

**IMPACTOS DA ADOÇÃO DE TARIFAS DIFERENCIADAS DE ENERGIA  
ELÉTRICA SOBRE O PROJETO OTIMIZADO DE SISTEMAS DE  
AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA**

**Borges T.P.F., Colle, S., Wendel, M.**

LABSOLAR – Departamento de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal de Santa Catarina,  
Florianópolis, 88040-900, SC, BRASIL,  
tel.: +55-48-2342161, fax: +55-48-3317615,  
E-mail:tborges@emc.ufsc.br

**RESUMO**

Desenvolveu-se uma metodologia com técnicas de otimização multiobjetivo para o apoio à decisão do valor de sobretarifa a ser cobrado em uma possível adoção de tarifa residencial diferenciada. Para isso, utilizam-se modelos de programação matemática conectados a um programa de simulações horárias a longo prazo para correlacionar possíveis sobretarifas com suas influências sobre a concepção otimizada de equipamentos consumidores de energia em residências. Foi realizado um estudo de caso com sistemas de aquecimento solar de água residencial sob o clima da cidade de Campinas-SP, no sudeste do Brasil. Os resultados foram apresentados em curvas de compromisso (*tradeoff*) e indicam haver uma faixa de negociação entre produtor e consumidor, e também faixas adversas para cada uma das partes.

**PALAVRAS-CHAVE** Pesquisa operacional, programação multiobjetivo

**ABSTRACT**

Multiobjective optimization techniques were used as a decision tool for sizing an additional price to the electricity consumed at peak hours. The proposed method uses mathematical programs linked to a long-term hourly simulation routine. The resulting optimal synthesis model was used to correlate additional peak-hour prices to optimal design solutions for appliances. A case study regarding solar water heaters for Campinas city, Southeastern Brazil was presented. The resulting tradeoff curve showed the existence of adverse regions for the consumers and for the utilities. There is also a good trading region for both parts.

**KEYWORDS:** Operations Research, Multiobjective optimization.

## INTRODUÇÃO

Uma alternativa efetiva proposta para o suprimento de energia elétrica durante o horário de ponta é a tarifa de energia elétrica residencial com preço diferenciado na ponta para o gerenciamento pelo lado da demanda (Alves, 1998; Dória, 1998).

Desenvolveu-se uma metodologia com técnicas de otimização multiobjetivo para o apoio à decisão do valor de sobretarifa a ser cobrado em uma possível adoção de tarifa residencial diferenciada. Para isso, utilizam-se modelos de programação matemática conectados a um programa de simulações horárias a longo prazo para correlacionar possíveis sobretarifas com suas influências sobre a concepção otimizada de equipamentos consumidores de energia em residências. Foi realizado um estudo de caso com sistemas de aquecimento solar de água residencial sob o clima da cidade de Campinas-SP, no sudeste do Brasil. Os resultados foram apresentados em curvas de compromisso (*tradeoff*) e indicam haver uma faixa de negociação entre produtor e consumidor, e também faixas adversas para cada uma das partes.

## SÍNTESE OTIMIZADA DE SISTEMAS TÉRMICOS

A síntese otimizada de sistemas térmicos em regime transiente evoluiu recentemente com a adoção de métodos de programação matemática que utilizam modelos de otimização simultânea de múltiplos parâmetros. (Borges & Correia, 1998; Borges, 2000, Wetter 2000, Krause et al., 2002 Loomans & Visser, 2002; Borges et al.2003) Um programa de síntese otimizada é composto de duas partes: um modelo de simulação que gera a função-objetivo e um modelo de otimização. O modelo de simulação utilizado neste trabalho foi implementado no software TRNSYS (Klein et al., 1996), e para a otimização, foram utilizados dois algoritmos diferentes: Um método de Gradientes Conjugados de Fletcher & Reeves implementado no software PLUPAR (Borges et al.2003), e um método híbrido de algoritmos genéticos com finalização por Hooke e Jeeves, no software GenOpt (Wetter, 2000).

## OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

A otimização Multiobjetivo ou Multicritério é uma excelente ferramenta para problemas de Engenharia com objetivos conflitantes. Para o caso em que existem somente dois objetivos, pode-se convertê-los em um único objetivo, através da atribuição de pesos relativos aos dois (Steuer, 1986)

$$\begin{aligned} \min \{ & f(\vec{x}) = \phi f_1(\vec{x}) + (1 - \phi) f_2(\vec{x}) = z \} \\ \text{s.a } & \vec{x} \in S \\ & \phi \in [0;1] \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $f_1(\vec{x})$  e  $f_2(\vec{x})$  são as funções-objetivo e  $S$  é a região factível Como a importância relativa de cada objetivo é desconhecida, Estabelece-se um conjunto discreto de valores de  $\phi$  entre zero e um, e realiza-se uma otimização (mono-objetivo) para cada valor. Esta

técnica de Programação Multiobjetivo é chamada de Programação Paramétrica (Steuer, 1986).

## ESTUDO DE CASO

Selecionou-se como caso para estudo o aquecimento de água para atender uma demanda de 400 l de água quente para banho por dia, na cidade de Campinas, região sudeste do Brasil. O perfil diário de demanda de água, a 40°C é de 100 litros de água das 6:00 às 8:00; 100 litros das 11:00 às 13:00 e 200 litros das 18:00 às 20:00. O equipamento modelado foi um aquecedor solar de água de placas planas e circulação termossifão, com reservatório térmico cilíndrico vertical e um dispositivo elétrico interno de aquecimento. Opcionalmente, um aquecedor elétrico de passagem com potência variável e controle eletrônico está também instalado, e é acionado toda vez que a água sai para uso em uma temperatura abaixo da desejada. O fluido circulante nas placas coletoras é a água para uso. A água quente deve ser entregue a uma temperatura de no mínimo 55°C na torneira quente, e pode ser misturada com água fria se necessário.

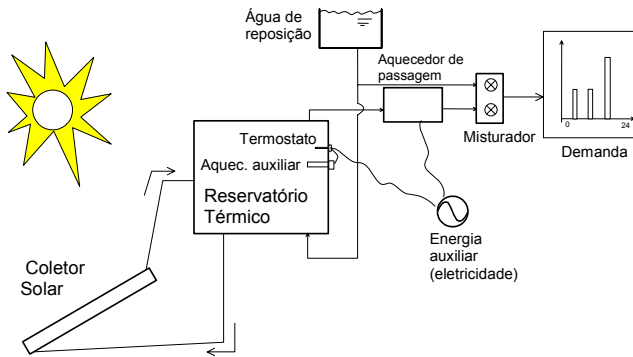


Fig. 2. Esquema do sistema modelado

As variáveis escolhidas para a otimização foram a área de placa coletora, o volume do Reservatório Térmico (RT) e a temperatura ajustada no termostato de acionamento do aquecedor elétrico ao RT. Uma descrição completa do equipamento considerado neste estudo, com as demais dimensões e características técnicas está descrita no trabalho de Borges et al. (2003). Para a simulação, foi escolhido o modelo numérico de Morrison e Braun (1985), que está disponível como modelo padrão no TRNSYS. Ele possui boa exatidão em simulações de longo prazo. A finalidade do modelo é calcular a quantidade total de energia auxiliar consumida, para o cálculo do Custo de Ciclo de Vida do equipamento, e também calcular a quantidade de energia auxiliar que foi utilizada no horário de ponta. A função objetivo utilizada no problema foi:

$$\min \{ f(\bar{x}) = \phi CCV(\bar{x}) + (1 - \phi) Q_{\text{ponta}}(\bar{x}) = z \} \quad (2)$$

$$\bar{x} = [A_p \quad V_t \quad T_{th}]^T \quad \phi \in [0; 1]$$

onde:

- $CCV$  Custo de ciclo de vida anualizado [US\$/ano]
- $Q_{ponta}$  Eletricidade consumida no horário de ponta durante um ano[kWh]
- $A_p$  Área de placa coletora [m<sup>2</sup>]
- $V_T$  Volume de reservatório térmico (RT) [m<sup>3</sup>]
- $T_{th}$  Temperatura do termostato RT [°C]

Para a análise de Custo de Ciclo de vida, foi considerada uma vida útil do equipamento de 20 anos, taxa de atratividade de 12% ao ano; valor residual de revenda zero; custo da placa coletora de 104 US\$/m<sup>2</sup>; custo do RT de 291 US\$ + 496 US\$ / m<sup>3</sup>; Custo de instalação em 15% do preço do equipamento; Custo de manutenção anual no primeiro ano de 1% do custo inicial; taxa de aumento do custo de manutenção em 6% ao ano, e custo da energia elétrica de 0.1649 US\$/ kWh.

### RESULTADOS

Foi gerada a curva parametrizada de consumo de energia no horário de ponta x custo de ciclo de vida do equipamento. Cada ponto desta curva representa uma configuração resultante de uma otimização, com valores distintos nos parâmetros de projeto, que atende a um objetivo que é uma combinação ponderada dos objetivos "economizar energia na ponta" e "minimizar custo de ciclo de vida do equipamento".

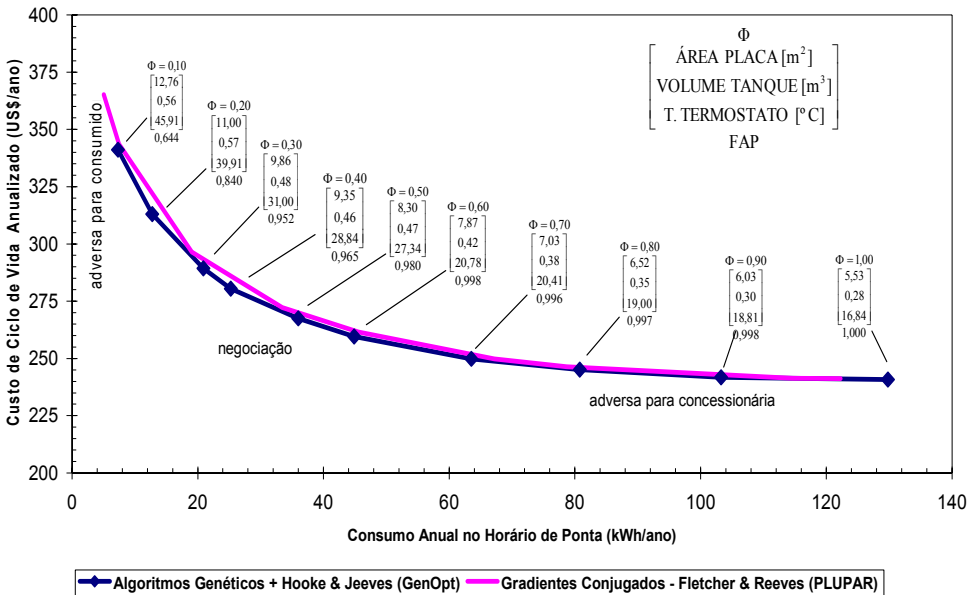


Fig. 3. Curva de Compromisso (*Tradeoff*) resultante

O indicador FAP, constante na legenda do gráfico indica qual a fração da energia auxiliar foi fornecida pelo aquecedor de passagem (FAP = energia auxiliar passagem / energia

auxiliar total). O gráfico possui duas curvas praticamente superpostas, que foram geradas por técnicas diferentes de otimização. A implementação utilizada no GenOpt (técnica mista de algoritmos genéticos com Hooke e Jeeves na etapa final) mostrou ser capaz de levantar um número maior de vértices da curva, obtendo-se, desta forma, uma curva mais suave do que a levantadas pela técnica de Gradientes Conjugados. No GenOpt, cada otimização utilizou-se de uma média de 180 execuções do programa de simulação. Na curva de compromisso gerada é mostrada a existência de três regiões distintas. Existe uma região adversa para a concessionária, onde cada dólar economizado no Custo de Ciclo de Vida para o consumidor representa um grande acréscimo de consumo no horário de ponta. Na região adversa para o consumidor, cada kWh conservado na ponta representa um grande acréscimo no Custo de Ciclo de Vida

Cada ponto do gráfico traz uma configuração diferente do sistema de aquecimento solar. As alterações mais acentuadas foram com relação à área de placa coletora e ao volume de reservatório térmico. Para o caso estudado, a área e o volume variaram em conjunto, mantendo uma proporção constante entre área de placa e volume de reservatório ao longo de todo o dimensionamento. Mesmo com a prioridade voltada para a conservação de energia, o modelo evitou complementar o aquecimento da água com a resistência elétrica interna ao reservatório, evitando-se desta forma perdas de desempenho nas placas coletoras.

Gadgil & Jannuzzi (1991) utilizaram o conceito de Custo de Evitar a Ponta como sendo a razão entre custo incremental da expansão do sistema de geração (para atender a ponta) por cada kW (potência) evitado na ponta. Adaptando este indicador para o ponto de vista do consumidor, calculou-se o custo unitário do kWh (consumo) evitado na ponta como sendo:

$$\text{Custo de Evitar a Ponta para o Consumidor} = CEPC = -\frac{\Delta CCV}{\Delta \text{consumo ponta}} \quad (3)$$

No gráfico a seguir, este custo unitário é levantado a partir de pares de pontos consecutivos da curva anterior. No caso de ser adotada uma sobretarifa por consumo na ponta, a faixa ótima de consumo na ponta será aquela que possui CEP de valor igual a tarifa. Valores de CEP superiores à tarifa indicam que seria mais barato pagar a sobretarifa do que conservar energia. Valores inferiores, o contrário.

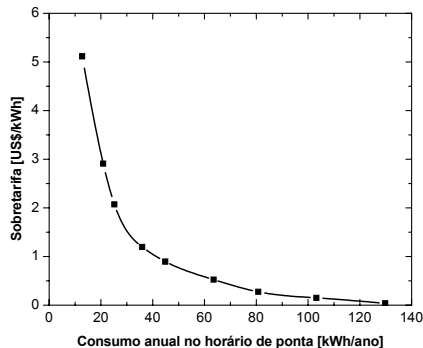


Fig. 4 Sobretarifa, igual ao Custo de evitar a ponta.

## CONCLUSÕES

Desenvolveu-se uma metodologia que, em função de um consumo máximo de eletricidade desejado no período de ponta para um determinado tipo de equipamento, prescreve uma sobretarifa a ser cobrada .

A metodologia mostrou-se efetiva em um estudo de caso, e recomenda-se seu uso com um modelo de simulação que tome em consideração o de aquecedores solares sujeitos à uma pluralidade de hábitos de consumo, de forma a refletir seu uso por diversos perfis de residências familiares.

O levantamento da curva de compromisso entre consumo na ponta e níveis de Custo de Ciclo de Vida mostra-se útil ao estabelecimento de parâmetros mínimos de eficiência para equipamentos consumidores de energia. Sugere-se a aplicação desta metodologia a outros equipamentos consumidores de energia, e também ao desempenho térmico de edificações.

## REFERÊNCIAS

- Alves, T. M. M. (1998); Um projeto piloto de tarifa binomial; a experiencia da CEMIG. *Anais do Efficientia 98- Seminario nacional de combate ao desperdicio de energia elétrica*. 30pgs.
- Borges, T. P. F., Correia, P. de B. (1998); Non-linear optimization model for domestic solar water heaters. *Proceedings of The 1998 American Solar Energy Society Annual Conference*, (Albuquerque-NM, June 14-17,1998), p.297-300.
- Borges, T.P.F. (2000), *Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água*, Faculdade de Engenharia Mecânica, p. 128, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Borges T.P.F., Correia P.B., Colle S. (2003) design of solar water heating systems using nonlinear programming- an objective function performed by a numerical simulation program. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 14-19 june, Göteborg, Sweden.
- Dória, R. (1998); Um projeto piloto de tarifa amarela; a experiência da COPEL. *Anais do Efficientia 98- Seminario nacional de combate ao desperdicio de energia eletrica*.
- Gadgil, A. and G. M. Jannuzzi (1991). "Conservation Potential of Compact Fluorescent Lamps in India and Brazil." *Energy Policy* 19(5): 449-463.
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., Michell, J. C., Braun, J. E., Evans, B. L., Kummer, J. P., Urban, R. E., Fiskel, A., Thornton, J. W., Blair, N. J. (1996): *TRNSYS 14.2 Reference Manual*. 14.2 ed. Madison: Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin- Madison.
- Krause M.;Vajen K. Wiese F. Akermann H.(2002) Investigations on optimizing large solar thermal systems. *Solar Energy* vol 73, no.4, pp 217-225
- Loomans M. and Visser H. (2002) Application of the genetic algorithm for optimization of large solar hot water systems. *Solar Energy* 72, 427-439.
- Morrison, G. L,and Braun, J. E. (1985); System modelling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters. *Solar Energy*, 34, (n.4/5), p.389-405.
- Steuer, R.E. (1986) *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Krieger Publishing Company, Malabar, 546 p.
- Wetter, M. (2000) Design optimization with GenOpt. *Building Energy Simulation User News*. Vol 21, sept-oct 2000, pp. 19-28