



IBP607\_04

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DE UMA PLANTA  
COGERATIVA DE UM SHOPPING CENTER,  
Gean C.S.Santana<sup>1</sup>, Ednildo A.Torres<sup>2</sup>, Michel F. Campos<sup>3</sup>

**Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2004*, realizada no período de 4 a 7 de outubro de 2004, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pela Comissão Técnica do Evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2004*.

---

## Resumo

A recente instabilidade no fornecimento de energia elétrica juntamente com a reestruturação do setor elétrico e a sinalização do governo em aumentar a participação do gás natural na matriz elétrica brasileira tem favorecido a discussão e a possibilidade de se implantar unidades de cogeração utilizando o gás natural como energético para gerar eletricidade, frio e/ou calor.

Diante desse contexto, plantas de cogeração, utilizando motor ou turbinas a gás natural, é uma alternativa para as empresas do setor terciário (tais como centros comerciais, universidades, escolas, hospitais) que desejam implantar diminuir a dependência das concessionárias de energia elétrica ou até mesmo ser auto-suficiente na produção energia elétrica.

A escolha da configuração (se turbina ou motor, por exemplo) para atender uma determinada demanda energética de uma empresa é um dos fatores que vem determinar a viabilidade econômica de plantas de cogeração.

Com isso, surge a necessidade de elaborar regras (ou critérios) e realizar simulações com diferentes configurações e escolher a melhor configuração para atender um determinado processo.

O presente trabalho realiza simulações em duas configurações de planta de cogeração para atender a demanda energética de um *shopping center* da cidade de Salvador-Ba. Em seguida é feita uma análise de 1ª e 2ª lei da termodinâmica para essas duas plantas e os resultados são comparados, mostrando em que circunstâncias cada modelo de planta é mais adequado.

## Abstract

Recent instability in the Brazilian electrical energy supply, together with the re-structuring of the power sector and government initiatives to increase natural gas participation in the system have led to discussion over the possibility of implementing cogeneration plants that utilize natural gas as an energy source in power generating for use in cooling and heating systems.

Given this context, the use of cogeneration plants is an alternative for service sector companies (such as retail centers, universities, schools, and hospitals) that would like to implement with the goal of producing electricity and cooling for indoor environmental climate control.

In this study, an energetic analysis (based on the first law of thermodynamics) and an exergetic analysis (based on the second law) were performed on two cogeneration plants.

## 1. Introdução

Estudos de instalação de plantas de cogeração têm sido nos últimos dois anos, temática de debates sobre alternativas de diversificação da matriz energética brasileira. No ano de 2001, o Brasil passava por uma crise de geração de energia elétrica devido à falta de investimento no setor e teve como consequências o racionamento de energia elétrica e o desaquecimento da economia, com geração de desemprego, dentre outros transtornos para o país. Naquele período, foram buscadas, intensivamente, soluções para a escassez da energia elétrica e a cogeração, juntamente com disponibilidade do gás natural, apresentou-se com uma solução viável.

Na atualidade, a grande reserva de água nos reservatório de água, dentre outros fatos, tem contribuído para o desestímulo de investidores e empresários na geração de energia por cogeração.

<sup>1</sup> Mestre, Engenheiro Químico - UFBA

<sup>2</sup> Professor Doutor – Engenheiro Mecânico - UFBA

<sup>3</sup> MBA, Engenheiro Eletrônico - Petrobras

Investimento na área de geração e distribuição de energia é necessário, pois segundo o próprio governo, faltará energia elétrica num futuro próximo se não houver investimento no setor. A questão é que muitos investidores preferem arriscar seus investimentos em projetos que tenham um retorno em curto prazo e cogeração oferece retorno em longo prazo.

O estudo sobre cogeração tem vários aspectos: técnico, econômico, político e institucional. No aspecto técnico são avaliadas as alternativas tecnológicas para implantação de unidades cogerativas tais como: se a geração será por motor ou turbina a gás, se a central será projetada para suprir a demanda térmica ou elétrica dentre outras questões. No aspecto econômico, estuda-se a existência de viabilidade econômica e quais soluções técnicas são mais viáveis, podendo a melhor solução técnica, não ser a melhor solução econômica. No aspecto institucional é realizado um estudo da possibilidade de se implantar a cogeração analisando o contexto normativo, a política energética do governo e a definição do preço do gás natural, quando este é o energético a ser utilizado.

O presente trabalho estuda cogeração a partir de um olhar técnico para um *shopping center*, instalado em Salvador, considerado o segundo maior shopping da capital da Bahia.

Dentre as vantagens da cogeração pode-se citar:

- Diversificação da matriz energética brasileira;
- Substituição de unidades geradoras de alto custo por centrais cogeradoras;
- Aumento da oferta da energia disponível;
- Garantia no fornecimento de energia.
- Economia de energia primária.

Para o setor terciário, como *shopping center*, universidades e escolas, condomínios residenciais, centrais de distribuição de alimentos perecíveis, hospitais, dentre outros, a implantação de cogeração pode ser utilizada para iluminação, climatização de ambientes, conservação de alimentos (incluindo frutas e similares em feiras), higienização, cocção de alimentos, dentre outras aplicações.

Dentre alguns critérios disponíveis para escolha da configuração básica da planta cogerativa (se turbina ou motor) pode-se citar a utilizada por SZKLO (2001), que define a razão potência-calor ofertada pela unidade cogerativa de  $\beta$  e a razão potência-calor demandada à unidade cogerativa de  $\alpha$ . Com isso dois critérios podem ser adotados para dimensionar uma planta cogerativa: o da paridade elétrica e o da paridade térmica.

No critério da paridade elétrica, o sistema de cogeração é projetado para atender a demanda elétrica. Nesse caso não haverá produção de energia elétrica excedente nem necessidade de se comprar energia elétrica da concessionária, salvo nos casos de manutenção do sistema de cogeração. Com isso, se a razão potência-calor ofertado pela unidade cogerativa for maior que demandada, ou seja  $\beta > \alpha$ , faltará energia térmica, necessitando de queima adicional de combustível; se a razão potência-calor ofertado for menor que demandada, ou seja  $\beta < \alpha$ , haverá excedentes de energia térmica, necessitando de um mercado comprador dessa energia em excesso.

Na paridade térmica, a central é projetada para atender a demanda térmica, não havendo nem escassez nem geração de energia térmica em excesso. Com isso, se razão potência-calor ofertada for maior que a demandada ( $\beta > \alpha$ ), tem-se uma situação de geração excedente de energia elétrica, necessitando de uma comprador para esse excesso. Se a razão potência-calor ofertada for menor que a demandada ( $\beta < \alpha$ ) tem uma situação de escassez de energia elétrica, sendo necessário um fornecedor de energia elétrica. Os motores apresentam uma maior razão potência-calor ofertado que as turbinas.

O shopping em estudo consome atualmente 3 MW de energia elétrica, sendo que parte de consumo é para atender a demanda térmica do shopping, cerca de 1,5 kW, o que equivale a 1500 TR, segundo estimativa levantada junto ao *shopping center*, a partir das características do equipamento de produção de água gelada. Nessa situação, a razão potência-calor é 1 e para essa situação será analisada uma planta de cogeração utilizando turbina e outra, motor a gás natural.

## 2. Análise das Configurações Proposta.

Na primeira configuração o gás natural é queimado em dois motores, um de 2216 kW e outro de 470 kW, que aciona um gerador produzindo energia elétrica. A energia térmica contida nos gases de exaustão é aproveitada na produção de vapor na caldeira recuperadora. A climatização do shopping é realizada a partir da água gelada produzida por *chillers* de absorção que utilizam o vapor como fonte energética e produzem cerca de 362 TR's. O restante da demanda térmica é suprida por *chiller* de compressão e equivale a 1138 TR's, aproximadamente.

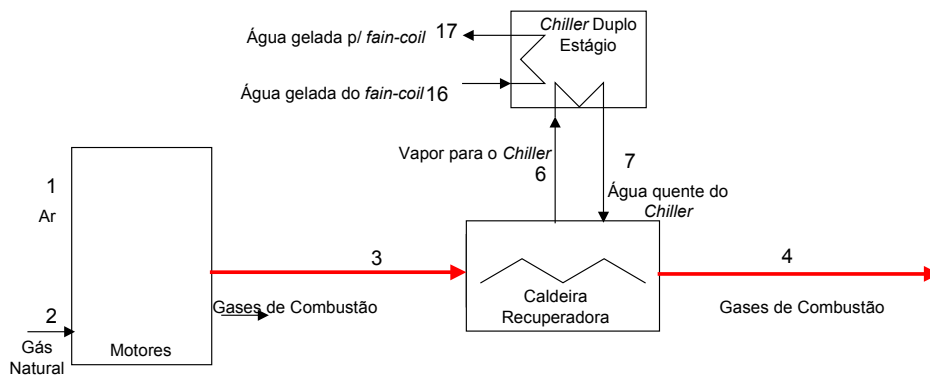


Figura 1 – Diagrama simplificado da 1ª configuração proposta para o shopping center em estudo.

A segunda configuração será constituída por uma turbina com capacidade de produzir 1663 kW de energia elétrica. A energia residual dos gases de exaustão será aproveitada na produção de vapor a ser utilizado no acionamento do *chiller* por absorção a vapor. O *chiller* tem capacidade de suprir 2000 TR's, ou seja, 500 TR acima do previsto.

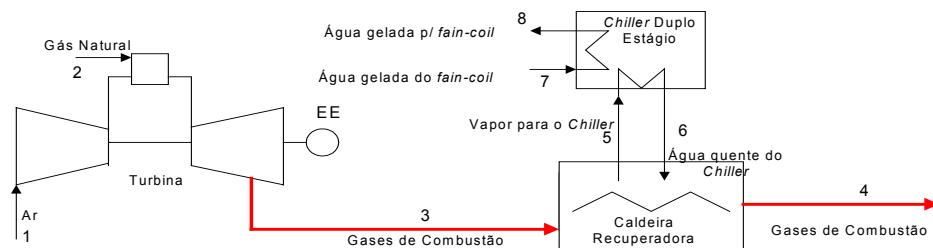


Figura 2 – Diagrama simplificado da 2ª configuração proposta para o shopping center em estudo.

## 2.1 Análise da Termodinâmica da Planta de Cogeração Utilizando Motor a Gás.

### a) Motor

A análise da eficiência do motor e da turbina pela Primeira Lei da Termodinâmica pode ser realizada utilizando a equação:

$$\eta_{motor / turbina} = \frac{\dot{W}_{ele.}}{\dot{m} * PCI} * 100 \quad (1)$$

Onde  $\eta$  representa a eficiência do motor ou da turbina,  $W_{ele}$  a energia elétrica produzida no processo, PCI é o poder calorífico inferior e  $\dot{m}$  é a vazão do combustível.

A eficiência exergetica, ou racional, é uma medida recomendada de perfeição termodinâmica para processos térmicos (geração de vapor, estação de geração de energia elétrica, fornos de aquecimento) (Szargut,1988). Para o motor temos a seguinte equação:

$$\psi_{motor / turbina} = \frac{\dot{W}_{ele.}}{\dot{m} * PCI * \varphi} * 100 \quad (2)$$

onde  $\varphi$  é o fator que corrige o PCI para se obter a exergia do combustível (Kotas, 1985)

**b) Caldeira Recuperadora (CR).**

A eficiência energética da caldeira recuperadora será realizada utilizando a equação 3.

$$\eta_{CR} = \frac{\dot{Q}_{vapor}}{\dot{Q}_{gases\ exaustão}} * 100 \quad (3)$$

O cálculo da eficiência exergética dos equipamentos de produção de vapor e água quente será realizado através da relação expressa pela equação 4.

$$\psi_{CR} = \frac{\Delta \dot{E}x_{vapor}}{\Delta \dot{E}x_{gases\ exaustão}} * 100 \quad (4)$$

Os parâmetros necessários para o cálculo das eficiências energéticas e exergéticas da equação 3 e 4 são mostrados na tabela 1, para cada equipamento.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na análise termodinâmica da 1ª e 2ª configuração.

Parâmetro	Caldeira Recuperadora
$\dot{Q}_{vapor}$	$\dot{m}_5 (h_6 - h_5)$
$\dot{Q}_{gases\ exaustão}$	$\dot{m}_3 (h_3 - h_4)$
$\Delta \dot{E}x_{vapor}$	$\dot{m}_5 (ex_6 - ex_5)$
$\Delta \dot{E}x_{gases\ exaustão}$	$\dot{m}_3 (ex_3 - ex_4)$

**d) Eficiência Térmica, Elétrica e Global do sistema.**

As relações utilizadas para o cálculo da eficiência térmica, elétrica e global estão na tabela 2. Os parâmetros  $\dot{Q}_{vapor}$  e  $\dot{E}x_{vapor}$  expressam, respectivamente, a energia e exergia utilizada na produção de vapor cujos parâmetros encontram-se na tabela 1.

Tabela 2 – Eficiência térmica, elétrica e global para o sistema.

Eficiência	$\eta$ (1ª lei da termodinâmica)	$\psi$ (2ª lei da termodinâmica)
Térmica	$\frac{\dot{Q}_{vapor}}{\dot{m}_{gn} * PCI}$	$\frac{\dot{E}x_{vapor}}{\dot{m}_{gn} * PCI * \varphi}$
Elétrica	$\frac{\dot{W}_{ele}}{\dot{m}_{gn} * PCI}$	$\frac{\dot{W}_{ele}}{\dot{m}_{gn} * PCI * \varphi}$

Global

$$\frac{\dot{W}_{ele} + \dot{Q}_{vapor}}{\dot{m}_{gn} * PCI}$$

$$\frac{\dot{W}_{ele} + \dot{E} x_{vapor}}{\dot{m}_{gn} * PCI * \varphi}$$

As propriedades termodinâmicas dos fluxos utilizados no cálculo da análise termodinâmica estão na tabela 3 e 4.

A exergia da água e dos gases de exaustão foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$ex = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (5)$$

$$\text{Para os gases de exaustão } \Delta h = \int c_p dT, \Delta s = \int \frac{c_p}{T} dT \text{ e } c_p = \sum_j x_j c_{pi}$$

Onde  $c_{pi} = A_i + B_i T + C_i T^2$  (CALLEN, 1960) e representa a capacidade calorífica do composto  $i$  presente nos gases de exaustão, calculados a partir da composição do gás natural, massa do ar e combustível, considerando combustão estequiométrica.

Tabela 3 – Propriedades termodinâmicas dos fluxos necessários para análise termodinâmica para 1ª configuração.

Pontos	Descrição	Temp( °C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h – (kJ/kg)	s-(kJ/kg)	ex –(kJ/kg)
2	Combustível	25,0	0,125	48.528	-	50.954,4
3	Gases Com.	359,0	4,99	352,7	0,7903	117,1
4	Gases Com.	160,0	4,99	134,4	0,3738	22,94
5	Vap. Sat.	175,2	0,4357	398	1,25	29,93
6	Liq Sat	95,0	0,4357	2773,0	6,624	803,2

Condições de referência:  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 101,3\text{kPa}$ , umidade relativa = 62,47 %, umidade absoluta = 0,018804 kg água/kg ar seco.

Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas dos fluxos necessários para análise termodinâmica para 2ª configuração.

Pontos	Descrição	Temp( °C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h – (kJ/kg)	s-(kJ/kg)	ex –(kJ/kg)
2	Combustível	25,0	0,223	48.528	-	50.954,4
3	Gases Com.	359,0	13,77	571,8	1,085	248,4
4	Gases Com.	160,0	13,77	132,2	0,3677	22,57
5	Vap. Sat.	175,2	2,421	398	1,25	29,93
6	Liq Sat	95,0	2,421	2773,0	6,624	803,2

Condições de referência:  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 101,3\text{kPa}$ , umidade relativa = 62,47 %, umidade absoluta = 0,018804 kg água/kg ar seco.

### 3. Resultados

A tabela 5 mostra os resultados de eficiência térmica elétrica e global. Percebe-se que a configuração com motor a gás apresenta uma melhor desempenho termodinâmico, ou melhor eficiência, tanto de 1ª Lei como de 2ª Lei da Termodinâmica.

Tabela 5 – Resultado das eficiências térmica, elétrica e global.

Configuração		$\eta$	$\psi$
1 <sup>a</sup>	Térmica	34,3	10,6
	Elétrica	43,4	41,3
	Global	77,7	51,9
2 <sup>a</sup>	Térmica	51,9	16,1
	Elétrica	15,0	14,3
	Global	66,9	30,4

A tabela 6 mostra a distribuição de energia pelo sistema na 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> configuração. Percebe-se que a segunda configuração apresenta uma maior destruição de exergia que a primeira configuração. As perdas exergéticas totais da primeira configuração somam 48,1% de toda exergia que entra a partir do gás natural e a segunda configuração apresenta uma perda total de 69,6% de toda exergia que entra que entra a partir da queima do gás natural.

Tabela 6 – Distribuição de Energia pelo Sistema.

	1 <sup>a</sup> Configuração		2 <sup>a</sup> Configuração	
	Energia(%)	Exergia(%)	Energia(%)	Exergia(%)
Energia Elétrica	43,4	41,3	15,0	14,3
Energia Térmica	34,3	10,6	51,9	16,1
Gases de Exaustão	9,4	0,80	5,2	2,8
Perdas Externas	12,9	0,80	27,9	1,2
Destruição	-	46,5	-	65,6

#### 4. Conclusões

Os resultados mostram que a primeira configuração produz uma maior quantidade de produtos por insumo que entra no sistema, tanto do ponto de vista da análise de primeira lei quanto da segunda lei da termodinâmica. Além da desvantagem de apresentar baixa performance, a segunda configuração sofre variações significativas de desempenho quando acontecem variações na carga e essas variações são inevitáveis em *shoppings centers*. Uma outra desvantagem é que o *shopping center* terá um excedente de energia térmica e dificilmente terá um mercado comprador para ele. Com isso, restará ao *shopping center* deixar de produzir vapor e eliminar os gases de exaustão com temperatura mais elevada pela chaminé, diminuindo mais ainda a eficiência global.

Com isso, os resultados estão sinalizando que a primeira configuração é a mais indicada para atender o caso em estudo, porém, ainda seria necessário realizar um estudo de viabilidade econômica para decidir que configuração seria escolhida.

#### 5. Agradecimentos

FINEP, CNPq, Petrobrás.

#### 6. Referências

- CALLEN, H.B., 1985, "Thermodynamics and Introduction to Thermostatistics", John Wiley & Sons, New York.
- SZKLO, A.S., 2001, "Tendências de Desenvolvimento da Cogeração a Gás Natural no Brasil", Tese de Doutorado, Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ.
- SZARGUT, J., MORRIS, D.R., STEWARD, F.R., 1988, "Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process", Hemisphere Publishing Corporation, New York.