

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA VISANDO MODIFICAÇÃO DE UMA MATRIZ ENERGÉTICA INDUSTRIAL ATRAVÉS DO EMPREGO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ¹

Pedro Magalhães Sobrinho ²

Resumo

O estudo foi realizado com o objetivo de aumentar a eficiência energética relacionada ao processo de produção de vapor e eletricidade de uma planta industrial, cliente da CPFL Energia, onde para tal, foi considerada uma operação em paridade térmica, garantindo a produção do vapor necessário aos processos industriais da planta e gerando parte da energia elétrica utilizada na planta. O desenvolvimento deste trabalho seguiu uma metodologia baseada na experiência de trabalhos similares, constando das seguintes etapas: análise prévia da documentação; Visitas à planta industrial para conhecimento das instalações e equipamentos, além da identificação dos ambientes; questionamentos com o pessoal de operação, processo e manutenção visando a coleta de informações sobre aspectos operacionais, necessidades de processo, conservação dos equipamentos; Análise estatística dos parâmetros históricos de utilização de energia elétrica e de sua relação com a produção; levantamento de amostra representativa das instalações e equipamentos. Com o método estudado, obteve-se as curvas que mostram a variação dos custos de produção energéticos, com o período de amortização. No estudo identificou-se que não haveria viabilidade econômica no emprego de turbinas a gás acopladas a caldeiras de recuperação, entretanto, se empregarmos ciclos com turbinas a vapor, temos situações bastante interessantes. Dos três casos estudados a opção onde seria gerado 5927 kW teríamos um pay-back de aproximadamente 4,2 anos, onde além de atender a demanda de vapor a geração elétrica seria suficiente para atender a demanda média considerada (4500 kW), fazendo-se diminuir a dependência da eletricidade comprada da concessionária.

Palavras-chave: Cogeração; Energia; Vapor.

Abstract

The objective of this study was to increase the energetic efficiency related to the production process of steam and electricity at a client of "CPFL Energia". During this study was considered a thermal parity process in order to guarantee the steam production for the industrial processes in that plant. In addition to that, this thermal parity also guaranteed a partial electrical energy utilized at the same plant. The methodology of this study/case was based on similar experiments by following the steps below: Previous analyses of the documentation; Several plant visits in order to study the equipments and its installation; Environment identification; Discussions with the personnel involved at the operation process; Data gathering in order to obtain details of the process and maintenance; Process requirements; Equipment conservation. Statistic analysis of the historical parameters (electric energy utilization and its production rate); Samples gathering (equipments and installations). By using this methodology we could reach the curves/graphs which show the cost variation for the energy production and its amortization period. During the same study we also could identify the lack of economic viability when using gas turbines linked to recuperation boilers. However, if we use cycles with steam turbine we can reach interesting points. Among the 3 (three) studies, the option which would generate 5927 kW would give a pay back of 4.2 years. This is possible to attend the steam demand for the average electricity generation (4500 kW), which would also decrease the electricity dependency bought by the concessionary

Key words: Cogeneration; Energy; Steam.

¹ *Contribuição técnica ao XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Porto Alegre, RS, 16 a 18 de agosto de 2006.*

² *Doutor em Engenharia Mecânica*

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo foi realizado com o objetivo de se aumentar a eficiência energética relacionada ao processo de produção de vapor e eletricidade nas instalações de um cliente da CPFL Energia. Para tal, foi considerada uma operação em paridade térmica, garantindo assim a produção do vapor necessário aos processos industriais da planta, e gerando parte da energia elétrica utilizada na planta. Duas análises de viabilidade técnica-econômicas foram realizadas, sendo considerado emprego de turbinas a gás e de turbinas a vapor. O desenvolvimento deste trabalho seguiu uma metodologia baseada na experiência de trabalhos similares realizados em diversas outras instalações industriais, constando as seguintes etapas: análise prévia da documentação; visitas à planta industrial para conhecimento das instalações e equipamentos, além da identificação dos ambientes; questionamentos com o pessoal de Operação, Processo e Manutenção, necessidades de processo, conservação dos equipamentos, etc; análise estatística dos parâmetros históricos de utilização de energia elétrica e de sua relação com a produção; levantamento de amostra representativa das instalações e equipamentos. A empresa pertence ao ramo cítrico, sendo uma das maiores produtoras de suco no mundo. Ela é composta por várias unidades, sendo que a unidade estudada emprega aproximadamente 1000 funcionários e possui um faturamento anual de próximo a US\$ 50.000.000. A variação da produção na planta com o decorrer do ano é função do período de safra de laranja, principal matéria prima utilizada. A safra ocorre entre os meses de maio e dezembro, quando os consumos de eletricidade e vapor são máximos. A fonte energética mais importante da planta é o vapor (que alimenta processos de aquecimento e atomização, além do desaerador, evaporadores e sistemas de segurança), visto que a eletricidade (outra fonte energética utilizada) pode ser comercializada com a concessionária. No período fora da safra o consumo de eletricidade cai a 30 % da média (do período de safra) e o de vapor cai a zero.

2 ANÁLISE DE SISTEMA DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A GÁS

2.1 Análise Técnica

De acordo com as necessidades energéticas da empresa, optou-se inicialmente por avaliar a possibilidade de utilização de sistema turbina a gás, direcionando seus gases de exaustão para uma caldeira de recuperação e produzindo o vapor necessário aos processos industriais da planta industrial, além de energia elétrica. O sistema estudado foi composto por duas turbinas a gás associadas a uma caldeira de recuperação. A escolha do equipamento a ser utilizado depende da quantidade de energia disponível nos gases de exaustão, responsável pela geração do vapor necessário na caldeira de recuperação. De acordo com as informações disponíveis, o vapor é utilizado nos processos em duas condições termodinâmicas, as quais são: a) Vapor superaquecido a 150 kPa e 130 °C, a 35 t/h; b) Vapor saturado a 1,05 MPa, a 15 t/h

Portanto, dependendo das condições do vapor a ser gerado, são necessárias quantidades diferentes de energia nos gases de exaustão das turbinas. O processo de seleção dos sistemas turbinas a gás que atendam tais necessidades deve iniciar com o

cálculo da quantidade de energia necessária para a geração de vapor (E_v) na caldeira de recuperação, como mostra a Eq. 1.

$$E_v = m_v \cdot (h_v - h_l) \quad (1)$$

Onde:

m_v vazão mássica de vapor [kg/s]
 h_v entalpia do vapor na saída da caldeira [kJ/kg]
 h_l entalpia da água na entrada da caldeira [kJ/kg]

Para a condição *a*: $E_v = 22,32$ MW

Para a condição *b*: $E_v = 9,77$ MW

Esta é a energia recebida pela água na caldeira de recuperação, que por sua vez é alimentada com o calor dos gases de exaustão das turbinas. Considerando a eficiência da caldeira de recuperação como sendo 75 %, obtém-se assim a energia necessária nos gases (E_g) dos sistemas turbinas a gás, como mostra a Eq. 2.

$$E_v = E_g \cdot h_{cr} \quad (2)$$

Onde:

h_{cr} eficiência da caldeira de recuperação

Para a condição *a*: $E_g = 29,76$ MW

Para a condição *b*: $E_g = 13,03$ MW

A energia contida nos gases de exaustão da turbina é função de sua temperatura de exaustão, da vazão mássica; considerando o calor específico a pressão constante médio de 1,15 kJ/kg.K e uma temperatura de escape para a atmosfera de 150 °C, a energia necessária dos gases de exaustão pode ser determinada pela Eq. 3.

$$E_g = m_g \cdot c_p \cdot (T_g - T_e) \quad (3)$$

Onde:

m_g vazão mássica de gases [kg/s]
 c_p calor específico a pressão constante dos gases [kJ/kg.K]
 T_g temperatura dos gases na saída da turbina [K]
 T_e temperatura de escape para a atmosfera [K]

A Equação 3 pode ser representada numa curva da variação do fluxo mássico de gases em função da temperatura de exaustão dos sistemas turbinas a gás. Esta curva permite a seleção de sistemas comercialmente disponíveis no mercado, obtendo-se diferentes casos selecionados. Os sistemas que se localizarem acima da curva gerada, caracterizam os equipamentos que apresentam condições favoráveis para suprir as necessidades energéticas da caldeira de recuperação (acionamento).

Utilizando deste procedimento para as duas condições de vapor (*a* e *b*), observou-se que para a condição *a* (vapor superaquecido), as máquinas selecionadas geram uma quantidade de energia elétrica muito maior que a requerida na empresa (cerca de 20 MW produzidos, contra cerca de 4,5 MW necessários), produzindo assim uma grande quantidade de excedente de eletricidade. Por este motivo a condição *a* foi descartada, tendo em vista que não existe legislação bem definida e favorável no país para a venda

de excedentes. A condição *b* (vapor saturado) possibilitou a seleção de alguns sistemas turbinas a gás com déficit de eletricidade ou pouca geração de excedente, além da prévia satisfação dos requisitos térmicos. Foram analisados cinco casos, como mostra a Tabela 1 e na Figura 1 é mostrado a curva de seleção de sistemas turbinas a gás para a condição *b*.⁽¹⁾

Tabela 1. Resultados da análise técnica.

Caso	Modelo	T_g [°C]	m_g [kg/s]	E_p [kW]	m_{GN} [Nm ³ /h]	Custo [US\$]
1	Typhoon 4.3	500	35,5	8680	2808	3.906.000
2	Typhoon 3.6	575	31	7174	2484	3.371.780
3	M1T-13	518	32,4	5804	2376	3.134.160
4	M1T-01	510	31,7	4296	2160	2.577.600
5	M1T-13 B	529	31,9	5804	2412	3.134.160

Nota: E_p , T_g , m_g correspondem à energia elétrica produzida, à temperatura de exaustão dos gases na turbina e o fluxo mássico destes gases, respectivamente.

Curva $m_g \times T_g$

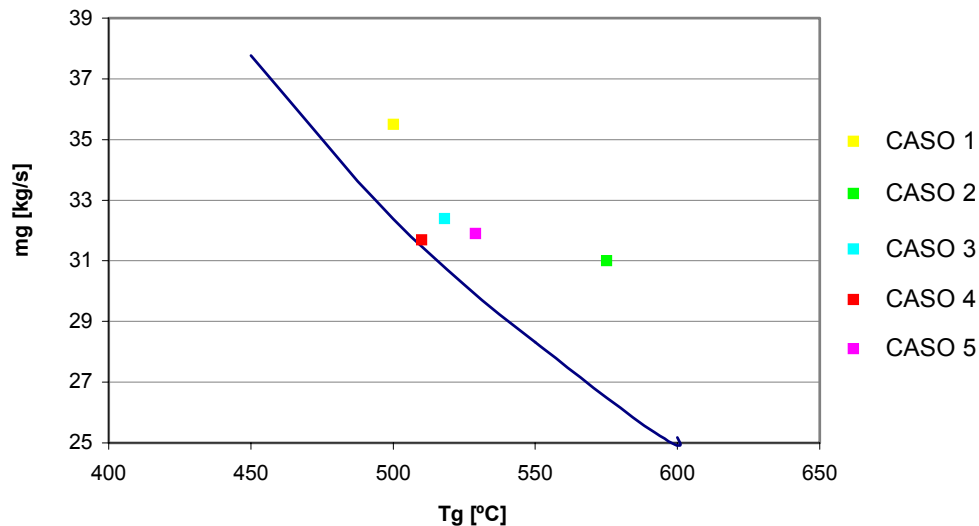


Figura 1. Relação da vazão de gases com a temperatura

Os resultados técnicos mostraram que entre os sistemas selecionados, o de melhor eficiência global (caso 2). Torna-se necessário, no entanto, avaliar economicamente tais sistemas para a escolha do mais adequado ao processo da empresa.

2.2 Análise Econômica

Neste ponto torna-se necessário empregar análise econômica para determinar qual o sistema turbina a gás é o mais atraente. O melhor sistema neste caso será aquele que apresentar o menor período de amortização do capital investido (pay-back). O equipamento produz energia elétrica e térmica tornando-se necessário a determinação dos custos de produção destes vetores energéticos (eletricidade e vapor de processo). O custo da eletricidade gerada pode ser determinado de acordo com a Eq. 4.⁽²⁾

$$C_{el} = \frac{I_{pl} - I_{cr}}{H \cdot E_p} \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} + \frac{C_{comb}}{E_p} (E_{comb} - E_t - Per/2) + CM_{tg} \quad (4)$$

Onde:

I_{pl}	investimento na planta de cogeração [US\$]
I_{cr}	investimento na caldeira de recuperação [US\$]
H	tempo anual de operação [h/ano]
E_p	eletricidade produzida [kW]
C_{comb}	custo do combustível [US\$/kWh]
E_{comb}	potência suprida pelo combustível [kW]
E_t	potência térmica aproveitada [kW]
Per	perdas de energia no sistema de cogeração [kW]
CM_{tg}	custo de manutenção da turbina a gás [US\$/kWh]
k	período de amortização do capital [anos]

A variável q é definida pela Eq. 5. ⁽²⁾

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (5)$$

Onde:

r	taxa anual de juros [%]
-----	-------------------------

A taxa de juros foi considerada igual a 12 % ao ano, resultando num valor de q de 1,12. O investimento na caldeira de recuperação foi considerado como sendo 30 % do valor da turbina e o investimento na planta de cogeração é considerado igual à soma dos investimentos nos sistemas de turbinas a gás e na caldeira de recuperação, com mais 30 % reservado para obra civil e instalação. O tempo anual de operação foi considerado de 5760 horas por ano (8 meses de safra). O custo do investimento no sistema de turbinas a gás depende do nível de potência elétrica produzida. O custo de manutenção do sistema turbina a gás foi considerado 0,015 US\$/kWh⁽²⁾ e o da caldeira de recuperação 0,008 US\$/kWh.⁽²⁾ O preço da eletricidade comprada da rede foi considerado 0,07 US\$/kWh (P_{el}),⁽²⁾ e o de venda para a concessionária foi variado entre 0,02 US\$/kWh, 0,03 US\$/kWh e 0,04 US\$/kWh. O ganho na produção de eletricidade (GP_{el}) pode ser calculado para o caso de déficit ou excedente elétrico, como mostram as Eq. 6a e 6b,⁽²⁾ respectivamente.

$$GP_{el} = E_p \cdot H (P_{el} - C_{el}) \quad (6a)$$

$$GP_{el} = E_r \cdot H (P_{el} - C_{el}) + (E_p - E_r) \cdot H \cdot (P_{v-ex} - C_{el}) \quad (6a)$$

Onde:

E_r	eletricidade requerida
P_{v-ex}	preço de venda de excedente

O custo da produção de vapor (C_v) também pode ser descrito em função do investimento na caldeira de recuperação, como mostra a Eq. 7.⁽²⁾

$$C_v = \frac{I_{cr}}{H \cdot E_v} \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} + \frac{C_{comb}}{E_v} (E_t + Per/2) + CM_{cr} \quad (7)$$

onde:

I_{cr}	investimento na caldeira de recuperação [US\$]
E_v	energia do vapor [kW]
CM_{cr}	custo de manutenção na caldeira de recuperação [US\$/kWh]

O ganho devido à produção de vapor (GP_v) é determinado pela diferença entre os valores do custo da produção de vapor no sistema de cogeração e o custo do vapor produzido em caldeiras convencionais ($C_{v-atual}$), utilizando a caldeira CBC (C_{v-CBC}) (Eq. 8a)⁽²⁾ e uma caldeira a óleo 3A* (C_{v-3A}) (Eq. 8b),⁽²⁾ sendo o custo final determinado pela média ponderada entre os custos de produção de vapor nas duas caldeiras, como mostra a Eq. 8c.⁽²⁾

$$C_{v-CBC} = \frac{C_{bag} \cdot E_{bag}}{E_{v-CBC}} \quad (8a)$$

$$C_{v-3A} = \frac{C_{3A} \cdot E_{3A}}{E_{v-3A}} \quad (8b)$$

$$C_{v-atual} = \frac{C_{v-3A} \cdot m_{v-3A} + C_{v-CBC} \cdot m_{v-CBC}}{m_t} + CM_c \quad (8c)$$

Onde:

$C_{v-atual}$	custo do vapor produzido atualmente [US\$/kWh]
C_{v-CBC}	custo do vapor produzido na caldeira CBC [US\$/kWh]
C_{v-3A}	custo do vapor produzido na caldeira a óleo 3A [US\$/kWh]
E_{3A}	potência suprida pela queima do óleo 3A [kW]
E_{CBC}	potência suprida pela queima do bagaço de cana [kW]
m_{v-CBC}	massa de vapor produzido na caldeira CBC [kg/s]
m_{v-3A}	massa de vapor produzido na caldeira a óleo 3A [kg/s]
m_t	massa total de vapor [kg/s]
CM_c	custo de manutenção nas caldeiras [US\$/kWh]

O custo de manutenção nas caldeiras foi considerado como sendo 0,010 US\$/kWh.⁽²⁾ Portanto, o ganho na produção de vapor pode ser descrito pela Eq. 9.

$$GP_v = E_v \cdot H \cdot (C_{v-atual} - C_v) \quad (9)$$

A receita anual esperada (R) representada pela soma dos ganhos de produção energética (eletricidade e vapor de processo), pode ser determinada pela Eq. 10.

$$R = GP_{el} + GP_v \quad (10)$$

* Foi considerado que esta caldeira pode produzir até 17 t/h de vapor saturado a 10,5 kgf/cm², além de uma eficiência de 75%. O PCI do óleo foi considerado como sendo 9900 kcal/kg (41450 kJ/kg).

Após a realização da análise econômica para todos os casos apresentados, observou-se que a receita não atinge o valor zero para nenhuma das situações, significando que não há viabilidade econômica para a implantação de sistema cogeração com turbina a gás para a empresa.

3 ANÁLISE DE SISTEMA DE COGERAÇÃO COM TURBINAS A VAPOR

3.1 Análise Técnica

Uma análise da tecnologia a vapor é realizada para o aproveitamento do vapor gerado pela caldeira CBC existente, além da utilização das caldeiras ATA no suprimento do restante do vapor saturado necessário aos processos industriais. A situação atual do sistema a vapor da planta é mostrada na Figura 2.

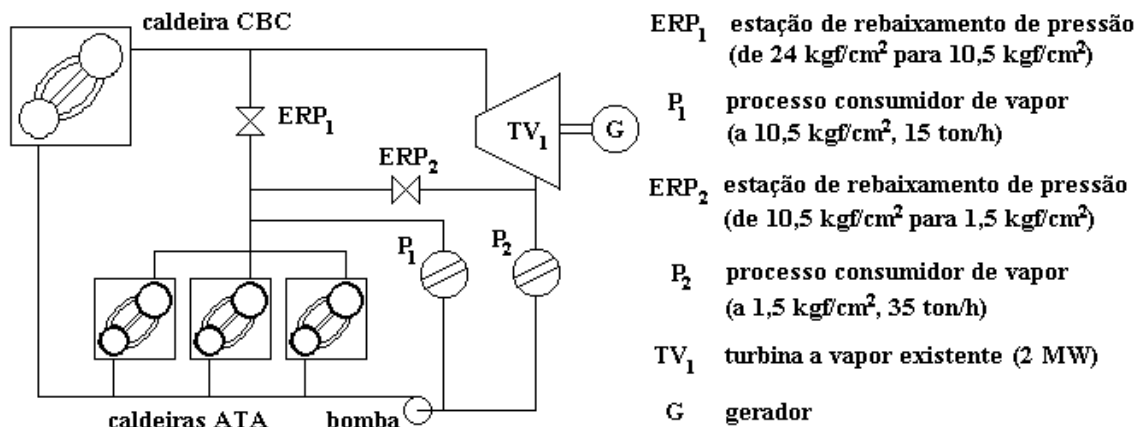


Figura 2. Esquema do sistema a vapor atual.

Do total de vapor que é produzido na caldeira CBC (35 ton/h a 21,5 kgf/cm²), parte (30,7 ton/h) é direcionada à turbina a vapor (TV₁) e a outra parte (4,3 ton/h) é expandida numa primeira estação de rebaixamento de pressão até 10,5 kgf/cm². Este nível de pressão é o requisitado no processo P₁, simbolizando a soma de todos os processos consumidores de vapor a esta pressão na planta, sendo esta linha de vapor conectada às caldeiras ATA. Esta mesma linha também é unida a uma segunda estação de rebaixamento de pressão, onde o vapor é expandido até 1,5 kgf/cm², nível de pressão do processo P₂.

Três casos foram estudados para a situação, sendo estes descritos abaixo.

Caso 1 – substituição de uma estação de rebaixamento de pressão por uma nova turbina a vapor

Neste caso considera-se o aproveitamento do vapor produzido na caldeira CBC para geração de eletricidade numa turbina a vapor TV₂, que deverá operar entre 21,5 kgf/cm² e 10,5 kgf/cm² (além da turbina a vapor existente – TV₁ – que opera entre 21,5 kgf/cm² e 1,5 kgf/cm²). No primeiro caso estudado optou-se pela substituição da estação rebaixadora de pressão ERP₁ por uma turbina a vapor de contrapressão, visando o aproveitamento da energia do vapor vivo (proveniente da caldeira CBC), obtendo-se

assim o vapor nas mesmas condições da saída da ERP₁. Neste caso a Potência Elétrica Total gerada será de 2440 kW.

Caso 2 – substituição das duas estações de rebaixamento de pressão por uma nova turbina a vapor

Neste caso considera-se o aproveitamento do vapor produzido na caldeira CBC para geração de eletricidade numa turbina a vapor TV₃, que opere entre 21,5 kgf/cm² e 1,5 kgf/cm² (além da turbina a vapor existente – TV₁ – que opera entre as mesmas condições. Neste segundo caso, optou-se pela substituição das duas estações rebaixadoras de pressão ERP₁ e ERP₂ por uma turbina a vapor de contrapressão, visando o aproveitamento da energia do vapor vivo (proveniente da caldeira CBC), obtendo-se assim o vapor nas condições necessárias ao processo P₂. O processo P₁ é então satisfeito pelas caldeiras ATA, sem passar por processo de expansão. Neste caso a Potência Elétrica Total será de 2537 kW.

Caso 3 – substituição das estações de rebaixamento de pressão e da turbina a vapor existente por uma nova turbina a vapor

Neste caso considera-se o aproveitamento do vapor produzido numa caldeira nova, capaz de gerar vapor nas mesmas condições da caldeira CBC, para geração de eletricidade numa turbina a vapor TV₄, que opere entre 21,5 kgf/cm² e com duas extrações controladas, uma extração intermediária a 10,5 kgf/cm², e outra com baixa pressão de 1,5 kgf/cm². Neste caso a Potência Elétrica Total produzida será de aproximadamente 5.900 kW. Esta opção tecnológica garante maior produção de eletricidade, possibilitando operação do sistema de cogeração em paridade térmica.

3.2 Análise Econômica

O custo da eletricidade gerada nos casos 1 e 2 pode ser determinado de acordo com a Eq. 11.⁽³⁾

$$C_{el} = \frac{I_{tv}}{H \cdot E_p} \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} + \frac{C_v}{E_p} \frac{m_v}{m_t} (h_e - h_s) \cdot m_v + CM_{tv} \quad (11)$$

Onde:

I_{tv}	investimento na turbina a vapor [US\$]
C_v	custo do vapor utilizado [US\$/kWh]
m_v	massa de vapor expandido na turbina [kg/s]
m_t	massa total de vapor gerado na caldeira [kg/s]
h_e	entalpia na entrada da turbina [kJ/kg]
h_s	entalpia na saída da turbina [kJ/kg]
CM_{tv}	custo de manutenção da turbina a vapor [US\$/kWh]

O custo do vapor (C_v) é considerado como sendo o custo do vapor produzido na caldeira CBC, determinado pela Eq. 8a, somado ao custo de manutenção nas caldeiras (0,008 US\$/kWh),⁽³⁾ resultando em 0,015 US\$/kWh.⁽³⁾

O custo da eletricidade gerada no caso 3 pode ser determinado pela Eq. 12.⁽³⁾

$$C_{el} = \frac{I_{pl}}{H \cdot E_p} \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} + \frac{C_{bag}}{E_p} fp_e + CM_{tv} \quad (12)$$

Onde:

I_{pl} investimento na planta [US\$]
 C_{bag} custo do bagaço [US\$/kWh]
 fp_e fator de produção de eletricidade

O fator de produção de eletricidade é descrito pela Eq. 13.⁽³⁾

$$fp_e = \frac{E_p}{E_{v-proc} + E_p} \quad (13)$$

Onde E_{v-proc} é a energia do vapor, na forma de calor útil, fornecida aos processos industriais, calculada pela massa de vapor multiplicada por sua diferença entálpica.

O custo o vapor produzido no caso 3 pode ser determinado pela Eq. 14.⁽³⁾

$$C_v = \frac{I_{cald}}{H \cdot E_{v-proc}} \frac{q^k (q - 1)}{q^k - 1} + \frac{C_{bag}}{E_{v-proc}} fp_v + CM_{cald} \quad (14)$$

Onde:

I_{cald} investimento na caldeira [US\$]
 fp_v fator de produção de vapor

O fator de produção de vapor é descrito pela Eq. 15.⁽⁴⁾

$$fp_v = \frac{E_{v-proc}}{E_{v-proc} + E_p} \quad (15)$$

A taxa anual de juros foi considerada variando entre 4, 12 e 20 % e o tempo anual de operação foi considerado de 5760 horas por ano (8 meses de safra). O investimento na planta é considerado igual à soma dos investimentos na turbinas a vapor e na caldeira, adicionando-se mais 40 % reservado para obra civil e instalação, sendo que o custo do investimento na turbina a vapor foi considerado 1200 US\$/kW⁽³⁾ para os casos 1 e 2 (com custo de manutenção de 0,015 US\$/kWh),⁽³⁾ e 1400 US\$/kW⁽³⁾ para o caso 3 (com custo de manutenção de 0,017 US\$/kWh).⁽³⁾ O custo de manutenção na caldeira foi considerado em 0,008 US\$/kWh.⁽³⁾

O ganho na produção de eletricidade (GP_{el}) pode ser calculado pela Eq. 16.

$$GP_{el} = E_p \cdot H (P_{el} - C_{el}) \quad (16)$$

O ganho devido à produção de vapor (GP_v) é determinado pela Eq. 17.

$$GP_v = E_v \cdot H \cdot (C_{v-atual} - C_v) \quad (17)$$

A receita anual esperada é determinada pela Eq. 18.

$$R = GP_{el} + GP_v \quad (18)$$

Os valores obtidos para a análise econômica de melhor resultado é apresentado na Figura 4.

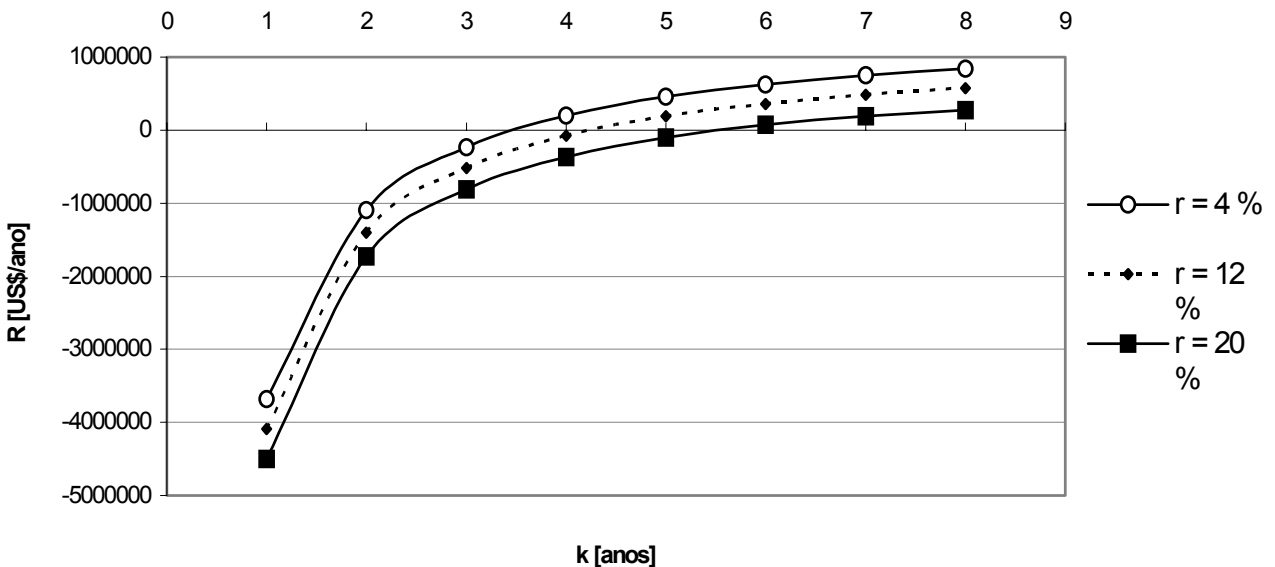


Figura 4. Variação da receita esperada com o período de amortização, para o caso 3.

4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a inviabilidade econômica do emprego das turbinas a gás; entretanto, para o emprego de turbinas a vapor, especificamente no caso 3 onde temos a geração de até 5927 kW, além do atendimento às necessidades de consumo de vapor, foi identificado o menor pay-back (aprox. 4,2 anos, com um investimento na ordem de US\$ 15.100.000), e possibilita uma geração elétrica que atende a demanda média considerada (4500 kW), fazendo com que se diminua a dependência da eletricidade comprada da concessionária, durante o período da safra.

REFERÊNCIAS

- 1 GAS TURBINE WORD. The 1999 Handbook, Pequot Publishing, Inc, 1999.
- 2 CARVALHO, M. B. Análise de um Sistema de Cogeração empregando Turbinas a Gás na Indústria de Malte, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2004.
- 3 DIAS, P.H., Análise Energética, Exergética e Econômica da Ampliação do Sistema de Cogeração Aplicado a Votorantim Celulose e Papel S/A, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2005.