

# Utilização de simuladores de processo e superestrutura para projeto de sistemas de cogeração

*Leonardo Rodrigues de Araujo*

## Resumo

Sistemas térmicos são essenciais em instalações como centrais termelétricas, plantas de cogeração, sistemas de refrigeração e ar condicionado, dentre outros, nas quais é processada grande parte da energia consumida pela humanidade. Em um mundo com fontes de combustíveis naturais finitas e com a crescente demanda de energia nos países, questões relacionadas ao projeto de sistemas térmicos, tais como simulação de processos, estimativa de custos, complexidade de projeto, proteção ambiental e otimização, vem aumentando de importância. Portanto, a necessidade de entender os mecanismos que degradam a energia e melhoram o aproveitamento das fontes energéticas, reduzindo assim o impacto ambiental e os custos do projeto, operação e manutenção, fez com que nos últimos anos ocorresse o desenvolvimento de procedimentos e técnicas computacionais para projeto de sistemas térmicos. Assim, neste contexto, o objetivo fundamental deste trabalho é a modelagem de uma superestrutura, em um simulador de processo comercial (IPSEpro da SimTech), onde são inseridas as opções de projeto apropriadas ao caso estudado.

## Introdução

Os sistemas de cogeração, que podem operar com eficiências maiores do que aquelas obtidas quando calor e trabalho são produzidos em processos separados, deveriam ser implantados sempre que possível. Esses sistemas são essenciais nas instalações industriais e comerciais onde existem demandas de energia elétrica e térmica. O projeto, operação e manutenção eficientes dessas instalações, além da própria implantação da planta de cogeração, são fatores que contribuem para um melhor desempenho econômico e aumento da competitividade das empresas adequadas à cogeração. Além disso, considerando que o custo e a complexidade do projeto de sistemas de cogeração vêm aumentando

do e que existe uma perspectiva de instalação de muitos desses sistemas no Brasil, principalmente devido às recentes mudanças no setor energético do país, torna-se imperativo entender e melhorar cada vez mais o procedimento de projeto de sistemas de cogeração. O projeto de sistemas térmicos, dentre eles as plantas de cogeração, vêm evoluindo ao longo do tempo com o desenvolvimento e aplicação de técnicas e métodos adequados a essa finalidade. Cita-se o desenvolvimento e aplicação dos simuladores de processo, onde se realiza as modelagens, inclusive de superestruturas. Os simuladores de processo, que são programas computacionais destinados à modelagem e simulação de sistemas térmicos, sofreram uma evolução significativa nos últimos anos, tornando-se ferramentas muito importantes para a otimização do projeto, operação e manutenção de sistemas térmicos. Por essa razão, neste trabalho contempla-se o emprego de um simulador de processo comercial, que traz inúmeras vantagens, por exemplo, a tarefa de modelagem da superestrutura torna-se mais rápida e fácil para o engenheiro projetista.

## Projeto de sistemas térmicos

Após os computadores se tornarem acessíveis, nas décadas de 60 e 70, foi possível aplicar os métodos de análise exérgica, afetando profundamente a engenharia de projeto de sistemas térmicos, que se encontrava em estágio de desenvolvimento geral. Com as ferramentas computacionais de análise, os projetistas passaram a examinar muitas soluções possíveis, sendo a melhor dessas soluções escolhida como o projeto final (BOEHM, 1997). Somente na década de 70 verificou-se o desenvolvimento, dentro das universidades, de cursos destinados exclusivamente ao projeto de sistemas térmicos. Assim, alguns livros nesta área de conhecimento foram publicados, sendo um dos primeiros o livro escrito por STOECKER (1971), que posteriormente sofreu revisões e ampliações (STOECKER, 1989). O autor abordou primariamente a modelagem térmica, os métodos matemáticos de otimização e

a engenharia econômica, sendo os primeiros dois aspectos tratados em base analítica. Após esse livro pioneiro, vários outros foram publicados abordando o projeto e otimização de sistemas térmicos, tais como: BOEHM (1987), BEJAN et al. (1996), JALURIA (1998), SCIUBBA e MELLI (1998), BEJAN e MAMUT (1999), EL-SAYED (2003), dentre outros. Também podem ser encontrados livros dedicados exclusivamente ao projeto de sistemas de cogeração, tais como ORLANDO (1991 e 1996), PAYNE (1997) e KOLANOWSKI (2000), BALESTIERI (2002), dentre outros. É possível identificar como tendências futuras na área de projeto de sistemas térmicos auxiliado por computador, apesar do dinamismo da mesma e da evolução rápida dos computadores, os seguintes aspectos:

- Desenvolvimento e uso mais intenso de interfaces gráficas nos simuladores de processo, tornando-os mais facilmente utilizáveis;
- Desenvolvimento de programas mais inteligentes que auxiliam o usuário na otimização de plantas complexas;
- Desenvolvimento e maior disponibilidade de programas no mercado que permitem a inclu-

são de novos modelos de equipamentos ou modificação dos existentes pelo usuário, atendendo assim às necessidades específicas do usuário quanto à modelagem;

- Desenvolvimento de programas que usam técnicas de inteligência artificial, principalmente na tarefa de auxiliar os projetistas novatos na concepção de configurações do sistema térmico que sejam promissoras (BOEHM, 1997).

#### Simuladores de processos

Vários conceitos têm sido desenvolvidos e incorporados nos simuladores de processo, os quais vêm se tornando uma poderosa ferramenta para a simulação, projeto e otimização de sistemas térmicos. SURYANARAYANA (2003) define simulação como a predição de uma ou mais variáveis de um componente ou sistema sob diferentes condições de operação. NASCIMENTO (2005) diz que a simulação computacional é um processo de experimentos em sistemas ou fenômenos físicos, realizados através de modelos matematicamente computadorizados, os quais representam características observadas em sistemas reais. Pode-se perceber então que as defi-

Figura 1-Superestrutura utilizada no trabalho

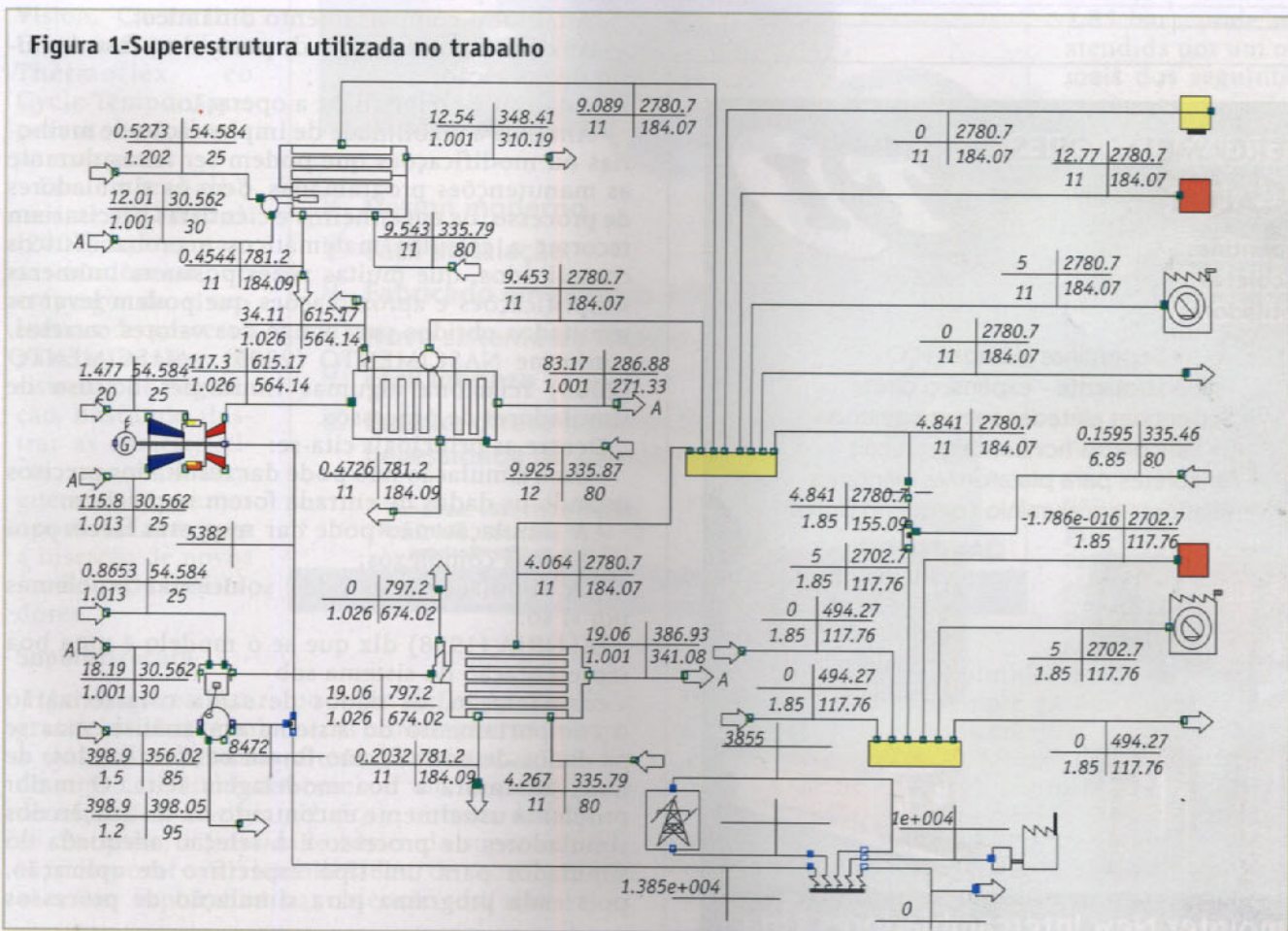


Figura 2- Rendimento típico dos acionadores primários

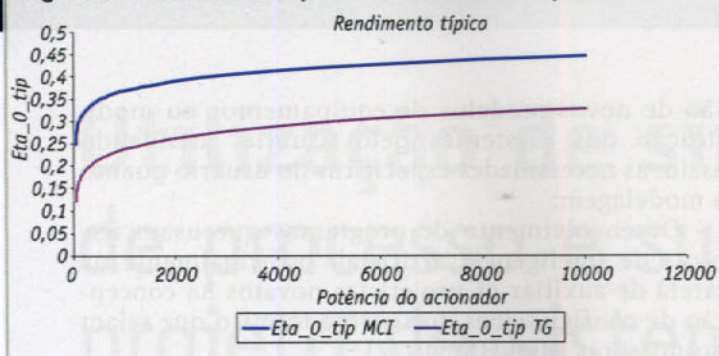
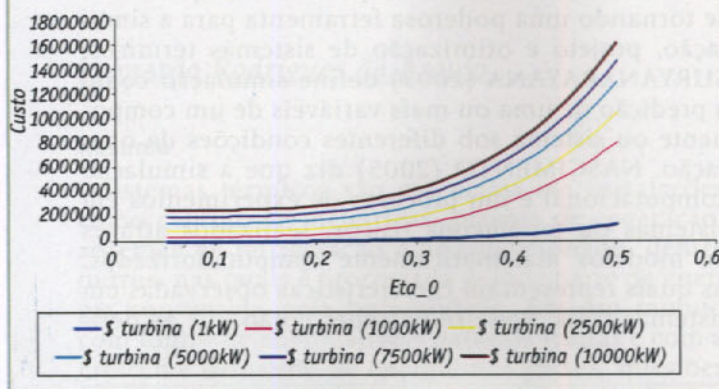


Figura 3- Custo de aquisição da turbina a gás em função do rendimento



nições dadas pelos autores são correlatas. Uma revisão do estado da arte no Brasil e no mundo sobre metodologias para análise de sistemas energéticos, abordando também alguns "softwares" disponíveis no mercado para a simulação desses sistemas, pode ser encontrada em BALESTIERI et al. (1999). Os simuladores de processo permite ao engenheiro modelar o comportamento de um sistema, ou componentes de um sistema, sob condições específicas e fazer análises térmicas, dimensionamento, análise de custo e otimização. Essas atividades são requeridas para o desenvolvimento apropriado do projeto de um sistema térmico (BEJAN et al., 1996).

Embora um custo sempre esteja associado à utilização de simuladores de processo, o uso dos mesmos normalmente é compensador, segundo BOEHM (1997), considerando as várias etapas no procedimento de projeto e otimização de um sistema térmico, os simuladores de processo podem ser usados para:

- Avaliar novas idéias na etapa de concepção da planta;
- Desenvolvimento do "layout" na etapa de projeto;
- Simular o desempenho do sistema de controle e integrá-lo à planta;
- Analisar o comportamento dinâmico;
- Auxiliar o treinamento de pessoal na fase de início de operação;
- Analisar e racionalizar a operação;
- Analisar a viabilidade de implantação de melhorias ou modificações que podem ser feitas durante as manutenções programadas. Sem os simuladores de processo, os engenheiros e cientistas precisariam recorrer a cálculos matemáticos e probabilísticos complicados, que muitas vezes possuem inúmeras simplificações e aproximações que podem levar os resultados obtidos para longe dos valores corretos, conforme NASCIMENTO (2005). NASCIMENTO (2005) relaciona algumas limitações do uso de simuladores de processos.

Dentre as principais cita-se:

- Uma simulação não pode dar resultados precisos quando os dados de entrada forem imprecisos;
- A simulação não pode dar respostas fáceis para problemas complexos;
- A simulação não pode solucionar problemas por si só.

JALURIA (1998) diz que se o modelo é uma boa representação do sistema sob consideração, os dados de saída caracterizarão o comportamento do sistema em análise, mas se os dados de entrada não forem bem utilizados, de nada adiantará a boa modelagem feita. O maior problema usualmente encontrado na utilização dos simuladores de processo é a seleção adequada do simulador para um tipo específico de aplicação, pois cada programa para simulação de processos

## INTERCAMBIADORES DE CALOR

- Serpentinhas
- Fancoletes
- Ventiladores



- Serpentinhas aletadas H<sub>2</sub>O gelada/quente - expansão direta
- Serpentinhas aletadas sob encomenda
- Fancoletes horizontais/verticais
- Fancoletes para plataformas marítimas
- Ventiladores em alumínio (pequeno porte)



Termointer New Intercambiadores Ltda.

Tel./Fax: (11) 3831-9921 / 3832-0470

vendas@termointer.com.br | www.termointer.com.br

apresenta características próprias. Além da escolha criteriosa do simulador de processo, recomenda-se um treinamento apropriado dos futuros usuários deste programa, o que poderia produzir benefícios significativos.

Um exemplo de simulador de processo com estrutura modular orientado a equações, com interface gráfica bem desenvolvida e biblioteca de modelos programável, dentre outras características, é o simulador de processo chamado IPSEpro (SIMTECH, 2000) utilizado neste trabalho. Outros simuladores de processo comercialmente disponíveis, conforme citados em BALESTIERI (1999), são: o SIMULINK, que é um "software" de aplicação geral e com possibilidade de emprego na avaliação de processos transitórios; o ASPEN+; ProVision, Chemasim, Gate Cycle, Thermoflex e Cycle-Tempo, que permite o cálculo da exergia.

Em trabalho recente, SILVA et al. (2002) apresentam as tendências no emprego de simuladores de processo para a análise de sistemas de cogeração, buscando ilustrar as características que os distinguem e apresentar oportunidades para a inserção de novos modelos de simuladores.

### Superestrutura

Uma superestrutura pode ser definida como um grande sistema térmico, cuja modelagem contempla a existência de várias alternativas básicas capazes de suprir, individualmente ou em associação, as demandas de energia elétrica e térmica do processo. Portanto, a finalidade básica da superestrutura é incorporar as flexibilidades de configuração a serem exploradas na obtenção do sistema de

cogeração ótimo, além de fornecer os balanços de massa e energia para todos os pontos percorridos no processo de otimização sem incorrer em falhas de simulação.

Os acionadores primários considerados na concepção da superestrutura desenvolvida neste trabalho são a turbina a gás e o motor de combustão interna, os quais fazem parte da lista de equipamentos disponíveis e não apresentam restrições quanto ao uso de gás natural, que é o único combustível con-

siderado. A concessionária é o outro possível fornecedor de energia elétrica, sem limites de fornecimento ou "compra" de energia elétrica cogera- da em excesso.

Na superestrutura as demandas de vapor no processo, de média pressão (saturado a 11 bar) e/ou de baixa pressão (saturado a 1,85 bar), pode ser atendida por um ou mais dos seguintes equipamentos: caldeira convencional flamotubular, caldeira de recuperação de calor aquatubular acoplada à turbina a gás, caldeira de recuperação de calor flamotubular acoplada ao motor de combustão interna. O equilíbrio entre produção e demanda de vapor, durante o processo de otimização, é garantido pelo fornecedor e pelo consumidor artificial de vapor.

Esse fornecedor e consumidor artificial de vapor têm a finalidade de sempre garantir uma solução para o balanço de massa e energia da superestrutura, conforme abordado em ARAUJO (2008), ARAUJO (2009) e ARAUJO (2010), conforme Figura 1.

A superestrutura desenvolvida neste trabalho foi testada e mostrado na Figura 2 as curvas características de todos os equipamentos utilizados na modelagem. O subsistema turbina a gás e caldeira

## BOCA DE AR VENTIDEC



AGORA PRODUZIDO NO BRASIL

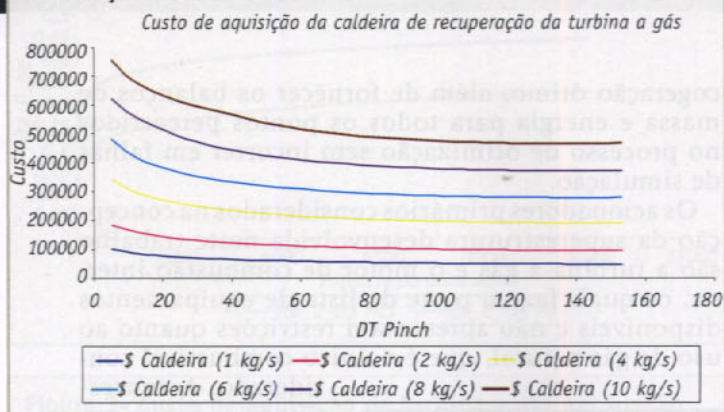
- ✓ Design moderno
- ✓ Fácil instalação
- ✓ Fabricado em plástico ABS
- ✓ Novo sistema de fixação
- ✓ Fácil limpeza
- ✓ Encaixe direto no duto flexível, sem necessidade de plenum

Fone/Fax: +55 (11) 3835-6600  
Rua Othão, 368 • São Paulo - SP  
vendas@multivac.com.br

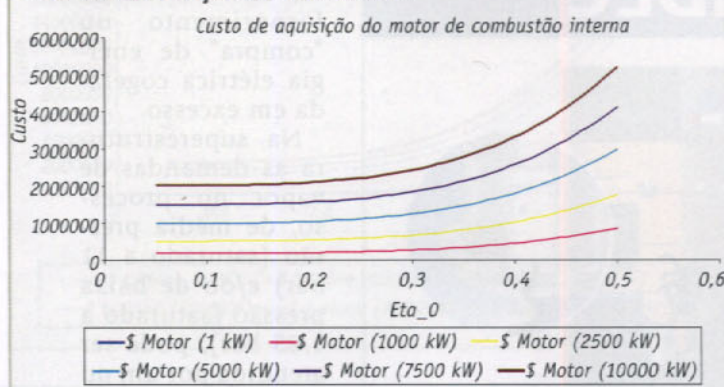


[www.multivac.com.br](http://www.multivac.com.br)

**Figura 4-Custo de aquisição da caldeira de recuperação em função do DT Pinch**



**Figura 5-Custo de aquisição do motor de combustão interna em função do rendimento**



de recuperação pode ser visto nas Figuras 3 e 4. O subsistema motor de combustão interna e caldeira de recuperação é mostrado nas Figuras 5 e 6; e o subsistema caldeira convencional conforme Figura 7.

#### Comentários finais

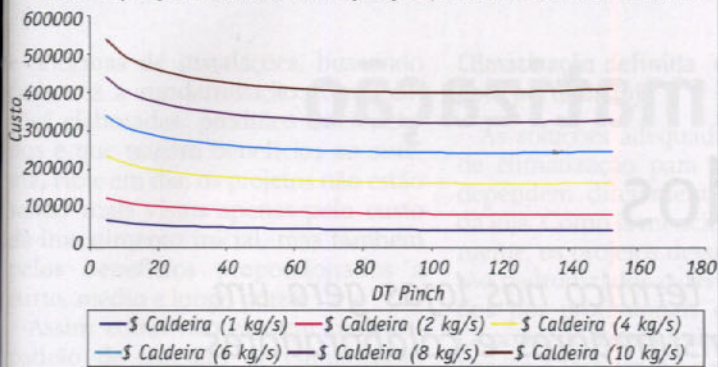
O objetivo fundamental deste trabalho, que é o desenvolvimento de uma superestrutura modelada em um simulador de processo, foi alcançado com sucesso utilizando o software IPSEpro. As curvas características dos sistemas tiveram um comportamento esperado, observam-se valores típicos de rendimentos para os acionadores em relação a potência desenvolvida, os custos dos acionadores foram compatíveis com os rendimentos nominais avaliados, assim como os custos das caldeiras tiveram um comportamento adequado em relação DT Pinch (para acionadores quanto maior o rendimento maior o custo e para as caldeiras quanto menor o DT Pinch maior o custo, devido uma maior área de troca de calor). A utilização do IPSEpro foi devido a existência de uma biblioteca de modelos programável, visto que a modelagem da superestrutura normalmente exige a inclusão de características específicas nos modelos existentes, bem como a criação de novos modelos. O simulador de processo utilizado possui interface gráfica bem desenvolvida, grande flexibilidade para a configuração de sis-

## Referências bibliográficas

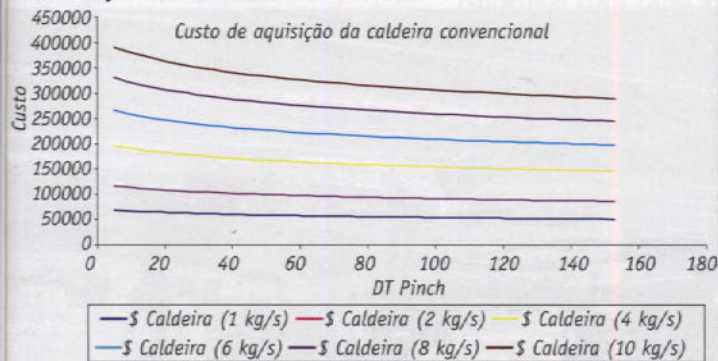
- ARAUJO, L. R., 2008, *Análise Comparativa da Otimização de Sistemas de Cogeração Através de um Método de Busca Direta e um Estocástico Utilizando Superestrutura e Simulador de Processo*, Dissertação de Mestrado, UFES, Brasil.
- ARAUJO, L. R., DONATELLI, J. L. M., SILVA, E. A. S., *Structural and Parametric Optimization of Cogeneration Power Plants Using Genetic Algorithm*. Proceeding of ECOS 2009.
- ARAUJO, L., DONATELLI, J. L. M., SILVA, E. A. S., *Comparative Analysis of Cogeneration Power Plants Optimization Based on Stochastic Methods Using Superstructure and Process Simulator*, Proceeding of COBEM 2009.
- ARAUJO, L., DONATELLI, J. L. M., SILVA, E. A. S., AZEVEDO, J. L. F., *Comparative Analysis of Cogeneration Power Plants Optimization by a Direct Search and a Stochastic Method Using Superstructure and Process Simulator*, Proceeding of ENCIT 2010.
- BALESTIERI, J. A. P., et al., 1999, "Metodologias para Análise de Sistemas Térmicos", In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (em CD-ROM)*, Águas de Lindóia-SP, Brasil, pp. 1~11.
- BALESTIERI, J. A. P., 2002, *Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor*, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, Brasil.
- BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M., 1996, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, EUA.
- BEJAN, A., MAMUT, E. (Editors), 1999, *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*, Kluwer Academic Publishers, Holanda.
- BOEHM, R. F., 1987, *Design Analysis of Thermal Systems*, John Wiley & Sons, New York, EUA.
- BOEHM, R. F., 1997, "Introduction and Trends in the Thermal Design Field", In: *Boehm, R. F. (ed.), Developments in Design of Thermal Systems*, Chapter 1, Cambridge University Press, UK.
- EL-SAYED, Y. M., 2003, *The Thermoconomics of Energy Conversions*, Elsevier, New York, EUA.
- JALURIA, Y., 1998, *Design and Optimization of Thermal Systems*, McGraw-Hill, New York, EUA.
- KOLANOWSKY, B. F., 2000, *Small-Scale Cogeneration Handbook*, The Fairmont Press Inc., Indian.
- NASCIMENTO, J. M. A., 2005, *Simulador Computacional para Poços de Petróleo com Método de Elevação Artificial por Bombeio Mecânico*, Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal.
- ORLANDO, J.A., 1991, *Cogeneration Planner's Handbook*, The Fairmount Press Inc., Indian.
- ORLANDO, J.A., 1996, *Cogeneration Design Guide*, ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, USA.
- PAYNE, F. W. (ed.), 1997, *Cogeneration Management Reference Guide*, The Fairmont Press Inc., Indian.
- SCIUBBA, E., MELLI, R., 1998, *Artificial Intelligence in Thermal Systems Design: Concepts and Applications*, Nova Science Publishers Inc., New York, EUA.
- SILVA, A. M. et al., 2002, "Simuladores para Análise de Projetos de Sistemas de Cogeração", In: *Anais do ENCIT2002 – IX Encontro Nacional de Engenharia e Ciências Térmicas*, ABCM – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, Caxambu-MG, Brasil, pp. 1~7.
- SIMTECH, 2000, *IPSEpro User Documentation -version 3.1*, SimTech Simulations Technology, Áustria.
- STOECKER, W. F., 1971, *Design of Thermal Systems*, McGraw-Hill, New York, EUA.
- STOECKER, W. F., 1989, *Design of Thermal Systems*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, EUA.
- SURYANARAYANA, N. V., ARICI, Ö., 2003, *Design and simulation of thermal systems*, McGraw-Hill, Boston, EUA.

**Figura 6- Custo de aquisição da caldeira de recuperação em função do DT Pinch**

Custo de aquisição da caldeira de recuperação do motor de combustão interna



**Figura 7- Custo de aquisição da caldeira convencional em função do DT Pinch**



temas e superestruturas, utilização de métodos matemáticos rápidos e robustos para simulação, atualização dos valores iniciais estimados para as variáveis e possibilidade de utilização de vários fluidos de trabalho e suas misturas.

O desenvolvimento da superestrutura no IPSEpro, ainda permitiu a otimização da superestrutura do sistema de cogeração, integrando uma rotina de otimização ao simulador de processo, conforme abordado em ARAUJO (2008), ARAUJO (2009) E ARAUJO(2010). Obviamente tornou-se indispensável uma integração adequada entre o simulador de processo e o programa de otimização, sendo esta rotina de otimização programa em Visual Basic no Microsoft Excel, devido a integração dinâmica entre o simulador IPSEpro e o Visual Basic no Microsoft Excel.

**Leonardo Rodrigues de Araujo**  
 Instituto Federal do Espírito Santo -  
 Coordenadoria de Mecânica  
 leoaraujo@ifes.edu.br

**EVACON**  
 25 anos com você

Tel: (11) 4059-0059  
 www.evacon.com.br

Distribuidor autorizado SONDEX  
 (Standard, Semi-soldadas e Free Flow)

- Aplicações:**
- Refrigeração
  - Químico
  - Farmacêutico
  - Alimentício
  - Pasteurização
  - Óleo e Gás
  - Metal-mecânica
  - Aquecimento
  - Açúcar



Distribuidor autorizado EMMEGI

- Aplicações:**
- Instalações e unidades hidráulicas
  - Injetoras
  - Máquinas de usinagem (retíficas, etc)
  - Compressores
  - Máquinas agrícolas (tratores, etc)
  - Veículos especiais (caminhões betoneiras, etc)



- Fluidos Compatíveis**
- Óleo Mineral
  - Água com Emulsão
  - Água com Glicol

**Refrigeração com qualidade**

- ✓ Condensador Casco e Tubo
- ✓ Evaporador Casco e Tubo
- ✓ Feixe do Evaporador
- ✓ Trocador de Calor Casco e Tubo
- ✓ Trocador de Calor Casco e Tubo Aletado
- ✓ Reservatório de Líquido (Horizontal/Vertical)
- ✓ Separador de Líquido
- ✓ Reservatório de Óleo.
- ✓ Trocadores Brasados (SWEP)
- ✓ Trocadores Gaxetados (SONDEX)
- ✓ Resfriador de Óleo a Ar (EMMEGI)

