

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Cogeração para geração de eletricidade e condicionamento de ar  
utililizando solução de H<sub>2</sub>O-LiBr como fluido de trabalho.**

**Trabalho de formatura apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para a obtenção do  
título de Graduação em Engenharia**

**Marcelo Martinelli Amorim**

**Orientador: Sílvio de Oliveira**

**São Paulo**

**2002**

## SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>Introdução</u>	4
<u>2</u>	<u>Cogeração</u>	5
2.1	<u>Definição</u>	5
2.2	<u>Por quê avaliar unidades de cogeração: vantagens</u>	5
2.3	<u>Equipamentos utilizados em instalações de cogeração</u>	6
2.4	<u>Instalações Típicas de Cogeração</u>	6
2.4.1	<u>Ciclo de cogeração com turbinas a vapor</u>	6
2.4.2	<u>Ciclos de cogeração com turbinas a gás</u>	7
2.4.3	<u>Cogeração com ciclo combinado</u>	8
2.4.4	<u>Ciclos de cogeração com motores alternativos de combustão interna</u>	9
2.4.5	<u>Ciclos de cogeração com produção de frio</u>	10
2.5	<u>Novo contexto: oportunidades novas</u>	10
2.6	<u>Principais barreiras atuais à cogeração no Brasil</u>	11
2.7	<u>Candidatos Naturais para Cogeração</u>	12
2.8	<u>Condições Escolhidas</u>	13
<u>3</u>	<u>Refrigeração por Absorção</u>	14
3.1	<u>Introdução e nota histórica</u>	14
3.2	<u>Aspectos gerais do sistema</u>	14
3.3	<u>O ciclo de absorção</u>	15
3.4	<u>Tipos de sistemas de absorção</u>	16
3.5	<u>Ciclo de absorção com trocador de calor</u>	17
3.6	<u>Sistema de duplo efeito</u>	18
3.7	<u>Coeficiente de Eficácia de um Ciclo de Absorção Ideal</u>	18
3.8	<u>Configuração de Unidades de Absorção Comerciais</u>	20
3.9	<u>O Papel de Unidades de Absorção na Prática de Refrigeração</u>	22
3.10	<u>Conclusão</u>	22
<u>4</u>	<u>Turbinas a gás</u>	24
4.1	<u>Introdução e nota histórica</u>	24
4.2	<u>Aspectos Gerais</u>	26
4.3	<u>Terminologia</u>	28
4.4	<u>Tipos de Turbinas</u>	29
4.5	<u>Eficiência do ciclo</u>	30
4.6	<u>Desenhos e esquemas de uma turbina ( GE LM 6000 ) – ref 18</u>	32
4.7	<u>Conclusões</u>	34
<u>5</u>	<u>Modelo</u>	35
5.1	<u>Introdução e dados de entrada</u>	35
5.2	<u>Modelo do Sistema de Absorção</u>	36
5.2.1	<u>Sistema de Absorção</u>	36
5.2.2	<u>Sistema de Absorção com Trocador de Calor</u>	38
5.3	<u>Modelo do Sistema de Potência com caldeira de recuperação</u>	41
5.4	<u>Modelo do Sistema de Cogeração com Sistema de Refrigeração</u>	43

<u>5.5</u>	<u>Resultados</u>	44
5.5.1	<u>MS6001 Nuevo Pignone</u>	44
5.5.2	<u>Turbina LM6000 da GE</u>	46
5.5.3	<u>Turbina LM5000 da GE</u>	47
<u>6</u>	<u>Conclusão</u>	50
<u>7</u>	<u>Bibliografia</u>	52
<u>8</u>	<u>Anexos</u>	54
8.1	<u>Anexo 1 (Telas do Aplicativo)</u>	54
8.2	<u>Anexo 2 (Funções e rotinas do Aplicativo)</u>	56
8.2.1	<u>Funções para o calculo das propriedades termodinâmicas do vapor d'água</u>	56
8.2.2	<u>Funções para apresentação dos dados da Planilha</u>	64

## **1 Introdução.**

Como objetivo deste trabalho pretendo apresentar modelo de cogeração com necessidade de produção de frio para um shopping center.

Inicialmente farei uma apresentação de conceitos importantes para compreensão geral do tema. Em primeiro lugar os relacionados com o tema cogeração, seguido de apresentações mais específicas de turbinas a gás e refrigeração por absorção, justificando minhas escolhas e forma de tratamento do tema.

Pretendo modelar o sistema de potência, e uma máquina de refrigeração por absorção com solução de  $H_2O/LiBr$  procurando tratar estes sistemas como caixas pretas para mais tarde num apanhado completo avaliar seus parâmetros de desempenho globais.

A análise de cada um destes sistemas isoladamente serve para enxergar os parâmetros de entrada e as equações que regem seu funcionamento de maneira mais clara e objetiva, analisando seu desempenho individual para depois avaliar até onde este influencia no desempenho global.

Pretendo avaliar os modelos fazendo simulação.

## 2 Cogeração

### 2.1 Definição

Cogeração é a tecnologia de geração simultânea de mais de uma forma de energia, cito energia eletro-mecânica, calor e frio, a partir de uma única fonte energética com objetivo principal de conseguir eficiências globais de conversão da energia bastante elevada, em torno de 70-90%.

Fazendo comparativo com outras alternativas de geração:

- ✓ Usinas termelétricas em ciclo combinado – eficiência de geração elétrica - 55%.
- ✓ Usinas termelétricas com turbinas a gás em ciclo aberto – eficiência de geração elétrica entre 35-40%.
- ✓ Motores a gás em ciclo bi-combustível ou ciclo Otto – eficiência de geração elétrica da ordem de 40%.

### 2.2 Por quê avaliar unidades de cogeração: vantagens

Considero diversos aspectos ao pensar numa instalação de cogeração. Em primeiro lugar as vantagens.

Aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica para o usuário final, conseguir uma opção de geração descentralizada realizada através de implementação mais próxima aos centros de carga, e reduzir investimentos em geração, transmissão e distribuição de eletricidade, são algumas delas. Não podemos menosprezar que o uso mais eficiente de energia se traduz num menor consumo específico de energia junto com uma redução da emissão de poluentes atmosféricos.

Em geral, em grandes centrais de cogeração industrial, existe a possibilidade de consumo mais regular de gás natural, o que torna estas centrais menos vulneráveis do que as termelétricas à sazonalidade do sistema elétrico brasileiro.

## 2.3 Equipamentos utilizados em instalações de cogeração

Numa instalação construída para cogerar podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos, como motores alternativos de combustão interna, que são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível em energia mecânica através do acionamento de pistões confinados em cilindros; turbinas a gás, que são equipamentos constituídos por compressor, câmara de combustão e a turbina de expansão; turbinas a vapor que são máquinas que convertem a energia térmica do vapor em energia mecânica para acionamentos; e/ou para a produção de frio se utilizam equipamentos frigoríficos com ciclo de absorção.

Vale a pena mencionar também a possibilidade de se utilizar caldeiras para a queima de combustíveis e produção de vapor, e caldeira para recuperação de calor, destinada ao aproveitamento do calor residual de algum sistema ou processo. Trocadores de calor tipo gás-líquido, gás-gás e líquido-líquido são amplamente utilizados em instalações térmicas industriais de cogeração.

Outros equipamentos auxiliares podem vir a ser utilizados, como, motores auxiliares, sistemas de tratamento de água e efluentes, ar comprimido e outros.

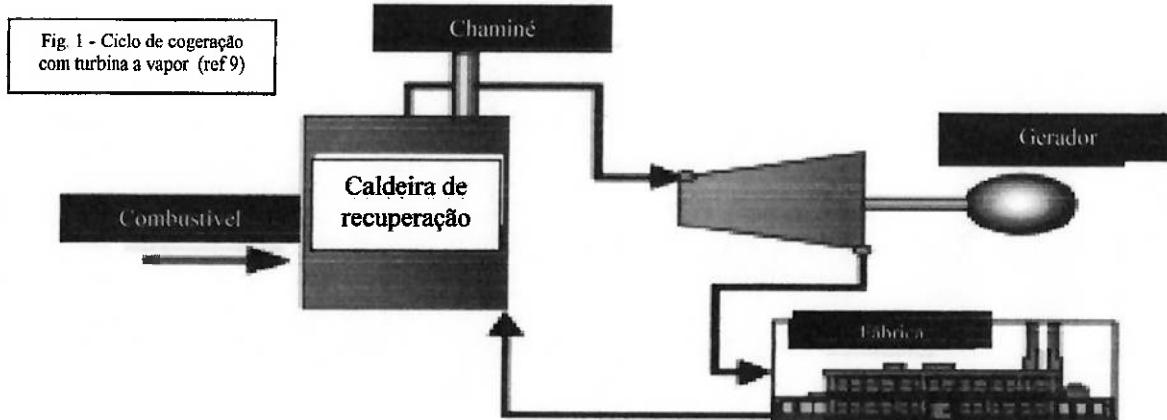
## 2.4 Instalações Típicas de Cogeração

### 2.4.1 Ciclo de cogeração com turbinas a vapor

Turbinas a vapor podem ser de contrapressão com eventual extração, dependendo da demanda de vapor ou de extração e condensação, solução mais flexível que permite variação na relação eletricidade/vapor. Esse ciclo de cogeração permite a utilização de combustíveis como resíduos industriais, carvão, lenha, bagaço de cana, etc, que podem contribuir para um preço mais acessível na geração de energia.

A energia térmica resultante da combustão é transferida, através de caldeira, para a água que vaporiza e superaquece. O vapor superaquecido é expandido em uma turbina que aciona uma carga mecânica (ou gerador elétrico). O vapor é extraído na saída da turbina, nas condições de temperatura e pressão requeridas para o processo que utiliza este calor útil.

Geralmente o fluido é devolvido à caldeira no estado de condensado para re-inicializar o ciclo de transferência de energia. Na figura 1 podemos ver um exemplo deste tipo de aplicação.



#### 2.4.2 Ciclos de cogeração com turbinas a gás

Uma turbina pode ser classificada em turbina de ação, reação ou turbina de ação e reação. A maior parte das turbinas encontra-se em funcionamento como motores aeronáuticos ou então em redes públicas de geração elétrica.

Nos equipamentos utilizados na indústria, que tem como origem em geral equipamentos derivados de turbinas a gás aeronáuticas, ou turbinas a gás industrial projetado com este uso específico, podemos ter em suas saídas os gases de exaustão apresentando uma temperatura relativamente elevada.

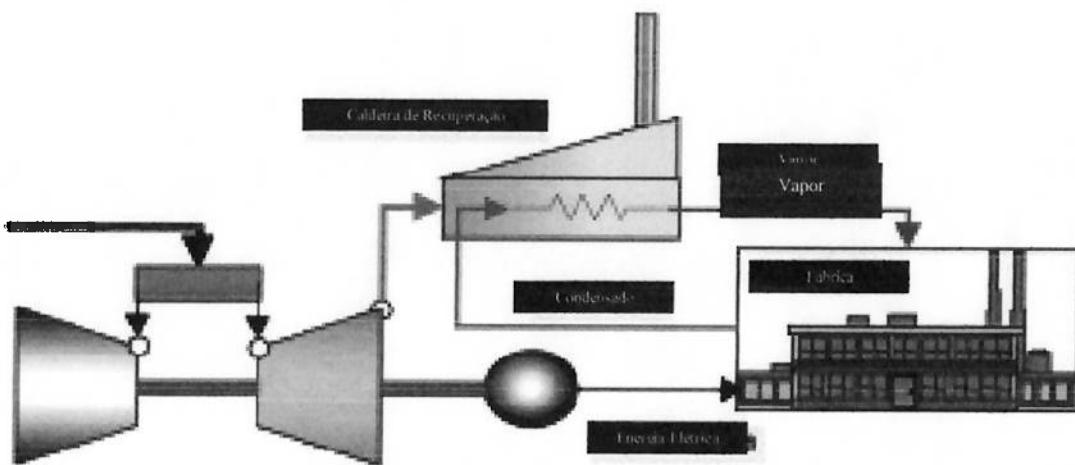
Estes gases possuem um elevado conteúdo energético, da ordem de 50 a 70% da energia contida no combustível.

Cogerar neste caso é aproveitar parte desta energia térmica. Conforme a carga térmica, o aproveitamento pode ser maior ou menor. Os processos que utilizam temperaturas mais baixas podem aproveitar mais energia residual dos gases de exaustão.

Através de uma caldeira de recuperação podemos gerar vapor, aquecer fluido térmico, condicionar de ambientes, etc.

A figura seguinte mostra uma instalação de cogeração onde uma turbina a gás aciona um gerador que produz energia elétrica que alimenta a fábrica que hospeda a instalação. Os gases quentes da saída da turbina produzem vapor em uma caldeira de recuperação que alimenta a fábrica com esta utilidade.

Fig. 2 - Ciclo de cogeração com turbina a gás (ref 9)



#### 2.4.3 Cogeração com ciclo combinado

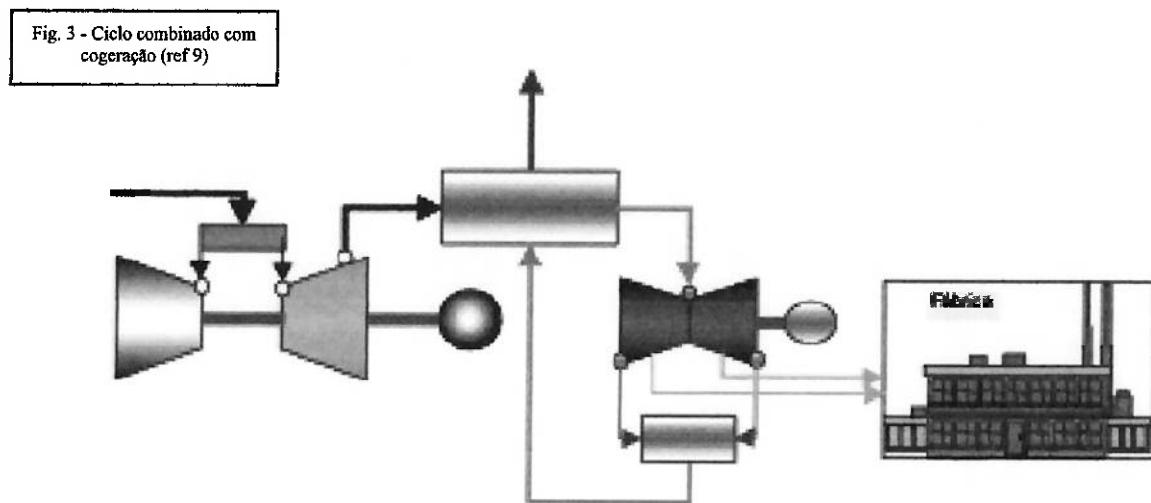
O ciclo combinado é o processo de produção de energia elétrica utilizando turbinas a gás e turbinas a vapor. O combustível é queimado em uma turbina a gás e a energia contida nos gases de exaustão produz vapor em uma caldeira de recuperação. O vapor da caldeira de recuperação aciona uma turbina a vapor de condensação.

Tanto a turbina a gás quanto a turbina a vapor acionam geradores para produção de energia elétrica, que é a única forma de energia útil retirada do sistema.

Este ciclo prioriza a eficiência de conversão da energia do combustível para a energia elétrica. As grandes instalações em ciclo combinado atingem atualmente eficiências superiores a 55%.

A cogeração com ciclo combinado é utilizada nas situações em que se deseja produzir energia elétrica e energia térmica útil em quantidades variáveis de acordo com as cargas consumidoras ou para atendimento de mercados específicos. Constituída

basicamente de um ciclo combinado com flexibilização da geração elétrica e de energia térmica (normalmente vapor) através da extração de vapor na turbina a vapor, condensação parcial, ou queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação. Existem plantas tão flexíveis que podem operar desde a produção máxima de energia elétrica sem extração de vapor para o processo industrial até a produção máxima de vapor para processo sem produção de energia elétrica.



Outra forma de cogeração deste tipo é aquela em que os acionamentos são de equipamentos mecânicos (bombas, compressores, etc.) ao invés de geradores elétricos.

Como estou considerando instalações aonde a produção de vapor e energia não precisa de tamanha flexibilidade, o custo de construção deste tipo de alternativa pode não ser o melhor. Em princípio não considero utilizar esta alternativa no meu trabalho, mas julguei digno de nota apresenta-la por ser uma forma de cogeração interessante em casos aonde a flexibilidade da necessidade seja requisito essencial.

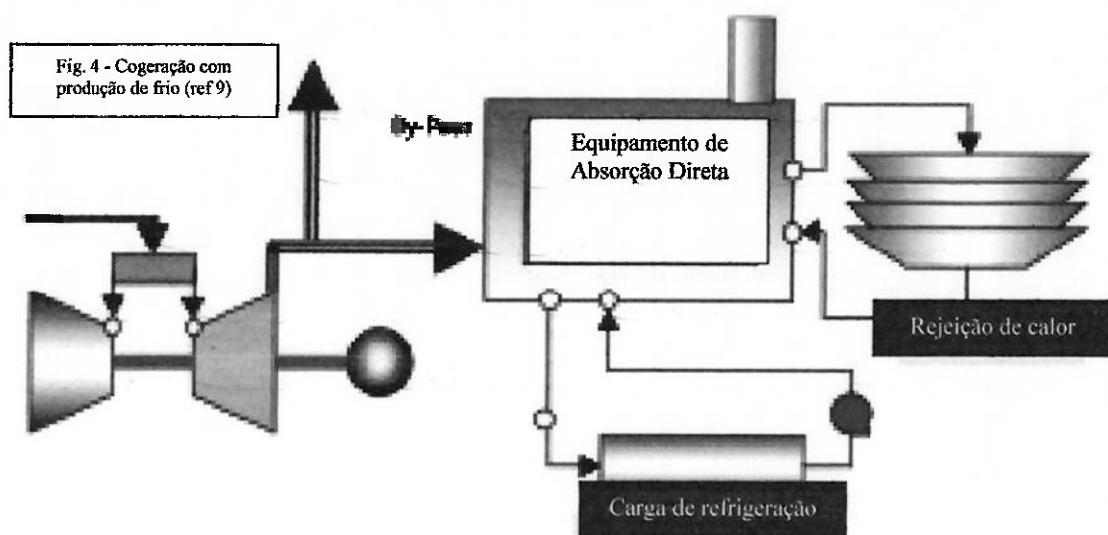
#### 2.4.4 Ciclos de cogeração com motores alternativos de combustão interna

Este ciclo de cogeração utiliza motores alternativos de combustão interna produzindo trabalho e devido à quantidade de energia residual recuperada não ser das mais expressivas, não entraremos em detalhes.

#### 2.4.5 Ciclos de cogeração com produção de frio

Os mercados potenciais para este ciclo são: os hospedeiros da planta de cogeração, que necessitam, além da energia elétrica, de condicionamento ambiental ou sistema de refrigeração.

Os equipamentos ideais para este uso são os resfriadores por absorção. A figura a seguir ilustra algumas aplicações deste tipo.



Os equipamentos de absorção são produzidos industrialmente para capacidades de 10 até cerca de 2.000 toneladas de refrigeração por hora. São comuns os de um e de dois estágios.

#### 2.5 Novo contexto: oportunidades novas

Pode-se considerar que diversos fatores ocorridos recentemente contribuem para uma mudança de cenário bastante positiva para quem queira considerar utilizar cogeração.

A abertura do mercado de energia elétrica altera as perspectivas do cogerador. A remoção de barreiras monopolistas à comercialização de energia, bilateralmente, entre o cogerador e o mercado e a introdução de novos agentes tais como os comercializadores, que podem atuar no mercado de energia buscando nichos para empreendimentos relacionados ao assunto são fundamentais, mas exigem novas atitudes.

Não se pode desconsiderar o aumento da oferta de gás natural no país através da importação de gás boliviano e argentino e do aumento da produção doméstica.

A existência de empresas de engenharia que prestam serviços desde o projeto até a operação da planta de cogeração sem dúvida contribui nesse cenário.

As concessionárias de eletricidade e o governo podem ser parceiros importantes.

Iniciativas inovadoras pedem respostas inovadoras e pessoas dispostas a enfrentar adversidades e responder a qualquer alteração de contexto de mercado criando novas oportunidades.

Assim riscos como os do apagão que aconteceu em 2001 devem ser apresentados junto com os prejuízos que trouxeram e as vantagens que trouxeram para os que investiram em cogeração.

Cada segmento de mercado sabe quais são as principais considerações que se deve ter nesta construção de cenários. Por exemplo, segmentos como "Shoppings Centers" levam em conta fatores como nível de conforto e segurança dos clientes; já na indústria gráfica o mais importante é cumprimento de prazos, e na indústria de bebidas devemos evitar paradas num mercado crescente aonde os espaços são ganhos e perdidos rapidamente.

Cogerar representa qualidade e confiabilidade no abastecimento de eletricidade e deve ser considerada seriamente num provável cenário de déficit.

## 2.6 Principais barreiras atuais à cogeração no Brasil

Se cogerar é tão bom, por que a sistemática de cogeração não está amplamente espalhada pelo país? Claro que não se pode negar a existência de barreiras de ordem econômica e institucional para esta solução.

A falta de garantia de suprimento de energia suplementar de reserva é um dos principais fatores que inviabilizam o investimento em cogeração, porque quando a distribuidora de eletricidade não disponibiliza energia ao cogerador durante às paradas do seu sistema, força o mesmo a instalar equipamentos adicionais para operarem em stand-by. A alternativa de se pagar tarifas de emergência é excessivamente onerosa para o investidor.

Um possível atrativo para um investidor em cogeração, a venda de excedentes de eletricidade, é dificultada por entraves na negociação de energia elétrica excedente para os cogeradores de menor porte, sem dúvida afetando o porte e o tipo dos sistemas instalados.

A viabilidade de sistemas de cogeração depende do valor de tarifa média de eletricidade paga pelo usuário, e tarifas de eletricidade baixas não incentivam eventuais investidores em geração termelétrica. Com o descolamento da evolução de preços de gás e eletricidade, a atenção dos investidores está aumentando, mas o gás natural, que tem seus contratos de fornecimento variando em função do câmbio pede uma atenção específica para o tema que não vem ao caso neste trabalho.

Volatilidades dos preços tanto de compra, quanto de venda e incertezas de natureza política e econômica também exigem do investidor atenção na hora de sua análise, principalmente no estudos das taxas de juros, e incentivos que o governo, via BNDES oferece para promover o aumento do parque cogerador do país.

## 2.7 Candidatos Naturais para Cogeração.

Dividindo os candidatos a cogeração em três grupo: natural, marginal e pouco provável, tem que os naturais são, por exemplo, a indústria do papel, do petróleo, manufaturas químicas e outros usuários de vapor. Enquanto tecnologias elétricas e avanços nos processos de aproveitamento de calor perdido vão reduzir as necessidades de vapor, estas indústrias podem ser locais para projetos de alta eficiência para produzir potência.

As questões básicas para saber-se candidato a cogeração são as seguintes:

- Onde construíram sistemas similares antes?
- Qual a resposta e retornos destes sistemas já construídos em termos de performance?
- Os objetivos inicialmente traçados foram alcançados?

Avaliações de viabilidade devem considerar retornos mais diversos. Muitos custos devem ser considerados: operação, manutenção, seguro, taxas e outros. Se a avaliação considerar estes, ela provavelmente não irá sobreavaliar a performance

econômica (isto é predizer um retorno em menor tempo do que realmente ocorrer).

Os seguintes aspectos não podem ser negligenciados:

- ✓ Uso de preço de energia elétrica médio. Não se deve permitir uma proposta com custo meio da energia elétrica. Potência nem deve ser tratada desta maneira nem um usuário deve considerar ganhos desta maneira.
- ✓ Negligenciar esperas e backups. Deve-se assegurar não se esquecer dos custos de energia suplementar e outros aspectos referentes à mesma.
- ✓ Olhar por cima incentivos. Todos incentivos na construção do projeto devem ser considerados.
- ✓ Negligenciar o efeito que dão clima. Turbinas a gás têm redução de potência significativa dadas condições de clima úmido ou seco, altitude, pressão de entrada ou saída baixas.
- ✓ Ignorar um estudo de viabilidade. É comum avaliar-se otimistamente a viabilidade do projeto calculando retornos maiores dos que ocorrem realmente e prazos mais curtos que os possíveis.

A manutenção adequada também deve ser levada em conta nos custos, meses de pico e de demanda baixa devem entrar nos custos de maneira adequada para não sobreavaliar nem sub-avaliar o sistema.

## 2.8 Condições Escolhidas

Centrarei os esforços deste trabalho no ciclo cogeração com produção de frio, em especial utilizando-se uma turbina a gás com caldeira de recuperação para considerar duas das hipóteses que considerei mais interessantes para um ambiente comercial do tipo Shopping Center. O combustível da turbina, gás natural e o fluido de refrigeração  $H_2O$ -LiBr.

### 3 Refrigeração por Absorção

#### 3.1 Introdução e nota histórica

O francês Ferdinand Carré inventou o sistema de absorção e tirou uma patente nos Estados Unidos em 1860 e considera-se que as primeiras utilizações ocorreram nos Estados Unidos sendo utilizado pelos Estados Confederados durante a Guerra Civil para suprimento de gelo natural que havia sido cortado pelo norte.

Recentemente nota-se um interesse maior pelo uso deste tipo de sistema por motivos econômicos e de meio ambiente. Os estudos e pesquisas têm ocorrido e melhorias consideráveis aconteceram nos últimos anos.

Certamente o aproveitamento de fontes de energia renováveis, como gases expelidos por outros sistemas são fundamentais no ressurgimento do interesse nestes equipamentos.

#### 3.2 Aspectos gerais do sistema

O ciclo de compressão de vapor é descrito como um ciclo operado a *trabalho*. A elevação da pressão do refrigerante é conseguida por um compressor que precisa de trabalho.

O ciclo de absorção, por outro lado, é referido como ciclo operado a *calor*. Seu principal custo de operação é devido ao fornecimento de calor necessário para que funcione.

O sistema de absorção primeiro absorve vapor de baixa pressão em um líquido absorvente apropriado. Incorporado no processo de absorção há a conversão de vapor em líquido, desde que esse processo é similar ao de condensação, o calor precisa ser rejeitado durante o processo. O passo seguinte é elevar a pressão do líquido com uma bomba, e o passo final é liberar o vapor do líquido absorvente por adição de calor.

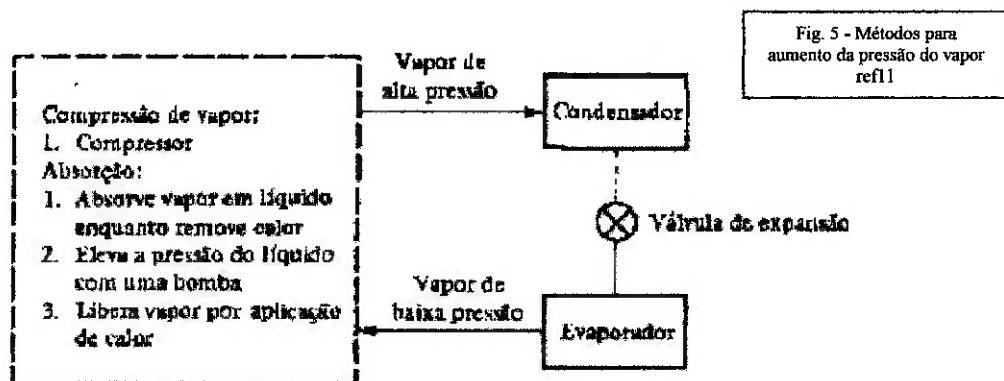
Ainda assim, num sistema de absorção existe a necessidade de algum trabalho para acionar a bomba no ciclo de absorção, mas a quantidade de trabalho para uma dada quantidade de refrigeração é mínima, comparada com aquela que seria necessária no ciclo de compressão de vapor.

### 3.3 O ciclo de absorção

O ciclo de absorção básico é mostrado na figura 6. O condensador e evaporador são mostrados na figura 5, e a operação de compressão é proporcionada pela montagem apresentada na metade do diagrama à esquerda da figura 6.

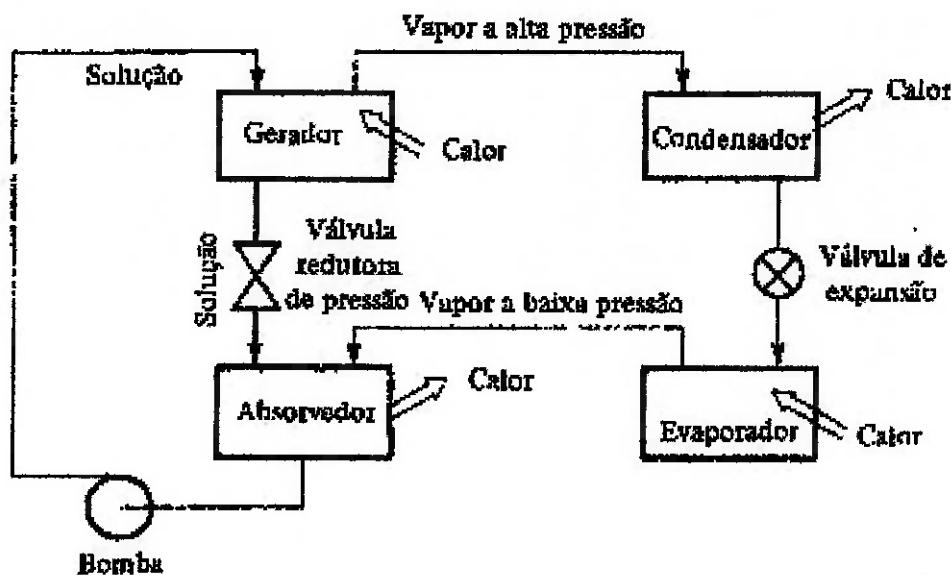
No evaporador há vapor de refrigerante de baixa pressão. Este é absorvido por uma solução no absorvedor. Caso, a temperatura desta solução se eleve a absorção de vapor poderia cessar. Para evitar isto, o absorvedor é resfriado por água ou ar. A solução no absorvedor é dita concentrada, pois contém grande quantidade de refrigerante. Uma bomba eleva a pressão eleva a pressão da solução concentrada e faz com que esta entre no gerador. No gerador, ocorre a adição de calor (fonte que forneça temperaturas elevadas), fazendo com que o refrigerante volte ao estado de vapor. Este vapor está em elevadas temperatura e pressão.

A solução líquida, que agora tem baixa concentração de refrigerante, retorna ao absorvedor por válvula redutora de pressão. O objetivo da presença desta válvula é manter a diferença de pressão entre o absorvedor e o gerador. No evaporador há passagem de água fria, que resfria o vapor e condensa o refrigerante. O refrigerante vai para o evaporador através de uma válvula de expansão. No evaporador ocorre a passagem de um fluido que será resfriado (troca de calor com o refrigerante). Este fluido fornecerá calor ao refrigerante que evaporará (está em baixa pressão). Este é o efeito de refrigeração.



Os fluxos de calor de e para os quatro trocadores de calor componentes do ciclo de absorção ocorrem da seguinte forma: o calor de uma fonte de alta temperatura entra no gerador, enquanto que o calor a baixa temperatura da substância que está sendo refrigerada entra no evaporador. A rejeição de calor do ciclo ocorre no absorvedor e condensador a temperaturas tais que o calor possa ser rejeitado para a atmosfera.

Fig. 6 - A unidade de absorção básica (ref 11)



### 3.4 Tipos de sistemas de absorção

Sistemas de absorção são baseados em combinações de substâncias que possuem propriedades não usuais: Uma substância irá absorver a outra sem interação química entre elas. A absorção irá acontecer quando uma dessas estiver em uma temperatura mais baixa e a separação quando esta estiver numa temperatura mais alta. Se essa substância for um sólido o processo será chamado de adsorção, se ela for líquida, absorção.

Sistemas de absorção são classificados como intermitentes ou contínuos, possuindo diversas aplicações, indo da doméstica para veicular, do setor de serviços a aplicações na indústria, em especial, para o interesse do nosso trabalho na refrigeração e condicionamento de ar.

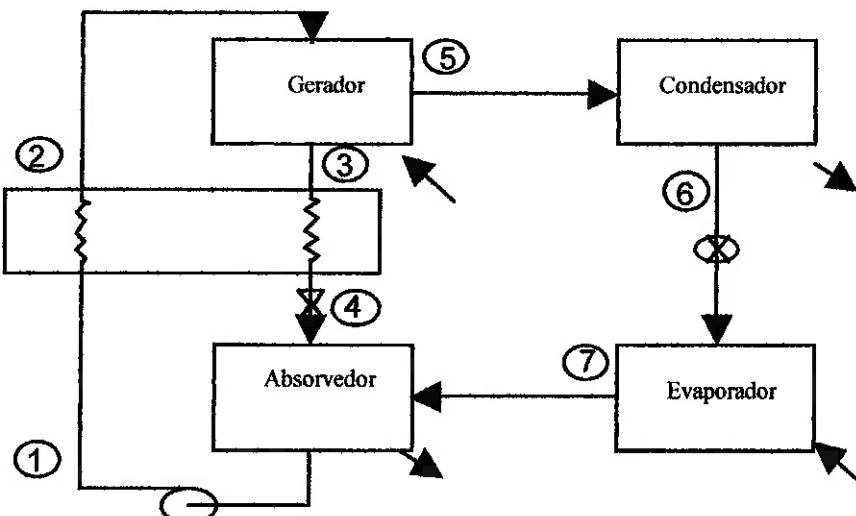
Diversas fontes de calor podem servir para seu funcionamento, querosene, gás natural, vapor, energia elétrica e solar.

### 3.5 Ciclo de absorção com trocador de calor

Uma adição lógica ao ciclo simples é a de um trocador de calor como mostrado na figura 7 para transferir calor entre as duas correntes de soluções. Este trocador de calor aquece a solução fria do absorvedor em seu caminho para o gerador e esfria a solução que retorna do gerador para o absorvedor. Um dos maiores custos de operação dos sistema está no calor adicionado no gerador  $Q_g$ , e haverá algum custo associado com a remoção de calor do absorvedor  $Q_a$ . O CDE abs aumenta.

Fig. 7 - Sistema de absorção com trocador de calor

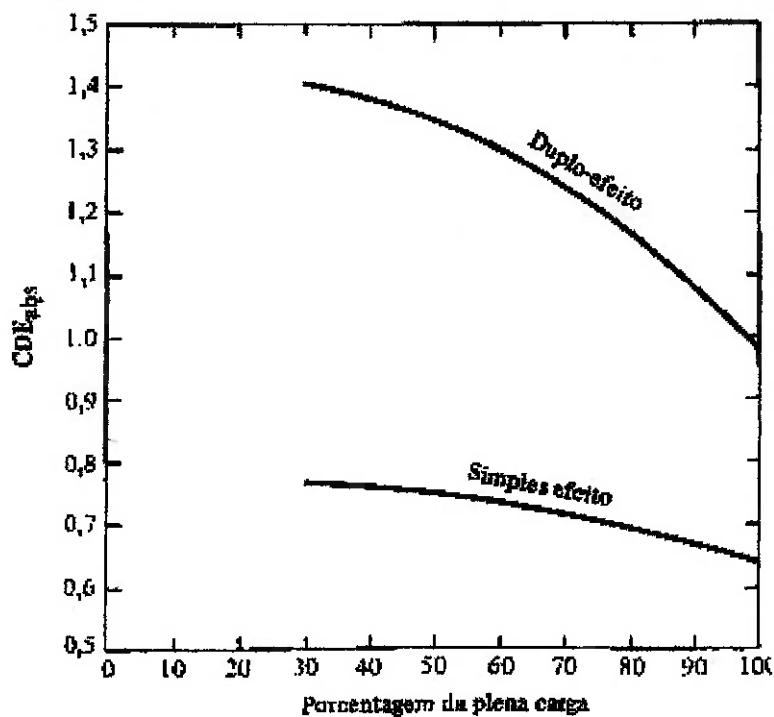
## **Esquema**



### 3.6 Sistema de duplo efeito

O sistema de duplo efeito é uma unidade de absorção de LiBr com a eficiência melhorada. O aspecto mais importante que distingue o sistema de duplo efeito é que este incorpora um segundo gerador, gerador II, que usa o vapor da água que condensa o gerador 1 para prover seu abastecimento de calor. A unidade de absorção de duplo efeito opera com CDEs maiores do que as de simples estágio como mostrado na figura 8. Não entraremos em maiores detalhes de um sistema de duplo-efeito por considerarmos que para nosso projeto um sistema simples atende bem nossa necessidade.

Fig. 8 - CDEabs de unidades de absorção de simples estágio e de duplo efeito ( ref 11)



### 3.7 Coeficiente de Eficácia de um Ciclo de Absorção Ideal

O coeficiente de eficácia do ciclo de absorção é definido CDEabs.

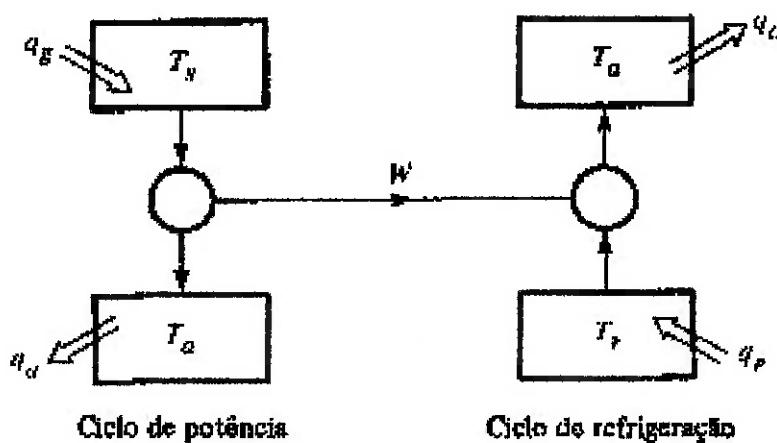
Em certos aspectos a aplicação do termo CDE para os sistemas de absorção não é feliz porque o seu valor , apreciavelmente

menor que os dos ciclos de compressão de vapor (0,6 versus 3, por exemplo). O valor comparativamente baixo do CDEabs não deve ser considerado prejudicial para os ciclos de absorção, porque os CDEs dos dois ciclos são definidos diferentes. O CDE do ciclo de compressão de vapor, a relação da taxa de refrigeração pela potência na forma de trabalho fornecida para operar o ciclo. Energia na forma de trabalho, normalmente muito mais valiosa e cara que energia na forma de calor.

Uma compreensão adicional da distinção das eficáncias dos ciclos de absorção e compressão de vapor pode ser oferecida pelo exercício de determinar o CDE do ciclo de absorção ideal. A Fig. 9 sugere como realizar esta análise, porque os processos nos blocos da esquerda consistem de um ciclo de potência que desenvolve o trabalho necessário para realizar a compressão do vapor do evaporador para o condensador no ciclo de refrigeração. Estes dois ciclos são mostrados esquematicamente na Fig. 9. O ciclo de potência recebe energia na forma de calor  $Q_g$  a uma temperatura absoluta  $T_g$ , entrega alguma energia  $W$  na forma de trabalho para o ciclo de refrigeração e rejeita uma quantidade de energia  $Q_a$  na forma de calor à temperatura  $T_a$ . O ciclo de refrigeração recebe o trabalho  $W$  e com ele transfere calor  $Q_e$  de temperatura de refrigeração de  $T_r$  para a temperatura  $T_a$ , onde a quantidade  $Q_c$  é rejeitada.

O ciclo ideal operando com processos termodinamicamente reversíveis entre duas temperaturas, um ciclo de Carnot, que aparece como um retângulo no diagrama temperatura entropia. Para o ciclo de potência do lado esquerdo da Fig. 9

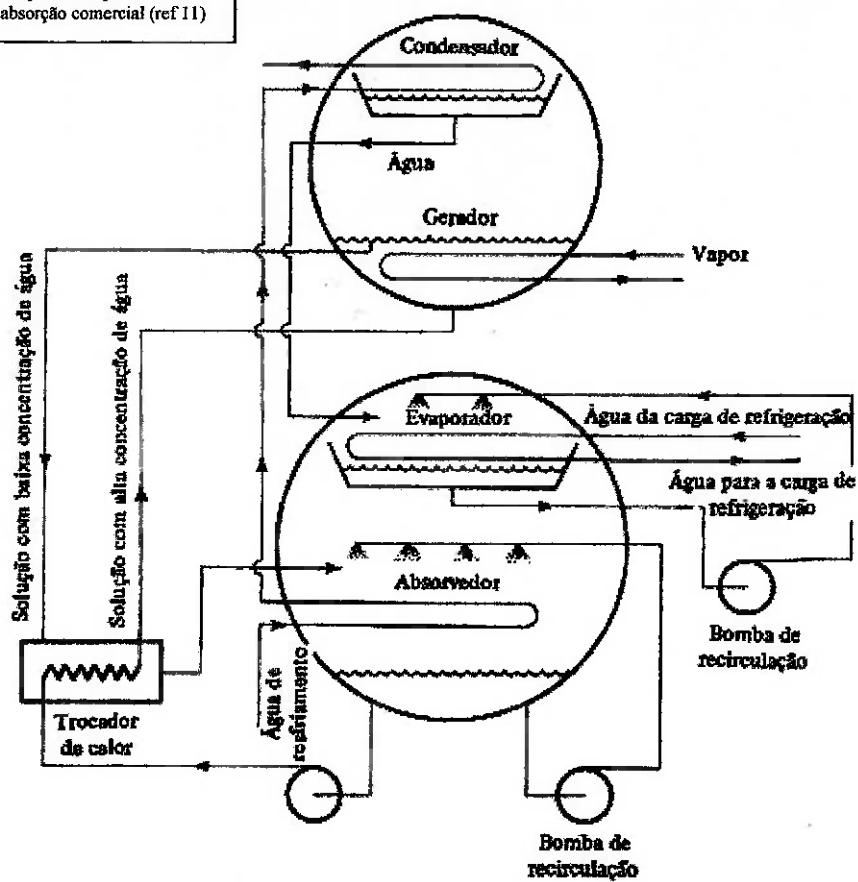
Fig. 9 – Ciclo de refrigeração operado a calor com combinação de um ciclo de potência e um de refrigeração (ref 11)



### 3.8 Configuração de Unidades de Absorção Comerciais

A construção de uma instalação de absorção comercial tira proveito do fato de que o condensador e o gerador operam à mesma pressão e combinam estes componentes em um mesmo vaso. Similarmente, desde que o evaporador e o absorvedor operam à mesma pressão, estes componentes também podem ser instalados em um mesmo vaso, como mostrado na Fig. 10. No vaso de alta pressão o vapor de água do gerador deriva para o condensador, onde é liquefeito, enquanto que no vaso de baixa pressão o vapor de água liberado no evaporador escoa para baixo para o absorvedor.

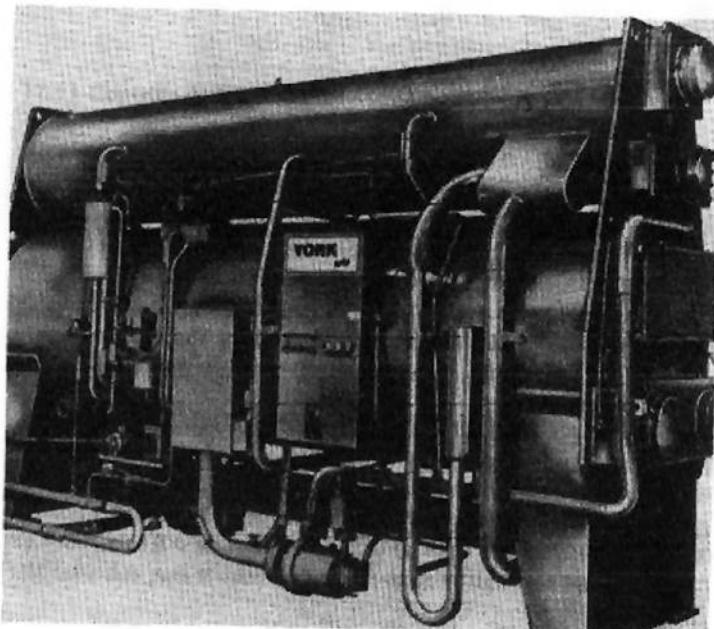
Fig. 10 – Um arranjo de componentes em uma unidade de absorção comercial (ref 11)



Para aumentar a taxa de transferência de calor no evaporador uma bomba de recirculação pulveriza a água a ser evaporada sobre os tubos do evaporador para resfriar a água da carga de refrigeração. Note-se que a água gelada que serve a carga de refrigeração é um circuito separado da água que serve como refrigerante na unidade de absorção. A manutenção de circuitos separados de água ajuda a manter uma maior pureza na unidade.

de absorção e permite a água que serve a carga de refrigeração operar a pressões acima da atmosfera. Um outro aspecto mostrado na Fig. 10 é que a água da torre de resfriamento passa em série pelo absorvedor e condensador, extraindo calor de ambos os componentes.

Fig. 11 (ref 11) e 11<sup>a</sup> (ref 15) – Unidades de refrigeração por absorção comercial



Na fotografia da unidade de absorção da Fig. 11 os vasos de alta e baixa pressões podem ser distinguidos. É possível também

combinar todos os componentes em um único vaso com um separador interno entre as câmaras de alta e baixa pressões.

Esta figura mostra um dos tipos de construção possíveis para unidades de refrigeração por absorção, sendo que esta é uma unidade que já foi comercializada.

### **3.9 O Papel de Unidades de Absorção na Prática de Refrigeração**

Os sistemas de absorção passaram por muitos altos e baixos: Foi predecessor do sistema de compressão de vapor no Século XIX e os sistemas água-amônia tinham grande aplicação em refrigeradores domésticos e grandes instalações industriais, como indústrias químicas e de processos. O sistema LiBr-água foi comercializado nos anos 40 e 50 como resfriadores de água para ar condicionado de grandes edifícios. Eles eram energizados por vapor ou água quente gerados em caldeiras a óleo e gás natural. Nos anos 70 a substituição de combustão direta de óleo e gás natural afetou a aplicação de unidades de absorção, mas ao mesmo tempo abriu outras oportunidades, como a utilização de calor derivado de coletores solares para energizar unidades de absorção. Também em função do aumento crescente do custo da energia, o calor de baixo nível de temperatura (na faixa de 90 a 1100C), que era anteriormente rejeitado para a atmosfera em instalações químicas e de processo, é agora freqüentemente usado para operar sistemas de absorção que fornece refrigeração necessária em algum outro ponto da fábrica. A combinação de sistemas de absorção com sistemas de compressão de vapor é uma outra aplicação de unidades de absorção que é atrativa.

### **3.10 Conclusão**

Sistemas de refrigeração por absorção se apresentam como alternativa para os sistemas de compressão de vapor sendo que possuem como vantagem a utilização de energia térmica, que é menos nobre, substituindo uma parte da energia elétrica necessária para obtenção do efeito desejado. Como esta energia térmica pode ser de qualquer fonte, como por exemplo, calor residual, energia solar, queima de combustíveis, etc., o sistema pode se tornar mais interessante na medida em que a energia

elétrica encarecer. Ou então para sistemas centrais de condicionamento, onde a utilização de energia elétrica é alta.

Utilizado em conjunto com turbinas a gás, em sistemas de cogeração como sugiro é uma alternativa atraente para suprir necessidade de refrigeração e energia elétrica ao mesmo tempo.

## 4 Turbinas a gás

### 4.1 Introdução e nota histórica.

O primeiro exemplo de propulsão a jato foi desenhado por volta de 150 A.C por um egípcio chamado Hero. Hero inventou um brinquedo que girava no alto de uma caldeira devido ao efeito da reação do ar quente ou vapor saindo em vários esguichos combinados radialmente em volta de uma roda. Ele chamou essa invenção de Aeolipile. (Na figura)

Diversos exemplos de turbinas rudimentares foram projetadas até o fim do século XVIII por diversos inventores, mas nenhuma pode ser considerada turbina a gás. Sempre o vapor foi utilizado em alguma parte do processo.

Somente em 1872, Stolze projetou a primeira verdadeira turbina a gás, e testou diversos modelos funcionais por volta de 1900.

Charles Curtis, o inventor do motor a vapor Curtis, obteve a primeira patente de uma aplicação para a turbina a gás. Foi concedida em 1914, mas com alguma controvérsia.

A companhia General Electric começou sua divisão de turbina a gás em 1903. Um engenheiro chamado Stanford Moss liderou a maioria dos projetos. Seu mais notável desenvolvimento foi o General Electric turbosupercharger, durante a Primeira Guerra Mundial. (Embora o crédito pelo conceito foi dado a Rateau, da França.) Foi utilizado gases quentes de escapamento do motor para girar uma turbina que ligado a ela girava um compressor centrifugo como supercharging ou superalimentação. (Mesmo conceito dos turbos, hoje utilizados em automóveis.) O revolucionário processo do turbosupercharger projetado e construído, possibilitou construir seguramente a primeira turbina a gás.

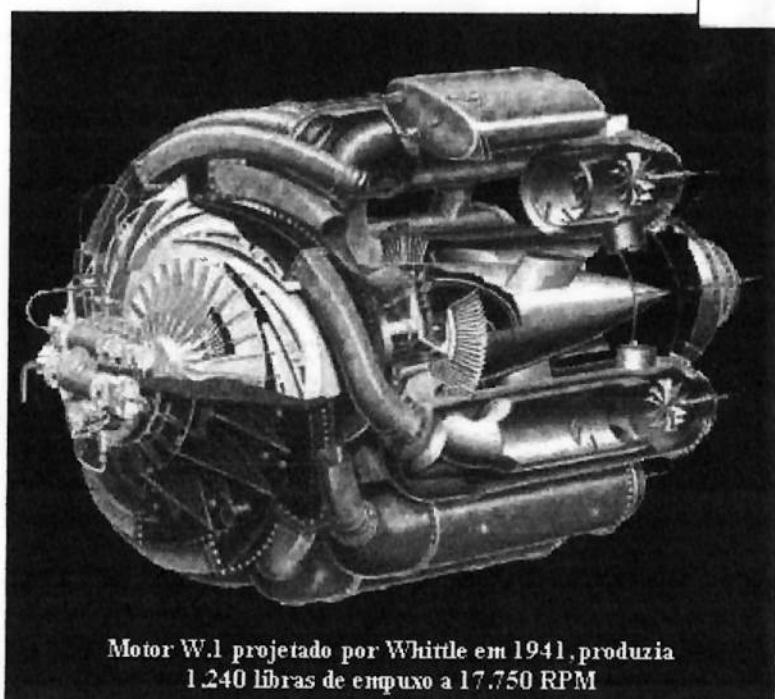
O senhor Frank Whittle nascido na Grã Bretanha patenteou um desenho de um motor de aeronave a jato em 1930. Em 1928 ele já tinha proposto utilizar a turbina a gás para propulsão quando

Fig. 12 – Aeolipile (ref 16)



estudava no Royal Air Force College em Cramwell, Inglaterra. Em 1941 um motor projetado por Whittle foi utilizado no primeiro avião turbojato a voar na Grã Bretanha.

Fig. 13 – Turbina (1941) (ref 16)



Coincidentemente com Whittle se esforçando para desenvolver as turbinas, Hans Von Ohain e Max Hahn, dois estudantes em Gottingen na Alemanha desenvolveram e patentearam seus próprios motores projetados em 1936. Esta idéia foi adaptada pela The Ernst Heinkel Aircraft Company. A companhia alemã Heinkel Aircraft realizou seu primeiro voo em aeronave com propulsão a jato em 27 de agosto de 1939. O primeiro avião a jato a voar era chamado de HE178, utilizava turbina Heinkel HES-3B que desenvolvia 1100 libras de empuxo, fazendo-o voar a aproximadamente 400 milhas por hora (643.7 quilômetros por hora). Logo em seguida veio o ME262 que superava as 500 milhas por hora (804.6 quilômetros por hora). Mais de 1600 aviões desse modelo foram construídos no final da 2ª Guerra Mundial. Os motores desses aviões eram mais avançados do que dos aviões britânicos e tinham como característica o resfriamento por sistema de pás e jato de escapamento com área variável.

Em 1941 Frank Whittle iniciou testes de vôo com motor turbojato que ele próprio tinha projetado na Inglaterra.

Finalmente, a companhia General Electric fabricou motores nos Estados Unidos baseados no projeto de Whittle.

Os significativos avanços nos projetos das turbinas a gás nos anos seguintes a 2<sup>a</sup> Guerra Mundial criaram expectativas tais que sistemas viriam tornar-se cada vez mais importantes em muitas outras áreas.

Fig. 14 – Jato da Embraer – exemplo de utilização de turbina aeronáutica (ref 16)



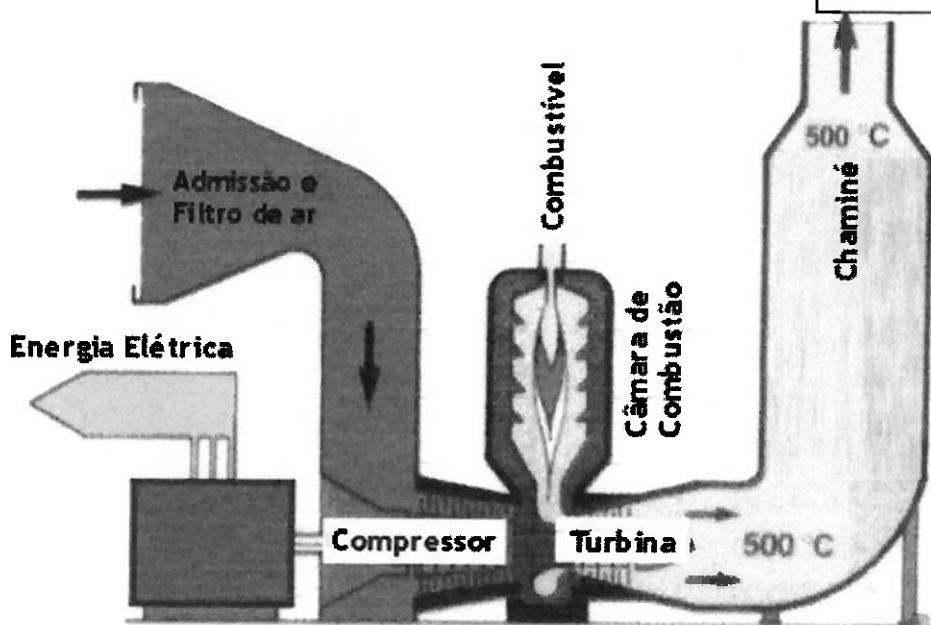
#### **4.2 Aspectos Gerais.**

Minha opção por turbinas a gás, além da boa disponibilidade de gás natural no país se deve à alta tecnologia envolvida na construção deste tipo de equipamento.

As turbinas a gás são motores térmicos que realizam a conversão da energia de um combustível em potência de propulsão, potência de eixo ou potência elétrica.

Para seu funcionamento o ar passa por um compressor onde sua pressão é elevada, idealmente este processo seria isoentrópico, e em seguida, entra na câmara de combustão, aonde ocorre a mistura de ar-combustível a pressão constante. Na turbina, propriamente, ocorre expansão dos gases, também isoentropicamente num processo ideal. Num processo normal a atmosfera resfria os gases de escape (que queremos aproveitar na cogeração).

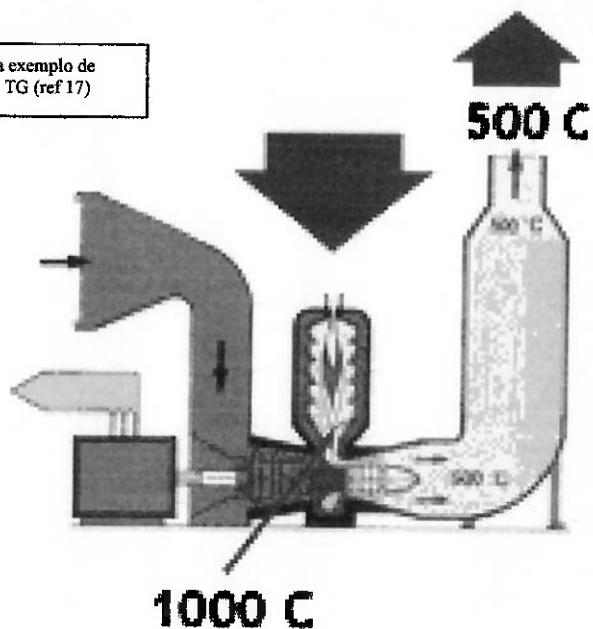
Fig. 15 – Turbina para geração de energia elétrica (ref 17)



No ciclo real, os processos que consideramos ideais tem perdas, ou irreversibilidades, devido ao atrito entre os gases e as pás, às perdas de carga na turbina, ao atrito dos gases na câmara de combustão, à troca de calor entre os gases e partes do equipamento e ao atrito entre as moléculas no fluxo de gases.

Por serem máquinas de combustão interna realizam o processo de conversão da energia do combustível a altas temperaturas (começando com temperaturas da ordem de 1000 °C e terminando em temperaturas próximas de 500 °C). A maior parcela da energia do combustível que não é aproveitada está nos gases de exaustão ainda a altas temperaturas. Aí reside o interesse de aproveitar esta energia num processo de cogeração.

Fig. 16 - Diagrama exemplo de temperaturas numa TG (ref 17)



#### 4.3 Terminologia

Para facilitar a compreensão da terminologia utilizada em turbinas defini os equipamentos abaixo:

**Turbina a gás:** Conjunto do gerador de gás ( turbina + compressor + câmara de combustão ) e turbina de potência.

**Compressor:** Conjunto de pás móveis e fixas responsáveis pelo processo de compressão do ar.

**Turbina e turbina de potência:** conjunto de pás móveis e fixa da turbina responsáveis pelo processo de produção de trabalho através da expansão dos gases que vêm da câmara de combustão.

#### **4.4 Tipos de Turbinas.**

Uma turbina pode ser de ação, reação ou ação e reação.

A maior parte da utilização das turbinas a gás é relacionada com o uso de motores aeronáuticos ou indústrias e rede pública de geração elétrica.

Tratamos neste trabalho das turbinas essencialmente de uso industrial que tem origem em turbinas a gás aeronáuticas, aeroderivadas ou turbinas projetadas para uso industrial ( " heavy duty gas turbines" ).

Também se classificam as turbinas de acordo com a quantidade de estágios que possui, sendo que cada estágio é formado pelo conjunto de pás móveis e pás fixas.

Outro tipo de classificação possível é a que define uma turbina pelo tipo de fluxo de ar, radial ou axial.

No fluxo radial os gases entram paralelamente ao vetor de velocidade do eixo de rotação e saem com o vetor orientado radialmente ao eixo de rotação. Aplicado essencialmente em turbinas de pequena potência.

As turbinas de fluxo axial, os gases passam pela turbina e pelo compressor com o vetor de velocidade paralelo ao eixo de rotação do equipamento.

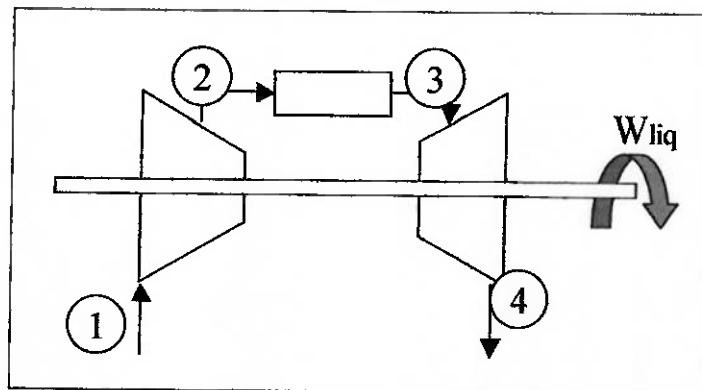
Existem sistemas em torre com apenas uma câmara de combustão ou sistemas com várias câmaras montadas com eixo paralelo ou inclinado ao eixo de rotação da TG. As câmaras podem ser canulares ou anulares.

Um equipamento pode ter 1, 2 ou 3 eixos, sendo esta outra forma de classificação deste tipo de equipamento.

## 4.5 Eficiência do ciclo.

Considerando o esquema de TG da próxima página

Fig. 16 - Esquema de TG

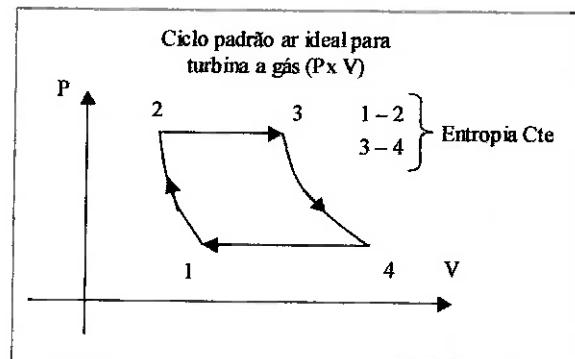


A eficiência do ciclo ideal é calculada pela relação entre o trabalho líquido, pela energia fornecida pelo combustível  $Q_{com}$ :

$$N_t = W_{liq} / Q_{com}$$

Fig. 17 - Ciclo TG

O ar entra e passa pelo compressor onde sua pressão é elevada de  $P_1$  para  $P_2$ . No ciclo ideal o processo é isoentrópico. Na câmara de combustão, ocorre a queima à  $P$  cte. Na turbina a expansão seguindo o processo  $3 - 4$ . A atmosfera realiza o processo de  $4 - 1$  a  $P$  cte.



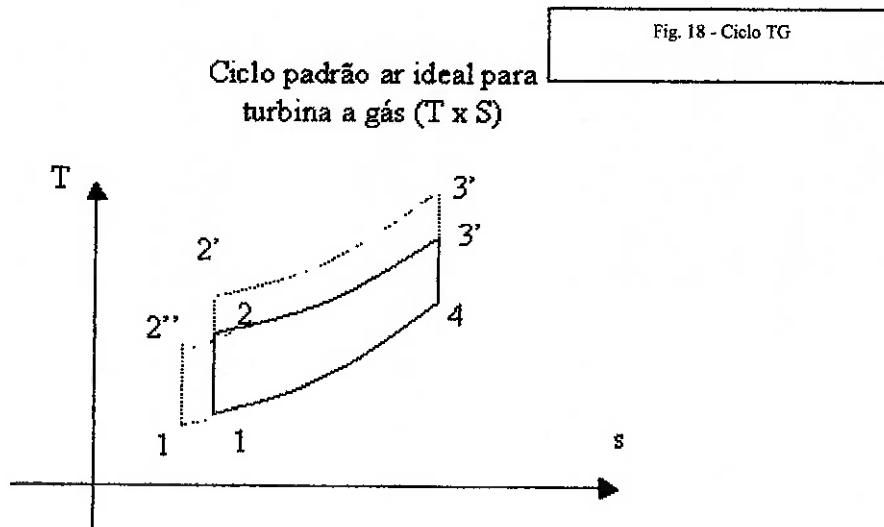
No ciclo real, os processos 1-2, 2-3, 3-4 são irreversíveis, ou seja isoentrópicos.

Da referência 8 pode-se definir a relação de eficiência com a razão de compressão da turbina para o processo ideal:

$$N_t = 1 - 1 / ((P_2 / P_1)^{((k-1)/K)}$$

A medida que a relação entre as pressões aumenta ( $P_2/P_1$ ) a eficiência aumenta. O que limita este rendimento é a temperatura às quais o equipamento é submetido, dadas as considerações metalúrgicas envolvidas.

As pesquisas e utilização de novos materiais tem tido um papel fundamental no desenvolvimento e na elevação da eficiência das TGs.



Também se pode aumentar a eficiência da TG diminuindo a temperatura do ar na entrada do compressor. Da fig 18 se observa que se  $T_1$  cai para  $T_1'$  a temperatura  $T_2$  cai para  $T_2''$ . Pode-se calcular a eficiência pela seguinte expressão (ref 8):

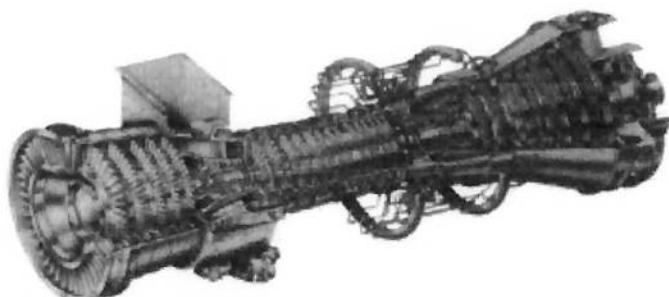
$$N_t = 1 - T_1/T_2$$

Aonde  $T_1$  é temperatura na entrada do compressor e  $T_2$  é a temperatura na entrada da câmara de combustão.

Como a inclinação das curvas a pressão constante no diagrama TxS da figura 18 é maior para pressões maiores [8], para uma mesma queda de entropia  $s_1-s_1''=s_2-s_2''$ , a queda de temperatura  $T_2-T_2''$  é maior do que  $T_1-T_1''$ , porque  $T_2$  está em uma curva de pressão superior a a  $T_1$ . desta forma,  $T_1/T_2 > T_1''/T_2''$ , ou seja,  $N_t''=1-T_1''/T_2''$  é maior que  $N_t 1-T_1/T_2$ .

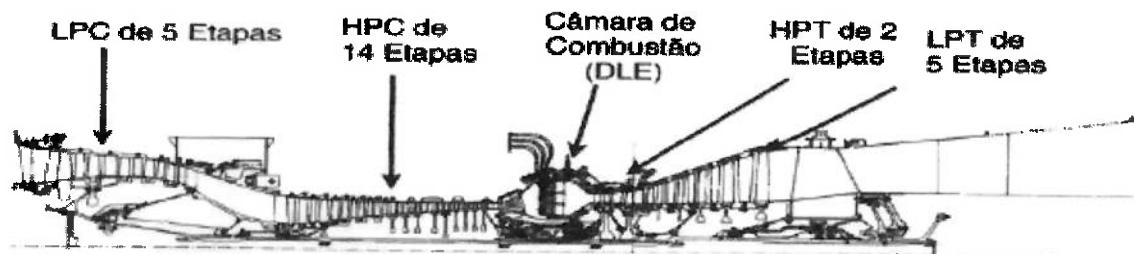
#### 4.6 Desenhos e esquemas de uma turbina ( GE LM 6000 ) – ref 18

#### Características da LM6000

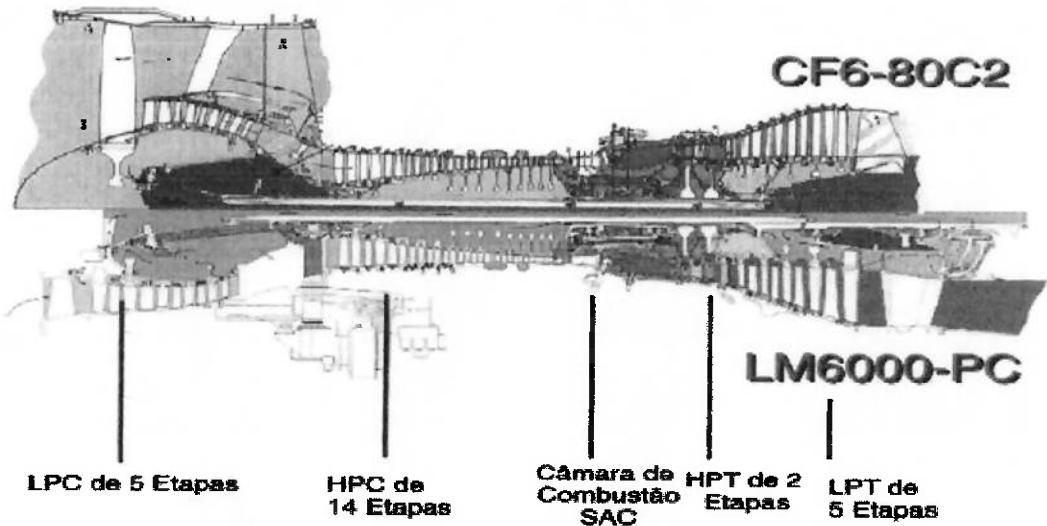


- Projeto de dois eixos - simples e confiável
- Velocidade de saída de 1.800 a 3.780 rpm - (60hz=3600rpm)
- Acionamento direto - não precisa de uma Turbina de Potência
- Combustível Gás/ Líquido ou Gás+Líquido
- A LM6000 estabelece uma nova marca de baixo consumo específico de combustível =

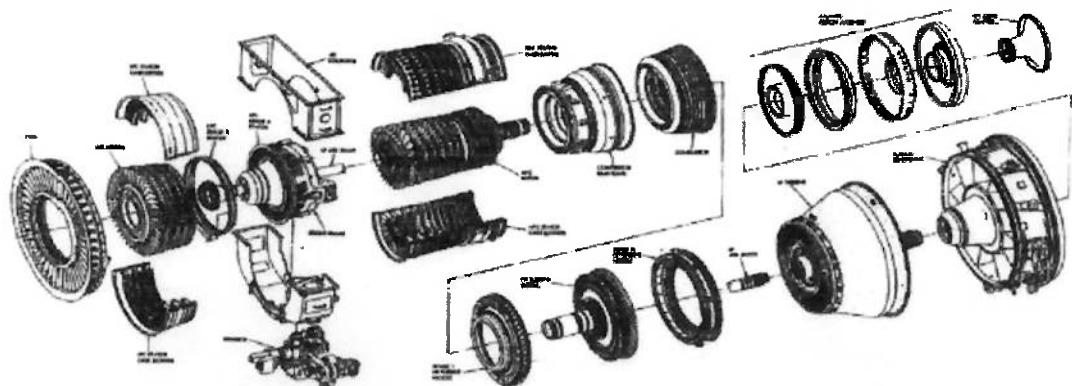
#### Seção Transversal da LM6000



## Comparação transversal



## LM6000 Modules



#### **4.7 Conclusões.**

As turbinas têm apresentado desenvolvimento notável, de materiais, de sistemas de controle visando maior eficiência e potência, menor peso dos equipamentos. Hoje representam, quando comparadas com os outros motores térmicos, como características principais:

1. Menor relação entre custo de capital e potência ( \$/kW )
2. Menor relação peso por potência ( kg/kW )
3. Menor relação espaço ocupado por potência ( m<sup>3</sup>/kW )

TGs, portanto, são uma alternativa interessantíssima para geração de potência e, se considerarmos os benefícios apresentados de cogeração se tornam ainda mais atraentes.

## 5 Modelo

### 5.1 Introdução e dados de entrada

Apresentei até aqui os conceitos de cogeração, turbinas e ciclo de absorção.

Definindo os parâmetros de demanda térmica e elétrica para um sistema de shopping center em torno de 40 MW e 30 ton/h de vapor saturado seco para alimentar o ciclo de absorção, parti para a construção do modelo.

Escolhi algumas turbinas na faixa de potência definida. Os dados destas turbinas estão na próxima página separados de acordo com as condições ISO.

Também considero que as condições do local como com temperatura de 25°C e 700m de altitude.

Equipamento	Equipamento 1	Equipamento 2	Equipamento 3
Equipamento	Turbina LM6000 da GE	Turbina LM5000 da GE	MS6001 Nuevo Pignone
Tipo	Aeroderivada	Aeroderivada	Industrial
Eixos	2	2	2
Combustível	GN	GN	GN
Condições	ISO	ISO	ISSO
Carga	100%	100%	100%
Potência	43050KW	34450KW	38980KW
Consumo	103141KW	91657KW	123220KW
Eficiência	41,74%	37,59%	31,60%
Fluxo de Gases	123,75Kg/s	120Kg/s	137,9Kg/s
T gases	445C	436C	537C
rotação	3600rpm	3600rpm	5100rpm
Condições	T 25 C, altitude 700m	T 25 C, altitude 700m	T 25 C, altitude 700m
Carga	100%	100%	100%
Potência	34100KW	28047KW	33064KW
Consumo	83956KW	76849KW	107790KW
Eficiência	40,61%	36,50%	30,67%
Fluxo de Gases	101,4Kg/s	101,12Kg/s	122,06Kg/s
T gases	466C	457C	543C
rotação	3600rpm	3600rpm	5100rpm

Outros componentes do ciclo são a caldeira de recuperação, o desaerador e as bombas. Desenvolvi uma série de macros no Excel para a apresentação dos resultados e simulação do processo.

Os dados das turbinas foram obtidos em catálogos.

Para calcular as propriedades termodinâmicas utilizei as fórmulas que estão no anexo 8.3.

## 5.2 Modelo do Sistema de Absorção

### 5.2.1 Sistema de Absorção

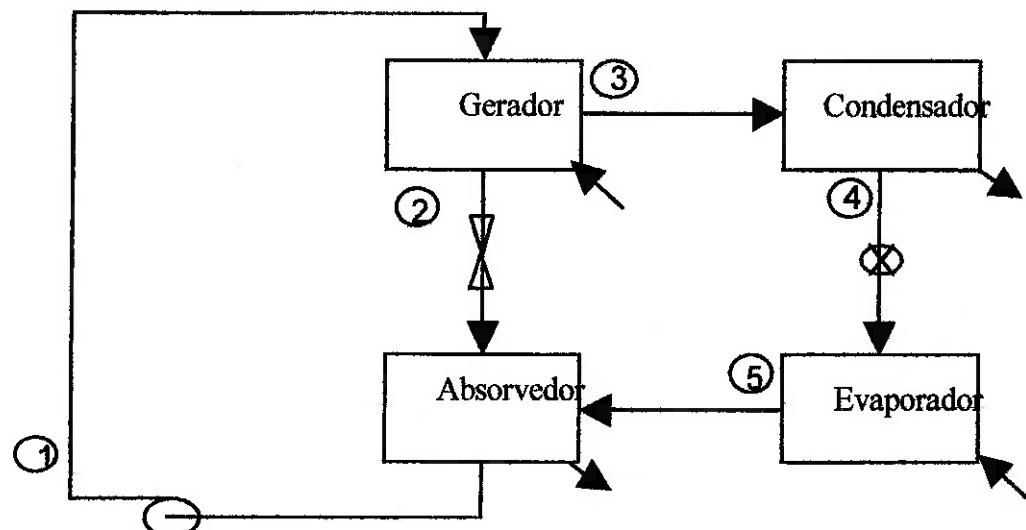
Tive os seguintes componentes especificados e estudados: absorvedor, gerador, recuperador (líquido-líquido, trocador de calor), um condensador e um evaporador.

Desenhos esquemáticos ajudam a entender o modelo proposto na planilha.

O estado de um líquido operando é caracterizado e distinguido de outro pela temperatura, fluxo de massa, concentração ou pressão.

Assim para um sistema de estágio simples a estrutura final será a somatória das estruturas individuais de onde faremos as análises de desempenho cabíveis e das quais surgirá a primeira caixa preta do sistema de cogeração completo que servirá para visualização global do projeto.

## Esquema



Para definir no modelo as fórmulas empregadas utilizei as seguintes equações:

- Balanço de Energia
- Conservação de Massa
- Conservação do Absorvente/Absorvido

As fórmulas utilizadas estão abaixo:

$$m_2 = m_1 * c_1 / c_2$$

$c_1$  = calculado em de tabela com  $T$  e  $P$

$$m_3 = m_1 - m_2$$

$c_2$  = calculado em de tabela com  $T$  e  $P$

$$m_4 = m_3 = m_5$$

$c_3 = c_4 = c_5 = 0$

$h_1$  = calc. na tabela utilizando temperatura e % de LiBr em massa

$h_2$  = calc. na tabela utilizando temperatura e % de LiBr em massa

$h_3$  = calc. na tabela utilizando temperatura e % de LiBr em massa

$h_4$  = calc. na tabela utilizando temperatura e % de LiBr em massa

$h_5$  = calc. na tabela utilizando temperatura e % de LiBr em massa

$$Q_g = m_3 h_3 + m_2 h_2 - m_1 h_1$$

$$Q_c = m_c h_3 - m_4 h_4$$

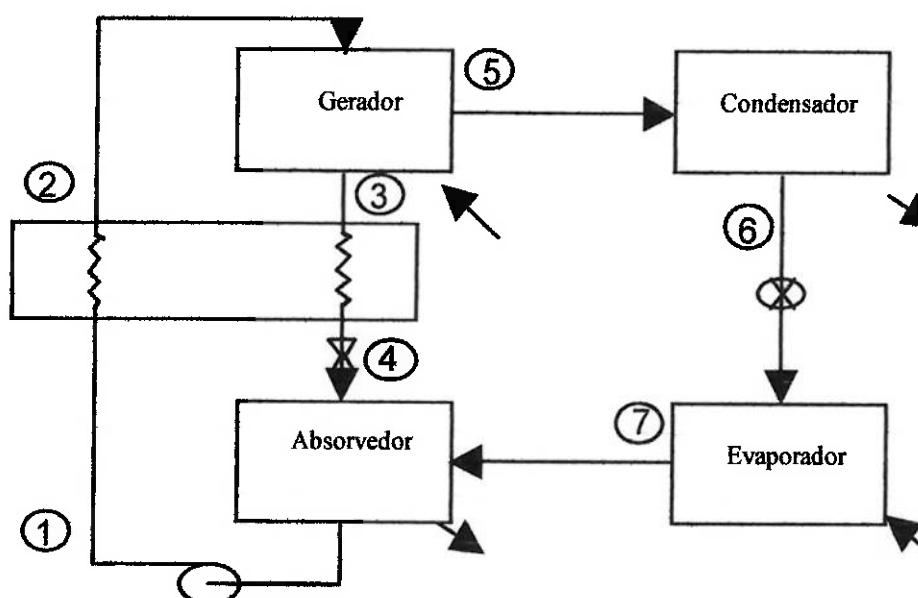
$$Q_a = m_2 h_2 + m_5 h_5 - m_1 h_1$$

$$Q_e = m_5 h_5 - m_4 h_4$$

$$COP_{abs} = Q_e / Q_g$$

### 5.2.2 Sistema de Absorção com Trocador de Calor

#### Esquema



O ciclo simples modificado pela inclusão de um trocador de calor passa a ter comportamento abaixo, com as seguintes fórmulas utilizadas:

Quantidades inalteradas a partir do modelo anterior:

$$m_1 = m_2$$

$$m_3 = m_4$$

$$m_5 = m_6 = m_7$$

$$m_4 = m_3 = m_5$$

Também estão inalterados:

$c_1$  = calculado a partir de tabela tendo  $P$  e  $T$

$c_2$  = calculado a partir de tabela tendo  $P$  e  $T$

$$c_3 = c_4 = c_5 = 0$$

As entalpias que permanecem inalteradas:  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $h_5$ ,  $h_6$  e  $h_7$ .

Também permanecem inalterados  $Q_c$  e  $Q_e$

A temperatura de solução deixando o trocador altera no ponto 2 permite calcular  $h_2$  e a taxa de calor absorvido pela solução:

$$Q_{hx} = m_1(h_2 - h_1)$$

Como a taxa de transferência de calor precisa ser suprida pela solução que escoa pelo gerador

$$Q_{hx} = m_3(h_3 - h_4) \text{ de onde calculamos } h_4$$

Finalmente as taxas de transferência de calor no gerador e no absorvedor podem ser calculadas agora por

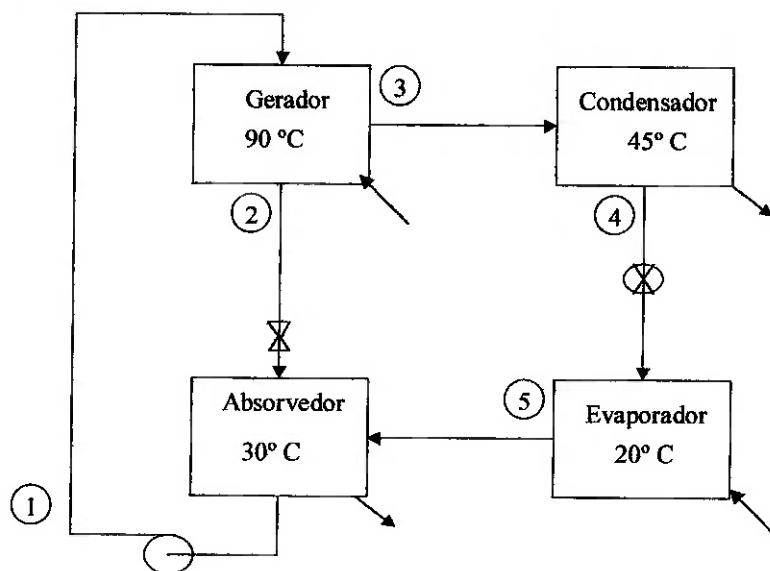
$$Q_g = m_5 h_5 + m_3 h_3 - m_2 h_2$$

$$Q_a = m_7 h_7 + m_4 h_4 - m_1 h_1$$

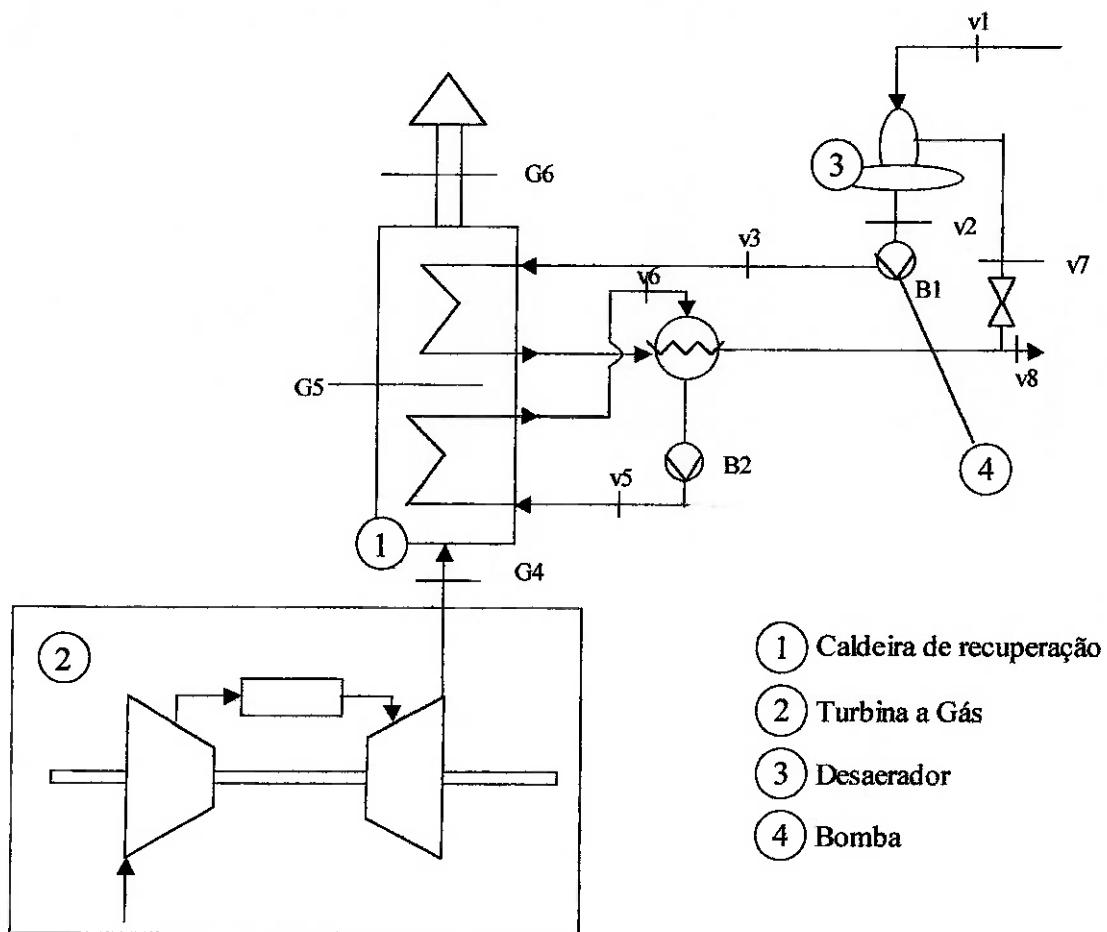
$$CDE_{abs} = Q_e / Q_g$$

No meu modelo os dados que utilizei fixos foram as temperaturas de operação do Gerador ( $T=90^\circ\text{C}$ ) Condensador( $45^\circ\text{C}$ ), Absorvedor ( $30^\circ\text{C}$ ) e Evaporador ( $20^\circ\text{C}$ )

A quantidade de vapor (Kg/s) varia em função da turbina, variando todos os outros resultados.



### 5.3 Modelo do Sistema de Potência com caldeira de recuperação



- 1 Caldeira de recuperação
- 2 Turbina a Gás
- 3 Desaerador
- 4 Bomba

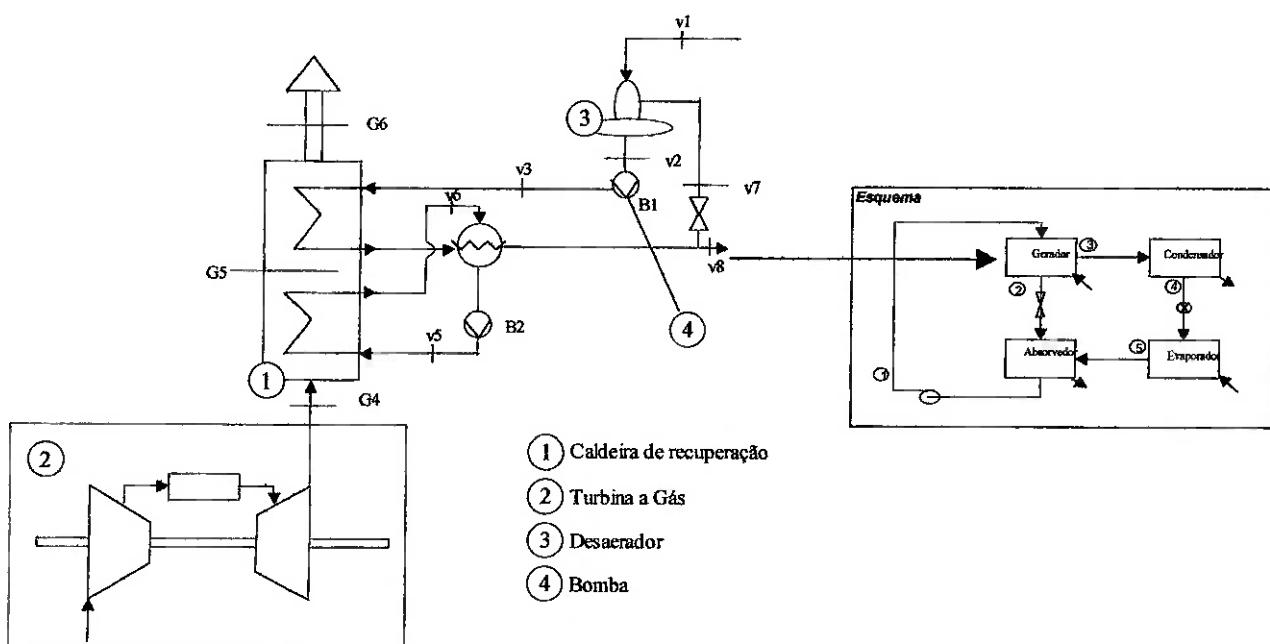
Calculados da seguinte maneira de forma interativa para todas as turbinas consideradas:

1. Considera-se as condições definidas no catálogo da turbina e se define  $T_{g4}$  (temperatura dos gases de escape da turbina),  $m_{g4}$  (fluxo em massa dos gases de escape da turbina),  $W_{tg}$  (energia elétrica gerada) e  $H_I$  (consumo de gás natural).
2. Não são consideradas perdas de pressão e perdas térmicas ao longo das linhas e nos equipamento dos ciclos por hipótese simplificadora.

3. Do balanço de energia para a caldeira de recuperação definimos a  $Pv6$  (10 Bar)
4. Pelo diagrama de Mollier (para o qual foi desenvolvido programa para facilitar sua aplicação) extrai-se  $Tv6$
5. Supõe-se diferença de temperatura entre os gases de escape no final da seção de saturação da caldeira de recuperação de  $20^\circ C$  (valor baseado em equipamentos existentes).  $Tg5 = Tv6 + 20$
6. Entre  $g4$  e  $g5 = C_{par}(Tg4 - Tg5)$ . Com  $C_{par} = 1004,83 \text{ J/Kg K}$ . Valor adotado e admitido constante entre  $G4$  e  $G5$ .
7.  $q_{Ar} = q_{ar^*} m_{ar}$ . Admitimos que todo o calor perdido pelo ar foi transferido à água.  $Q_{Ar} = q_{H2O}$
8. Para o processo de saturação  $v5$  - líquido saturado; e  $v6$  - vapor saturado.
9. Do diagrama de Mollier calcula-se  $hv6$  e  $hv5$  e consequentemente  $q_{H2O}$ . A partir dela calculo a vazão em Kg de vapor de água por segundo.
10. A partir do balanço de energia do desaerador. Supus que este é adiabático, e considerei que a água sai como líquido saturado sem perdas de massa.
11. A partir destas hipóteses calculei  $Pv1 = Pv2 = Pv7$  e  $Tv1, Tv2$  e  $mv2 = m_{H2O}$
12.  $Pv7$  é regulado através da válvula reguladora de pressão indicada no circuito. Considerei seu processo adiabático.  $Hv6 = hv7$ . E a vazão em massa de  $mv2$  é a soma de  $mv1$  e  $mv7$
13. Pela 1<sup>a</sup> Lei:  $mv1hv1 + mv7hv7 = mv2hv2$
14. Através das fórmulas desenvolvidas calcula-se  $hv1$  e  $hv2$ ,  $mv1$  e  $mv2$  e do sistema de equações acima.
15. Supus que a bomba tem eficiência isoentrópica de 75% e calculei a partir de  $s2$  e  $s3s = s2$ . Para calcular  $hv3$

16. Supus que a bomba é adiabática e  $W_b = h_3 - h_2$  (KJ/Kg) (trabalho líquido). A partir do qual pude ter o trabalho exigido pela bomba ao multiplicarmos pela vazão.
17. No economizador calculei a troca de calor  $Q_{econo} = h_4 - h_3$ . Que multiplicada pela vazão nos dá a troca de calor do mesmo.
18. Supondo  $Q_{econo} = Q_{Ar}$  calculamos  $T_{G6}$  (temperatura do gás de escape da caldeira de recuperação)
19. A eficiência global é calculada a partir dos consumos calculados, da potencia da turbina e da energia fornecida para o processo. (Não é conveniente esquecer o consumo da bomba auxiliar).
20.  $Q_{processo} = h_{ob} * m_{ob}$ .
21. Rendimento = Trabalho da turbina +  $Q_{processo}$

#### 5.4 Modelo do Sistema de Cogeração com Sistema de Refrigeração



## 5.5 Resultados

### 5.5.1 MS6001 Nuevo Pignone

Assim por exemplo para uma possibilidade que estudei da turbina

Dados de Entrada	
carga	100% %
potencia	33064 kW
consumo	107790 kW
eficiencia	30,67% %
fluxo dos gases	122,06 kg/s
temp dos gases	543 °C
rotação	5100 rpm

Tamb	30 °C
Pamb	760 mmHg
Umidade Relativa	60%

MS6001...

Temperaturas		Temperaturas		Potências e Eficiência	
Tv1	80,0 °C	mpg4	122,06	wpb	2,33 kW
Tv2	104,8 °C	mpH2O	20,73 Kg vapor/s	qpecon	6745,76 KJ/s
Tg4	816,2 K	mpv2	20,73 Kg vapor/s	efic	80%
Tg5	220,0 °C	mpv1	19,79 Kg/s	wptg	33064,00 kW
Tg6	165,0 °C	mpv7	0,93 Kg/s	wpl	33061,67 kW
Tv6	200,0 °C	mpv8	19,79 Kg/s	HI	107790,00 kW
TH2O	80,0 °C			Cpar	1,00483 kJ/kg K
Tvapor	200,0 °C			qppro	52963,96072 kW

Pressões		Fluxos		Calor e outros valores	
Pv1	1,2 Bar	hv1	334,53 KJ/Kg	qpar	39634,20 J/Kg ar
Pv2	1,2 Bar	hv2	440,03 KJ/Kg	qar	4837750,70 J/s
Pv3	0,1 Bar	hv3	438,24 KJ/Kg	qH2O	1912,28 Kj/Kg
Pv7	1,2 Bar	hv4	763,72 KJ/Kg	qpH2O	39634,20 J/Kg ar
pv4	10,0 Bar	hv5	763,72 KJ/Kg	carga	1,00 %
Pvapor	0,1 bar	hv6	2676,00 KJ/Kg	efic	31% %
PH2O	1,2 Bar	hv7	2676,00 KJ/Kg	omega	5100 rpm
Pv6	10,0 Bar				

Tive os seguintes resultados globais na turbina com o recuperador:

Dados de Saída	
Produção de vapor	74,6 Ton/H
Produção eletrica	33.064,0 kW
consumo auxiliar	2,3 kW
consumo	107.790,0 kW
eficiencia do ciclo	79,8% %
temp, ar na chaminé	165,0 °C

Os resultados para o sistema de refrigeração por absorção dependem da vazão de vapor saturado seco que sai da turbina  $m_{pH2O}$ :

SISTEMA DE ABSORÇÃO																																																																											
Esquema		Variáveis																																																																									
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>m_1 = 20,73 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_1 = 0,4</math></td><td><math>h_1 = -168 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_2 = 13,4804 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_2 = 0,615</math></td><td><math>h_2 = -52 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_3 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_3 = 0,0</math></td><td><math>h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_4 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_4 = 0,0</math></td><td><math>h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_5 = 0,0</math></td><td><math>h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_g = 22170,54 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"><math>COP = 0,76863759</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_c = 18175,87 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_a = 21040,21 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_e = 17045,54 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>							$m_1 = 20,73 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,4$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$					$m_2 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,615$	$h_2 = -52 \text{ kJ/kg}$					$m_3 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}$					$m_4 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}$					$m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}$					$q_g = 22170,54 \text{ kW}$		$COP = 0,76863759$						$q_c = 18175,87 \text{ kW}$								$q_a = 21040,21 \text{ kW}$								$q_e = 17045,54 \text{ kW}$							
$m_1 = 20,73 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,4$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$																																																																									
$m_2 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,615$	$h_2 = -52 \text{ kJ/kg}$																																																																									
$m_3 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}$																																																																									
$m_4 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}$																																																																									
$m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}$																																																																									
$q_g = 22170,54 \text{ kW}$		$COP = 0,76863759$																																																																									
$q_c = 18175,87 \text{ kW}$																																																																											
$q_a = 21040,21 \text{ kW}$																																																																											
$q_e = 17045,54 \text{ kW}$																																																																											
Equações																																																																											
$m_2+m_3=m_1c_1=1$		$m_3=m_4=m_5$																																																																									
$q_a=m_2h_1$		$q_g=m_3h_3+m_2h_2-m_1h_1$																																																																									
$q_e=m_5h_4$		$COP=q_e/q_g$																																																																									
<a href="#">Volta Acima</a>																																																																											

SISTEMA DE ABSORÇÃO com TROCADOR DE CALOR																																																																																																									
Esquema		Variáveis																																																																																																							
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td><math>m_1 = 20,72611 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_1 = 0,5</math></td><td><math>h_1 = -168 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_2 = 20,72611 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_2 = 0,664</math></td><td><math>h_2 = -120 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_3 = 13,4804 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_3 = 0,0</math></td><td><math>h_3 = -52 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_4 = 13,4804 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_4 = 0,0</math></td><td><math>h_4 = -116 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_5 = 0,0</math></td><td><math>h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_6 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_6 = 0,0</math></td><td><math>h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_7 = 7,245714 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_7 = 0,0</math></td><td><math>h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_g = 21175,68 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"><math>COP = 0,8049583</math></td><td colspan="2"></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_c = 18175,87 \text{ kW}</math></td><td colspan="2"><math>q_{hx} = 994,853413 \text{ kW}</math></td><td colspan="2" rowspan="4"></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_a = 20177,46 \text{ kW}</math></td><td colspan="6"></td></tr> <tr> <td colspan="2"><math>q_e = 17045,54 \text{ kW}</math></td><td colspan="6" rowspan="2"></td></tr> <tr> <td colspan="8" style="text-align: right;"><a href="#">Volta Acima</a></td></tr> </tbody> </table>								$m_1 = 20,72611 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,5$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$						$m_2 = 20,72611 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,664$	$h_2 = -120 \text{ kJ/kg}$						$m_3 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = -52 \text{ kJ/kg}$						$m_4 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = -116 \text{ kJ/kg}$						$m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}$						$m_6 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_6 = 0,0$	$h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}$						$m_7 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_7 = 0,0$	$h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}$						$q_g = 21175,68 \text{ kW}$		$COP = 0,8049583$						$q_c = 18175,87 \text{ kW}$		$q_{hx} = 994,853413 \text{ kW}$						$q_a = 20177,46 \text{ kW}$								$q_e = 17045,54 \text{ kW}$								<a href="#">Volta Acima</a>							
$m_1 = 20,72611 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,5$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_2 = 20,72611 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,664$	$h_2 = -120 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_3 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = -52 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_4 = 13,4804 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = -116 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_5 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_6 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_6 = 0,0$	$h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$m_7 = 7,245714 \text{ Kg/s}$	$c_7 = 0,0$	$h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}$																																																																																																							
$q_g = 21175,68 \text{ kW}$		$COP = 0,8049583$																																																																																																							
$q_c = 18175,87 \text{ kW}$		$q_{hx} = 994,853413 \text{ kW}$																																																																																																							
$q_a = 20177,46 \text{ kW}$																																																																																																									
$q_e = 17045,54 \text{ kW}$																																																																																																									
<a href="#">Volta Acima</a>																																																																																																									

## 5.5.2 Turbina LM6000 da GE

Assim por exemplo temos para uma possibilidade que estudei da turbina LM6000 da GE:

Dados de Entrada	
carga	100% %
potencia	34100 kW
consumo	83956 kW
eficiencia	40,61% %
fluxo dos gases	101,4 kg/s
temp dos gases	466 °C
rotação	3600 rpm

Tamb 30 °C  
 Pamb 760 mmHg  
 Umidade Relativa 60%

Temperaturas		Temperaturas		Potências e Eficiência	
Tv1	80,0 °C	mpg4	101,40	wpb	1,48 kW
Tv2	104,8 °C	mpH2O	13,12 Kg vapor/s	qpecon	4268,66 KJ/s
Tg4	739,2 K	mpv2	13,12 Kg vapor/s	efic	81%
Tg5	220,0 °C	mpv1	12,52 Kg/s	wptg	34100,00 kW
Tg6	178,1 °C	mpv7	0,59 Kg/s	wpl	34098,52 kW
Tv6	200,0 °C	mpv8	12,52 Kg/s	HI	83956,00 kW
TH2O	80,0 °C			Cpar	1,00483 kJ/kg K
Tvapor	200,0 °C			qppro	33515,11578 kW

Pressões		Fluxos		Calor e outros valores	
Pv1	1,2 Bar	hv1	334,53 KJ/Kg	qpar	25080,16 J/Kg ar
Pv2	1,2 Bar	hv2	440,03 KJ/Kg	qar	2543128,72 J/s
Pv3	0,1 Bar	hv3	438,24 KJ/Kg	qH2O	1912,28 Kj/Kg
Pv7	1,2 Bar	hv4	763,72 KJ/Kg	qpH2O	25080,16 J/Kg ar
pv4	10,0 Bar	hv5	763,72 KJ/Kg	carga	1,00 %
Pvapor	0,1 bar	hv6	2676,00 KJ/Kg	efic	41% %
PH2O	1,2 Bar	hv7	2676,00 KJ/Kg	omega	3600 rpm
Pv6	10,0 Bar				

Tive os seguintes resultados globais na turbina com o recuperador:

Dados de Saída		
Produção de vapor	47,2	Ton/H
Produção eletrica	34.100,0	kW
consumo auxiliar	1,5	kW
consumo	83.956,0	kW
eficiencia do ciclo	80,5%	%
temp, ar na chaminé	178,1	°C

Os resultados para o sistema de refrigeração por absorção dependem da vazão de vapor saturado seco que sai da turbina mpH<sub>2</sub>O:

SISTEMA DE ABSORÇÃO																									
Esquema		Variáveis																							
		<table border="1"> <tr> <td><math>m_1 = 13,12 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_1 = 0,4</math></td><td><math>h_1 = -168 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_2 = 8,530274 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_2 = 0,615</math></td><td><math>h_2 = -52 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_3 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_3 = 0,0</math></td><td><math>h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_4 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_4 = 0,0</math></td><td><math>h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_5 = 0,0</math></td><td><math>h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> </table>				$m_1 = 13,12 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,4$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$		$m_2 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,615$	$h_2 = -52 \text{ kJ/kg}$		$m_3 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}$		$m_4 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}$		$m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}$	
$m_1 = 13,12 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,4$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$																							
$m_2 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,615$	$h_2 = -52 \text{ kJ/kg}$																							
$m_3 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = 2676 \text{ kJ/kg}$																							
$m_4 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = 167,5 \text{ kJ/kg}$																							
$m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2520 \text{ kJ/kg}$																							
		$q_g = 14029,32 \text{ kW}$ COP = 0,76883759																							
		$q_c = 11501,53 \text{ kW}$ $q_a = 13314,06 \text{ kW}$ $q_e = 10786,27 \text{ kW}$																							
<b>Equações</b>																									
$m_2 + m_3 = m_1 c_1 = m_3 = m_4 = m_5$ $q_a = m_2 h_1$ ; $q_e = m_5 h_1$ ; COP = $q_e / q_g$		$q_g = m_3 h_3 + m_2 h_2 - m_1 h_1$ $q_c = m_3 h_3 - m_4 h_4$																							
<a href="#">Volta Acima</a>																									

SISTEMA DE ABSORÇÃO com TROCADOR DE CALOR																																	
Esquema		Variáveis																															
		<table border="1"> <tr> <td><math>m_1 = 13,1153 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_1 = 0,5</math></td><td><math>h_1 = -168 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_2 = 13,1153 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_2 = 0,664</math></td><td><math>h_2 = -120 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_3 = 8,530274 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_3 = 0,0</math></td><td><math>h_3 = -52 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_4 = 8,530274 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_4 = 0,0</math></td><td><math>h_4 = -116 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_5 = 0,0</math></td><td><math>h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_6 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_6 = 0,0</math></td><td><math>h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> <tr> <td><math>m_7 = 4,585022 \text{ Kg/s}</math></td><td><math>c_7 = 0,0</math></td><td><math>h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}</math></td><td></td></tr> </table>				$m_1 = 13,1153 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,5$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$		$m_2 = 13,1153 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,664$	$h_2 = -120 \text{ kJ/kg}$		$m_3 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = -52 \text{ kJ/kg}$		$m_4 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = -116 \text{ kJ/kg}$		$m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}$		$m_6 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_6 = 0,0$	$h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}$		$m_7 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_7 = 0,0$	$h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}$	
$m_1 = 13,1153 \text{ Kg/s}$	$c_1 = 0,5$	$h_1 = -168 \text{ kJ/kg}$																															
$m_2 = 13,1153 \text{ Kg/s}$	$c_2 = 0,664$	$h_2 = -120 \text{ kJ/kg}$																															
$m_3 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_3 = 0,0$	$h_3 = -52 \text{ kJ/kg}$																															
$m_4 = 8,530274 \text{ Kg/s}$	$c_4 = 0,0$	$h_4 = -116 \text{ kJ/kg}$																															
$m_5 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2676 \text{ kJ/kg}$																															
$m_6 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_6 = 0,0$	$h_6 = 167,5 \text{ kJ/kg}$																															
$m_7 = 4,585022 \text{ Kg/s}$	$c_7 = 0,0$	$h_7 = 2520 \text{ kJ/kg}$																															
		$q_g = 13389,78 \text{ kW}$ COP = 0,8049583 $q_c = 11501,53 \text{ kW}$ $q_a = 12768,11 \text{ kW}$ $q_e = 10786,27 \text{ kW}$																															
		$q_g = m_3 h_3 + m_2 h_2 - m_1 h_1$ $q_c = m_3 h_3 - m_4 h_4$																															
<a href="#">Volta Acima</a>																																	

### 5.5.3 Turbina LM5000 da GE

Assim por exemplo temos para uma possibilidade que estudei da turbina LM5000 da GE:

Dados de Entrada	
carga	100% %
potencia	28047 kW
consumo	76849 kW
eficiencia	36,50% %
fluxo dos gases	101,12 kg/s
temp dos gases	457 °C
rotação	3600 rpm

Tamb	30 °C
Pamb	760 mmHg
Umidade Relativa	60%

Temperaturas		Temperaturas		Potências e Eficiência	
Tv1	80,0 °C	mpg4	101,12	wpb	1,42 kW
Tv2	104,8 °C	mpH2O	12,60 Kg vapor/s	qpecon	4101,23 KJ/s
Tg4	730,2 K	mpv2	12,60 Kg vapor/s	efic	78%
Tg5	220,0 °C	mpv1	12,03 Kg/s	wptg	28047,00 kW
Tg6	179,6 °C	mpv7	0,57 Kg/s	wpl	28045,58 kW
Tv6	200,0 °C	mpv8	12,03 Kg/s	Hl	76849,00 kW
TH2O	80,0 °C			Cpar	1,00483 kJ/kg K
Tvapor	200,0 °C			appro	32200,53733 kW

Pressões		Fluxos		Calor e outros valores	
Pv1	1,2 Bar	hv1	334,53 KJ/Kg	qpar	24096,43 J/Kg ar
Pv2	1,2 Bar	hv2	440,03 KJ/Kg	qar	2436631,44 J/s
Pv3	0,1 Bar	hv3	438,24 KJ/Kg	qh2O	1912,28 KJ/Kg
Pv7	1,2 Bar	hv4	763,72 KJ/Kg	qph2O	24096,43 J/Kg ar
pv4	10,0 Bar	hv5	763,72 KJ/Kg	carga	1,00 %
Pvapor	0,1 bar	hv6	2676,00 KJ/Kg	efic	37 % %
PH2O	1,2 Bar	hv7	2676,00 KJ/Kg	omega	3600 rpm
Pv6	10,0 Bar				

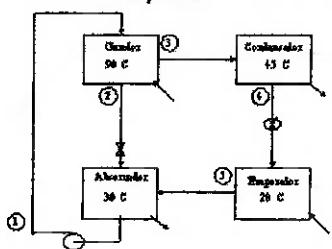
Tive os seguintes resultados globais na turbina com o recuperador:

Dados de Saída	
Produção de vapor	45,4 Ton/H
Produção eletrica	28.047,0 kW
consumo auxiliar	1,4 kW
consumo	76.849,0 kW
eficiencia do ciclo	78,4% %
temp, ar na chaminé	179,6 °C

Os resultados para o sistema de refrigeração por absorção dependem da vazão de vapor saturado seco que sai da turbina mpH2O:

### SISTEMA DE ABSORÇÃO

#### Esquema



#### Variáveis

$m_1 = 12,60$ Kg/s	$c_1 = 0,4$	$h_1 = -168$ kJ/kg
$m_2 = 8,195688$ Kg/s	$c_2 = 0,615$	$h_2 = -52$ kJ/kg
$m_3 = 4,405182$ Kg/s	$c_3 = 0,0$	$h_3 = 2676$ kJ/kg
$m_4 = 4,405182$ Kg/s	$c_4 = 0,0$	$h_4 = 167,5$ kJ/kg
$m_5 = 4,405182$ Kg/s	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2520$ kJ/kg

$q_g = 13479,04$ kW	$COP = 0,76883759$
$q_c = 11050,4$ kW	
$q_a = 12791,83$ kW	$q_c = m_3 h_3 - m_4 h_4$
$q_e = 10363,19$ kW	

#### Equações

$$m_2 + m_3 = m_1 c_1 \Rightarrow m_3 = m_4 = m_5$$

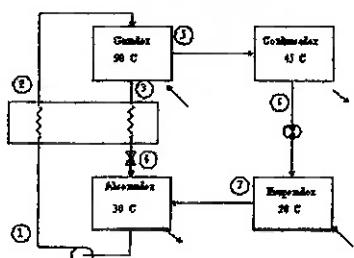
$$q_a = m_2 h_1 \quad q_e = m_5 h_5 \quad COP = q_e / q_g$$

$$q_g = m_3 h_3 + m_2 h_2 - m_1 h_1$$

$$q_c = m_3 h_3 - m_4 h_4$$

[Volta Acima](#)

### SISTEMA DE ABSORÇÃO com TROCADOR DE CALOR



#### Variáveis

$m_1 = 12,60087$ Kg/s	$c_1 = 0,5$	$h_1 = -168$ kJ/kg
$m_2 = 12,60087$ Kg/s	$c_2 = 0,664$	$h_2 = -120$ kJ/kg
$m_3 = 8,195688$ Kg/s	$c_3 = 0,0$	$h_3 = -52$ kJ/kg
$m_4 = 8,195688$ Kg/s	$c_4 = 0,0$	$h_4 = -116$ kJ/kg
$m_5 = 4,405182$ Kg/s	$c_5 = 0,0$	$h_5 = 2676$ kJ/kg
$m_6 = 4,405182$ Kg/s	$c_6 = 0,0$	$h_6 = 167,5$ kJ/kg
$m_7 = 4,405182$ Kg/s	$c_7 = 0,0$	$h_7 = 2520$ kJ/kg

$q_g = 12874,2$ kW	$COP = 0,8049583$
$q_c = 11050,4$ kW	
$q_a = 12267,31$ kW	$q_hx = 604,841746$ kW
$q_e = 10363,19$ kW	

#### Equações

$$m_2 + m_3 = m_1 c_1 \Rightarrow m_3 = m_4 = m_5$$

$$q_a = m_2 h_1 \quad q_e = m_5 h_5 \quad COP = q_e / q_g$$

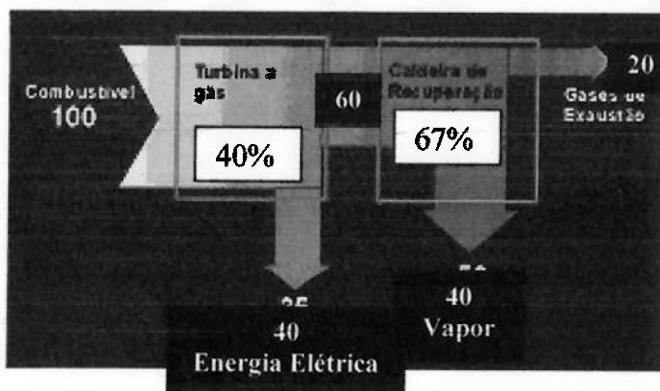
$$q_g = m_3 h_3 + m_2 h_2 - m_1 h_1$$

$$q_c = m_3 h_3 - m_4 h_4$$

[Volta Acima](#)

## 6 Conclusão

Cogeração é a geração seqüencial em temperatura de trabalho (energia elétrica ou mecânica) e de energia térmica (calor ou 'frio') através de uma única queima de combustível.

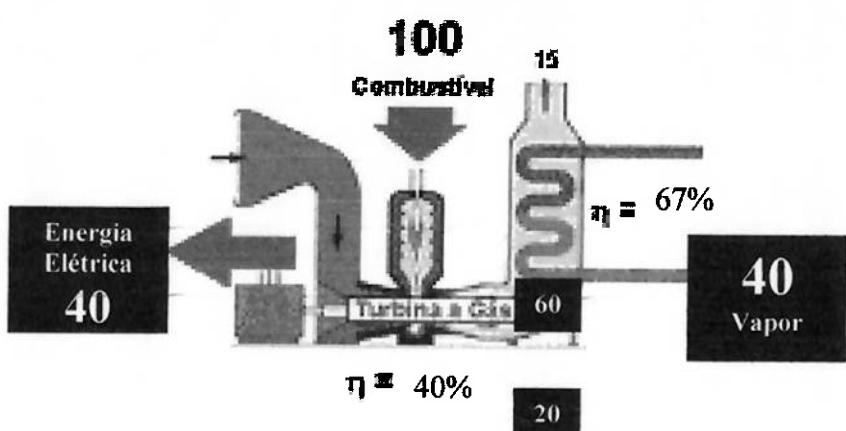


Na cogeração aproveita-se o potencial existente nos produtos resultantes da queima de um combustível que estão a alta temperatura para geração de trabalho e energia térmica. Os produtos de combustão a alta temperatura possuem uma grande disponibilidade para conversão de sua energia interna em trabalho. Quando se utiliza esta energia em baixas temperaturas (como calor para processo) esta disponibilidade é dissipada. A cogeração visa o aproveitamento deste potencial, obtendo uma forma de energia de maior qualidade termodinâmica (trabalho), abaixando a temperatura dos produtos de combustão que depois fornecem calor para processo.

Um motor térmico, por exemplo, uma turbina a gás, aproveita a energia dos produtos de combustão produzindo trabalho. Os gases de exaustão são rejeitados a uma temperatura suficientemente alta para fornecerem calor para processo ao passarem por uma caldeira de recuperação.

A junção da produção de trabalho e de energia térmica com uma única queima de combustível e aproveitamento seqüencial em temperatura resulta em uma grande economia de energia primária (combustível).

Tomando como exemplo os resultados apresentados acima o caso da turbina L6000 da GE foi o que rendeu os melhores resultados e melhor rendimento global. Assim, em um shopping utilizando cogeração, utilizando uma turbina a gás e uma caldeira de recuperação, são necessárias 100 unidades de energia de combustível para a produção de 40 unidades de energia elétrica e 40 unidades de calor. Se a eficiência da turbina a gás for igual a 40 %, são consumidas 100 unidades de energia de combustível para a produção de 40 unidades de energia elétrica. Com as 60 unidades de energia rejeitadas nos gases de exaustão, uma caldeira de recuperação com 67 % de eficiência produz as 40 unidades de calor para processo na forma de vapor.



Do ponto de vista termodinâmico (preservação de reservas de combustível), a cogeração é plenamente justificável. A viabilidade econômica da cogeração deve ser verificada através da análise do fluxo de caixa para uma determinada aplicação, considerando o custo inicial dos equipamentos e os retornos e desembolsos correntes durante a vida da usina.

O sistema de absorção permite refrigerar o espaço disponível de forma a otimizar a utilização de energia disponível. Se utiliza um trocador de calor para melhorar o CDEabs em todas as soluções apresentadas.

## 7 Bibliografia

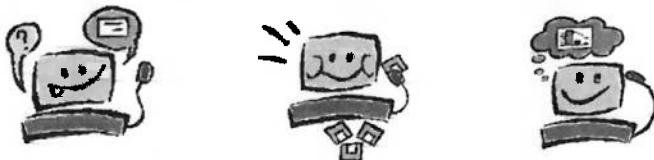
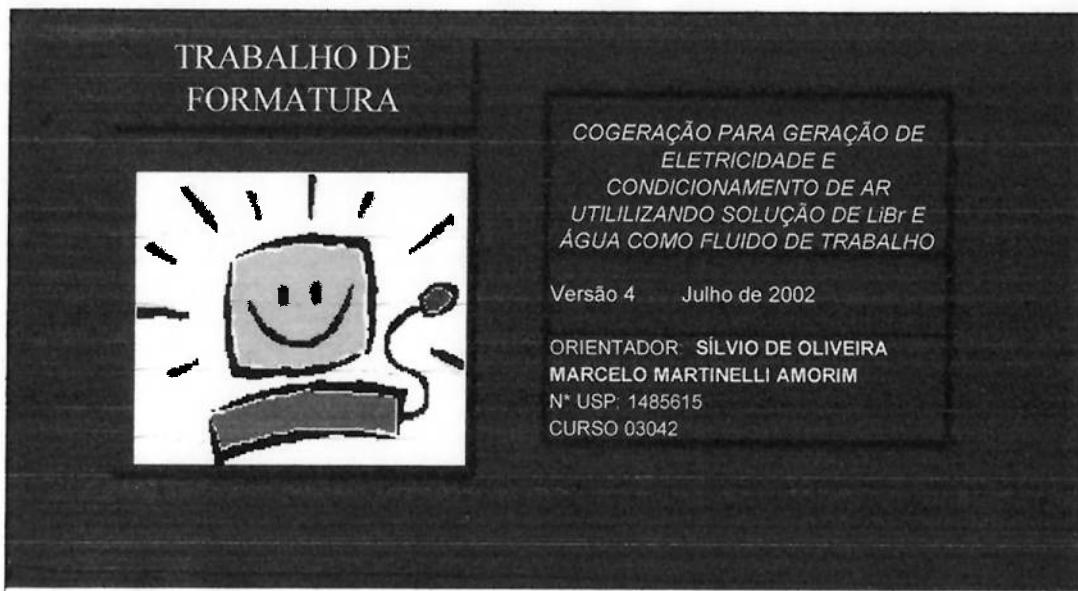
1. Ashrae Journal vols 32/2,33/2,34/3,33/7:
  - 34/3-Aumento de Eficiência de Cogeração com chiller de absorção.
  - 33/7-Modelagem de refrigeração (energia) uso e demanda
  - 33/2-Planejando Sistemas de Cogeração
  - 33/2-Cogeração-Competição ou Pesquisa.
2. ASHRAE TRANSACTIONS 85-36 Número 2: "Uma Simulação Modular computacional de sistemas de absorção"
3. ASHRAE TRANSACTIONS - " Absortion Chillers Maximize Cogeneration Vale."
4. ASHRAE TRANSACTIONS- " STATUS OF THE DOUBLE - EFFECT ABSORTION HEAT PUMP (DEAHP) "
5. CESP: CONSERVAÇÃO E COGERAÇÃO: "A EFICIÊNCIA COMO FONTE DE ENERGIA".
6. Perspectivas da cogeração a gás natural no Brasil por Jéferson Borghetti Soares
7. Harman, Richard T 198 Gas Turbine Engineering
8. Van Wylen, GordonJ, 1976, "Fundamentos da Termodinâmica Clássica".
9. Manual de Administração de Energia do Governo de São Paulo.
10. M. J. Moran e H. N. Shapiro; Fundamentals of Engineering Thermodynamics; John Wiley & Sons, Inc., third edition, 1996;
11. W. F. Stoecker, J. W. Jones; Refrigeração e Ar Condicionado, tradução de J. M. Saiz Jabardo-[et. al.], ed. McGraw-Hill Ltda; 1985

12. Althouse, Turnquist, Bracciano; Modern Refrigeration and Air Conditioning, The Goodheart-Willcox Company, Inc., 1996
13. "ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume", Atlanta, Ga., 1981;
14. "ASHRAE Handbook, Equipment Volume", Atlanta, Ga., 1981;
15. Site - STR AR Condicionado [str@strarcondicionado.com.br](mailto:str@strarcondicionado.com.br)
16. Artigo – A História da Turbina a Gás – Turbina Home Page.
17. Site Tecnologia e conhecimento do UOL: [www\lsites.uol.com.br/technoelearning/Eletrica/Termeletricas/termeletricas.html](http://www\lsites.uol.com.br/technoelearning/Eletrica/Termeletricas/termeletricas.html)
18. GEES South America

## 8 Anexos

### 8.1 Anexo 1 (Telas do Aplicativo)

Tela inicial do aplicativo... e tela de escolha de alternativas

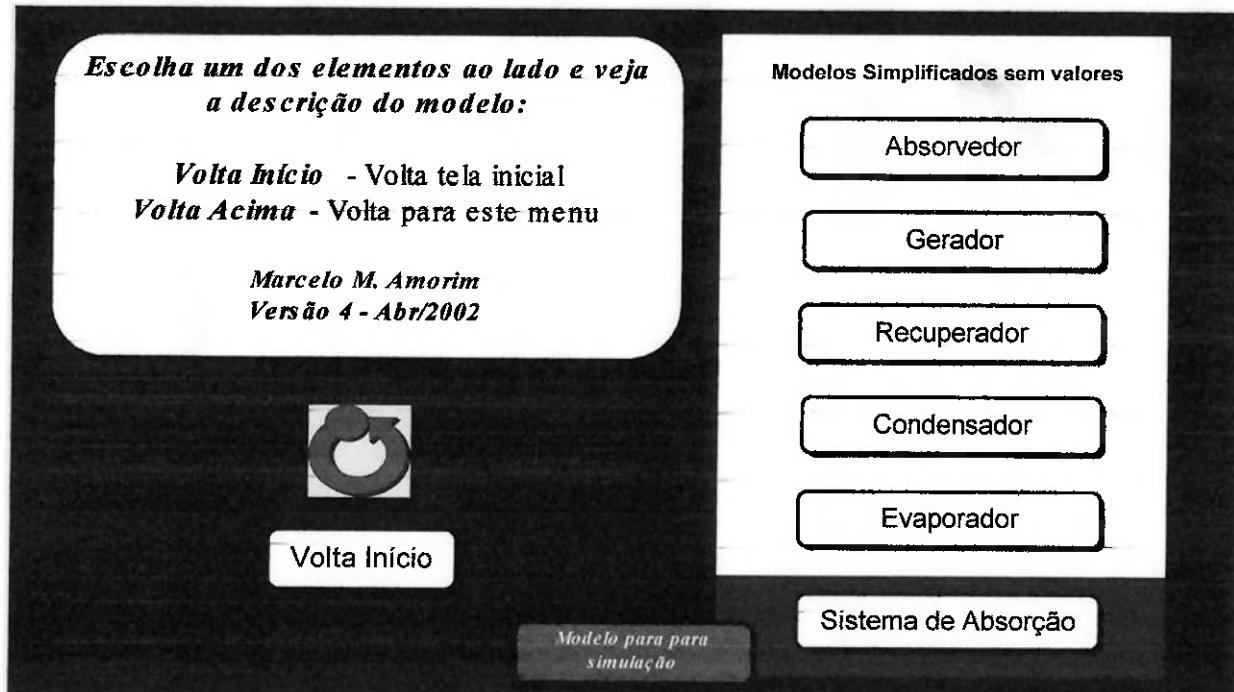
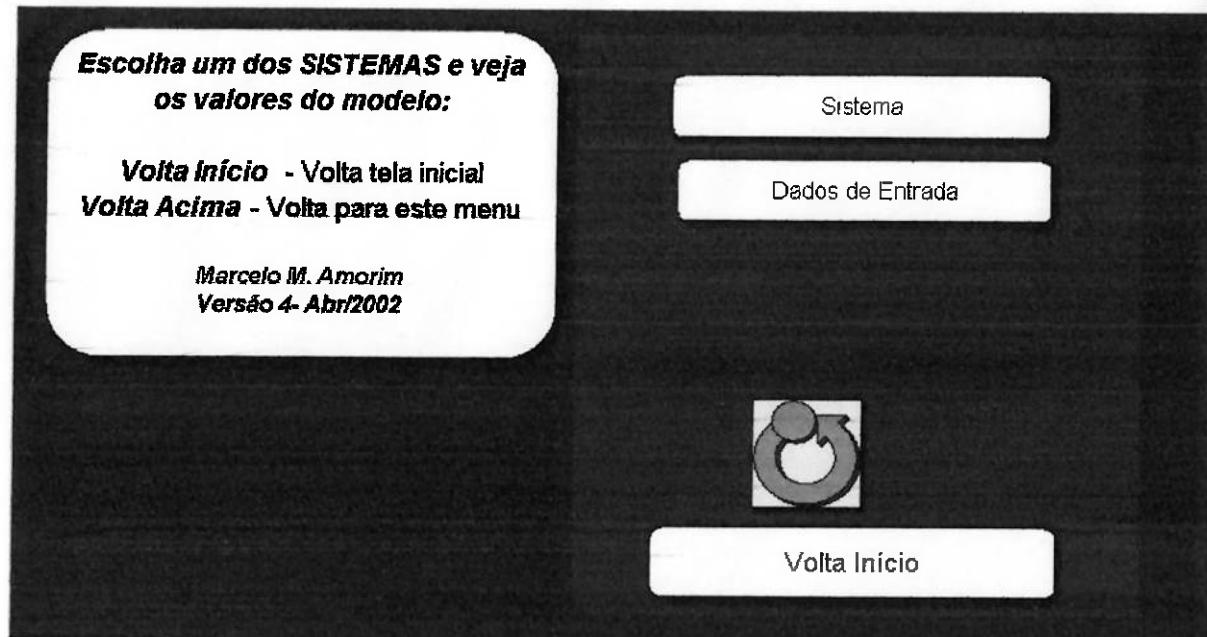


Sistema de Absorção      Turbina a Gás      Sistema Completo      Sair

Escolha abaixo os dados do equipamento e entre com os dados em Entrada de Dados

Equipamento	Equipamento 1	Equipamento 2	Equipamento 3
Tipo	Turbina LM6000 da GE Aeroderivada	Turbina LM5000 da GE Aeroderivada	MS6001 Nuevo Pignone Industrial
Eixos	2	2	2
Combustível	GN	GN	GN
Condições	ISO	ISO	ISO
Carga	100%	100%	100%
Potência	43050 KW	34450 KW	38980 KW
Consumo	103141 KW	91657 KW	123220 KW
Eficiência	41,74%	37,59%	31,60%
fluxo de Gases	123,75 Kg:s	120 Kg:s	137,9 Kg:s
T gases	445 C	436 C	537 C
rotação	3600 rpm	3600 rpm	5100 rpm
Condições	T 25 C, altitude 700m	T 25 C, altitude 700m	T 25 C, altitude 700m
Carga	100%	100%	100%
Potência	34100 KW	28047 KW	33064 KW
Consumo	83956 KW	76849 KW	107790 KW
Eficiência	40,61%	36,50%	30,67%
fluxo de Gases	101,4 Kg:s	101,12 Kg:s	122,06 Kg:s
T gases	466 C	457 C	543 C
rotação	3600 rpm	3600 rpm	5100 rpm

## Tela de apresentações dos sistemas de absorção e de potência



## 8.2 Anexo 2 (Funções e rotinas do Aplicativo)

### 8.2.1 Funções para o cálculo das propriedades termodinâmicas do vapor d'água

Function fndh(t1 As Double)

```
fndh = (597.5 - 0.570864 * t1 + 0.00023544 * (t1) ^ 2 - 0.0000037 * t1 ^ 3) *  
4.1868
```

End Function

Function fnht(pr2 As Double)

```
fnht = 1.78846 + 0.43805937 / (pr2 ^ 0.8499999 - 1.88749) + 0.0347775 *  
(pr2) - 0.1530711 * (pr2) ^ 2 + 0.2132129 * (pr2) ^ 3 - 0.09292805 * (pr2) ^ 4
```

End Function

Function fna11(pr3 As Double)

```
fna11 = -21.05779375 + 225.5180959 / (pr3 + 9.39019433) - 2.016786374 *  
Exp(-133.66657 * (pr3 + 0.1296938257) ^ 2)
```

End Function

Function fna12(pr4 As Double)

fna12 = 18.14317752 + 133.0803968 / ((pr4) - 8.63686109)

End Function

Function fna21(pr5 As Double)

fna21 = 0.9113044722 + 10.6373543 \* (pr5) - 17.1692306 \* (pr5) ^ 2 +  
7.359577957 \* (pr5) ^ 3 - 2.034175037 - Exp(-357.0357995 \* ((pr5) +  
0.0365991653) ^ 2)

End Function

Function fna22(pr6 As Double)

fna22 = -0.4404207404 + 4.287201 \* (pr6) - 1.215557 \* (pr6) ^ 2 - 0.6054166  
\* (pr6) ^ 3

End Function

Function fnb11(pr7 As Double)

```
fnb11 = 1.069730941 + ((1.069730941) ^ 2 - (4.775490506 - (pr7)) /  
4.525330179) ^ 0.5
```

End Function

Function fnb12(pr8 As Double)

```
fnb12 = 1.069399985 + ((1.066939985) ^ 2 - (4.531984516 - (pr8)) /  
4.339178708) ^ 0.5
```

End Function

Function fnb21(pr9 As Double)

```
fnb21 = 1.468883233 - ((1.46883233) ^ 2 - (2.673611511 - (pr9)) /  
1.277250457) ^ 0.5
```

End Function

Function fnb22(pr10 As Double)

```
fnb22 = 1.964573437 - ((1.964573437) ^ 2 - (20.19202836 - (pr10)) /  
5.290258898) ^ 0.5
```

End Function

Function fntss(pr11 As Double)

```
fntss = (0.0129281 * (pr11) ^ 0.65 * Sin(0.803 * lognep(0.904104 / pr11)) +  
10.65669 / (6.5509 - lognep(pr11)) - 0.625124) * 374.15
```

End Function

Function fnst(p12, pr12 As Double)

```
fnst = 1.913569966 / (p12) ^ (0.0610307141 + 0.001258578 * lognep(pr12)) -  
0.0072749781 + 0.0080506066 * (pr12) - 0.0019131648 * 0.25 ^ (p12) +  
384.19951 * Exp(-1.7623 * ((pr12) + 2.4797468) ^ 2)
```

End Function

Function fnsl(tr13 As Double)

```
fnsl = 4.4429 * ((0.64139869 + 2.0869569 * (tr13))) ^ 0.5 - 0.8009183191 +  
0.551104 * Exp(-6.5755268 * (1.5633863 - (tr13)) ^ 2)
```

End Function

Function hlsat(p14 As Double)

```
hlsat = (0.743329 * fntss(p14 / 221.2) / 374.15 + 0.0957797 * (fntss(p14 /  
221.2) / 374.15) ^ 4) * 2107.4
```

End Function

Function slsat(p15 As Double)

```
slsat = (0.64139869 + 2.0869569 * fntss(p15 / 221.2) / 374.15) ^ 0.5 -  
0.8009183191 + 0.551104 * Exp(-6.5755268 * (1.5633863 - fntss(p15 / 221.2) /  
374.15) ^ 2) * 4.4429
```

End Function

Function sh(h16, p16 As Double)

```
Dim a116, a216, aux16, hr16, pr16 As real
```

```
hr16 = h16 / 2107.4
```

```
pr16 = p16 / 221.2
```

```
If h16 >= 3250 Then
```

```
    a116 = fnb12(pr16)
```

```
Else
```

```
    a116 = fnb118(pr16)
```

```
    a216 = fnb21(pr16)
```

```
End If
```

```
If h16 < 0 Then
```

```
    aux16 = ((-a116 - ((a116) ^ 2 - 4 * a216 * 1.5421847 - hr16) ^ 0.5) / (2 *  
    a216) + fnst(p16, pr16)) * 4.4429
```

Else  
aux16 = ((-a116 + ((a116) ^ 2 - 4 \* a216 \* 1.5421847 - hr16) ^ 0.5) / (2 \*  
a216) + fnst(p16, pr16)) \* 4.4429

sh = aux16

End Function

Function Tsat(p17 As Double)

Tsat = fntss(p17 / 221.2)

End Function

Function Ht(t18, p18 As Double)

Dim a118, a218, aux18, tr18, pr18 As Double

tr18 = t18 / 374.15

pr18 = p18 / 221.2

If fntss(pr18) > (t18 + 0.1) Then

aux18 = hlsat(p18)

Else

If t18 >= 400 Then

a118 = fna12(pr18)

a218 = fna22(pr18)

Else

a118 = fna11(pr18)

```

a218 = fna21(pr18)

End If

aux18 = ((-a118 + ((a118) ^ 2 - 4 * a218 * (1.06909 - tr18)) ^ 0.5) / (2 *
a218) + fnht(pr18)) * 2107.4

If aux18 < 0 Then

aux18 = ((-a118 + ((a118) ^ 2 - 4 * a218 * (1.06909 - tr18)) ^ 0.5) / (2 *
a218) + fnht(pr18)) * 2107.4

End If

If (t18 = fntss(pr18)) And (p18 < 0.5) Then

aux18 = aux18 + (0.0023944 - 0.01101 * tr18) * 2107.4

End If

Ht = aux18

End If

```

End Function

```

Function Th(h19, p19 As Double)

Dim HR19, PR19, XX19, AUX19 As Double

HR19 = h19 / 2107.4

PR19 = p19 / 221.2

XX19 = HR19 - fnht(PR19)

AUX19 = (1.06909 + fna11(PR19) * XX19 + fna21(PR19) * (XX19) ^ 2) *

374.15

If AUX19 >= 400 Then

AUX19 = (1.06909 + fna12(PR19) * XX19 + fna22(PR19) * (XX19) ^ 2) *

374.15

```

```

End If

If AUX19 < 0 Then
    Th = AUX19
End If

End Function

Function Hs(h20, s20, p20 As Double)
Dim sr20, pr20, t20, h20, Ss, taux, aux20, h120, b220, xx20 As Double

sr20 = s20 / 4.4429
pr20 = p20 / 221.2
t20 = fntss(pr20)
h20 = Ht(t20, p20)
Ss = sh(h20, p20)
If s20 < Ss Then
    aux20 = (s20 - fnsl(t20 / 374.15)) / (Ss - fnsl(t20 / 374.15)) * (h20 - 4.1686 *
t20) + 4.1868 * t20
    taux = Th(aux20, p20)
    titulo = (1 - (aux20 - taux * 4.1868) / fndh(taux)) * 100
Else
    b120 = fnb11(pr20)
    b220 = fnb21(pr20)
    xx20 = sr20 - fntss(p20, pr20)
    aux20 = (1.5421847 + b120 * xx20 + b220 * (xx20) ^ 2) * 2107.4
If aux20 > 3250 Then
    b120 = fnb12(pr20)

```

```
b220 = fnb22(pr20)
aux20 = (1.5421847 + b120 * xx20 + b220 * (xx20) ^ 2) * 2107.4
titulo = 0
End If
End If
Hs = aux20

End Function
```

```
Function HI(tv21 As Double)
HI = tv21 * 4.1816
End Function
```

```
Function lognep(val As Double)
lognep = Log(val) / Log(Exp(1))

End Function
```

### 8.2.2 Funções para apresentação dos dados da Planilha

```
Sub Open_auto()
Inib
Sheets("Tapres").Select
range("A1").Select
Inib
End Sub
```

```
Sub AcessApres2()
```

```
    Open_auto
```

```
    Sheets("Dados Turbina").Select
```

```
End Sub
```

```
Sub Sair()
```

```
    Sheets("Tapres").Select
```

```
    Exib
```

```
    Exib
```

```
    range("a1").Select
```

```
    Application.DisplayAlerts = False
```

```
    ActiveWorkbook.Close
```

```
End Sub
```

