

## ***XV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI 2002***

### **Metodologia e Software para Determinação da Viabilidade Expedida de Projetos de Cogeração**

**José A. S. Brito – COELBA, Vincenzo Mazzone, Roberto Pinho, Elias Catan, Frederico Wergne Araújo – UNIFACS.**

E-mail: [jbrito@coelba.com.br](mailto:jbrito@coelba.com.br)

**Palavras-chave** – Cogeração, Ciclo combinado, Ciclo simples de turbina a vapor, Ciclo simples de turbina a gás.

**Resumo** - Este artigo apresenta uma síntese da metodologia e descrição de um programa de computador para determinação da viabilidade de projetos de cogeração. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento da Coelba, Ciclo 2000-2001.

No contexto energético atual, que tende a valorizar fontes secundárias, confiáveis e ecologicamente adequadas com o objetivo de garantir o fornecimento de eletricidade de forma econômica e independente de flutuações conjunturais, a cogeração ocupa um espaço significativo.

As plantas que produzem calor para processo são, na grande maioria, tecnicamente aptas a gerar eletricidade, constituindo um notável potencial elétrico complementar ainda não aproveitado. Entretanto nem sempre os investimentos podem ser conciliados com o rápido retorno do capital investido.

Dáí o interesse de empreendedores e companhias concessionárias como a COELBA, em dispor, para fins estratégicos e de planejamento, de meios confiáveis e precisos, para avaliar o potencial e viabilidade de sistemas cogenerativos.

#### **1. INTRODUÇÃO**

O presente projeto foi formulado para apresentar respostas para perguntas como as seguintes:

É determinada planta apropriada para produzir eletricidade por cogeração?

Quais seriam os equipamentos necessários?

Quais as capacidades deles?

Quais os combustíveis?

Quais os novos consumos?

É tecnicamente possível a plena satisfação da demanda elétrica, permanecendo inalterada a demanda de calor?

Haverá eletricidade excedente a ser exportada ou insuficiente a ser comprada?

Qual será o investimento necessário?

É economicamente viável o empreendimento?

Qual a taxa interna de retorno do capital investido?

Quais são as alternativas possíveis, qual o grau de atratividade de cada uma delas?

Outras questões são avaliadas, como por exemplo as alterações a serem introduzidas num sistema convencional, as vazões e parâmetros operacionais dos fluidos envolvidos (combustíveis, gases, água, vapor), elementos básicos de dimensionamento dos equipamentos necessários.

Foram previstas as seguintes duas fases principais de estudo:

Criar a metodologia para a determinação de soluções cogenerativas básicas, técnica e economicamente viáveis, contemplando sistemas de ciclo simples e combinado, dentro do limite de potência (eletro-mecânica) de 25 MW.

Desenvolver programa computacional do tipo interface gráfica, de fácil aplicação e uso, implementando a metodologia concebida.

Foi também estabelecido que o programa se limitasse a tratar da grande maioria dos casos que se apresentam na prática, sem todavia abranger estudos especializados de engenharia básica mais apropriados a estágios avançados de projeto.

Optou-se então por delimitar o escopo do trabalho a nove modelos típicos de plantas que, admitindo uma larga faixa de variação de parâmetros, pudessem cobrir amplo campo de soluções, e apresentassem condição de satisfazer as exigências de qualquer usuário não necessariamente especialista, mas razoável conhecedor do assunto.

Os sistemas escolhidos se referem a plantas industriais de potência elétrica compreendida entre 1500 e 25000 kW, e com capacidade utilizada superior a 5000 horas por ano.

Foram incluídas as plantas de ciclo combinado condensante, ou seja plantas propriamente termoelétricas que em princípio são cogenerativas (o calor, ao invés de ir para o processo, é utilizado para gerar mais eletricidade), mas que, por extração, podem fornecer algum vapor necessário ao processo. Estas últimas plantas, dispendo de uma turbina a vapor condensante além da turbina a gás, poderão gerar uma potência elétrica total bem maior que a potência de 25000 kW admitida como máximo para a turbina a gás.

Foram considerados sistemas de turbina a gás e/ou a vapor, apresentando tipicamente relações kW<sub>term</sub>/kW<sub>el</sub> entre 0/1 e 6,5 /1. Para situações onde as soluções

cogerativas não permitem a paridade elétrica, esta é obtida acrescentando eletricidade importada, ou subtraindo eletricidade exportada, à eletricidade realizável calculada pelo programa.

Não obstante a preferência para o uso do gás natural como combustível, foi admitido o uso, quando aplicável, de qualquer outro combustível, como por exemplo o óleo leve das turbinas a gás e o bagaço de cana das usinas sucro-alcooleiras.

Em resumo, o escopo do projeto foi de criar metodologia, desenvolver um programa de computador, comprovar sua capacidade de obter os resultados propostos e, enfim, permitir a fácil utilização de tal capacidade.

Tal programa, do ponto de vista estratégico da COELBA, representa uma útil ferramenta a fim de conhecer o potencial cogenerativo dos consumidores industriais, definir políticas de comercialização de excedentes de energia, otimizar os investimentos em áreas críticas do sistema elétrico e prestar serviços na área de cogeração.

O software, incluindo explicações e instruções de uso, poderá ser divulgado ou comercializado em benefício de outras empresas de distribuição de eletricidade, consultores, universidades e consumidores industriais. Para o usuário em geral, não necessariamente especialista, poderá constituir um guia nos procedimentos de cálculo e reduzir o trabalho de vários dias para poucas horas, minimizando as possibilidades de erro.

## **2. METODOLOGIA ADOTADA NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

A metodologia adotada incluiu:

- Pesquisa e revisão de literatura relevante.
- Definição e análise dos casos específicos em suas peculiaridades e variedades.
- Compilação de bancos de dados para turbinas a gás.
- Análise de custos médios de equipamentos e de insumos (alteráveis no programa).
- Construção e concatenação de algoritmos de modo a constituir um conjunto funcional para cada equipamento e modelo cogenerativo.
- Programação lógica e digital. O software, desenvolvido inicialmente em "MS Excel", após as devidas verificações e correções foi convertido para "Visual Basic".
- Testes e devidos aperfeiçoamentos.
- Elaboração do Manual de uso do Programa.

## **3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE PROJETOS COGENERATIVOS**

Para desenvolvimento de uma metodologia e correspondente programa de computador com o objetivo de avaliar a viabilidade de projetos de cogeração, foram

considerados 3 tipos de sistemas cogenerativos, baseados em: 1) ciclo simples de turbina a vapor, 2) ciclo simples de turbina a gás, 3) ciclo combinado de turbina a gás e turbina a vapor.

### **1) Ciclo Simples - Turbina a Vapor**

- Turbina a Vapor TV - Caldeira primária convencional. Turbina a vapor de contrapressão. Vapor superaquecido para turbina, saturado para processo.
- Turbina a Vapor TV2N - Caldeira primária convencional. Desaerador. Turbina a vapor condensante com extrações em 2 níveis para processo.

### **2) Ciclo Simples - Turbina a Gás**

- Turbina a Gás TG - Caldeira de recuperação com pós-combustão. Vapor saturado para processo. Controle de temperatura (baixa) na entrada do preaquecedor. Controle do pinch-point.
- Turbina a Gás TG2N - Caldeira de recuperação com pós-combustão, dois níveis de pressão. Vapor saturado de baixa pressão e vapor de alta pressão (superaquecido ou não) para processo. Com ou sem desaerador, com ou sem superaquecedor. Controle de temperatura (baixa) na entrada do preaquecedor.
- Turbina a Gás TGB - Caldeira de recuperação com pós-combustão. Desaerador. Vapor superaquecido para o processo. Controle de temperatura (alta-baixa) na entrada do preaquecedor. Controle do pinch-point.

### **3) Ciclo Combinado**

- Ciclo Combinado CC - Turbina a gás. Caldeira de recuperação com pós-combustão. Turbina a vapor de contrapressão. Vapor superaquecido para turbina, saturado para processo. Controle de temperatura (alta-baixa) na entrada do preaquecedor. Controle do pinch-point.
- Ciclo Combinado CC2N - Termoelétrica - Turbina a Gás, 2 níveis. Caldeira de recuperação com pós-combustão, dois níveis de pressão. Turbina a vapor condensante. Controle de temperatura (baixa) na entrada do preaquecedor. Controle do pinch-point.
- Ciclo Combinado CCA - Turbina a gás. Caldeira de re-cuperação com pós-combustão. Sem desaerador (até 30 bar). Turbina a vapor de contrapressão, vapor saturado para processo.
- Ciclo Combinado CCB - Turbina a gás. Caldeira de recuperação com pós-combustão. Com desaerador. Turbina a vapor condensante. 1 Extração de vapor saturado (ou não) para o processo.

A metodologia e programas propostos apresentam os seguintes recursos e características inovadoras:

- O programa apresenta inicialmente gráficos de plantas que podem incluir caldeiras convencionais e de recuperação de calor com ou sem combustão suplementar, com ou sem pré-aquecedor de alimentação e superaquecedor, turbinas a vapor com ou sem extrações, desaeradores e condensadores, turbinas a gás ou motores de combustão interna.
- A partir de “inputs” básicos relativos ao combustível a ser usado (comercial ou biomassa), são calculados a combustão, a composição dos gases e o conteúdo de calor em função das temperaturas.
- São feitos os devidos balanços e fornecidos todos os dados úteis relativos aos fluxos dos diversos fluidos.
- São fornecidos os dados relativos à transmissão do calor no interior das caldeiras convencionais e de recuperação de calor com posição do pinch-point, permitindo uma fácil representação gráfica.
- São calculadas as eficiências de turbinas, caldeiras e ciclos.
- São especificados excedentes ou insuficiência de potência elétrica gerada.
- Quando necessário, em função dos dados do problema, é sugerida uma turbina a gás genérica e, posteriormente, uma turbina a gás real é adaptada às condições operativas locais, que pode ser escolhida em banco de dados disponível.
- É calculado o consumo de combustível e o custo da eletricidade produzida (também incidindo a operação). É feita a comparação com o sistema não cogenerativo. É indicada a economia realizável.
- É avaliado o investimento e taxa interna de retorno (TIR) do capital em função do tempo de amortização.
- É verificado o atendimento aos requisitos mínimos de racionalidade energética estabelecidos pela ANEEL.

#### **4. RESULTADOS ALCANÇADOS**

Todos os resultados esperados foram alcançados de forma satisfatória.

Para isso, uma numerosa série de problemas teve que ser analisada e resolvida. São destacados a seguir apenas os principais.

Eles exigiram estudo aprofundado, adequado tratamento matemático e execução de testes operacionais antes que cada procedimento pudesse ser introduzido no programa de maneira confiável.

##### ***4.1. Combustão e gases produzidos. Temperatura – calor e vice-versa.***

A combustão de qualquer combustível conhecido pode ser obtida sem dificuldade, mas a necessidade de dispor da temperatura de uma mistura qualquer de gases resultantes conhecendo-se o calor contido, ou então dispor do calor contido em função da temperatura, obrigou a criar equações adequadas.

Elas foram obtidas por integração das conhecidas equações do calor específico a pressão constante relativas a cada gás. Os resultados produzidos pelo programa são agora imediatos e de notável precisão.

##### ***4.2. Vapor d'água saturado úmido, seco e superaquecido.***

A preferência pelo uso de equações ao invés da pouco prática consulta dos diagramas de Mollier ou do uso de banco de dados (tabelas do vapor d'água) levou a estudar e desenvolver rotinas de programa baseadas nas equações originais do próprio Mollier.

As várias sub-rotinas obtidas e amplamente testadas no campo de valores aplicáveis às caldeiras e às turbinas a vapor possibilitam a resolução de qualquer problema, com resultados decididamente satisfatórios.

##### ***4.3. Turbinas a vapor. Rendimentos. Extrações.***

O problema da avaliação preliminar do rendimento de uma turbina a vapor, não dispondo de catálogo ou informações do fabricante, não é de fácil solução. Foi decidido fazer referência aos diagramas estatísticos de De Laval, incluídos no programa.

O próprio programa, baseando-se neles, sugere valores aproximados de rendimento, mas o usuário pode adotar qualquer valor julgado mais adequado ou correto.

Qualquer número e nível de extrações de vapor da turbina pode ser calculado pelo programa.

Para se conseguir valores suficientemente satisfatórios de temperatura em função da pressão ou vice-versa foi necessário utilizar e adaptar as rotinas de programa citadas anteriormente.

##### ***4.4. Turbinas a gás. Dimensionamento da Turbina genérica. Adaptação da Turbina real às condições de trabalho.***

Um estudo particularmente novo e preciso foi necessário para que o programa pudesse sugerir e calcular os dados básicos de uma turbina a gás genérica operando em condições ambientais locais.

Essa turbina genérica, capaz de satisfazer às exigências do caso em exame, e operando a 100% de sua capacidade local, deveria representar um paradigma útil para a escolha de uma turbina real presente (disponível em catálogo interno) ou futura.

O procedimento adotado, partindo de poucos indispensáveis inputs de valor médio, apresentou na prática resultados de alto grau de aproximação.

Com procedimento parecido ao adotado para a turbina genérica, a adaptação de uma turbina real escolhida em catálogo não se revelou mais laboriosa e não apresentou dificuldades em particular.

#### **4.5. Avaliação do provável custo da planta.**

Para conseguir uma razoável avaliação preliminar do capital envolvido no investimento relativo aos vários tipos de planta, foi necessário recorrer às poucas informações disponíveis na literatura internacional consultada e diagramar valores dentro dos limites estabelecidos preliminarmente.

Os diagramas foram substituídos por equações. O usuário, entretanto é livre para alterar os valores sugeridos em US\$ (atualizados ano 2000) com valores estimados em US\$ ou R\$, adaptados à maior ou menor sofisticação da planta e ao mercado nacional.

Como afirmado anteriormente, o programa desenvolvido confirmou as expectativas e pode-se dizer que constitui um conjunto orgânico funcional e de operação agradável.

Testes teóricos exaustivos e testes práticos aplicados a casos reais foram executados.

Resultados satisfatórios foram obtidos analisando empresas existentes potencialmente cogeneradoras: 1 empresa petroquímica, 1 empresa petrolífera, 1 fábrica têxtil, 1 fábrica de pneus, 2 fábricas de cerâmica, 1 fábrica de óleo e sabão e 5 usinas sucro-alcooleiras.

## **5. PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA DETERMINAÇÃO EXPEDITA DA VIABILIDADE DE PROJETOS DE COGERAÇÃO**

O programa de computador para determinação expedita da viabilidade de projetos de cogeração, intitulado Firefly, aplica a metodologia exposta.

Trata-se de um programa simples de usar, para aqueles familiarizados com as questões relativas aos sistemas cogenerativos, oferecendo resultados rápidos com um mínimo de dados necessários à apresentação de dados significativos.

O Firefly permite o armazenamento, alteração de cálculos identificados por uma descrição. A criação de um cálculo se dá através da seleção de um dos modelos de cada um tipos de sistemas cogenerativos descritos anteriormente.

A tela de Cálculos é a primeira tela apresentada no sistema.

Os diagramas dos modelos estão disponíveis para consulta e impressão através da ajuda do sistema e também a partir da tela de criação de novo cálculo, apresentada quando é pressionado o botão + na tela inicial.

Quando é selecionado um modelo para criação de um novo cálculo, o mesmo vem já preenchido, com valores típicos, que podem ser aceitos para exames superficiais, e servem também como parâmetro de referência no momento em que são cadastrados dados específicos de um problema.

A entrada e saída de dados dos cálculos foi dividida nas seguintes páginas:

### **5.1. Combustível**

Esta página permite selecionar o combustível a ser usado no modelo corrente. Ela permite também introduzir um novo combustível a partir do peso ou volume dos seus componentes.

Ela calcula ar estequiométrico, ar efetivo e gases resultantes da combustão. Para os gases de combustão, calcula o calor contido em função da temperatura ou temperatura em função do calor contido.

Cada combustível poderá ser utilizado como combustível atual para um determinado modelo e, posteriormente, para outros modelos.

### **5.2. Condições Ambientais**

Esta página permite definir a localidade e fixar as condições ambientais do local onde o modelo corrente está ou será instalado.

É permitido também cadastrar os dados relativos a uma nova localidade, que poderão ser usados em qualquer um dos modelos.

### **5.3. Necessidades**

Nesta página devem ser indicados os dados básicos de projeto. Assim como as demais páginas, ela vêm preenchida com valores adequados a um caso escolhido a título de exemplo. Os valores devem ser alterados conforme o necessário.

### **5.4. Condições Operacionais**

Nesta página devem ser indicadas as condições operacionais do projeto.

### **5.5. Dados básicos e Primeiros Resultados ( ou Dados básicos e Resultados )**

Para os modelos que possuem turbina a gás, são apresentados os dados básicos de projeto e os primeiros resultados.

Também nesta página, devem ser determinados o valor do calor contido (Qg) e do calor total introduzido (Qd), por tentativas. É especificada uma turbina a gás genérica de capacidade adequada. Para os modelos que possuem apenas turbina a vapor, são apresentados os dados básicos e os resultados finais.

### **5.6. Turbina a Gás Real (apenas para os modelos com turbina a gás).**

Nesta página deve ser escolhida uma turbina a gás do catálogo, similar à turbina genérica e deve ser feita a equalização entre o calor total e o calor disponível necessário.

A navegação entre páginas é sempre feita com o uso dos botões apresentados na figura 1, sempre disponíveis na mesma posição da tela, facilitando o aprendizado do sistema.



FIGURA 1  
BOTÕES DE NAVEGAÇÃO

O botão apresentado na figura 2 é sempre utilizado para indicar que o programa fará uma tentativa de obtenção de valores de entrada aceitáveis ou equalizados.



FIGURA 2  
BOTÃO TENTATIVA

Ele é usado também para sugerir uma turbina real a partir da turbina genérica calculada. Esta seleção, no entanto é preliminar e não significa que a melhor turbina disponível foi escolhida.

Os resultados finais do programa são apresentados no programa, e podem, também ser exportados para planilhas no formato Microsoft Excel.

Alguns cálculos, como o de avaliação do investimento e retorno de capital são feitos exclusivamente nas planilhas de saída, em Excel.

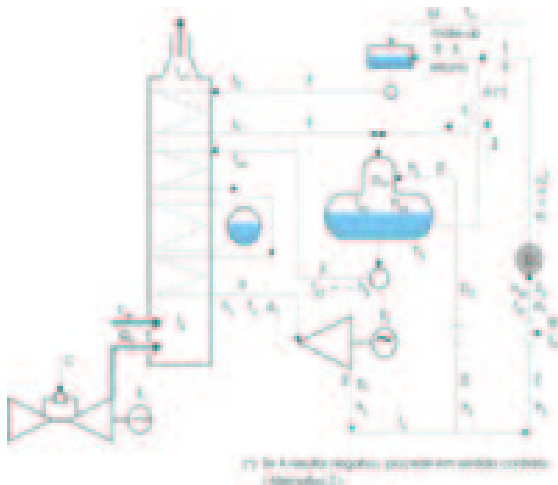
Esta solução foi adotada, pois dá maior liberdade ao usuário para trabalhar com os resultados obtidos, incluindo-os em outros documentos, enviando-os por correio eletrônico, e particularmente para os estudos econômicos, adaptá-los à sua realidade.

## 6. TELA DE AJUDA DO PROGRAMA – EXEMPLO

Este exemplo apresenta uma tela de ajuda do programa para utilização do Ciclo Combinado CC, cujas características são apresentadas a seguir:

### CICLO COMBINADO CC

Caldeira de recuperação com pós-combustão. Turbina a vapor de contrapressão. Vapor superaquecido para turbina, saturado para processo. Controle de temperatura (alta-baixa) na entrada do preaquecedor. Controle do pinch-point.



Neste modelo são utilizadas as seguintes páginas(veja também as Notas Explicativas) :

- 1) Combustível,
- 2) Condições Ambientais,

- 3) Necessidades,
- 4) Condições Operacionais,
- 5) Dados básicos e Primeiros Resultados,
- 6) Turbina a Gás Real.

### Notas Explicativas

Neste modelo se presume que o combustível usado tanto pela turbina a gás quanto pela combustão suplementar (pós-combustão), seja o mesmo.

Suas características são levadas em conta nos cálculos. Pode ser gasoso ou líquido. No raro caso em que o combustível usado para a pós-combustão seja diferente daquele usado para a turbina, a eficiência da caldeira praticamente não muda, portanto valem os cálculos feitos com o mesmo combustível da turbina.

Bastará, no fim, substituir o consumo do combustível utilizado para a pós-combustão pelo equivalente (em poder calorífico) do combustível verdadeiro.

Na avaliação econômica será ser levado em conta o custo dos dois combustíveis.

## 7. CONCLUSÕES

Como principal conclusão do trabalho, pode-se destacar que a pesquisa resultou em metodologia e programa de computador que possibilita estabelecer de forma expedita a viabilidade de projetos de cogeração enfatizando, no entanto, os aspectos práticos de plantas cogenerativas de ciclo simples e de ciclo combinado até o limite de 25 MW.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “De Laval engineering handbook”
- [2] “Diesel and gas turbine Worldwide Catalog”
- [3] “General Electric - Gas turbine reference library”
- [4] “Geração de vapor, sistemas de potência e refrigeração e recuperação de calor – IPT”
- [5] “Means - Mechanical cost data”
- [6] Annaratone, Donatello. “Generatori di vapore”
- [7] Babcock & Wilcox Co. “Steam, its generation and use” - 40th edition - Babcock & Wilcox Co.
- [8] Bathie, William W. “Fundamentals of gas turbines”
- [9] Boehm, Robert F. “Design analysis of thermal systems”
- [10] Ganapathy, V. “Waste heat boiler deskbook”
- [11] IDAE. “Cogeracion 88 - Comunicaciones - Jornadas Técnicas”. IDAE, 1988.
- [12] IDAE. “Cogeracion 88 – Ponencias - Jornadas Técnicas”. IDAE, 1988.
- [13] Kehlhofer, Rolf H. “Combined-cycle gas and steam turbine power plants”.
- [14] Kern, Donald Q. “Process heat transfer”

- [15] Mazzone, Vincenzo; Hayashi, Thamy. “Noções de Cogeração de Ciclo Simples e Combinado”. UFBA, 1997
- [16] Nashchokin, V. “Engineering thermodynamics and heat transfer”
- [17] Orlando, Joseph A. “Cogeneration planner’s handbook”.
- [18] Osbourne, Alan. “Modern marine engineer’s manual”
- [19] Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W.T.; Flannery, B. P. “Numerical Recipes in C : the art of scientific computing”. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1996.
- [20] Schegláiev, A.V. “Turbinas de vapor”
- [21] Shepherd, D. G. “Principles of turbomachinery”
- [22] Thumann, Albert; Metha. D. Paul. “Handbook of energy engineering”