

# ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

Ademir Edson Fernandes ([fernana4@ig.com.br](mailto:fernana4@ig.com.br))

Jose Rui Camargo ([rui@unitau.br](mailto:rui@unitau.br))

UNITAU, Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/nº, Jd Morumbi, 12060-440, Taubaté/SP

**Resumo.** No atual período de incertezas na geração e transmissão de energia elétrica no Brasil, a utilização dos sistemas de cogeração com uso de gás natural, tornou-se uma grande oportunidade econômica, estratégica e tecnológica, para as pequenas e médias empresas, considerando a extensão e perspectivas de expansão da rede de distribuição de gás natural. O aumento das tarifas, associada à perspectiva de retomada do crescimento econômico e à incerteza quanto à expansão da oferta de eletricidade, faz com que a cogeração comece a ser avaliada como uma solução economicamente viável para o fornecimento de energia e garantia de operação das empresas. Apresentação de um estudo de caso de cogeração para uma empresa Farmacêutica que necessita implantar um sistema de HVAC, para um novo setor produtivo que também teria a necessidade de se aumentar a geração de vapor para a produção da fábrica e em função deste acréscimo de equipamentos teríamos como barreira para este investimento o grande aumento de consumo de energia, a opção encontrada para viabilizar este investimento sem que isto afetasse no valor dos medicamentos, seria implantar um sistema de cogeração de energia, suprimindo o aumento de demanda e vender o excedente para a concessionária e este investimento, para ser viável economicamente, teria de ser pago dentro de um período de Dez anos, este estudo também trata da análise de viabilidade econômica, análise de melhores alternativas e rendimento dos volumes de controle. A metodologia de estudo deste sistema de cogeração, consiste na geração simultânea de potência elétrica e de energia térmica (vapor para o processo) em instalações industriais. O sistema a ser estudado é na proposição de um ciclo combinado com turbina a gás e caldeira de recuperação em paridade térmica, gerando vapor de processo.

**Palavras-chave:** Cogeração, Rankine, Brayton.

## 1. INTRODUÇÃO

Após a crise do Petróleo mundial, com racionamento de combustível, impedindo o crescimento das indústrias em função de diversos apagões, por falta de investimentos no setor energético, foi necessário buscar formas de reduzir o consumo e depender menos do petróleo importado. Assim, o Brasil os países deram maior impulso ao desenvolvimento dos modelos de cogeração, através dos quais se faz simultaneamente, a geração de trabalho (energia elétrica ou mecânica) e calor (energia térmica) a partir de um único combustível, que pode ser o gás natural, o carvão, os derivados do petróleo, ou a biomassa.

Com a privatização do sistema elétrico e o aumento das tarifas de eletricidade, associado à expansão das linhas de transporte e distribuição de gás natural, a cogeração alimentada por Com a privatização do sistema elétrico e o aumento das tarifas de eletricidade, associado à expansão das linhas de transporte e distribuição de gás natural, a cogeração alimentada por este combustível começa a ser avaliada como uma solução economicamente viável para o fornecimento de energia e a garantia de operação das empresas brasileiras.

Este trabalho analisa a viabilidade técnica e econômica, apontando os modelos mais adequados, para aplicação da cogeração para uma Empresa Farmacêutica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo utiliza-se de volumes de controle conhecidos de fácil aquisição no mercado como turbinas a gás com caldeira de recuperação, chillers, trocadores de calor, tanques de água quente e água de resfriamento, desaerador e caldeira a gás natural e visa a equacionar custos e prazos de amortização, através de custos de manutenção e suprimentos e valores conhecidos de venda de energia elétrica.

## 3. ANÁLISE DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

Será realizada uma análise térmica e econômica em um sistema de cogeração (fig. 1) para a empresa analisada.

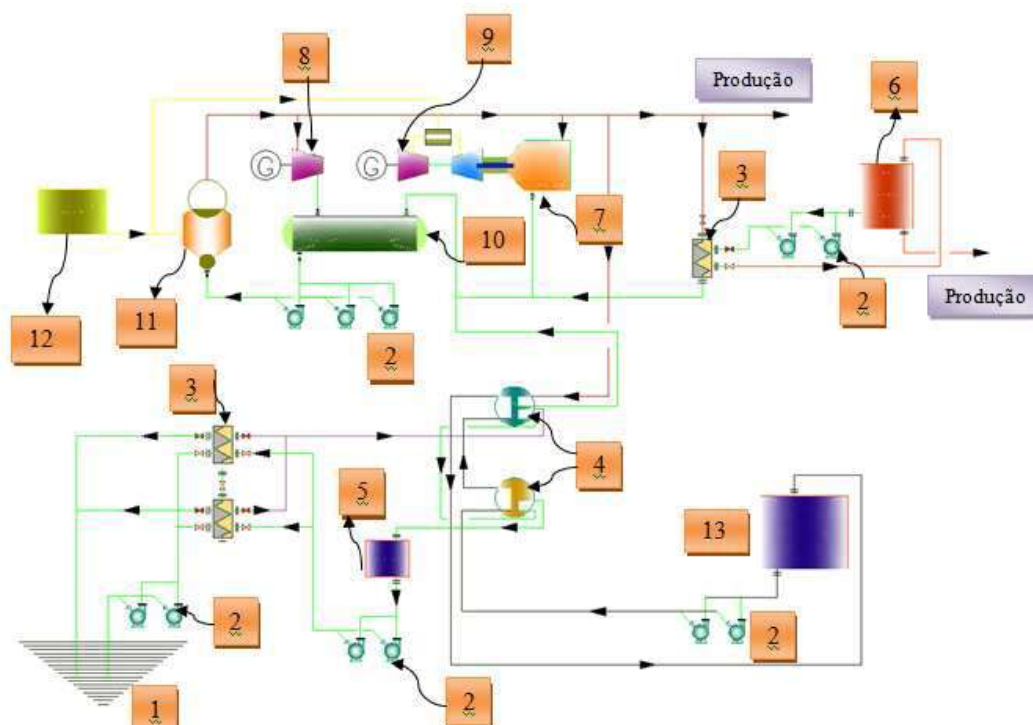


Figura 1 – Sistema de Cogeração.

Tabela 1. Descrição dos Volumes de Controle

Item	Volume de Controle
1	Poço Artesiano
2	Sistema de Bombas
3	Trocadores de Calor
4	Chillers
5	Sistema de HVAC
6	Tanque de Água Quente
7	Caldeira de Recuperação
8	Turbina a Vapor
9	Turbina a gás
10	Desaerador
11	Caldeira á gás natural
12	Geração de gás natural
13	Tanque água gelada

#### 4. PROCESSO

Abaixo será descrito de forma resumida, cada processo e seu fluxo, explicando a figura 1.

##### 4.1. Sistema Água de Poço Artesiano

(1) captação de água de poço artesiano, (2) Bombeado para os (3) trocadores de calor do sistema de HVAC, que retorna para o (1) poço.

##### 4.2. Sistema de Gás Natural

(12) Do reservatório de Gás Natural faz-se a distribuição para a (11) caldeira, (2) Turbina á Gás.

#### 4.3. Sistema Água para Vapor

(10) no Des aerador é captado o condensado da turbina a vapor, (7) da caldeira de recuperação, (8) do trocador de calor do sistema de água quente, do (4) Chiller, que são bombeados para a caldeira (11) e para a caldeira de recuperação (3).

#### 4.4. Sistema Gás Refrigerante

(13) do reservatório de gás refrigerante, (2) é bombeado para os (3) trocadores de calor e para o (4) Chiller e retorna ao (13) reservatório de gás.

#### 4.5. Sistema Água Gelada

(13) do reservatório de água gelada (2) é bombeado para os (4) Chillers que retorna para o (13) reservatório.

#### 4.6. Sistema Geração de Vapor

(1) o vapor é produzido na (11) caldeira de gás natural e na (7) caldeira de recuperação e é enviado para o (4) Chiller, para o (3) trocador de calor do sistema de água quente, daí para a produção.

#### 4.7. Sistema Água de Quente

(1) do (6) tanque de água quente é (2) bombeado para o (3) trocador de calor e retorna ao (6) tanque, que alimenta a produção.

### 5. DEMANDA

Para este estudo considera-se:

- Consumo maior de vapor das máquinas de produção, conforme os procedimentos de produção e equipes e turnos.
- Em função da necessidade de mais pessoas e maior emissão de calor, seria necessária maior refrigeração do sistema produtivo, conseqüentemente maior potência do sistema de HVAC.
- Com maior produção e maior refrigeração e mais máquinas em funcionamento, foi estimado maior consumo de energia elétrica.

As curvas de demanda elétrica e térmica são apresentadas na fig. 2, tendo como média de elétrica 4650 kW e de demanda Térmica 27900 kW.

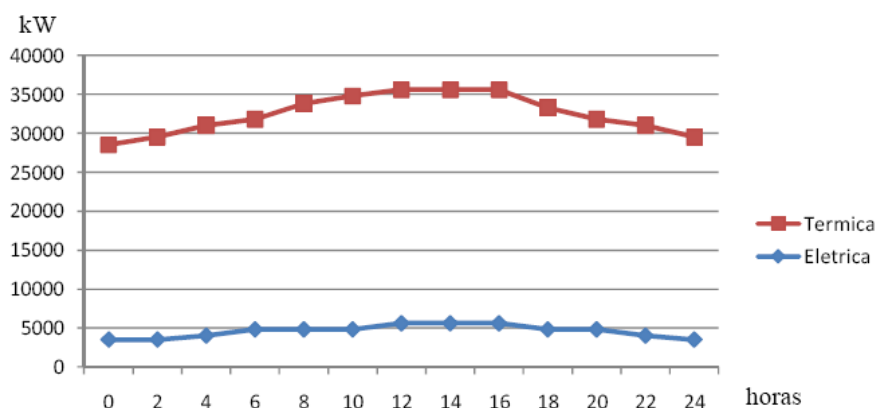


Figura 2 – Demanda Térmica e Elétrica.

O sistema estudado é na utilização do ciclo combinado com turbina a gás e caldeira de recuperação, em paridade térmica, gerando vapor de base. Para a análise energética o equacionamento é

feito segundo os princípios da Termodinâmica e, nesse caso, os balanços de massa e de energia são ferramentas essenciais.

A análise econômica tem por objetivo quantificar os custos de operação e manutenção e os investimentos requeridos de modo a determinar se o sistema proporciona um retorno adequado ao investimento. A maioria dos casos de análise econômica para os sistemas de cogeração são específicos devido às características próprias dos diversos tipos de sistemas. As decisões são feitas usualmente com base no custo de investimento e na receita e, conseqüentemente, no período de retorno do capital investido (pay-back). Este período de retorno é influenciado por inúmeros fatores, tais como: Taxa de juros, Custos de manutenção, Período equivalente de utilização, Custo do combustível a ser utilizado, Custo de aquisição dos equipamentos, Receita obtida com a venda dos produtos do sistema (calor e eletricidade excedentes), Outros custos.

Algumas considerações foram feitas, tais como:

- a) Combustível utilizado foi o gás natural, sendo seu preço de compra de 0,011 US\$/kWh, fonte Comgás, para consumidores de até 50.000 m<sup>3</sup>, pelo consumo específico, já convertido para o Dólar de Setembro de 2009, dados obtidos do site <http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>.
- b) Período de utilização do sistema estimado em 7.000 h/ano,
- c) Preço da eletricidade comprada já convertido para o Dólar, da concessionária local (Eletropaulo) igual a US\$ 0,057/kWh, dados obtidos em Setembro de 2009 pelo site: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>
- d) Taxa de juros anuais igual a 10%.
- e) Valor do Dólar em setembro de 2009 = R\$ 1,819, obtido pelo site : <http://www.unitau.br/servicos/nupes/indicadores/gerais/dolar>
- f) Rendimento da Caldeira a gás Natural: Entre 34 e 38%, para regime de carga de 80% da capacidade nominal, podendo se reduzir consideravelmente em função de cargas menores.

Os valores são para poder calorífico médio de 9.400 Kcal/m<sup>3</sup>. (No Brasil, a definição dos parâmetros para o gás natural se faz conforme método ASTM D 3588, classificando o Poder Calorífico Superior (PCS) em três faixas: A) - Baixo, de 8.000 a 9.000; B) - Médio, de 8.800 a 10.200 e C) - Alto, de 10.000 a 12.500 Kcal/m<sup>3</sup>). Para produção de energia elétrica, estima-se um consumo específico da ordem 0,30 m<sup>3</sup>/kWh gerado.

Neste somente estudaremos o sistema de geração de vapor e energia, onde utilizaremos para geração de vapor, uma turbina a gás natural e com uma turbina a gás, onde se aproveita os gases de escape da turbina para a produção de vapor. Esses gases são dirigidos para uma caldeira de recuperação, trocando energia com a água que circula nos tubos, produzindo vapor. Este vapor pode ser produzido em temperatura e pressão especificadas para o processo (no caso gera-se vapor saturado a 0,6 MPa). A fig. 3 apresenta um esquema desse sistema, com o ciclo topping, com turbina a gás em ciclo aberto e o ciclo bottoming que aproveita os gases de descarga da turbina para gerar vapor para processo. Neste caso a somatória destes dois geradores de vapor totaliza 23 t/h de vapor.

## ANÁLISE ENERGÉTICA

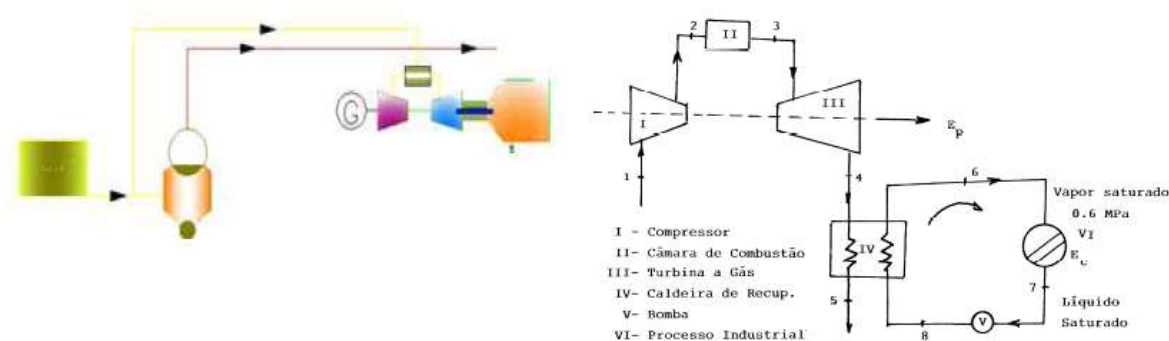


Figura 3. Ciclo combinado utilizando turbina a gás em paridade térmica, gerando vapor de base com caldeira de recuperação.

Da curva de demanda:  $E_c = 27900$  kW, o que implica, para as condições dadas, em um fluxo de massa de vapor para o processo  $m_{kg\ s} = 1,66 / s$ . Optou-se, neste caso, após uma análise energética, por uma turbina SIEMENS, modelo SGT - 500, com os seguintes dados, dados obtidos em catalogo Siemens:

Tabela 2. Dados da Turbina

DADOS	CAPACIDADE
mg	93,9 kg/s
Texaustão	375 °C
Potencia produzida	6750 kw
Rotação	3600 RPM
Rendimento	32,2 %
Heat Rate	10595 BTU/kwh

## 6. ANÁLISE ECONÔMICA

A viabilidade econômica de um sistema de cogeração depende do custo de produção de eletricidade ou energia mecânica e calor útil cobrirem os custos suplementares em relação aos sistemas convencionais de atendimento. As decisões de investimentos em cogeração são feitas com base nos custos e nas receitas ou taxas de retorno esperadas.

Os custos anuais de produção de energia elétrica e de vapor para processo são funções de um fator de anuidade (f), dado pela equação:

$$f = \frac{q^k (q-1)}{(q^k - 1)} \quad (1)$$

$$\text{onde } q = 1 + r / 100 \quad (2)$$

r = taxa anual de juros (neste trabalho adotado como 10%)

k = período de amortização (pay-back), em anos

A seguir é feita a análise econômica para os quatro casos discutidos anteriormente. O custo de investimento nas bombas e tubulações será desprezado por ser um termo muito pequeno em relação aos outros investimentos.

## 7. CICLO COMBINADO COM TURBINA A GÁS E CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO, EM PARIDADE TÉRMICA, GERANDO VAPOR DE BASE

### a) Custo de investimento na caldeira convencional ( $I_{vcc}$ ):

$$I_{vcc} = 1,2 \cdot 16.000 \left( \frac{\dot{m}_v}{1000} \right)^{0,64} \quad (3)$$

O fator 1,2 refere-se à taxa de instalação. Neste caso  $\dot{m}_v = 23.000$  kg/h e tem-se:

$$I_{vcc} = 1,2 \cdot 16.000 (7,439) = 142.825,92 \text{ US\$}$$

Onde  $\dot{m}_v$  = fluxo de massa de vapor caldeira convencional(kg/s)

### b) Custo de investimento no sistema de turbina a gás ( $I_{stg}$ )

$$I_{stg} = 2 \times 10^{-5} \dot{W}_T^2 - 0,2078 \dot{W}_T + 982,65 \quad \text{US\$/kW} \quad (4)$$

onde  $\dot{W}_T$  é a potência gerada pela turbina a gás (neste caso igual a 6750 kW)

$$I_{stg} = 491,25 \text{ US\$/kW} \quad \text{logo, } I_{stg} = 491,25 \times 6750 = 3.315,937,50 \text{ US\$}$$

**c) Custo de instalação da caldeira de recuperação (I<sub>vcr</sub>)**

$$I_{vcr} = 1,1 \times 160.000 \left( \frac{\dot{m}_s}{1500} \right)^{0,81} = 160.649,10 \text{ US\$} \quad (5)$$

Onde  $\dot{m}_s$  = fluxo de massa de vapor (kg/s)

**d) Custo de investimento na planta (I<sub>pl</sub>)**

$$I_{pl} = (I_{stg} + I_{vcr} + I_{vcc}) = 3.619.412,52 \text{ US\$} \quad (6)$$

**e) Custo para a produção de vapor (C<sub>v</sub>)**

$$C_v = \frac{I_{cr} \cdot f}{E_c \cdot H} + C_{comb} \frac{(E_{gases} + \text{Perdas} / 2)}{E_c} + CMcr \quad (7)$$

Onde :

$E_c$  = energia térmica produzida por cogeração e consumida pela planta (kW)

$H$  = horas de trabalho

$CMcr$  = custo de manutenção da caldeira de recuperação (US\$/kWh)

Substituindo os valores pertinentes tem-se:

$$C_v = 0,0012 f + 0,0189$$

**f) Custo para produção de energia elétrica (C<sub>el</sub>)**

Os valores são para poder calorífico médio de 9.400 Kcal/m<sup>3</sup>(10,94kWh/m<sup>3</sup>). Para produção de energia elétrica, estima-se um consumo específico da ordem 0,30 m<sup>3</sup>/kWh gerado, portanto:

$$E_{comb} = 6750 \text{ kWh} \times (0,30 \text{ m}^3/\text{kWh}) \times (10,94 \text{ kWh}/\text{m}^3) = 22.154$$

Rendimento global:

$$C_{el} = \frac{I_{pl} \cdot f}{E_p \cdot H} + \frac{C_{comb}}{\eta_{global}} + CMan \quad (8)$$

onde:

$C_{comb}$  = custo do combustível (neste trabalho adotado como 0,011 US\$/kWh)

$CMan$  = custo total de manutenção da planta (conf. Silveira, 1998, adota-se o valor de 0,015 US\$/kWh)

$$\text{Rendimento global: } \eta_{global} = \frac{E_p}{E_{comb} - E_c / \eta_{cald}} = \frac{6750}{22154 - 27900 / 0,8} = 0,53 \quad (9)$$

Substituindo em (8)

$$C_{el} = \frac{3.619.412 \cdot f}{6750 \cdot 7.000} + \frac{0,011}{0,53} + 0,015 = \quad (10)$$

$$C_{el} = 0,0766 f + 0,0357$$

**g) Custo para a produção de vapor (Cpv)**

$$C_{pv} = \frac{I_{pl} \cdot f \cdot 1,2}{E_c \cdot H} + C_{comb} \frac{(E_c + \text{Perdas} / 2)}{E_c} \quad (11)$$

$$C_{pv} = \frac{3619.412,92 \cdot f \cdot 1,2}{27900 \cdot 7000} + 0,011 \cdot \frac{[27900 + (23000 - 20700) / 2]}{27900}$$

$$C_{pv} = 0,0222 f + 0,0115$$

**h) Custo para a produção de vapor convencional (Cvc)**

$$C_{vc} = \frac{I_{vcc} \cdot f}{E_c \cdot H} + \frac{C_{comb}}{\eta_{cvc}} + C_{Man_{cc}} \quad (12)$$

onde:

$C_{Man_{cc}}$  = custo de manutenção da caldeira convencional (conf. Silveira, 1994 = 0,012 US\$/kWh).

$$C_{vc} = \frac{142825,92 \cdot f}{27900 \cdot 7000} + \frac{0,011}{0,8} + 0,012 =$$

$$C_{vc} = 0,00073 f + 0,02575$$

**i) Ganho com a produção de vapor ( Gv)**

$$G_v = E_c \cdot H ( C_{vc} - C_{pv} ) \quad (13)$$

$$G_v = 207.900 \times 103 (C_{vc} - C_{pv})$$

**j) Ganho com a produção de energia elétrica (Gel)**

$$G_{el} = E_p \cdot H (P_{vel} - C_{el})$$

$$G_{el} = 6750 \times 7000 (0,057 - C_{el})$$

$$G_{el} = 47250 \cdot 103 \times (0,057 - C_{el})$$

**k) Receita do sistema de produção (R):**  $R = (G_{el} + G_v)$  (14)

Tabela 3 – Período de Amortização e Receita do investimento:

<b>K</b>	<b>C<sub>vc</sub></b>	<b>C<sub>v</sub></b>	<b>C<sub>el</sub></b>	<b>C<sub>el</sub></b>	<b>G<sub>el</sub></b>	<b>R</b>
Anos	(US\$/kWh)	(US\$/kWh)	(US\$/kWh)	(US\$/kWh)	US\$	US\$
1	0,027	0,020	0,120	1947399	2974860	-4922259
2	0,026	0,020	0,080	390683	1079010	-688326
3	0,026	0,019	0,067	1167690	-448969	718720
4	0,026	0,019	0,060	1554435	-135374	1419061
5	0,026	0,019	0,056	1785085	51649	1836734
6	0,026	0,019	0,053	1937696	175395	2113092
7	0,026	0,019	0,051	2045724	262990	2308714
8	0,026	0,019	0,050	2125897	327999	2453896
9	0,026	0,019	0,049	2187510	377959	2565469
10	0,026	0,019	0,048	2236142	417392	2653534

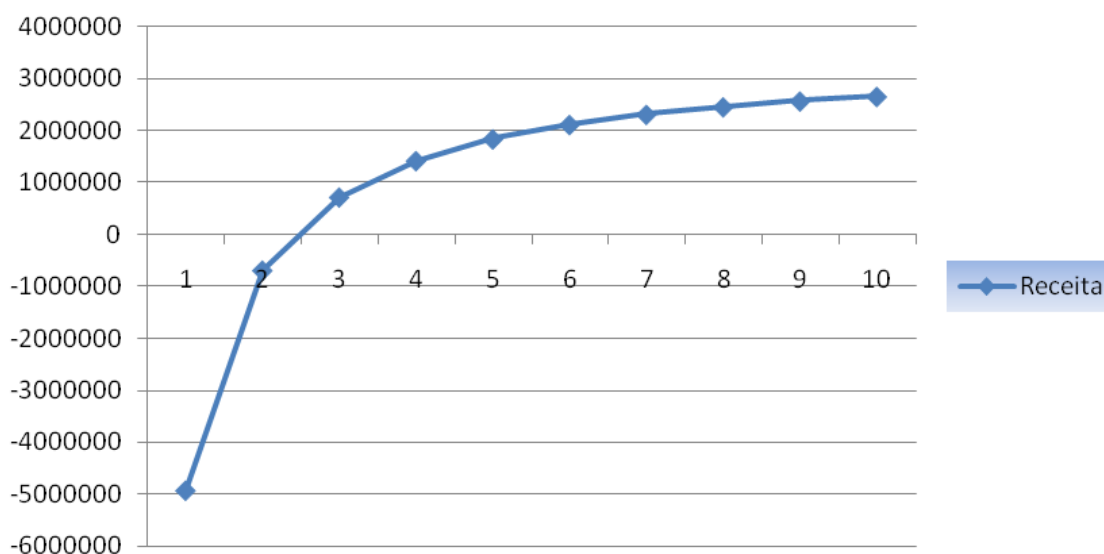


Figura 4 Gráfico de *RECEITA x PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO* para uma análise de viabilidade econômica do sistema apresentado.

## 8. CONCLUSÃO

Neste trabalho fez-se a análise energética e econômica para um sistema de cogeração para uma indústria Farmacêutica. A análise energética buscou otimizar a relação entre a potência elétrica e o vapor para o processo produzido e a potência suprida pelo combustível. No caso foram analisadas várias opções de turbinas a gás e foi escolhida a turbina Siemens modelo SGT 500 cujo ponto de operação mais se aproxima da curva apresentada no diagrama “massa de gás x temperatura de exaustão”.

A análise econômica foi feita de acordo com a metodologia adaptada e utilizada por Silveira (1998) e Camargo(2003) e teve por objetivo quantificar os custos de operação e manutenção e os investimentos requeridos. Para o cálculo da receita foram adotados os preços de compra do combustível (gás natural) e de eletricidade, preço de venda da eletricidade excedente e também a taxa de juros (10%). Obviamente esses valores variam bastante com a conjuntura econômica do País e, para um estudo mais aprimorado, eles devem ser atualizados.

Com os dados obtidos pela análise econômica foi plotado o gráfico de “receita x período de amortização” para este caso. Verifica-se que o caso apresenta um pay-back em torno de 2,5 anos. O cenário é bem favorável, apresentando um pequeno período de amortização. Assim, conclui-se que, o ciclo combinado com turbina a gás e caldeira de recuperação, em paridade térmica pela demanda média de eletricidade e vapor para o processo é muito recomendável.



## 9. REFERÊNCIAS

COMGÁS (2009) – Obtido do Site:

<http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>.

ELETROPAULO (2009)–Obtido pelo Site:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>

Catalogo SIEMENS obtido pelo site: [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/powergeneration/gas-turbines/downloads/IndustriaGasTurbines/E50001-W430-A100-V2-7900\\_GasTurbines\\_Broschuere\\_POR\\_LR.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/powergeneration/gas-turbines/downloads/IndustriaGasTurbines/E50001-W430-A100-V2-7900_GasTurbines_Broschuere_POR_LR.pdf)

Tarifa do Dólar em setembro de 2009 - Obtido pelo site:

<http://www.unitau.br/servicos/nupes/indicadores/gerais/dolar>

CAMARGO J R(2003) Tese de Doutorado - **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsorativo aplicados ao condicionamento de ar**, Tese de Livre Docência, UNESP, Guaratinguetá, 2003.

SILVEIRA, J. L. **Uma contribuição para a modelagem termoeconômica: otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos**, Tese de Livre Docência, UNESP, Guaratinguetá, 1998.

WAN WYLEN . SONNTAG . BORGNAKKE -**Fundamentos da Termodinamica**- 6ªed.

## DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho