HB} H_B^2 + D_{HB} H_B + C_{HBO} + A_{HS} H_S^2 + D_{HS} H_S + C_{HSO} + P_A A_{PHB} H_B + P_A A_{PHS} H_S + H_B A_{HBS} H_S \dots\dots\dots(16)$$

Agora, durante cada ensaio, deve-se registrar a potência global de combustível, P , como também as saídas P_A , H_B e H_S .

Observando-se a equação (16) concluímos existir 12 constantes a serem determinadas. Assim, para a determinação das mesmas, serão necessários, pelo menos, 12 ensaios a serem realizados em vários níveis de entrada de combustível e saídas de vapor, os quais fornecerão um sistema de equações cuja solução será a determinação dos coeficientes.

O método utilizado no trabalho, para a determinação de coeficientes de funções baseados em dados experimentais, foi o dos “Mínimos Quadrados”.

10 - RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para a avaliação do processo em termos de confiabilidade dos resultados, o programa digital desenvolvido calcula o custo da “Estratégia Ótima” e este pode ser observado através dos resultados apresentados, onde a TABELA “Resultados Obtidos” apresenta as potências compradas e Auto-Gerada em cada sub-período, para a “Estratégia Ótima” e a TABELA “Resultados para Verificação” apresenta uma combinação qualquer de compra de energia e, em função desta, a potência Auto-Gerada necessária. Além das TABELAS citadas, acompanham listagens das condições operativas do Sistema Industrial em estudo.

A análise dos resultados mostra que o ponto encontrado é realmente ótimo, pois quaisquer outras distribuições de potências comprada e Auto-Gerada, levam a um custo final maior e, assim sendo, a Aplicação do programa digital para otimização do consumo de energia, em um Sistema Industrial, traz benefícios relativos aos custos da compra e Auto-Geração de Energia, mostrando que o método utilizado corresponde aos objetivos que se pretendia atingir com a elaboração deste trabalho.

Condições Operativas do Sistema Industrial

Duração do período	= >	12.0 (horas)
Número de Subperíodos	= >	4
Demanda Média	= >	50.0 ([MV])
Consumo Médio de vapor	= >	18.0 ([T])

DEMANDA MÉDIA POR SUBPERÍODO	
Subperíodo	Demanda ([MW])
1	40.000
2	65.000
3	50.000
4	45.000

TARIFAS			
	TC (R\$/KWH)	TD (R\$/KW)	EC (R\$/KWH)
Normal	6.0140	1672.0000	3.0427
Esng	7000	.0000	.9362
Egtd	1.5300	.0000	.9362
Óleo Combustível	1071.0000 (R\$/MBTU)		

Demanda contratada	= >	35.0 ([MW])
Entalpia do Vapor	= >	600.0 ([KCAL])
Contrato de Esng	= >	5.0 ([MV])
Contrato de Egtd	= >	.0 ([MW])

LIMITES DA AUTOGERAÇÃO POR SUBPERÍODO			
Superperíodo	Unidades Geradoras	Min. ([MW])	Max. ([MW])
1	Maq 1	.00000	7.00000
	Maq 2	.00000	7.00000
	Maq 3	.00000	13.00000
	Maq 4	.00000	13.00000
	Maq 5	.00000	9.00000
2	Maq 1	.00000	7.00000
	Maq 2	.00000	7.00000
	Maq 3	.00000	13.00000
	Maq 4	.00000	13.00000
	Maq 5	.00000	9.00000
3	Maq 1	.00000	7.00000
	Maq 2	.00000	7.00000
	Maq 3	.00000	13.00000
	Maq 4	.00000	13.00000
	Maq 5	.00000	9.00000
4	Maq 1	.00000	7.00000
	Maq 2	.00000	7.00000
	Maq 3	.00000	13.00000
	Maq 4	.00000	13.00000
	Maq 5	.00000	9.00000

COEFICIENTES DAS FUNÇÕES DE CUSTO							
	NP	DP	CP	AH	DH	CH	NFH
Maq 1	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
Maq 2	.32466	2.17150	1.10384	.32466	2.17150	1.10384	.00000
Maq 3	.52543	1.43145	1.61312	.52543	1.43145	1.61312	.00000
Maq 4	.25644	2.19809	1.13164	.25844	2.19809	1.13164	.00000
Maq 5	.18551	1.52062	2.23060	.18551	1.52062	2.23060	.00000

RESULTADOS OBTIDOS						
Subperíodo	Pot. comprada	Maq 1	Maq 2	Maq 3	Maq 4	Maq 5
1	5.37486	6.44567	6.44567	4.68907	8.04180	9.00000
2	26.87431	7.00000	7.00000	7.57653	7.57653	9.00000
3	16.12459	6.25233	6.25233	4.56948	7.79912	9.00000
4	5.37486	5.15571	5.15571	3.89123	6.42256	9.00000
Total do Período =>	53.74863	24.85371	24.85371	20.72632	29.84002	36.00000

Custo Total => 16957936.00 (R\$)

RESULTADOS PARA VERIFICAÇÃO						
Subperíodo	Pot. comprada	Maq 1	Maq 2	Maq 3	Maq 4	Maq 5
1	10.00000	5.25228	5.25228	3.95095	6.54379	9.00000
2	16.00000	7.00000	7.00000	12.98441	12.98441	9.00000
3	15.00000	6.54234	6.54234	4.74887	8.16314	9.00000
4	10.00000	4.01982	4.01982	3.18880	4.99653	8.77726
Total do Período =>	51.00000	22.81445	22.81445	24.87304	32.68787	35.77726

Custo Total => 18217912.00 (R\$)

11 - BIBLIOGRAFIA

1 - GUERRA, H. N. (1983), “Otimização do Consumo de Energia em Sistemas Industriais com Auto-Geração”, EFEI.