

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

TRABALHO DE FORMATURA

Prof. Responsável: Alberto Hernandez Neto

“SISTEMA DE COGERAÇÃO PARA AEROPORTO”

Prof. Orientador: Silvio de Oliveira Júnior

Aluno: José Eduardo Azevedo Ribeiro do Valle

São Paulo, Dezembro de 2001.

RESUMO	3
I. INTRODUÇÃO	4
II. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA	5
II.1. DEMANDA ENERGÉTICA	5
II.2. INSTALAÇÕES EXISTENTES	6
III. ALTERNATIVAS ANALISADAS	8
III.1. CONFIGURAÇÃO 1	8
III.2. CONFIGURAÇÃO 2	9
IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
IV.1. TURBINA A GÁS	10
IV.1.1. <i>O Ciclo Padrão a Ar Brayton</i>	11
IV.2. MOTOR A GÁS NATURAL	12
IV.2.1. <i>Ciclo Padrão a Ar Otto</i>	12
IV.3. CHILLER CENTRÍFUGO	13
IV.3.1. <i>Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor</i>	13
IV.4. CHILLER DE ABSORÇÃO	14
IV.4.1. <i>Ciclo de Refrigeração por Absorção de Amônia</i>	14
IV.5. BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA	16
IV.5.1. <i>Turbina a Gás</i>	16
IV.5.2. <i>Motor a Gás</i>	18
IV.5.3. <i>Caldeira de Recuperação</i>	18
IV.5.4. <i>Chiller Centrífugo</i>	19
IV.5.5. <i>Chiller de Absorção</i>	19
V. EQUIPAMENTOS ANALISADOS	20
VI. ANÁLISE ECONÔMICA	24
VII. CUSTOS OPERACIONAIS	25
VII.1. SITUAÇÃO ATUAL	25
VII.2. ALTERNATIVAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA	25
VII.3. TARIFAS	26
VII.3.1. <i>Energia Elétrica da Light e Demanda de Emergência</i>	26
VII.3.2. <i>Custo do Gás Natural</i>	28
VII.3.3. <i>Custo da Água de Reposição de Torre de Resfriamento</i>	28
VII.3.4. <i>Custos de Manutenção</i>	28
VII.3.5. <i>Resumo Custos Operacionais</i>	29
VIII. INVESTIMENTOS	30
IX. COMENTÁRIOS FINAIS	31
X. BIBLIOGRAFIA	33

RESUMO

A cogeração de energia é uma das formas mais eficientes de utilização dos recursos naturais, permitindo um máximo aproveitamento das fontes de energia disponíveis com um mínimo de degradação ambiental.

Este estudo analisa a viabilidade de implementação de uma solução desse tipo para o setor terciário, no caso, o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, com uma grande demanda de energia elétrica e de água gelada para o sistema de ar condicionado.

Após a caracterização do sistema atual, estudaram-se duas alternativas principais, ambas baseadas no uso do gás natural como combustível: turbina a gás ou motores de combustão interna, acoplados a caldeiras de recuperação de calor e chillers de absorção.

Os balanços de massa e energia permitiram identificar os custos operacionais de cada uma das alternativas utilizadas. Com valores de investimento obtidos de empresas da área, foi possível realizar a análise econômica.

A alternativa que apresentou o melhor resultado econômico foi a alternativa 2, baseada no uso de 6 motores a gás de 2500 kW cada. No entanto, o tempo de retorno de investimento desta alternativa é de 12 anos, prazo considerado longo para os padrões atuais do mercado. Em suma, dadas as atuais tarifas de energia elétrica e gás natural, e também os atuais custos dos equipamentos necessários à cogeração, a implantação de uma central de cogeração no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro não é viável.

I. INTRODUÇÃO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a possibilidade de implantação de uma central de cogeração no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Galeão, visando atender total ou parcialmente a demanda de energia elétrica e de água gelada para refrigeração.

O atual cenário energético brasileiro, em situação de crise, com escassez de energia elétrica e racionamento, é um dos fatores que mais favorecem a cogeração. Outros fatores determinantes são a grande disponibilidade de gás natural, devido principalmente à construção do gasoduto Brasil-Bolívia e a exploração ultramarina, a possibilidade de venda de um eventual excedente de energia no Mercado Atacadista de Energia (MAE) a preços competitivos, e os incentivos fiscais que surgem com a crise energética. Além disso, há uma grande possibilidade de elevação da tarifa praticada pelas concessionárias de energia elétrica. Existe também um apelo ecológico, já que uma planta de cogeração adequada apresenta uma maior eficiência na utilização dos recursos energéticos, resultando numa menor degradação do meio ambiente.

O Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro é um grande consumidor tanto de energia elétrica como de energia térmica para o sistema de ar condicionado, justificando, portanto, o interesse na implantação de uma central de cogeração.

II. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

II.1. DEMANDA ENERGÉTICA

A demanda máxima de energia elétrica é de 22,0 MW, enquanto a demanda térmica é de 5200 TR durante o verão, que é o período crítico. O consumo anual de energia elétrica é de 72.154 MWh/ano e o consumo de energia térmica é de 9.052 MWh/ano. A tabela abaixo mostra esses valores em comparação com dados dos aeroportos de Santos Dumont e de Jacarepaguá, ambos de porte menor e situados também na cidade do Rio de Janeiro.

Aeroporto	Energia Elétrica	Energia Térmica
Demanda Máxima (Verão)		
Galeão	22,0 MW	5.200 TR
Santos Dumont	1,9 MW	2.000 TR
Jacarepaguá	0,4 MW	-----
Consumo Anual		
Galeão	72.154 MWh/ano	9.052 MWh/ano
Santos Dumont	12.510 MWh/ano	7.076 MWh/ano
Jacarepaguá	1.760 MWh/ano	-----

Tabela II.1. – Quadro Comparativo de Demanda e Consumo de Energia

II.2. INSTALAÇÕES EXISTENTES

Sistema Elétrico

Atualmente o Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro é alimentado pela Light por meio de duas linhas de transmissão subterrâneas de 138 kV (Pedro Ernesto, linha 108 e Governador, linha 109). Estas linhas alimentam a subestação principal que dispõe de três transformadores abaixadores de tensão, sendo dois de 18/24/30 MVA e um de 30/40 MVA. A tensão de distribuição interna é de 13,2 kV.

Central de Água Gelada

Atualmente na Central de Água Gelada do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro existem instalados:

- 03 Chillers de 1400 TR cada, de fabricação Carrier modelo 17CB, que ainda utilizam R11 como fluido refrigerante, e que foram instalados ainda na 1ª etapa de ampliação do Aeroporto do Galeão. Destes 03 chillers, hoje apenas um encontra-se em condições de operação.
- 03 Chillers de 1400 TR cada, de fabricação Trane modelo CVHB 155. O primeiro destes três chillers foi instalado em 1992, numa 2ª etapa de ampliação do aeroporto, e os dois restantes foram instalados em 1998, na 3ª etapa de ampliação, quando foi construído o terminal TPS2.
- Existem também instalados outros três chillers de pequeno porte, de 164, 160 e 120 TR de capacidade nominal, e que servem o circuito de água gelada de emergência e da torre de controle. Estes três chillers não foram considerados no estudo de cogeração.

Resumindo, a instalação de água gelada principal tem 5.600 TR de capacidade instalada, devendo atender a uma demanda máxima de 5.200 TR. Verifica-se, portanto, que atualmente a CAG não dispõe de Chiller de reserva apto a operar para atender o pico de carga térmica, o que justifica a interesse da Infraero em substituir os três Chillers mais antigos, da Carrier, além é claro do apelo ecológico de acabar com a utilização do R11.

O circuito de água gelada opera nas seguintes condições:

- Vazão de Água Gelada: 377,0 m³/h (cada Chiller de 1400 TR)
- Temperatura da Água Gelada: 4,4 °C
- Temperatura de Retorno: 15,5 °C

Para fornecer a água de condensação dos Chillers existem instaladas 02 Torres de Resfriamento, cada uma subdividida em 06 células, cada célula com capacidade de resfriamento de 1400 TR, totalizando 16800 TR instalados.

O circuito de água de condensação é projetado para operar nas seguintes condições:

- Vazão de Água de Resfriamento: 673,0 m³/h (cada célula de 1400 TR)
- Temperatura da Água de Torre: 30,0 °C
- Temperatura do Retorno: 37,7 °C
- Temperatura de Bulbo Úmido do Ar: 26,7 °C

III. ALTERNATIVAS ANALISADAS

Dentre as inúmeras configurações possíveis, foram escolhidas duas, ambas de ciclo combinado, que oferecem as melhores condições de performance para a cogeração de energia elétrica e água gelada para refrigeração, dentro dos valores de demanda fornecidos. Ambas utilizam o gás natural como combustível, devido ao baixo preço e elevada oferta em comparação com outros combustíveis. A utilização de chillers de absorção também é recomendada, visando um maior rendimento da planta e uma menor degradação dos recursos naturais.

III.1. CONFIGURAÇÃO 1

Essa configuração consiste no uso de uma turbina a gás, utilizando gás natural como combustível, como elemento gerador de potência, seguida de uma caldeira de recuperação que utiliza os gases de escape da turbina para gerar vapor, e finalmente os chillers de absorção, que utilizam o vapor gerado anteriormente como fonte de calor e produzem a água gelada para o sistema de refrigeração do aeroporto. O uso de chillers convencionais pode ser necessário para complementar a produção dos chillers de absorção.

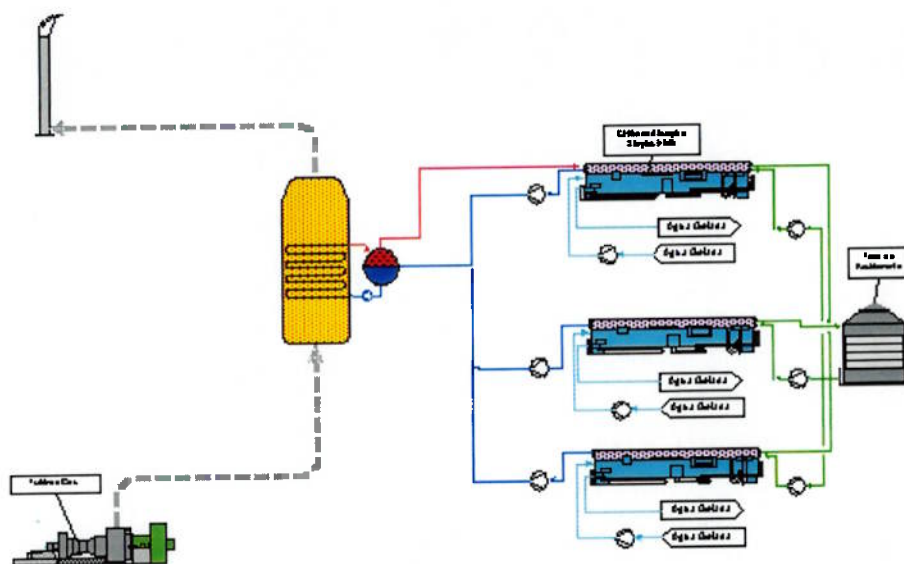


Figura III.1. – Configuração 1

III.2. CONFIGURAÇÃO 2

A segunda configuração é baseada no uso de motores a gás, operando em ciclo Otto, como elemento gerador de potência. De forma semelhante à anterior, os gases de escape dos motores são aproveitados pela caldeira de recuperação para a geração de vapor, e esse vapor é utilizado pelos chillers de absorção como fonte de calor. Também como no caso anterior, pode ser necessário o uso de chillers convencionais para complementar a produção de água gelada. Como a potência fornecida por um motor movido a gás natural é significativamente menor que a potência de uma turbina a gás, é necessário o uso simultâneo de vários motores. A escolha do número de motores a serem utilizados, bem como a potência de cada um, é um aspecto que merece ser analisado.

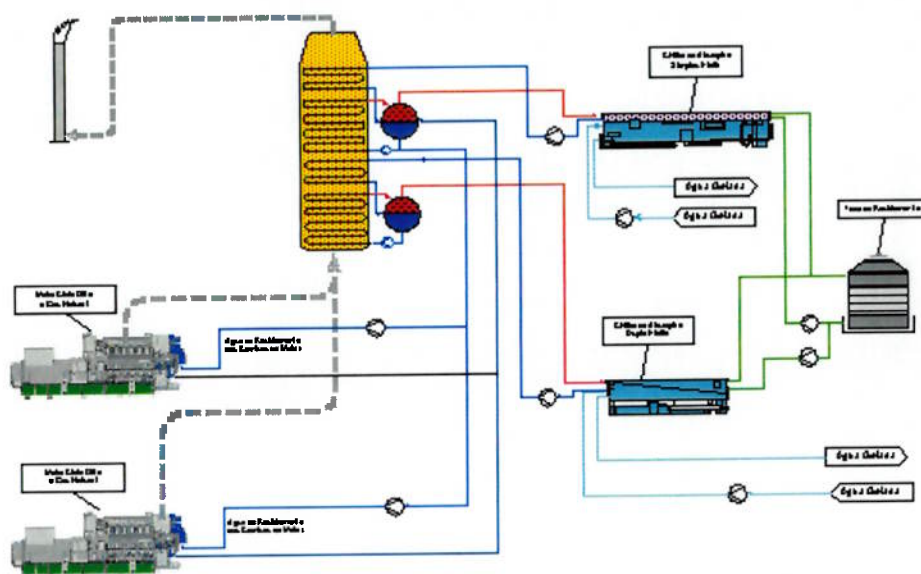


Figura III.2. – Configuração 2

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

IV.1. TURBINA A GÁS

A figura IV.1 abaixo mostra um esquema do funcionamento de uma turbina a gás. O ar entra no compressor, no ponto 1, e é comprimido para uma pressão mais alta. Ainda não há nenhuma adição de calor, embora a compressão aumente a temperatura do ar na descarga. Após deixar o compressor, o ar entra na câmara de combustão, onde o combustível é injetado e ocorre a reação de combustão, a pressão constante. Os gases gerados na combustão são diluídos antes da entrada da turbina, de modo a reduzir a sua temperatura. Na turbina (ponto 3), a energia térmica dos gases é convertida em trabalho, normalmente em duas etapas. Sendo a primeira etapa a aceleração do fluido no bocal, transformando a energia térmica em cinética, e a segunda etapa a conversão dessa energia cinética em trabalho no rotor.

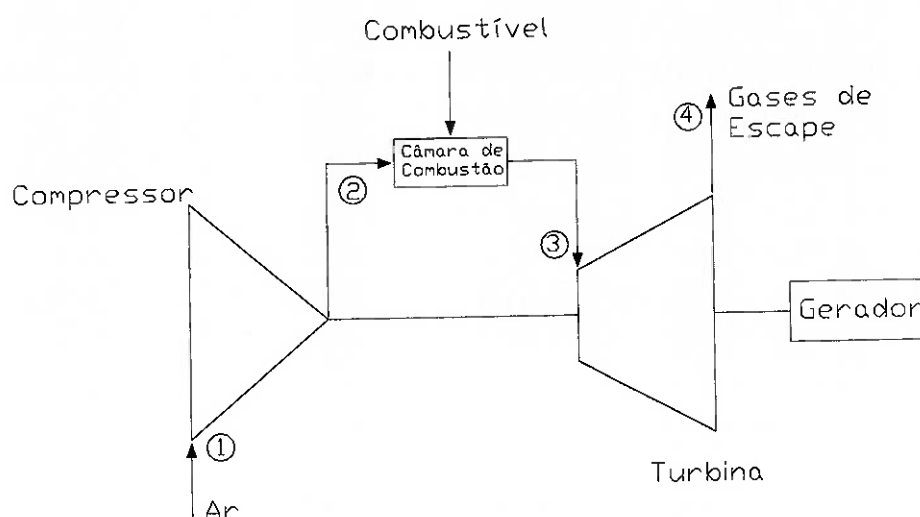


Figura IV.1. – Esquema de uma Turbina a Gás

Parte do trabalho gerado na turbina é utilizada para acionar o compressor, e o restante é a potência líquida disponível. Em geral, a energia utilizada no compressor corresponde a cerca de 40% da energia total fornecida pela turbina.

IV.1.1. O Ciclo Padrão a Ar Brayton

Uma turbina a gás opera segundo um ciclo termodinâmico chamado ciclo Brayton. Os diagramas pressão-volume e temperatura-entropia deste ciclo são mostrados na figura IV.2 abaixo. Os números utilizados são os mesmos da figura IV.1. A linha 1-2 representa a compressão, 2-3 representa a adição de calor a pressão constante ocorrida na câmara de combustão, 3-4 a expansão. O processo 4-1 nesses diagramas representa um resfriamento a pressão constante. Numa turbina a gás real, esse processo é realizado pela atmosfera, que recebe os gases de exaustão e fornece ar frio para o compressor. Por isso, é comum dizer que um equipamento real opera em “ciclo aberto”. Os principais parâmetros que caracterizam um ciclo Brayton são a taxa de compressão e a temperatura de chama.

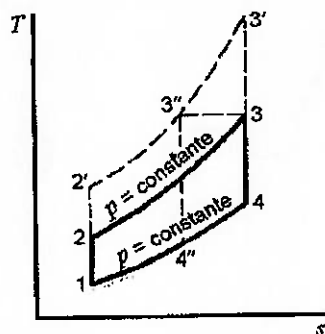


Figura IV.2. - Diagrama T-s do ciclo Brayton

IV.2. MOTOR A GÁS NATURAL

Os motores utilizados nas configurações de cogeração de energia discutidas anteriormente são motores de combustão interna, movidos a gás natural, e com ignição por centelha. Eles se assemelham aos motores a gasolina utilizados em automóveis, e são modelados termodinamicamente pelo ciclo padrão a ar Otto.

IV.2.1. Ciclo Padrão a Ar Otto

O diagrama T-s de um ciclo Otto (ideal) é mostrado na figura seguinte. Este ciclo consiste de quatro principais:

- 1-2: Compressão isentrópica do ar, quando o pistão se move do ponto morto inferior (lado da manivela) ao ponto morto superior (lado do cabeçote);
- 2-3: Transferência de calor a volume constante, com o pistão momentaneamente em repouso no ponto morto superior (este processo corresponde a ignição da mistura ar-combustível pela centelha e à queima subsequente);
- 3-4: Expansão isentrópica;
- 4-1: Rejeição de calor do ar, enquanto o pistão está no ponto morto inferior.

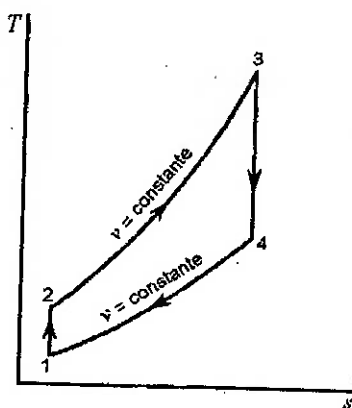


Figura IV.3. - Diagrama T-s do ciclo Otto

IV.3. CHILLER CENTRÍFUGO

Os chillers centrífugos são utilizados nas configurações de cogeração para complementar a produção de água gelada das máquinas de absorção. O seu funcionamento pode ser descrito pelo ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

IV.3.1. Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é composto pelos seguintes processos, de acordo com o diagrama T-s abaixo.

- 1-2: Compressão adiabática reversível;
- 2-3: Rejeição de Calor a pressão constante;
- 3-4: Estrangulamento (expansão) adiabático;
- 4-1: Vaporização do fluido de trabalho a pressão constante.

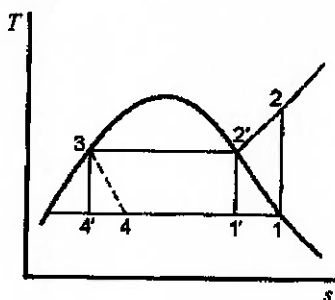


Figura IV.2. - Diagrama T-s do ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

Fluidos de trabalho comumente utilizados são o Freon (R12), R22, R134. Em geral, evita-se utilizar fluidos que possam atacar a camada de ozônio, como o Freon.

IV.4. CHILLER DE ABSORÇÃO

O chiller de absorção é o equipamento que permite o aproveitamento do calor rejeitado pela turbina a gás ou pelos motores, utilizando-o na produção de água gelada. É este equipamento que viabiliza a cogeração de energia elétrica e água gelada para refrigeração, num ciclo combinado de alto rendimento.

Este tipo de chiller opera segundo o ciclo de refrigeração por absorção de amônia.

IV.4.1. Ciclo de Refrigeração por Absorção de Amônia

O ciclo de refrigeração por absorção de amônia difere do ciclo por compressão de vapor pela maneira na qual a compressão é conseguida. No ciclo de absorção, o vapor de amônia a baixa pressão é absorvido pela água e a solução líquida é bombeada a uma pressão superior por uma bomba de líquido.

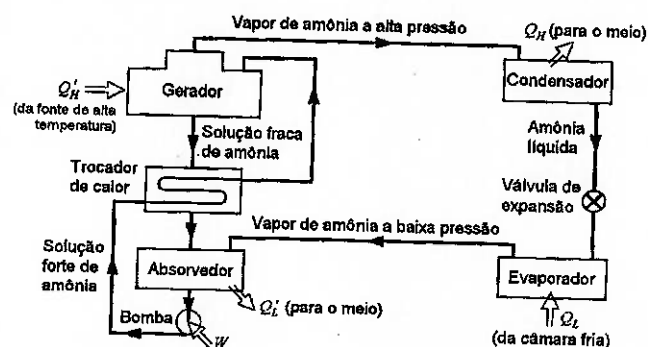


Figura IV.5. - Diagrama do ciclo de Refrigeração por Absorção de Amônia

O vapor de amônia a baixa pressão, que deixa o evaporador, entra no absorvedor onde é absorvido pela solução fraca de amônia. Esse processo ocorre a uma temperatura ligeiramente acima daquela do meio e deve ser transferido calor ao meio ambiente durante esse processo. A solução forte de amônia é então bombeada através de um trocador de calor ao gerador (a alta pressão e temperatura). Nessas condições, o vapor de amônia recebe calor de uma fonte a alta temperatura (no caso da cogeração, a fonte de calor é a caldeira de recuperação). O vapor de amônia vai então para o condensador, onde é condensado como no sistema por compressão de vapor, e então se dirige para a válvula de expansão e para o evaporador.

O trabalho consumido é apenas o de bombeamento de um líquido, que é significativamente menor que o trabalho do compressor no ciclo de compressão de vapor. No entanto, deve-se dispor de uma fonte de calor a uma temperatura relativamente alta (100 °C a 200 °C), como por exemplo, o vapor gerado na caldeira de recuperação.

IV.5. BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA

Nos itens abaixo segue o equacionamento utilizado para realizar o balanço de massa e energia em cada um dos equipamentos utilizados.

IV.5.1. Turbina a Gás

No caso da turbina a gás, deve-se equacionar o balanço de massa e energia de cada um dos seus componentes isoladamente.

IV.5.1.1. Compressor de Ar

Dadas as condições de entrada do ar (temperatura e pressão), a taxa de compressão e o rendimento isentrópico do compressor, determina-se as condições do ar na saída do compressor (entrada da câmara de combustão).

$$T_s = T_e \cdot \left(1 + \left(\frac{r_p^{(k-1)/k} - 1}{\eta_c} \right) \right)$$

r_p - taxa de compressão [adimensional];

η_c - rendimento isoentrópico do compressor [adimensional];

T_s - temperatura de saída do ar [K];

T_e - temperatura de entrada do ar [K].

E com o fluxo de ar, que é proveniente dos cálculos da combustão (ver item a seguir), é possível determinar o trabalho consumido pela compressão do ar.

$$\dot{W} = \dot{m}_{ar} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)$$

$\dot{W}$ - trabalho consumido pelo compressor [kW];

$\dot{m}_{ar}$ - fluxo de ar [kg/s];

c_p - calor específico do ar [kJ/kg K];

IV.5.1.2. Câmara de Combustão

O balanço na câmara de combustão deve ser realizado para determinar o excesso de ar, dado que a temperatura de chama é uma limitação para a operação da turbina. Sabendo o excesso de ar, é possível determinar o fluxo de ar necessário, e por conseguinte, o trabalho do compressor, discutido no item anterior.

Os cálculos foram realizados considerando a combustão completa e a pressão constante na câmara de combustão.

O equacionamento fica:

$$\dot{m}_{ar} c_p (T_{ar} - 25^\circ C) + \dot{m}_{combustivel} PCI = \dot{m}_{gases} c_{gases} (T_{chama} - 25^\circ C)$$

$\dot{m}_{ar}$ - fluxo de ar [kg/s];

c_p - calor específico do ar [kJ/kg K];

T_{ar} - temperatura de entrada do ar [$^\circ C$];

$\dot{m}_{combustivel}$ - fluxo de combustível [kg/s];

PCI - poder calorífico inferior [kJ/kg];

$\dot{m}_{gases}$ - fluxo de gases de escape [kg/s];

c_{gases} - calor específico dos gases de escape [kJ/kg K];

T_{chama} - temperatura adiabática da chama [$^\circ C$]

IV.5.1.3. Turbina

A temperatura de saída dos gases de escape da turbina é dada por:

$$T_{teórico} = T_{chama} \times \left(\frac{1}{r_p} \right)^{(k-1)/k}$$

$$T_{real} = T_{chama} - \eta_{iso} \cdot (T_{chama} - T_{teórico})$$

r_p - taxa de compressão [adimensional];

η_c - rendimento isoentrópico da turbina [adimensional];

T_{chama} - temperatura adiabática da chama [K];

$T_{teórico}$ - temperatura teórica na saída da turbina [K];

T_{real} - temperatura real na saída da turbina [K].

e o trabalho realizado na turbina é:

$$\dot{W} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{gases} \cdot (T_{chama} - T_{real})$$

$\dot{W}$ - trabalho produzido pela turbina [kW];

$\dot{m}_{gases}$ - fluxo de gases de escape [kg/s];

c_{gases} - calor específico dos gases [kJ/kg K];

IV.5.2. Motor a Gás

Os cálculos com motores a gás foram utilizados os valores nominais dos catálogos fornecidos pelos fabricantes, uma vez que a maioria deles opera nessa condição ou desligado, estando apenas um em carga parcial. Para este, foi feita uma aproximação (linear).

IV.5.3. Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação pode ser modelada como um trocador de calor que recebe os gases de escape da turbina a gás ou dos motores, e transfere a energia destes para a água, evaporando-a. A temperatura de saída dos gases deve ser superior a temperatura do vapor d'água gerado (para não violar a segunda lei da termodinâmica), que neste caso é de 100 °C. Consultando dados de fabricantes, que muitas vezes já fornecem a caldeira de recuperação acoplada à saída de uma turbina a gás, obteve-se a informação de que os gases de escape deixam a caldeira cerca de 30 °C acima da temperatura do vapor. Este foi o valor utilizado nos cálculos.

Aplicando a 1ª lei da termodinâmica, temos:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} \cdot (h_{\text{vapor}} - h_{\text{água}}) = \dot{m}_{\text{gases}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}})$$

$\dot{m}_{\text{vapor}}$ - fluxo de vapor produzido;

h_{vapor} - entalpia do vapor;

$h_{\text{água}}$ - entalpia da água de alimentação;

$\dot{m}_{\text{gases}}$ - fluxo de gases de escape;

c_p - calor específico dos gases de escape (pode ser aproximado pelo c_p do ar;

$T_{\text{saída}}$ - temperatura de saída dos gases;

T_{entrada} - temperatura de entrada dos gases.

IV.5.4. Chiller Centrífugo

O rendimento de refrigeração do chiller centrífugo é definido por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}}$$

$\dot{Q}$ - fluxo de calor removido do sistema [kW ou TR];

$\dot{W}$ - potência elétrica consumida [kW].

Nos cálculos foi utilizado o valor de 5,87.

IV.5.5. Chiller de Absorção

O consumo específico do chiller de absorção é:

$$\text{Consumo} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}}}{\dot{Q}_{\text{removido}}}$$

$\dot{Q}_{\text{removido}}$ - fluxo de calor removido do sistema [TRh];

$\dot{m}_{\text{vapor}}$ - fluxo de vapor fornecido ao chiller [kg].

Nos cálculos foi utilizado o valor de 8,35 kg/TRh.

V. EQUIPAMENTOS ANALISADOS

Os ciclos foram analisados, seguindo as configurações acima, com os seguintes equipamentos disponíveis no mercado:

- Motogerador Ciclo Otto Waukesha 12VAT27GL (2100 kW);
- Motogerador Ciclo Otto Wartsila 16V220SG (2516 kW);
- Turbina a Gás General Electric LM 2500+(PK) (26220 kW);

A central de cogeração é dimensionada para atender a totalidade (ou a quase-totalidade) das cargas elétrica e térmica do aeroporto, sem, no entanto, considerar a possibilidade de venda de um possível excedente de energia.

Em todas as configurações, sempre que necessário e possível admitiu-se o aproveitamento das instalações e equipamentos existentes, como torres de resfriamento e chillers, buscando deste modo minimizar o investimento necessário para implantação da cogeração.

As tabelas a seguir apresentam um resumo das três alternativas estudadas. As características dos ciclos analisados, bem como os balanços de massa e energia, são mostrados em anexo.

ALTERNATIVA 01 - FICHA TÉCNICA

Instalação de cogeração para produzir energia elétrica e água gelada para ar condicionado, constituída por:

Motor Ciclo Otto,
Caldeira de Recuperação de Calor e
Chiller de Absorção de Simples Efeito.

A interligação dos equipamentos é desenvolvida configurando módulos de operação independentes, sendo que a composição de cada módulo é detalhada a seguir.

Principais Características da Alternativa 02:

N° de Módulos de Cogeração:	4
Potência Elétrica Total Instalada:	16800 kW
Consumo Interno da Cogeração:	490 kW
Potência Térmica Total Instalada:	2470 TR
Rendimento da Cogeração (carga 100%):	67,2%
Conversão em Energia Elétrica (carga 100%):	37,4%
Recuperação Energia Térmica (carga 100%):	29,8%
Rendimento Médio da Cogeração:	65,5%
Conversão Média em Energia Elétrica:	37,4%
Recuperação Energia Térmica (média):	28,1%

CONFIGURAÇÃO DO MÓDULO DE COGERAÇÃO

EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

1 Motor Ciclo Otto

Fabricante:	Waukesha	
Modelo:	12VAT27GL	
Potência Nominal:	2100 kW	(nas condições locais)
Consumo Específico:	9359 kJ/kWh	(nas condições locais)
Rendimento (base PCI):	38,5%	
Quantidade:	2	

2 Caldeira de Recuperação de Calor

Capacidade Nominal:	5 t/h
Pressão do Vapor:	1,0 kgf/cm ² ef., saturado
Quantidade:	1

3 Chiller de Absorção de Simples Efeito

Capacidade Nominal:	620 TR
Consumo Específico:	8 kg vapor / TRh
Quantidade:	1

4 Torre de Resfriamento

Capacidade Nominal Requerida:	3100 TR
-------------------------------	---------

Tabela V.1. – Ficha Técnica da Alternativa 1

ALTERNATIVA 02 - FICHA TÉCNICA

Instalação de cogeração para produzir energia elétrica e água gelada para ar condicionado, constituída por:

Motor Ciclo Otto,
Caldeira de Recuperação de Calor e
Chiller de Absorção de Simples Efeito.

A interligação dos equipamentos é desenvolvida configurando módulos de operação independentes, sendo que a composição de cada módulo é detalhada a seguir.

Principais Características da Alternativa 04:

N° de Módulos de Cogeração:	3
Potência Elétrica Total Instalada:	15090 kW
Consumo Interno da Cogeração:	470 kW
Potência Térmica Total Instalada:	2210 TR
Rendimento da Cogeração (carga 100%):	72,3%
Conversão em Energia Elétrica (carga 100%):	40,2%
Recuperação Energia Térmica (carga 100%):	32,0%
Rendimento Médio da Cogeração:	70,7%
Conversão Média em Energia Elétrica:	40,2%
Recuperação Energia Térmica (média):	30,4%

CONFIGURAÇÃO DO MÓDULO DE COGERAÇÃO EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

1 Motor Ciclo Otto

Fabricante:	Wartsila	
Modelo:	16V220SG	
Potência Nominal:	2510 kW	(nas condições locais)
Consumo Específico:	8669 kJ/kWh	(nas condições locais)
Rendimento (base PCI):	41,5%	
Quantidade:	2	

2 Caldeira de Recuperação de Calor

Capacidade Nominal:	6 t/h
Pressão do Vapor:	1,0 kgf/cm ² ef., saturado
Quantidade:	1

3 Chiller de Absorção de Simples Efeito

Capacidade Nominal:	740 TR
Consumo Específico:	8 kg vapor / TRh
Quantidade:	1

4 Torre de Resfriamento

Capacidade Nominal Requerida:	3940 TR
-------------------------------	---------

Tabela V.2. – Ficha Técnica da Alternativa 2

ALTERNATIVA 03 - FICHA TÉCNICA

Instalação de cogeração para produzir energia elétrica e água gelada para ar condicionado, constituída por:

Turbina a Gás,
Caldeira de Recuperação de Calor e
Chiller de Absorção de Simples Efeito.

A interligação dos equipamentos é desenvolvida configurando módulos de operação independentes, sendo que a composição de cada módulo é detalhada a seguir.

Principais Características da Alternativa 10:

N° de Módulos de Cogeração:	1
Potência Elétrica Total Instalada:	26220 kW
Consumo Interno da Cogeração:	1310 kW
Potência Térmica Total Instalada:	5200 TR
Rendimento da Cogeração (carga 100%):	84,5%
Conversão em Energia Elétrica (carga 100%):	35,4%
Recuperação Energia Térmica (carga 100%):	49,1%
Rendimento Médio da Cogeração:	70,7%
Conversão Média em Energia Elétrica:	35,4%
Recuperação Energia Térmica (média):	35,3%

CONFIGURAÇÃO DO MÓDULO DE COGERAÇÃO EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

1 Turbina a Gás

Fabricante:	General Electric	
Modelo:	LM 2500+(PK)	
Potência Nominal:	26220 kW	(nas condições locais)
Consumo Específico:	9669 kJ/kWh	(nas condições locais)
Rendimento (base PCI):	37,2%	
Quantidade:	1	

2 Caldeira de Recuperação de Calor

Capacidade Nominal:	44 t/h
Pressão do Vapor:	1,0 kgf/cm ² ef., saturado
Quantidade:	1

3 Chiller de Absorção de Simples Efeito

Capacidade Nominal:	1300 TR
Consumo Específico:	8 kg vapor / TRh
Quantidade:	4

4 Torre de Resfriamento

Capacidade Nominal Requerida:	16300 TR
-------------------------------	----------

Tabela V.3. – Ficha Técnica da Alternativa 3

VI. ANÁLISE ECONÔMICA

O objetivo da análise econômica é verificar a viabilidade de implantação do projeto. Os parâmetros que servem de base para tal análise são:

- **Investimento Inicial**: é todo o capital necessário para implementar o projeto, incluindo custo dos equipamentos a serem adquiridos, de mão-de-obra especializada para a instalação do mesmo, das obras civis necessárias, impostos, etc...
- **Economia Bruta Anual**: é a diferença entre os custos operacionais atuais da planta e os custos operacionais de cada alternativa após a sua implementação (inclui energia elétrica, combustível, água de reposição, custos de O&M, etc...).
- **Valor Presente Líquido**: é a diferença entre o valor presente da economia bruta anual (que corresponde ao “lucro” do projeto) e o valor presente do investimento inicial (“despesas” do projeto), calculados para um dado período de tempo e uma dada taxa de juros.
- **Tempo de Retorno de Capital (pay back time)**: é o tempo necessário para que o Valor Presente Líquido seja nulo, isto é, é o tempo necessário para se recuperar totalmente o capital investido no projeto.

O Tempo de Retorno de Capital é o principal parâmetro que define a viabilidade de um projeto. Quanto mais curto, mais lucrativo e vantajoso é o projeto. Atualmente, prazos acima de 10 anos são considerados longos no Brasil e não atraem investidores

VII. CUSTOS OPERACIONAIS

Um dos pontos mais importantes na análise econômica é a estimativa dos custos operacionais que cada alternativa selecionada teria se fosse implementada. Esses valores são comparados com os custos atuais da planta, sendo então possível determinar a economia bruta anual e conseqüentemente os demais parâmetros citados no item anterior.

VII.1. SITUAÇÃO ATUAL

Os principais custos incidentes na situação atual são:

- Energia Elétrica;
- Água de Reposição das Torres de Resfriamento;
- Operação e Manutenção dos Equipamentos.

VII.2. ALTERNATIVAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

O custo operacional de cada alternativa é avaliado considerando:

- Consumo de Gás Natural;
- Energia Elétrica Fornecida pela Light.
- Demanda de Emergência.
- Consumo de Água de Reposição p/ Torre de Resfriamento;
- Custos de Manutenção
- Custos de Operação;

VII.3. TARIFAS

VII.3.1. Energia Elétrica da Light e Demanda de Emergência

A conta de energia elétrica anual é calculada da seguinte forma:

$$C_{EE} = Demanda \times \frac{R\$}{MW \cdot ano} + Consumo \times \frac{R\$}{MWh}$$

Onde o consumo pode ser expresso em função da demanda e do fator de carga da unidade:

$$Consumo = Demanda \times Fator \text{ de Carga} \times 8760 \text{ horas/ano}$$

As tarifas de Demanda e Consumo variam em função do horário (horário de ponta e fora de ponta) e da época do ano (período seco e úmido).

Fornecimento de Energia Elétrica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro

Tarifa A2 – Horo-Sazonal Azul (*)

	Tarifa de Demanda R\$ / kW	Tarifa de Consumo R\$ / MWh
Período Seco:		
Horário de Ponta	12,79	71,70
Horário Fora de Ponta	2,96	51,38
Período Úmido:		
Horário de Ponta	12,79	66,91
Horário Fora de Ponta	2,96	47,13

(*) Tarifas vigentes em julho de 2.001,

Além disso, quando uma central de cogeração fornece parte da demanda de uma unidade, é necessário contratar o fornecimento de energia de emergência junto à concessionária. Em geral, a demanda contratada é igual à potência de um dos equipamentos geradores (admite-se que a manutenção é feita em rodízio, quando a cogeração é composta por vários grupos geradores, e que a probabilidade de falha em mais de um equipamento simultaneamente é mínima).

A energia de emergência (back-up) é tarifada segundo a Resolução da ANEEL nº 371, de 29 de dezembro de 2.000, nesta análise foi considerado um Contrato de Reserva de Capacidade prevendo utilização de 700 horas/ano:

$$CRC = D * EUSTD$$

Onde:

CRC -> Custo da Reserva de Capacidade [R\$ / kW.mês],

$EUSTD$ -> Encargo de Utilização do Sistema de Transmissão e Distribuição [R\$ / kW.mês] e

D -> Fator de Utilização da Reserva de Capacidade.

$$D = Hp / 1314$$

Onde:

Hp -> Número de Horas de Utilização Prevista.

Sendo:

$EUSTD = R\$0,23$ / kW.mês (Resolução ANEEL nº 286/1999)

e adotando:

$Hp = 700$ horas/ano

Resulta:

$CRC = 0,1225$ R\$ / kW.mês

VII.3.2. Custo do Gás Natural

O consumo de gás natural de cada uma das alternativas é dado pelo balanço de massa e energia, o respectivo custo é dado por:

$$P = Pm + T$$

Onde:

P -> é o preço de venda do Gás Natural sem impostos, em R\$/m³,

Pm -> é o custo da matéria prima em R\$/m³. $Pm = \text{R\$ } 0,1863 \text{ m}^3$, e

$$T = \left(\frac{31470}{(c + 40)^{2,8}} + 0,286 \right) \times f \times \left(\frac{1,0}{26,81} \right)$$

Onde:

c -> é o consumo mensal de gás natural em milhões de m³ e

f -> é o fator de "Take or Pay" anual.

Admitiu-se fator de "Take or Pay" $f = 0,925$, que corresponde a 80 % do consumo.

Para um consumo típico de 2.500.000 m³/mês de gás natural, o preço do gás natural resulta igual R\$ 230,61 / 1000 m³ (já incluído no preço 3,65% relativo a PIS e Cofins), o que é equivalente a US\$ 2,38 / MMBTU (considerando taxa de câmbio de R\$ 2,60 / US\$).

VII.3.3. Custo da Água de Reposição de Torre de Resfriamento

O custo da água de reposição de torre de resfriamento foi adotado igual a R\$ 3,00 / m³.

VII.3.4. Custos de Manutenção

Os custos de manutenção foram calculados considerando os seguintes índices:

- Moto geradores Ciclo Otto: US\$ 8,00 / MWh.
- Turbinas a Gás: US\$ 3,00 / MWh.

VII.3.5. Resumo Custos Operacionais

A tabela abaixo apresenta um resumo dos custos operacionais atuais da planta, e também de cada uma das alternativas analisadas.

		Situação Anual	Alternativa 1 Cogeração Motor Waukesha 12AT27GL Maq. Absorção SE	Alternativa 2 Cogeração Motor Wartsila 18V220SG Maq. Absorção SE	Alternativa 3 Cogeração TG GE LM 2500+ Maq. Absorção SE
CUSTO ENERGIA REDE PÚBLICA					
ENERGIA FIRME					
Demanda Ponta	kW	20420	2270	4150	0
Demanda Fora de Ponta	kW	22920	4770	6640	0
Consumo Energia Ponta	MWh/mês	1126	12	77	0
Consumo Energia Fora de Ponta	MWh/mês	10899	299	731	0
RESERVA DE CAPACIDADE					
Demanda Reserva Contratada	kW		7588	6905	24951
Consumo Ponta	MWh/mês		42	41	43
Consumo Fora de Ponta	MWh/mês		426	408	438
Custo Demanda	R\$/ano	3.948.180	517.830	872.795	0
Custo Energia	R\$/ano	7.689.235	194.945	516.508	0
Custo Reserva Capacidade	R\$/ano	0	661.784	630.230	846.890
Total Energia Elétrica (sem ICMS)	R\$/ano	11.637.415	1.374.559	2.019.532	846.890
Custo Médio Tarifa EE	R\$/MWh	80,64	190,76	143,40	#DIV/0!
Custo Médio Tarifa Reserva Capacidade	R\$/MWh	#DIV/0!	117,69	117,04	146,71
ICMS sobre Energia Elétrica	R\$/ano	3.879.138	458.186	673.177	282.297
CUSTO COMBUSTÍVEL (GN)					
Consumo de Gás Natural	m³/mês	0	2766140	2457616	2907362
Custo Total Gás Natural (sem ICMS)	R\$/ano	0	7.654.786	6.819.421	8.035.816
ICMS sobre Combustível	R\$/ano	0	1.043.834	929.921	1.095.793
CUSTO TOTAL ENERGIA	R\$/ano	11.637.415	9.029.345	8.838.953	8.882.706
CUSTO PESSOAL DE OPERAÇÃO					
Supervisores			1	1	1
Operadores			3	3	2
Número de Turnos			4	4	4
Salário Supervisor	R\$/mês		1800	1800	1800
Salário Operador	R\$/mês		1200	1200	1200
Custo Total Salários	R\$/mês		16200	16200	11400
Encargos sobre Salários			150%	150%	150%
CUSTO OPERAÇÃO	R\$/ano		486.000	486.000	342.000
CUSTOS DE MANUTENÇÃO					
HRSG (US\$/t vapor)	0,50				
HRSG	R\$/ano		33.290	29.782	88.423
Motores Ciclo Otto (US\$/MWh)	5,60				
	R\$/ano		262.795	251.574	0
Turbogeradores a Gás (US\$/MWh)	3,00				
	R\$/ano		0	0	261.604
CUSTO MANUTENÇÃO	R\$/ano		296.085	281.356	350.027
ÁGUA DE REPOSIÇÃO DE TORRE					
Consumo	m³/ano	186874	401980	376365	377481
Custo Água de Reposição	R\$/ano	728.808	1.567.723	1.467.823	1.472.177
CUSTO TOTAL O&M (sem ICMS)	R\$/ano	12.366.223	11.379.153	11.074.132	11.046.911
CUSTO TOTAL O&M (com ICMS)	R\$/ano	16.245.361	12.881.173	12.677.230	12.425.000

Tabela VII.1. – Resumo dos Custos Operacionais

VIII. INVESTIMENTOS

Os investimentos necessários consistem no custo dos equipamentos, de montagem e instalação, da mão-de-obra para tal, dos serviços de engenharia e nos impostos incidentes. A tabela abaixo mostra os valores utilizados.

A comparação econômica das alternativas analisadas foi realizada na moeda brasileira, o Real, e no caso dos equipamentos importados, com preço em Dólar, a conversão para o Real foi efetuada admitindo uma taxa de câmbio de R\$ 2,60 / US\$.

		Alternativa 1 Cogeração Motor Waukesha 12AT27GL Maq. Absorção SE	Alternativa 2 Cogeração Motor Wartsila 18V220SG Maq. Absorção SE	Alternativa 3 Cogeração TG GE LM 2500+ Maq. Absorção SE
Equipamentos Importados (FOB, s/ impostos):				
Turbogerador a Gás / Motor Ciclo Otto	US\$	8.160.000	7.200.000	9.000.000
Máquinas Absorção SE	US\$	1.111.500	994.500	2.340.000
Compressor de Gás Natural	US\$	0	0	430.000
Total Equipamentos Importados	US\$	9.271.500	8.194.500	11.770.000
	R\$	24.105.900	21.305.700	30.602.000
Internalização Equipos Importados	R\$	4.821.180	4.261.140	6.120.400
Total Equipamentos Importados	R\$	28.930.000	25.570.000	36.730.000
Equipamentos Nacionais:				
HRSG BP	R\$	2.150.000	1.920.000	4.520.000
Torre de Resfriamento (úmida)	R\$	0	0	277.500
Total Equipos Nacionais	R\$	2.150.000	1.920.000	4.797.500
Imposto Produtos Industrializados	R\$	107.500	96.000	239.875
Subtotal Equipamentos Nacionais	R\$	2.260.000	2.020.000	5.040.000
Materiais e Equipos p/ Interligação Eletromecânica	R\$	3.870.000	3.470.000	6.500.000
		12,4%	12,6%	15,6%
Total Equipamentos	R\$	35.060.000	31.060.000	48.270.000
ICMS Sobre Materiais e Equipamentos	R\$	4.780.909	4.235.455	6.582.273
Obras Cíveis	R\$	1.900.000	1.700.000	1.200.000
Frete e Seguro (Território Nacional)	R\$	876.500	776.500	1.206.750
Montagem	R\$	4.207.200	3.727.200	5.792.400
Engenharia	R\$	1.402.400	1.242.400	1.930.800
TOTAL INVESTIMENTOS (sem ICMS)	R\$	43.446.100	38.506.100	58.399.950
TOTAL INVESTIMENTOS (com ICMS)	R\$	48.227.009	42.741.555	64.982.223

Tabela VIII.1. -- Resumo dos Investimentos Necessários

Os valores de Frete e Seguro, Montagem e Engenharia foram admitidos como percentuais fixos do valor total dos equipamentos (2,5%, 12% e 4% respectivamente).

IX. COMENTÁRIOS FINAIS

A tabela a seguir apresenta um resumo da análise realizada, comparando as diferentes alternativas e, inclusive, o tempo de retorno de investimento de cada uma delas. Também foi considerada a incidência ou não do ICMS nos resultados.

		Situação Atual	Alternativa 1 Cogeração Motor Waukesha 12AT27GL Maq. Absorção SE	Alternativa 2 Cogeração Motor Wartsila 18V220SG Maq. Absorção SE	Alternativa 3 Cogeração Turbina GE LM 2500 Maq. Absorção
Características da Cogeração					
	Tipo		Motor Ciclo Otto 8	Motor Ciclo Otto 6	Turbina a Gás 1
Quantidade Motores / Turbinas a Gás					
Potência Total Turbo/Motogeradores	kW		16.800	15.098	26.220
Consumo Interno da Cogeração	kW		490	470	1.310
Geração Elétrica Líquida	kW		16.310	14.628	24.910
Energia Elétrica Gerada (Líquida)	MWh/ano		122.012	116.802	121.459
Produção de Água Gelada:					
Chiller Absorção de Simples Efeito	TR		2.470	2.210	5.200
Chiller Absorção de Duplo Efeito	TR				
Energia Elétrica					
Consumo Total	MWh/ano		131.371	131.876	127.231
Total Fornecido pela Cogeração	MWh/ano		122.012	116.802	121.459
Complemento Fornecido pela Rede Pública	MWh/ano		3.737	9.689	
Total Fornecido por Sistema de Backup	MWh/ano		5.623	5.385	5.772
Excedente p/ Rede Pública	MWh/ano				
Combustível - Gás Natural					
Consumo Médio Mensal	m³/mês		2.766.140	2.457.616	2.907.362
Custos de Operação e Manutenção					
Custo Anual de Energia Elétrica Firme	R\$/ano	11.637.415	712.775	1.389.302	
Custo Anual de Energia Elétrica de Back-up	R\$/ano		661.784	630.230	846.890
Custo Anual Combustíveis (Gás Natural)	R\$/ano		7.654.786	6.819.421	8.035.816
Custo Anual de Operação	R\$/ano		486.000	486.000	342.000
Custo Anual de Manutenção	R\$/ano		296.085	281.356	350.027
Custo Anual de Água de Reposição de Torre	R\$/ano	728.808	1.567.723	1.467.823	1.472.177
Custo Anual Total (sem ICMS)	R\$/ano	12.366.223	11.379.153	11.074.132	11.046.911
Economia Bruta Anual (sem ICMS)	R\$/ano		987.070	1.292.091	1.319.312
ICMS Sobre Energia Elétrica e Combustíveis	R\$/ano	3.879.138	1.502.021	1.603.098	1.378.090
Custo Anual Total (com ICMS)	R\$/ano	16.245.361	12.881.173	12.677.230	12.425.000
Economia Bruta Anual (com ICMS)	R\$/ano		3.364.188	3.568.131	3.820.361
Investimentos					
Equipamentos Importados	R\$		28.930.000	25.570.000	36.730.000
Equipamentos Nacionais	R\$		2.260.000	2.020.000	5.040.000
Materiais e Equipos p/ Interligação Eletromecânica	R\$		3.870.000	3.470.000	6.500.000
Obras Cíveis	R\$		1.900.000	1.700.000	1.200.000
Frete e Seguro (Território Nacional)	R\$		876.500	776.500	1.206.750
Montagem	R\$		4.207.200	3.727.200	5.792.400
Engenharia	R\$		1.402.400	1.242.400	1.930.800
Investimento Total (s/ ICMS)	R\$		43.446.100	38.506.100	58.399.950
"Pay-Back" simples (s/ ICMS)	anos		44	30	44
ICMS Sobre Equipamentos e Materiais	R\$		4.780.909	4.235.455	6.582.273
Investimento Total (c/ ICMS)	R\$		48.227.009	42.741.555	64.982.223
"Pay-Back" simples (c/ ICMS)	anos		14,3	12,0	17,0

Tabela IX.1. – Resumo Análise Econômica

A tarifa de ICMS sobre o gás natural (12%) é menor do que sobre a energia elétrica (25%), favorecendo o cenário de cogeração.

A alternativa que apresentou o melhor resultado econômico foi a alternativa 2, com tempo de retorno do investimento igual a 12 anos. No entanto, esse prazo é longo para os padrões atuais do mercado, conforme discutido anteriormente. Assim sendo, nenhuma das alternativas analisadas pode ser considerada economicamente viável.

É importante ressaltar que, embora nas condições vigentes hoje não seja viável a implantação de uma central de cogeração, às incertezas no setor energético brasileiro podem alterar esse cenário. Os principais fatores a serem analisados são:

- a evolução do preço do gás natural,
- a evolução das tarifas de energia elétrica,
- a possibilidade de venda de excedente de energia elétrica.

X. BIBLIOGRAFIA

BLACK & VEATCH. "Power Plant Engineering". 1996.Ed. Chapman & Hall. Nova Iorque.

GORDON, D. W. "The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines".

HAYWOOD, R.W.. "Analysis of Engineering Cycles". 4ª Edição. 1991. Pergamon Press, Oxford.

PILAVACHI, P.A.. "Power Generation with Gas Turbine Systems and Combined Heat and Power". 2000. Applied Thermal Engineering. Vol. 20. pp 1421-1429.

VAN WYLEN, Gordon & SONNTAG, Richard. "Fundamentos da Termodinâmica Clássica". 4ª Edição. 1995. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 591p.

ANEXOS

- **BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA**

		Alternativa 1 Cogeração Motor Waukesha 12AT27GL Maq. Absorção SE	Alternativa 2 Cogeração Motor Wartsila 18V220SG Maq. Absorção SE	Alternativa 3 Cogeração TG GE LM 2500+ Maq. Absorção SE
Potência Nominal (no eixo)	kW	2182.0	2624.0	28500.0
Correção p/ Condições Locais		1.000	1.000	0.920
Degradação		1.000	1.000	1.000
Rendimento Redutor / Gerador		0.962	0.959	1.000
Potência Borne do Gerador	kW	2100.0	2516.4	26220.0
Cons. Espec. Nominal (no eixo)	kJ/kWh	9007.1	8314.0	9479.8
Correção p/ Condições Locais		1.000	1.000	1.020
Degradação		1.000	1.000	1.000
Rendimento Redutor / Gerador		1.039	1.043	1.000
Consumo Específico	kJ/kWh	9359.0	8669.4	9669.4
Rendimento Moto/Turbogerador	%	38.5%	41.5%	37.2%
Gases Exaustão	t/h	14.584	18.186	283.373
Temperatura Gases	°C	394.0	341.0	520.0
Correção Temperatura Gases	°C	-11.0	0.0	10.0
Entalpia Gases de Combustão	kJ/kg	412.4	349.0	550.6
Saídas de Energia				
Resfriamento da Camisa	kW	415.6	747.0	0.0
Resfriamento do Óleo Lubrificante	kW	237.3	310.0	0.0
Intercooler	kW	438.8	292.0	0.0
Radiação	kW	461.0	298.0	0.0
Gases Exaustão	kW	1670.5	1763.0	43338.6
Total	kW	3223.3	3410.0	43338.6
Balanco de Energia do TG / Motor	kW	54.1	26.0	867.1
(Perdas Não Identificadas)		1.0%	0.4%	1.2%
Conversão EE		38.47%	41.53%	37.23%
Consumo Combustível	kW (PCI)	5459.4	6060.0	70425.7
	t/h	0.396	0.439	5.107
	m³/h	554.8	615.8	7156.2
Cálculo dos Gases de Exaustão				
Ar Estequiométrico	kg/kg comb.	17.21	17.21	17.21
Gases Estequiométrico	kg/kg comb.	18.21	18.21	18.21
Coefficiente de Ar		2.023	2.273	3.047
Composição Gases de Exaustão				
CO2	% m, bu	7.44%	6.65%	4.99%
O2	% m, bu	11.25%	12.50%	15.09%
H2O	% m, bu	8.02%	7.35%	5.96%
SO2	% m, bu	0.00%	0.00%	0.00%
N2	% m, bu	73.28%	73.50%	73.96%
		100.00%	100.00%	100.00%
CO2	% vol, bs	5.39%	4.77%	3.51%
O2	% vol, bs	11.20%	12.33%	14.62%
SO2	% vol, bs	0.00%	0.00%	0.00%
N2	% vol, bs	83.40%	82.90%	81.87%
		100.00%	100.00%	100.00%
Preço TG / Motor (FOB, sem impostos)	1000 US\$	1020	1200	9000
		485.7	476.9	343.2

		Situação Atual	Alternativa 1 Cogeração Motor Waukesha 12AT27GL Maq. Absorção SE	Alternativa 2 Cogeração Motor Wartsila 18V220SG Maq. Absorção SE	Alternativa 3 Cogeração TG GE LM 2500+ Maq. Absorção SE
Turbinas a Gás / Motores					
Número de Máquinas			8	6	1
Geração Elétrica / Combustível Máquinas					
Potência Elétrica	kW		16800.0	15098.5	26220.0
Combustível TGs / Motores	t/h		3.167	2.637	5.107
	m³/h		4438.0	3694.7	7156.2
Saídas de Energia					
Resfriamento da Camisa	kW		3324.6	4482.0	0.0
Resfriamento do Óleo Lubrificante	kW		1898.3	1860.0	0.0
Intercooler	kW		3510.7	1752.0	0.0
Radiação	kW		3688.4	1788.0	0.0
Gases Exaustão	kW		13364.1	10577.8	43338.6
Total	kW		25786.2	20459.8	43338.6
Gases TGs / Motores					
Vazão	t/h		116.670	109.116	283.373
Temperatura	°C		394.0	341.0	520.0
Fluxo de Entalpia	kW		13364.1	10577.8	43338.6
CO2	% vol, bs		5.39%	4.77%	3.51%
O2	% vol, bs		11.20%	12.33%	14.62%
SO2	% vol, bs		0.00%	0.00%	0.00%
N2	% vol, bs		83.40%	82.90%	81.87%
Queima Suplementar					
	t/h		0.000	0.000	0.000
	m³/h		0.0	0.0	0.0
	kW		0.0	0.0	0.0
Gases Após QS					
	kW		13364.1	10577.8	43338.6
	t/h		116.670	109.116	283.373
	°C		394.0	341.0	520.0
Coefficiente de Ar	λ		2.023	2.273	3.047
HRSG					
Balanco Superaq. e Evaporador 1					
Pressão Evaporador	bar		11.0	11.0	11.0
Temperatura Vapor Evaporador	°C		184.0	184.0	184.0
Lado Gases					
Pinch Point Evaporador	°C		210.0	157.0	336.0
Tempratura Gases Saída Evaporador	°C		394.0	341.0	520.0
Fluxo Entalpia Gases Entrada HRSG	kW		13364.1	10577.8	43338.6
Fluxo Entalpia Gases Saída Evaporador	kW		13364.1	10577.8	43338.6
Lado Vapor					
Entalpia Vapor Saída HRSG	kJ/kg		2780.2	2780.2	2780.2
Temperatura Água Entrada Evaporador	°C		80.0	80.0	80.0
Entalpia Água Entrada Evaporador	kJ/kg		335.7	335.7	335.7
Troca de Calor	kW		0.0	0.0	0.0
Produção de Vapor 1º Corpo					
	t/h		0.00	0.00	0.00
	t/MWh		0.00	0.00	0.00
Economizador 1 - Cálculos Auxiliares					
Inclinação Curva Gases	°C / kW		0.028	0.030	0.011
Inclinação Curva Água Líquida	°C / kW		-5237287.296	-14974232.730	10475386.481
Pinch Point Economizador (>)	°C		210.0	157.0	336.0
Subresfr. Água Entrada Evaporador (>)	°C		10.0	10.0	10.0
DT Gases Economizador	°C		0.0	0.0	0.0
DT Água Economizador	°C		0.0	0.0	0.0
Balanco Economizador 1					
Lado Gases					
Temperatura Gases Entrada Economizador			394.0	341.0	520.0
Tempratura Gases Saída Economizador	°C		394.0	341.0	520.0
Fluxo Entalpia Gases Saída Economizador	kW		13364.1	10577.8	43338.6
Lado Água					
Troca de Calor no Economizador	kW		0.0	0.0	0.0
Temperatura Água Entrada Economizador	°C		80.0	80.0	80.0
Temperatura Água Saída Economizador	°C		80.0	80.0	80.0
HRSG					
Balanco Superaq. e Evaporador 2					
Pressão Evaporador	bar		1.7	1.7	1.7
Temperatura Vapor Evaporador	°C		114.4	114.4	114.4
Lado Gases					
Pinch Point Evaporador	°C		15.0	15.0	15.0

Tempratura Gases Saída Evaporador	°C		129.4	129.4	129.4
Fluxo Entalpia Gases Entrada HRSG	kW		13364.1	10577.8	43338.6
Fluxo Entalpia Gases Saída Evaporador	kW		3669.7	3412.7	8758.0
Lado Vapor					
Entalpia Vapor Saída HRSG	kJ/kg		2696.5	2696.5	2696.5
Temperatura Água Entrada Evaporador	°C		100.0	100.0	100.0
Entalpia Água Entrada Evaporador	kJ/kg		419.6	419.6	419.6
Troca de Calor	kW		9694.4	7165.1	34580.6
Produção de Vapor 2° Corpo	t/h		15.33	11.33	54.68
	t/MWh		0.91	0.75	2.09
RECUPERAÇÃO DE CALOR					
Água de Resfriamento do Motor					
"Ebulient System"					
Potência Resfriamento Camisa	kW		3324.6	4482.0	0.0
Temperatura de Entrada da Água	°C		100.0	100.0	100.0
Temperatura de Saída da Água	°C		114.4	114.4	114.4
Produção de Vapor Resf. Camisa	t/h		5.26	7.09	0.00
	t/MWh		0.31	0.47	0.00
Produção de Vapor MP	t/h		0.00	0.00	0.00
Produção de Vapor BP	t/h		20.58	18.42	54.68
Potência Térmica Total HRSG	kW		13019	11647	34581
Chiller Absorcao Duplo Efeito Vapor	TR	5.33	0.0	0.0	0.0
Chiller Absorcao Simples Efeito Agua/Vapor	TR	8.35	2465.2	2205.4	6548.0
Capacidade Máxima Total Maq. Absorção	TR		2465.2	2205.4	6548.0
Temperatura de Retorno de Condensado					
Condensado Vapor MP	°C		80.0	80.0	80.0
Condensado Vapor BP	°C		100.0	100.0	100.0
Consumo Gás Natural TGs/Motores	t/h		3.167	2.637	5.107
Consumo Gás Natural Queima Supl.	t/h		0.000	0.000	0.000
Consumo Gás Natural Total	t/h		3.167	2.637	5.107
	kW		43676	36360	70426
Consumo Adicional Cogeração					
Água Resfriamento Camisa					
Vazão	kg/s		119.8	161.5	0.0
Potência	kW		85.5	115.3	0.0
Água Resfriamento Óleo e Turbo					
Vazão	kg/s		36.9	24.6	0.0
Potência	kW		0.0	0.0	0.0
Água Alimentação HRSGs MP					
Vazão	kg/s		0.0	0.0	0.0
Potência	kW		0.0	0.0	0.0
Água Alimentação HRSGs BP					
Vazão	kg/s		5.7	5.1	15.2
Potência	kW		4.1	3.7	10.8
Água de Torre (Vazão Adicional)					
Vazão	kg/s	1072.3	586.1	511.4	1113.1
Potência	kW	400.3	218.8	190.9	415.6
Ventiladores de Torre					
Potência	kW	0.051	178.4	155.7	338.8
TOTAL	kW		486.9	465.6	765.2
COGERAÇÃO					
Potência Líquida kW		0.0	16313.1	14632.9	24913.4
Máxima Produção de Água Gelada TR/kW		0.00000	0.15112	0.15072	0.26283
Consumo Específico Centrifugas kW/TR		0.74400	0.74400	0.74400	0.74400
Consumo Específico Cogeração kgGN /kWh		0.00000	0.19417	0.18020	0.20501
Carga Térmica Total					
Demanda Média	TRh/ano	24333354	24333354	24333354	24333354
Demanda Média	TR	2778	2778	2778	2778
Demanda Mínima	TR	802	802	802	802
Demanda Máxima	TR	5196	5196	5196	5196
Produção AG Cogeração					
Demanda Média	TRh/ano	0	18113868	17407741	23910043
Demanda Média	TR	0	2068	1987	2729
Demanda Mínima	TR	0	802	802	802
Demanda Máxima	TR	0	2465	2205	4935
Produção AG Centrifugas					
Demanda Média	TRh/ano	24333354	6219486	6925613	423311
	TR	2778	710	791	48

Demanda Mínima	TR	802	0	0	0
Demanda Máxima	TR	5196	2789	2991	1447
Consumo Energia Elétrica (s/ CAG)	MWh/ano	126205	126205	126205	126205
Demanda Média	kW	14407	14407	14407	14407
Demanda Mínima	kW	10932	10932	10932	10932
Demanda Máxima	kW	20153	20153	20153	20153
Consumo Energia Elétrica Centrifugas	MWh/ano	18104	4627	5153	315
Demanda Média	kW	2067	528	588	36
Demanda Mínima	kW	597	0	0	0
Demanda Máxima	kW	3866	2075	2225	1076
Consumo Energia Elétrica Total	MWh/ano	144309	130832	131358	126520
Demanda Média	kW	16474	14935	14995	14443
Demanda Mínima	kW	11707	10938	10938	10932
Demanda Máxima	kW	22913	21079	21273	20153
Geração Própria	MWh/ano	0	127096	121669	126520
Demanda Média	kW	0	14509	13889	14443
Demanda Mínima	kW	0	10938	10938	10932
Demanda Máxima	kW	0	16313	14633	20153
Entrada Rede Ponta	MWh/ano	13516	146	921	0
Demanda Média	kW	17196	185	1172	0
Demanda Mínima	kW	0	0	0	0
Demanda Máxima	kW	20415	2268	4141	0
Entrada Rede Fora da Ponta	MWh/ano	130793	3591	8768	0
Demanda Média	kW	16402	450	1100	0
Demanda Mínima	kW	0	0	0	0
Demanda Máxima	kW	22913	4766	6640	0
CORREÇÃO PELA DISPONIBILIDADE DA COGERAÇÃO					
Disponibilidade Cogeração %			0.96	0.96	0.96
Maximo Fornecimento Cogeração p/ Infraero MWh/mês			10591	10139	10543
Máxima Geração Elétrica Cogeração MWh/mês			10591	10139	10543
Geração Elétrica Cogeração MWh/mês			10168	9734	10122
Fornecimento Cogeração p/ Infraero MWh/mês			10168	9734	10122
Máxima Geração Água Gelada Cogeração TRh/mês			1509489	1450645	1992504
Geração Água Gelada Cogeração TRh/mês			1449109	1392619	1912803
Mínima Geração Água Gelada Centrifugas TRh/mês	2027780		518290	577134	35276
Geração Água Gelada Centrifugas TRh/mês	2027780		578670	635160	114976
Consumo Adicional En. El. Centrifugas MWh/mês			45	43	59
Demanda Adicional En. El. Centrifugas kW			1538	1478	2031
ENTRADA ENERGIA REDE PÚBLICA					
ENERGIA FIRME					
Demanda Ponta kW	20420	2270	4150	0	
Demanda Fora de Ponta kW	22920	4770	6640	0	
Consumo Energia Ponta MWh/mês	1126	12	77	0	
Consumo Energia Fora de Ponta MWh/mês	10899	299	731	0	
RESERVA DE CAPACIDADE					
Demanda Reserva Ponta		3	3	1	
Demanda Reserva Fora de Ponta		18150	10270	20420	
Demanda Reserva Contratada kW		18150	16280	22020	
Consumo Ponta MWh/mês		7588	6905	24951	
Consumo Fora de Ponta MWh/mês		42	41	43	
		426	408	438	
Conferência do Balanço de En. Elétrica	0	0	0	0	
Consumo GN Cogeração	m³/mês		2766140	2457616	2907362
Consumo GN Cogeração	1000 m³/ano		33194	29491	34888
Custo Anual GN Cogeração	1000 R\$/ano		7,655	6,819	8,036
Custo Gás COMGAS					
Faixas de Consumo Gás Natural	Preço Margem				
de m³ / mês	a m³ / mês				
0	2,000,000	R\$/mês	75,999	75,999	75,999
2,000,001	4,000,000	R\$/mês	25,878	15,457	30,648
4,000,001	7,000,000	R\$/mês	0	0	0
7,000,001	10,000,000	R\$/mês	0	0	0
10,000,001	20,000,000	R\$/mês	0	0	0
20,000,001	1,000,000,000	R\$/mês	0	0	0
Total Margem		R\$/mês	101,877	91,456	106,647
Total Margem + Preço Gás + Transporte		R\$/mês	870,183	774,069	914,178
Preço Venda s/ ICMS (incluso Pis e Cofins) R\$ / m³			0.31458	0.31497	0.31444
Custo Unitário Médio do GN US\$/MMBTU			3.24	3.25	3.24

Custo Gás CEG					
Custo Matéria Prima - Pm R\$ / m³		0.1832	0.1832	0.1832	
Consumo Mensal - c MM m³/mês		2.77	2.46	2.91	
Fator de Take or Pay - f		0.93	0.93	0.93	
Parcela T R\$ / m³		0.04	0.04	0.04	
Preço de Venda sem Impostos R\$ / m³		0.22249	0.22309	0.22222	
PIS e COFINS R\$ / m³		0.00812	0.00814	0.00811	
Preço Venda s/ ICMS (incluso Pis e Cofins) R\$ / m³		0.23061	0.23123	0.23033	
Custo Unitário Médio do GN US\$/MMBTU	1	2.38	2.38	2.37	
Cálculo da Capacidade das Máquinas Absorção					
Carga Térmica Atual (Demanda Máxima)	TR	5200			
Capacidade Instalada Maq. Absorção DE	TR		0.0	0.0	0.0
Capacidade Instalada Maq. Absorção SE	TR		2470.0	2210.0	5200.0
Total Instalado Maq. Absorção	TR		2470.0	2210.0	5200.0
Custo Maq. Absorção DE 1000 US\$					
Custo Maq. Absorção SE					
Consumo Vapor MP					
Consumo Vapor BP	t/h		0.0	0.0	0.0
	t/h		20.6	18.5	43.4
Carga Térmica Vapor MP					
Carga Térmica Vapor BP	kW		0.0	0.0	0.0
	kW		13044.3	11671.3	27461.8
Compressor GN					
Pressão Entrada	bar		5	5	5
Pressão Saída	bar		5	5	5
Vazão Gás Natural	kg/s		0.9	0.7	1.4
Te	°C		25	25	25
Tis	°C		25.0	25.0	112.8
Tie	°C		40	40	40
Ts	°C		40.0	40.0	80.7
he	kJ/kg		55.7	55.7	55.7
his	kJ/kg		55.7	55.7	251.2
hie	kJ/kg		89.1	89.1	89.1
hs	kJ/kg		89.1	89.1	179.7
Potência Compressão	kW	500.0	0.0	0.0	541.4
Custo Compressor(es)	1000 US\$	400.00	0	0	430
Torres de Resfriamento					
Capacidade Instalada Atual	TR	12600.0	12600.0	12600.0	12600.0
Capacidade p/ Atender Refrigeração Motores	TR	0.0	1538.0	1027.0	0.0
Capacidade p/ Atender Máquinas Absorção	TR	0.0	6179.0	5528.6	13008.5
Capacidade p/ Atender Centrifugas	TR	6382.9	3351.0	3670.1	0.0
Total	TR	6382.9	11068.0	10225.8	13008.5
Capacidade Torre de Resfr. (Recomendável)	TR	7978.6	13835.1	12782.2	16260.6
Torre p/ Ar Condicionado -> Delta T ~ 5 °C	TR	6382.9	9530.0	9198.8	13008.5
Torre p/ Motor -> Delta T ~ 35 °C	TR	0.0	1538.0	1027.0	0.0
Torre Resfriamento Equivalente (p/ Motor):	TR	0.0	341.8	228.2	0.0
Capacidade Torre de Resfr. (Recomendável)	TR		12400.0	11800.0	16300.0
Custo Ampliação Sistema de Resfriamento 1000 US\$		75.00	0	0	277500
Água de Reposição em Torre Resfriamento					
Produção AG Centrifugas	TRh/ano	24333354	6219486	6925613	423311
Calor Rejeitado em Torre	TRh/ano	29868518	7634246	8500998	519603
TRtorre/TR AG		1.23	1.23	1.23	1.23
Produção AG Cogeração	TRh/ano		18113868	17407741	23910043
Calor Rejeitado em Torre	TRh/ano		56615242	51654320	59814145
			3.13	2.97	2.50
Produção Total AG	TRh/ano	24333354	24333354	24333354	24333354
Total Calor Rejeitado em Torre	TRh/ano	29868518	64249488	60155318	60333748
Água de Reposição de Torre	m³/ano	186874	401980	376365	377481
	m³/h				
Rendimento Máximo Ciclo Cogeração	%		67.2%	72.3%	84.5%
Rendimento Efetivo Ciclo Cogeração	%		65.5%	70.7%	70.7%
Conversão Energia Elétrica (100% de carga)	%		37.4%	40.2%	35.4%
Conversão Efetiva Energia Elétrica	%		37.4%	40.2%	35.4%