



Submetido em 06.06.16 | Aceito em 07.12.16 | Disponível on-line em 25.04.18

Alvaro Antonio Ochoa Villa*, **José Ângelo Peixoto da Costa** e **Sérgio da Silva Franco**

Instituto Federal de Pernambuco | *ochoaalvaro@recife.ifpe.edu.br

Helder Henrique Lima Diniz

Universidade Salgado de Oliveira

Luiz Assumpção e Vitor Carvalho

Faculdade Integrada, Brasília

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade a avaliação técnica e financeira de um sistema de trigeração de energia, aproveitando os gases da combustão de duas máquinas térmicas (Microturbina e Grupo gerador) com o objetivo de gerar energia elétrica, de produzir água gelada para climatização e água quente (vapor) para um processo industrial. O sistema está composto por uma microturbina a gás de 30 kW de potência (condição ISO), e um grupo gerador de 175 kW, ambos acionados através da queima de gás natural como combustível. A modelagem financeira baseia-se nos princípios da engenharia econômica, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e de payback, estudando os fluxos de caixa ao longo do tempo do investimento verificando os lucros gerados e os custos necessários para a operação e manutenção da planta de trigeração de energia, verificando as economias de gerar eletricidade para consumo próprio e exportação. O estudo realizado para os diferentes cenários analisados da planta de trigeração forneceram resultados favoráveis em função do payback, TIR e o valor presente líquido ao longo dos anos.

Palavras-chaves: Trigeração, Eficiência energética, análise financeira.

ABSTRACT

This study aims at technical and financial evaluation of an energy trigeneration system, taking advantage of the gases from the combustion of two thermal machines (microturbine and generator) in order to generate electricity, to produce chilled water for air conditioning and hot water (steam) for an industrial process. The system is composed of a gas microturbine 30 kW power (ISO condition), and a generator of 175 kW, both operating by burning natural gas as fuel. The financial modeling is based on the principles of economic engineering, Net value present (NVP), internal rate of return (IRR) and the payback time, studying the cash flows over the investment time checking the profits and costs required for operation and maintenance of power trigeneration plant verifying the savings to generate electricity for own consumption and export. The study made for the different sceneries of the trigeneration plant shown good results as function of the payback, IRR and the net present value over the years.

Keywords: Trigeneration, energetic efficiency, Financial Analysis.

1. Introdução

O aproveitamento eficiente dos recursos energéticos é cada vez mais objeto de estudos no meio acadêmico e na indústria, devido à alta demanda de energia do setor residencial, comercial e industrial do País e do Mundo, assim como também os altos custos de processamento

para gerá-la. Este tema, está fortemente ligado à valorização dos aspectos ambientais e sustentabilidade energética dos sistemas de produção, o qual leva a uma preocupação de racionalização e otimização da energia com o objetivo de aproveitar de forma consciente os recursos energéticos.

A cogeração de energia representa um modelo de uso mais eficiente dos recursos energéticos, já que permite aproveitar ao máximo a disponibilidade da matéria prima (fonte primária de energia) e convertê-la em energias de aplicação como, energia elétrica, vapor de água, água gelada, entre outras (ABUSOGLU e KANOGLU, 2009; KANOGLU e DINCER, 2009; CAMPOS, 2011; FU *et al.*, 2011; GOGOI e TALUKDAR, 2014; OCHOA *et al.*, 2014a). Porém, só a combinação das análises energéticas e financeiras permitem escolher o melhor tipo de configuração de cogeração a utilizar. Em projetos de cogeração de energia é necessário a execução de uma análise técnica que vise a eficiência do processo, verificando os fluxos energéticos envolvidos e produtos gerados com a utilização de um recurso primário, assim como também, uma análise econômica que permita complementar os resultados energéticos em função do retorno do capital investido com o sistema proposto, neste caso de energia elétrica e térmica. Entretanto, a amortização, destes projetos de cogeração, no tempo permite recuperar em curto ou médio prazo o investimento, levando em consideração parâmetros econômicos como taxas de juros, vida útil do sistema e taxa mínima atrativa (OCHOA *et al.*, 2014b).

No Brasil as hidrelétricas são as principais fontes de geração de energia e representam aproximadamente 65% da energia elétrica gerada (ANEEL, 2012). Ao longo do tempo acreditava-se que esta seria a melhor forma de gerar energia. Entretanto, outros tipos de fontes de energia alternativas estão ganhando força no Brasil, o que contribui para reduzir a dependência de uma única fonte e para o desenvolvimento da economia de forma sustentável no país (OCHOA *et al.*, 2015). Nos últimos anos vem se identificando a busca de sistemas energéticos mais eficientes, ou seja, que aproveitem ao máximo os insumos na produção de energia (elétrica e térmica), onde a cogeração de energia tem alcançado valores altos de eficiência. Cavalcanti e Silva (2008) colocam que com o aumento da demanda da energia elétrica devido ao crescimento do país, é necessário intensificar o estudo da diversificação da matriz energética,

buscando o aproveitamento de recursos energéticos e de novas tecnologias. Do mesmo modo, Silva (2009) reforçaram o apresentado por Cavalcanti e Silva (2008), já que foi verificado que o perfil ímpar da matriz brasileira não significava que o País não necessitasse promover investimentos em fontes alternativas e renováveis de energia. Vários trabalhos têm demonstrado a relevância da energia elétrica, consumo energético e seus impactos na matriz energética do Brasil (SILVA, 2011; OCHOA *et al.*, 2015), e a necessidade de flexibilidade de operação com a eletricidade (SCHNEIDER e GHILARDI, 2008; ELEOTERO, 2008).

Vários autores analisaram o processo de cogeração com visões diferentes (BRUNO *et al.*, 2005; VIDAL *et al.* 2006; VANDEWALLE *et al.*, 2014). Kong *et al.*, 2009 apresentou um estudo sobre o problema da gestão de energia e operação do sistema de cogeração através da integração de refrigeração, aquecimento e produção de energia. Ochoa *et al.*, 2014b, realizaram uma análise energética e exérgica num *chiller* de absorção integrado a um sistema de microcogeração de energia, encontrando que as eficiências energética e exérgica global de cogeração aumentaram com a recuperação de energia com valores aproximados de 50% e 26% respectivamente. Por outro lado, usando um motor de combustão interna, de 6 kW de potência, Rosato e Sibilio, 2013 investigaram a carga elétrica de um sistema de ar condicionado doméstico em tempo real para uma casa familiar localizada na Itália. Os resultados mostraram uma redução das emissões de dióxido de carbono em cerca de 2%. Diferentes trabalhos têm demonstrado a análise econômica como ferramenta auxiliar da tomada de decisões de investimento de projetos de cogeração de energia (ÇAKIR *et al.*, 2012; CHAI *et al.*, 2013). Além disso, está análise econômica auxilia na busca de redução dos custos relacionados com o consumo de energia elétrica, através do reaproveitamento e utilização de outra fonte alternativa de energia (MRÓZ, 2006; SOMCHAROENWATTANA *et al.*, 2011; EVELOY *et al.*, 2014).

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade de um projeto de trigerção

de energia (eletricidade, frio e calor), aproveitando os gases da combustão de duas máquinas térmicas (Microturbina e Grupo gerador) através da aplicação da análise técnica e econômica, com o intuito de gerar eletricidade para consumo próprio e exportação, produção de água gelada para climatização e vapor para um processo industrial. A ideia é avaliar a configuração mais eficiente de uma planta de trigerção de energia proposta por meio da análise energética e financeira do sistema, aplicando os princípios da conservação de energia e as ferramentas de análise econômica de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e de *payback*.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Cogeração de energia

Representa a geração simultânea de diferentes formas de energia útil, tais como energias elétricas, térmicas, para prover as necessidades de energia de um processo qualquer, seja industrial, agrícola, residencial, a partir de uma única fonte de energia ou matéria prima. (BALESTIERI, 2002). A cogeração também pode ser definida como o reaproveitamento de rejeitos de energia (através da segunda lei da termodinâmica) originando um incremento da eficiência global do sistema devido à produção de duas ou mais energias de aplicação, como por exemplo, energia elétrica, vapor e água gelada (OCHOA *et al.*, 2011).

2.2. Conceitos Financeiros

2.2.1. Taxa mínima atrativa (TMA)

Representa uma taxa de juros mínima (referência) aplicada a qualquer investimento, para estabelecer um lucro mínimo na aplicação de um projeto. Esta taxa está vinculada à oportunidade do investimento, ao risco e à liquidez do investimento (BLANK e TARQUIN, 1999; OCHOA *et al.*, 2011).

2.2.2. Valor presente líquido (VPL)

Sua aplicação está diretamente ligada às taxas do mercado, como por exemplo, a taxa mínima atrativa (TMA), a qual serve de referência

É um procedimento matemático utilizado na análise econômica para verificar a viabilidade financeira de projetos ou negócios novos (BLANK e TARQUIN, 1999). Este procedimento é de longo prazo e permite calcular o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros adequada, e sua formulação é baseada no conceito do valor da soma de todos os investimentos e receitas referenciados a uma única data pela taxa de juros (OCHOA *et al.*, 2011), segundo a Equação (1).

$$VPL = Inv_{inicial} + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1+i)^j} \quad (1)$$

O termo i corresponde à taxa de atratividade usada por quem fará a análise do investimento, e o termo FC representam os fluxos de caixa ao longo dos anos.

A tomada de decisão da viabilidade do projeto de cogeração a partir do VPL é baseada nas seguintes hipóteses:

- Para um VPL maior que zero ($VPL > 0$), o capital investido será recuperado e ainda com resultado de caixa superior ao previsto com a taxa mínima atrativa (TMA).
- Para um VPL menor que zero ($VPL < 0$), o capital investido não será recuperado, portanto o projeto não será economicamente viável.

2.2.3. Taxa interna de retorno (TIR)

É a taxa média dos retornos futuros esperados em função de um investimento e que implica assumir uma oportunidade de reinvestir. Esta taxa pode ser utilizada como parâmetro indicador de viabilidade de um projeto qualquer (BLANK e TARQUIN, 1999), e pode ser calculada a partir da Equação (2)

$$VPL = investimento_{inicial} + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1+TIR)^j} = 0 \quad (2)$$

na comparação de viabilidade do projeto, segundo as seguintes indicações:

- $(TIR > TMA)$; o investimento é um bom negócio;
- $(TIR = TMA)$; o investimento é indiferente;
- $(TIR < TMA)$; o investimento não é um bom negócio.

2.2.4. Tempo mínimo de retorno do capital investido (*Payback*)

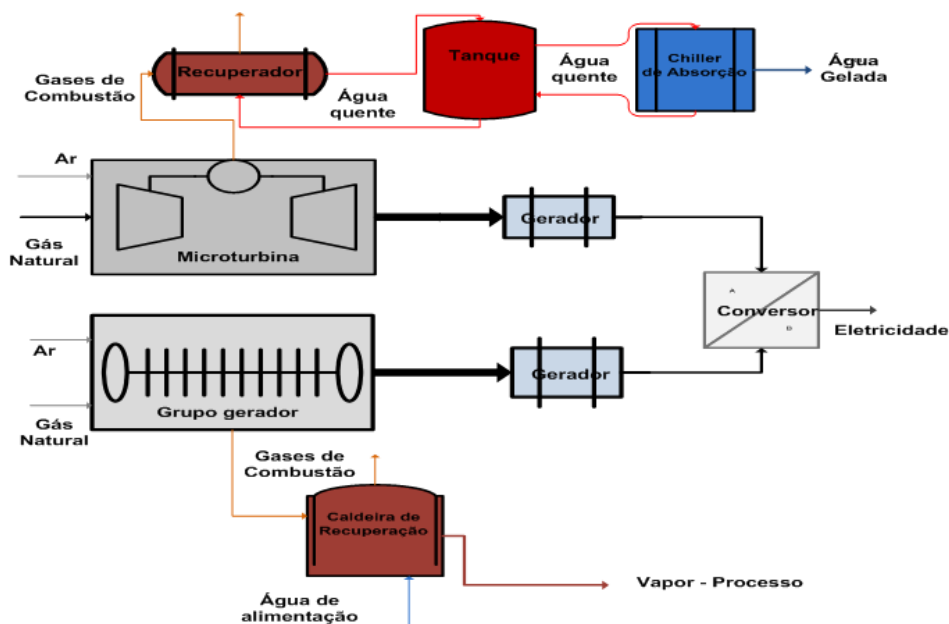
Representa um parâmetro indicador de viabilidade de um investimento, já que verifica a liquidez e o risco do projeto. Por meio deste parâmetro, pode ser determinado o tempo em que a soma das receitas provenientes de um determinado projeto reproduz o total do capital investido para sua implantação, expressado através da Equação (3)

$$Receitas = Custos \quad (3)$$

3. Materiais e Métodos

A Figura 1 mostra o esquema da planta de trieração de energia analisada no trabalho. Este sistema de trieração de energia está integrado pelos seguintes componentes; duas máquinas térmicas (uma microturbina a gás de 30 kW e um grupo gerador - motor de combustão interna de 175 kW de potência um recuperador de calor compacto para o reaproveitamento dos gases, um *chiller* de refrigeração por absorção e uma caldeira de recuperação. O sistema tem como finalidade a geração de eletricidade, calor e frio (eletricidade, vapor de água para processo químico e água gelada para climatização), utilizando o gás natural como fonte primária de produção.

Figura 1. Esquema da planta de trieração de energia analisada.



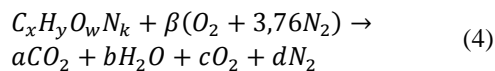
O estudo desta pesquisa será do tipo quantitativo, levando em consideração a análise paramétrica de casos divididos em 6 cenários

baseados na variação das demandas elétrica e térmicas de refrigeração e aquecimento, e também

dos custos associados e as taxas de juros aplicados no sistema de trigeriação de energia.

3.1. Análise Energética

Os dados utilizados na simulação tais como potência, temperaturas dos gases, vazões de combustível e produtos da combustão das máquinas térmicas (microturbina e o grupo gerador), foram extraídos dos catálogos dos fabricantes (Capstone e Leon Heimer) através de curvas de funcionamento, as quais foram ajustadas em forma de correlações através de uma regressão multilinear, que permitem simular o comportamento operacional destes equipamentos. A determinação da vazão de gás natural consumida pelo motor e pela turbina, assim como para a vazão dos produtos, foi determinada a partir da consideração da Lei da Conservação das Espécies tendo como hipótese uma reação para cada hidrocarboneto presente no combustível, segundo a composição do gás natural fornecida pela COPERGAS. A Equação (4) apresenta o balanço geral para o cálculo da composição química dos produtos da combustão.



Os dados do recuperador de calor e chiller de absorção foram extraídos da literatura (OCHOA *et al.*, 2014b; OCHOA *et al.*, 2016) e os dados da caldeira foram fornecidos pelo fabricante (Weco). Foi analisada a quantidade de energia presente nos gases da exaustão através das eficiências elétricas e térmicas dos equipamentos de geração, Equação (5).

$$\dot{Q}_i = \frac{W_i}{\eta_{ele_i}} * \eta_{th_i} \quad (5)$$

Os fluxos energéticos de insumo do *chiller* de absorção e caldeira de recuperação, foram determinados através da inclusão do coeficiente

$$PPM = t_{ope_ele} \cdot \dot{W}_{total_ger} \quad (11)$$

de performance térmico do *chiller* (COP) e eficiência energética da caldeira de recuperação, segundo as Equações (6) e (7).

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{Q}_{th_rec_mt} * COP \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{Q}_{th_rec_gg} * \eta_{cal} \quad (7)$$

O fluxo energético do combustível foi determinado através da vazão consumida pela microturbina e o grupo gerador, expresso segundo a Equação (8).

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb} * PCI \quad (8)$$

O consumo mensal de combustível foi determinado através da potência global gerada pela microturbina e o grupo gerador, e o tempo de operação da planta, Equação (9).

$$consumo_{comb} = \left(\frac{\dot{W}_{gg}}{\eta_{gg}} + \frac{W_{mt}}{\eta_{mt}} \right) \cdot t_{ope_ele} \quad (9)$$

A potência gerada líquida é função da energia fornecida pelos equipamentos de geração e a energia consumida pela instalação dos mesmos (energia parasita que é necessária na operação da planta), Equação (10). O percentual considerado para o cálculo da energia parasita foi de 10% do total da produção de energia (BEJAN *et al.*, 1996; OCHOA *et al.*, 2011).

$$\dot{W}_{total_ger} = (1 - F_{parasita}) \cdot (\dot{W}_{gg} + \dot{W}_{mt}) \quad (10)$$

A produção mensal de energia elétrica (PPM) foi determinada por meio da potência total gerada e o tempo de operação elétrico da planta, Equação (11).

A produção mensal de energia térmica (PTM) foi determinada por meio da recuperação

total de calor da microturbina no recuperador de calor e pelo grupo gerador na caldeira de recuperação, segundo Equação (12).

$$PTM = t_{ope_ele} \cdot \dot{Q}_{rec_gg} + t_{ope_ref} \cdot \dot{Q}_{rec_mt} \quad (12)$$

A eficiência global de trigerção da planta ($\eta_{trigerção}$) foi determinada como a quantidade de energia produzida de eletricidade, vapor e água gelada e a energia consumida pela microturbina e o grupo gerador, expressa a Equação (13).

$$\eta_{trigerção} = \frac{\dot{W}_{total_ger} + \dot{Q}_{rec_gg} + \dot{Q}_{rec_mt}}{\dot{Q}_{comb_gg} + \dot{Q}_{comb_mt}} \quad (13)$$

3.2. Análise Econômica

Esta análise permite decidir a viabilidade financeira do sistema de trigerção de energia a ser implementado, tendo como objetivo o fornecimento de elementos para a melhor compreensão e tomada de decisão entre alternativas de projeto em função dos lucros oriundos do mesmo (OCHOA *et al.*, 2011).

3.2.1. Custos envolvidos na análise econômica

O custo total de uma instalação está composto dos custos de investimento, operação e manutenção, e de partida da planta e construção.

3.2.1.1. Investimento total

Representam os custos produzidos pela compra dos equipamentos da planta e os custos oriundos da construção civil, dimensionamento e instalação da planta, sendo fornecidos segundo a Tabela 1. (BEJAN *et al.*, 1996; OCHOA *et al.*, 2011)

Tabela 1. Valores percentuais sobre os custos envolvidos em análise econômicos de projetos. (BEJAN *et al.*, 1996)

Tipo de Custos	Faixa de valores em função do investimento inicial
Custos Diretos	
Compra de equipamentos adicionais	15 – 40 %
Instalação dos equipamentos	6 – 14 %
Tubulações	3 – 20 %
Instrumentação e controle	2 – 8 %
Equipamentos e materiais elétricos	2 – 10 %
Terreno	0 – 2 %
Trabalho civil, arquitetura e estrutura	5 – 23 %
Serviços	8 – 20 %
Custos indiretos	
Engenharia e supervisão	4 – 21 %
Construção e montagem	6 – 22 %
Contingências	5 – 20 %
Outros custos	
Custos de partida da planta	5 – 12 %
Capital de operação	10 – 20 %

3.2.1.2. Outros Custos

Representam custos associados à partida da planta e capital de operação. A Tabela 1 mostra valores percentuais que podem ser utilizados como referência nestes custos relacionados ao projeto de trigeração.

3.2.1.2.1. Compra de energia elétrica adicional

Se a potência interna requerida for menor que a potência gerada pelos equipamentos, o consumo adicional será determinado segundo a equação (14).

$$con_{adic_ele} = (Pot_{int} - Pot_{ger}) \cdot t_{ope_ele} \cdot Tar_{elet} \quad (14)$$

No caso contrário, este consumo será assumido zero.

3.2.1.2.2. Compra de energia elétrica adicional devido ao processo de refrigeração

Se a demanda de refrigeração for maior que a recuperada nos gases de combustão da microturbina, o consumo adicional pode ser determinado segundo a Equação (15).

$$con_{adic_ele} = \frac{((Pot_{ter_refri} - Pot_{refri_mt}) \cdot t_{ope_ref})}{COP_{comp}} \cdot Tar_{elet} \quad (15)$$

No caso contrário, este consumo será assumido zero.

3.2.1.2.3. Compra de energia elétrica adicional devido ao processo de aquecimento

Se a demanda de aquecimento for maior que a recuperada nos gases de combustão do grupo gerador, o consumo adicional será determinado segundo a Equação (16).

$$con_{adic_ele} = \frac{((Pot_{ter_aque} - Pot_{refri_gg}) \cdot t_{ope_ele})}{\eta_{cal_ele}} \cdot Tar_{elet} \quad (16)$$

No caso contrário, este consumo será assumido zero.

3.2.1.2.4. Custos devido ao consumo de combustível na microturbina e o grupo gerador

Determinado a partir da Equação (17).

$$Custo_{fuel} = \frac{m_{GN}}{\rho_{GN}} \cdot Tar_{GN} \cdot t_{ope_ele} \quad (17)$$

3.2.1.2.5. Custos devido ao consumo da água para uso da planta

Determinado a partir da Equação (18).

$$Custo_{\acute{a}gua} = \frac{m_{\acute{a}gua}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot Tar_{\acute{a}gua} \cdot t_{ope_ele} \quad (18)$$

3.3. Receitas do investimento

Estão vinculadas à economia no consumo de energia pela decisão de aplicar um sistema de geração convencional ou de trigeração. Neste caso as receitas são determinadas pelo fator de exportação de eletricidade (FEE), sendo definidas como a venda do excedente de energia elétrica mediante a demanda interna de potência da planta, e a gerada pela microturbina e o grupo gerador.

- $Dem_{int} \geq Dem_{ger}$; Custo gerado pela compra de energia elétrica para o funcionamento da planta;
- $Dem_{int} < Dem_{ger}$; Custo zero, não precisa de compra de energia elétrica para o funcionamento;

A potência total vendida é função do fator de exportação e a produção mensal de energia produzida pela microturbina e o grupo gerador, segundo a Equação (19).

$$Pot_{venda_ele} = FEE \cdot PPM \quad (19)$$

Sendo a receita determinada segundo a Equação 20.

$$\frac{Receita_{venda_ele}}{Tar_{ele}} = Pot_{venda_ele} \cdot \quad (20)$$

3.3.1. Receita devido ao uso do chiller de absorção

Referida à utilização de energia térmica procedente da energia recuperada pelos gases da combustão da microturbina, o qual representa a energia de ativação do sistema de refrigeração por absorção o qual, substituirá o sistema de refrigeração mecânica, representado economia realizada pela não utilização de energia elétrica para a refrigeração sendo definida pela Equação (21).

$$Receita_{refri} = \left(\frac{Q_{ref_mt} \cdot t_{ope_ref}}{COP_{comp}} \right) \cdot Tar_{ele} \quad (21)$$

3.3.2. Receita devido ao uso da caldeira de recuperação

Referida à utilização de energia térmica procedente da energia recuperada pelos gases da combustão do grupo gerador destinada à produção de vapor para o processo específico industrial, e representa a economia elétrica realizada pela utilização de uma caldeira de recuperação em vez do uso de eletricidade para o aquecimento, Equação (22).

$$\frac{Receita_{aque}}{Tar_{elet_cal}} = Q_{rec_gg} \cdot t_{ope_elet} \cdot \quad (22)$$

3.4. Lucros gerados no investimento

Os lucros produzidos pelo sistema de trigerção de energia são em função da venda de eletricidade, economia devido à refrigeração e aquecimento, menos os custos com a compra de energia elétrica, custos de combustível, água, depreciação, operação e manutenção, Equação (23).

$$Lucros = Venda_{ele} + Econ_{ref} + Econ_{aque} - Pot_{cons} - Custo_{ope-man} - Custo_{fuel} - Custo_{agua} - depre \quad (23)$$

A Equação 23 contabiliza os fluxos de caixa do investimento.

$$Fluxo_{caixa} = lucros + Retorno_{depre} \quad (24)$$

As técnicas de análise financeira utilizadas para avaliar o sistema de trigerção de energia foram: o valor presente líquido (Equação 1), taxa interna de retorno (Equação 2) e o *payback* (Equação 3). Estas técnicas, descritas na seção de fundamentação teórica, são complementares entre si e permitem ajudar na toma de decisão. Porém, foram utilizadas as três de forma de compará-las e analisá-las nos estudos de casos deste trabalho.

4. Resultados e Discussão

A análise econômica do sistema de trigerção de energia foi baseada na configuração mostrada na Figura 1. Para habilitar a possibilidade de trigerção foi necessária a inclusão de um recuperador de calor (trocador de calor) na saída da microturbina, para a troca de calor entre os gases de combustão e água. Esta água é armazenada em um reservatório que funciona como energia principal para o acionamento do *chiller* de absorção. Os gases de exaustão do grupo gerador são enviados à caldeira de recuperação para a formação de água quente direcionado para um processo comercial (lavanderia). A Tabela 2 mostra os dados técnicos e financeiros utilizados para realizar as simulações do sistema de trigerção (cenários analisados) considerando diferentes possibilidades de análise de sensibilidade técnica e financeira. Estes dados apresentam as eficiências dos equipamentos (microturbina, grupo gerador, recuperador), os custos iniciais de cada equipamento do sistema, e também as taxas de juros e tarifas cobradas pelos insumos do sistema (água, combustível).

Tabela 2. Dados fixos de entrada para as simulações.

Parâmetros		Parâmetros	Valores
Temperatura ambiente (°C)	25	Custo da microturbina (R\$)	220.000
PCI (Gás natural) (kJ/kg)	44.450	Custo do grupo gerador (R\$)	100.000
Eficiência elétrica do grupo gerador (%)	31	Custo da caldeira de recuperação (R\$)	18.000
Eficiência elétrica da microturbina (%)	28	Custo do recuperador (R\$)	10.000
Eficiência térmica do grupo gerador (%)	30	Custo do chiller de absorção (R\$)	90.000
Eficiência térmica da microturbina (%)	26	Custo do tanque (R\$)	3.500
Eficiência do recuperador (%)	70	Custo da torre de resfriamento (R\$)	9.500
Eficiência caldeira de recuperação (%)	90	Custos adicionais (R\$)	2.000
Eficiência da caldeira elétrica (%)	98	Taxa de lucros (%)	15
Taxa de juros (%)	15	Taxa de depreciação (%)	10
Taxa mínima atrativa (%)	12	Fator de energia parasita (%)	10
Preço do combustível (R\$/m ³)	1,212	Número de anos do investimento (anos)	20
Preço da água (R\$/m ³)	1,17	Preço da energia elétrica (R\$/kWh)	0,55

4.1. Estudo de Caso

Foi avaliado um caso de referência através de diferentes cenários em função da demanda elétrica, de frio e calor do sistema, fornecidas segundo os dados assumidos em OCHOA *et al.* (2011) e SILVA (2011). Os cenários 1, 2 e 3 visam a análise econômica em função das

demandas elétricas e térmicas, e os cenários 5 e 6 visam o estudo em função dos custos e aumento da taxa de juros.

4.1.1. Cenário 1. Demandas de energia elétrica, térmica de refrigeração e aquecimento (Referência).

Figura 2. a) Demanda Energética Mensal do sistema de cogeração; b) Variação do VPL em função do tempo do investimento para o cenário 1.

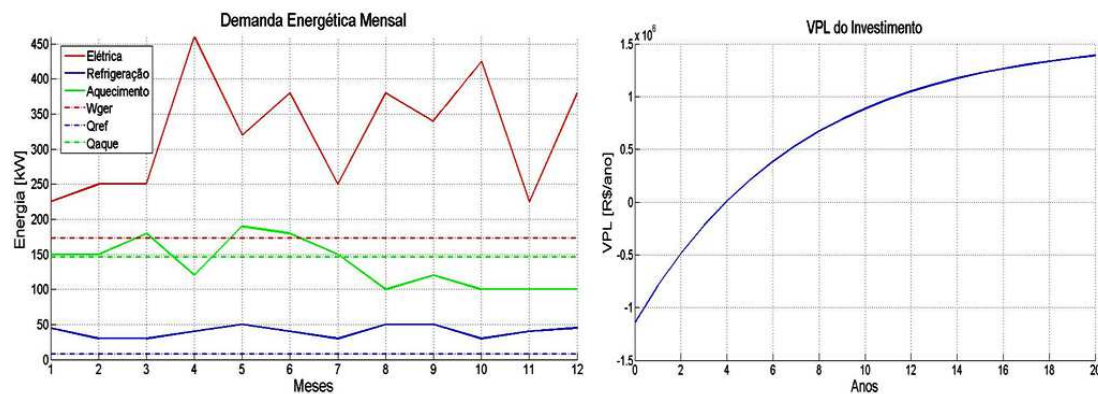


Tabela 3. Resultados Financeiros do cenário 1.

Parâmetros	Valores
VPL	1.003.700 R\$
Payback	6 anos
TIR	26,20 %

Os resultados mostrados na Tabela 3 e Figura 2b demonstram a viabilidade econômica do investimento, já que a taxa interna de retorno é 26,20%, sendo maior que a taxa mínima atrativa de 12 % ao ano. Pode-se visualizar que o VPL tende a um valor positivo, sendo este instante o tempo de retorno do capital, neste caso 6 anos apresentando um VPL de R\$ 100.370,00. Estes resultados mostraram a viabilidade econômica do sistema de trigerção já que a produção de energia elétrica para consumo próprio e exportação, além da economia de utilizar um sistema de refrigeração por absorção, e geração de vapor a partir do rejeito de calor por parte das máquinas térmicas (microturbina e grupo gerador), permitiu gerar lucros que levaram à amortização do investimento do projeto de energia, em aproximadamente 6 anos, ou seja, a partir do sexto ano, todo o capital investido retornará, e os lucros aumentando, permitindo que o sistema seja ampliado ou melhorado, em termos de ampliação.

4.1.2. Cenários 2, 3 e 4. Análise de Sensibilidade em função das demandas elétricas, e térmicas do sistema de trigerção.

A análise de sensibilidade do sistema de trigerção foi realizada a partir da variação das demandas elétricas, térmica de refrigeração e de aquecimento do caso apresentado. O cenário 2 foi representado pelo aumento de 5% na demanda elétrica. O cenário 3 foi representado pelo aumento de 10% da demanda térmica de refrigeração e aquecimento e o cenário 4 foi representado pelo aumento de 10% na demanda elétrica e térmica. A Tabela 4 mostra os resultados das análises econômicas aplicadas aos cenários 2, 3 e 4. Os resultados mostrados na Tabela 4 demonstraram a viabilidade econômica do investimento para os cenários 2 e 3, já que a taxa interna de retorno foi de 21% e 23%, sendo

maior que a taxa mínima atrativa de 12 % ao ano. Assim como os valores do VPL de R\$ 522.210 e R\$ 711.110 para os cenários 2 e 3 respectivamente com tempos de retornos menores aos 9 anos. Porém para o cenário 4 foi negativo já que a taxa interna de retorno teve um valor de 11,95% menor à taxa mínima atrativa, e o valor do VPL foi negativo, o que não permite um tempo de retorno do capital investido. Neste caso, é melhor fazer outro tipo de negócio com o capital a investir.

4.1.3 Cenários 5 e 6. Análise de Sensibilidade do Caso apresentado. a. Variando os custos da Tabela 1 (Utilizando valores mínimos, máximos e médios). b. Variando a taxa de juros.

Esta análise de sensibilidade foi aplicada para verificar a influência da variação dos custos encontrados na Tabela 1, assim como também, a influência à taxa de juros do investimento. As Figuras 3a e 3b mostram estes resultados.

Os resultados mostrados na Figura 3a revelaram que quando usado os valores mínimos, médios e máximos, Tabela 1, as taxas de retorno do capital foram de 53,20%, 35,25 e 26,20%, respectivamente maiores que a mínima apresentada, e fornecendo tempo de retornos (*payback*) de 3, 4 e 6 anos, respectivamente. Este sistema de trigerção foi considerado como excelente devido aos valores de VPL positivo com valores de R\$ 1.773.800, R\$ 1.388.700 e R\$ 1.003.700, para os cenários 5 e 6 respectivamente. Este fenômeno era de se esperar devido ao aumento dos juros, portanto dos custos associados e diminuição das receitas geradas pelo sistema de trigerção de energia. É importante destacar, que um incremento nos percentuais dos custos do sistema de trigerção (Tabela 1) levariam a um aumento no tempo de retorno do capital (*payback*), e também reduzir o VPL do sistema, já que os fluxos de caixa (devido ao aumento das despesas) ficariam menos lucrativos o que colocaria ao sistema de trigerção como uma

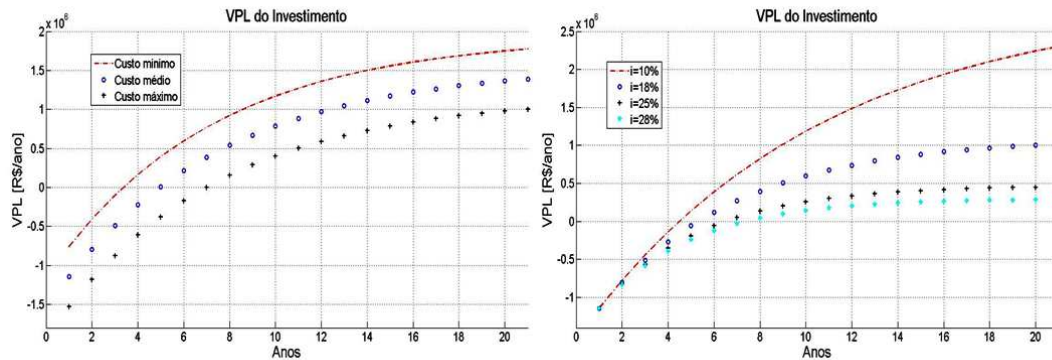
alternativa menos atrativa de investimento, Figura 3a. Segundo a Figura 3b, a medida que a taxa de juros aumenta o investimento tende a ser menos viável, segundo as taxas de retorno e os tempos de

retorno do capital, mas mesmo assim, o investimento pode ser completamente viável para este cenário, até valores um pouco acima de 35% de taxa de juros.

Tabela 4. Resultados da análise de sensibilidade em função da variação das demandas elétricas e térmicas - Caso 1.

Parâmetros	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	Valores	Valores	Valores
VPL	522.210 R\$	711.110 R\$	-251.860 R\$
Payback	9 anos	8 anos	-----
TIR	20,95 %	23,03 %	11,95 %

Figura 3. a) Variação do VPL em função dos custos do investimento segundo a Tabela 1, considerando as variações mínimas, médias e máximas; b) Variação do VPL em função da taxa de juros do investimento.



4. Conclusões

Como parte inicial, o programa desenvolvido permitiu analisar a viabilidade energética e econômica de um projeto de trigerção de energia (Eletricidade, frio e calor) através dos parâmetros energéticos de eficiência global e financeiros como o VPL, TIR e *payback*. Este programa representa uma ferramenta de apoio na toma de decisão sobre a viabilidade técnica, mas principalmente, na parte econômica já que permite identificar os sistemas de geração de energia, levando em consideração as perdas energéticas, compra e venda de energia elétrica, economias, e principalmente, a avaliação do investimento ao longo dos anos;

Foi verificado que a viabilidade técnica e financeira do sistema depende fortemente das demandas de energia (elétrica e térmica), já que em função destas, poderá se ter maiores

economias e lucros, fazendo com que o tempo de retorno do capital seja menor;

O sistema de trigerção de energia quando submetido à variação dos percentuais dos custos, forneceu melhores resultados econômicos quando foram assumidos valores mínimos dos custos, encontrando valores de 3 anos *payback* e 53% de TIR, e piores resultados para valores máximos dos custos, encontrando valores de 6 anos de *payback* e 26 % de TIR. Porém, para as demandas requeridas, a viabilidade técnica e financeira foi positiva em ambos os casos;

A variação da taxa de juros na avaliação econômica mostrou que à medida que aumenta esta taxa a viabilidade tende a diminuir, devido ao aumento dos custos e dissolução do capital através dos anos de avaliação do projeto de trigerção. O tempo de retorno do capital (*payback*) passou de 4 anos para 7 anos, quando a taxa de juros foi aumentada de 10% para 28%.

5. Agradecimentos

O primeiro e segundo autor gostariam de agradecer o apoio financeiro da FACEPE através do projeto de pesquisa PPP/APQ-0151-3.05/14, para a realização deste trabalho.

6. Nomenclatura

\dot{Q}	Fluxo de calor (kW)	<i>água</i>	Água
\dot{W}	Potência de Trabalho (kW)	<i>i</i>	Taxa De Juros
η	Eficiência (-)	<i>th, ter</i>	Térmica
<i>COP</i>	Coefficiente de Performanc e (-)	<i>ele</i>	Elétrica
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	<i>ref</i>	Referência
<i>Pot</i>	Potência (KW)	<i>rec</i>	Recuperad o
<i>con</i>	Compra (R\$ mês ⁻¹)	<i>total</i>	Total
<i>Tar</i>	Tarifa (R\$ unidade de produto ¹)	<i>cal</i>	Caldeira
<i>Econ</i>	Economia (R\$ mês ⁻¹)	<i>comb</i>	Combustív el
	Subscritos	<i>heat</i>	Calor
<i>ger</i>	Gerada	<i>gg</i>	Grupo Gerador
<i>comp</i>	Compressor	<i>mt</i>	Microturbi na
<i>GN</i>	Gás Natural	<i>ope</i>	Operação
<i>refri</i>	Refrigeraçã o	<i>int</i>	Interna
<i>aque</i>	Aquecimen to	<i>depre</i>	Depreciaçã o

7. Referências

ABUSOGLU, A., KANOGLU, M. First and second law analysis of diesel engine powered

cogeneration systems. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 1, p. 2026-2031, 2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Matriz de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidade-brasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>Acessoem 07 out 2012.

BALESTIERI, P. J. A. Cogeração. Geração combinada de eletricidade e calor. Primeira Edição. Florianópolis, Santa Catarina, 2002.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAM, M. Thermal Design and Optimization. Primeira Edição., United State of America, 1996.

BLANK., T., L., TARQUIN, A. J., Ingeniería Económica. Editora McGrawHill UFPE, 1999. Quarta Edição.

BRUNO, J. C., VALERO, A., CORONAS, A. Performance analysis of combined micro gas turbines and gas fired water - LiBr absorption chillers with post-combustion. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, n. 1, p. 87-99, 2005.

ÇAKIR, U., ÇOMAKLI, K., YUKSEL, F. The role of cogeneration systems in sustainability of energy. *Energy Conversion and Management*, v. 63, n. 1, p. 196-202, 2012.

CAMPOS A. C., ERKOREKA, A., ESCUDERO, K. M., SALA, J. M. Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain. *Energy Policy*, v. 39, n. 1, p. 3813-3821, 2011.

CAVALCANTI, A. L. M., SILVA, L. D. Estudo da expansão do setor elétrico brasileiro com geração termelétrica à gás natural. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Dez. 2008.

CHAI, D. S, WEM, J. Z, NATHWANI, J. Simulation of cogeneration within the concept of

- smart energy networks. *Energy Conversion and Management*, v. 75, n. 1, p. 453-465, 2013.
- ELEOTERO, B. C. Redução do Custo com Energia Elétrica em Sistemas de Bombeamento - Estudo de Caso Sistema de Abastecimento de Água de Capinzal/Ouro - (SC). Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Dez, 2008.
- EVELOY, V., RODGERS. P., POPLI S. Trigeration scheme for a natural gas liquids extraction plant in the Middle East. *Energy Conversion and Management*, v. 78, n. 1, p. 204-218, 2014.
- FU, L., ZHAO, X., ZHANG, S., LI, Y., JIANG, Y., LI, H., SUN, Z. Performance study of an innovative natural gas CHP system. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 1, p. 321-328, 2011.
- GOGOI, T. K., TALUKDAR, K. Exergy based parametric analysis of a combined reheat regenerative thermal power plant and water-LiBr vapor absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, v. 83, n. 1, p. 119-132, 2014.
- KANOGLU. M., DINCER, I. Performance assessment of cogeneration plants. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 1, p. 76-81, 2009.
- KONG, X.Q., WANG, R.Z., LI, Y., HUANG, X.H. Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 3, p. 530-538, 2009.
- MANCARELLA P. Cogeneration systems with electric heat pumps: Energy-shifting properties and equivalent plant modeling. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 1, p. 1991-1999, 2009.
- MRÓZ, T. M. Thermodynamic and economic performance of the LiBr-H₂O single stage absorption water chiller. *Applied Thermal Engineering*, v. 26, n. 17-18, p. 2103-2109, 2006.
- OCHOA V., A. A., CHARAMBA D. J. C., HENRÍQUEZ G. J. H., Introdução à análise de sistemas de refrigeração por absorção. Editora Universitária UFPE, 2011. Primeira Edição.
- OCHOA, A. A. V, DUTRA, J. C. C., HENRÍQUEZ, J. R. G. Enege and exergy analysis of the performance of 10 TR lithium bromide/water absorption chiller. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería - Universidad del Zulia*, v. 37, n. 1, p. 38-47, 2014b.
- OCHOA, A. A. V, DUTRA, J. C. C., HENRÍQUEZ, J. R. G., dos Santos, C.A.C. Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O. *Energy Conversion and Management*, v. 108, n. 1, p. 30-42, 2016.
- OCHOA, A. A. V, DUTRA, J. C. C., HENRÍQUEZ, J. R. G., Rohatgi, J. Energetic and exergetic study of a 10RT absorption chiller integrated into a microgeneration system. *Energy Conversion and Management*, v. 88, n. 1, p. 545-553, 2014a.
- OCHOA, A. A. V., DINIZ, H., SANTANA, W., SILVA, P., OCHOA, L. Aplicação de uma Fonte Alternativa de Energia Termelétrica a Gás Natural visando Reduzir o Custo com Energia Elétrica em um Edifício Comercial. *HOLOS*. V. 1, n. 1, p. 72-86, 2015.
- ROSATO, A., SIBILIO, S. Performance assessment of a micro-cogeneration system under realistic operating conditions. *Energy Conversion and Management*, v. 70, n. 1, p. 149-162, 2013.
- SCHNEIDER, V. R. GHILARDI, W. J. Eficientização Energética: Uma Maneira de Reduzir os Custos com Energia Elétrica. *Revista Eletrônica de Contabilidade*, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2008.

SILVA, N. H. C., Estudo da influência das tarifas e das variações de processo no comportamento técnico e financeiro de uma usina de açúcar e álcool. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco. UFPE, Recife, Pernambuco, 2011.

SILVA, W. D. A Cogeração de Energia Elétrica a Partir da Biomassa Inserida na Matriz Energética Brasileira. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade São Paulo, Set, 2009.

SOMCHAROENWATTANA, W., MENKEA, C. KAMOLPUSB, D., GVOZDENACC, D. Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand. *Energy and Buildings*, v. 43, n. 4, p. 925-934, 2011.

VANDEWALLE J, D'HAESELEER W. The impact of small scale cogeneration on the gas demand at distribution level. *Energy Conversion and Management*, v. 78, n. 1, p. 137-150, 2014.