

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DA COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UM HOTEL DE PEQUENO PORTE

Technical, economic and environmental feasibility study for energy
cogeneration in a small hotel

Ana Paula Cardoso Ermel¹; Conrado Ermel¹; Elizandra Pires de Matos²; Felipe Guilherme Appelt¹;
Fernanda Assumpção Rocha²; Francisco José Rohenkohl¹; Gian Marcos Gatti¹;
Graciela Ângela Capacchi²; Vinícius Gomes Marchetto¹; Cristiano Vitorino da Silva³

¹ Engenheiro(a) Mecânico(a) formado(a) pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI Erechim

² Acadêmica de Engenharia Civil na Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim

³ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim. E-mail: cristiano@uricer.edu.br

Data do recebimento: 20/01/2017 - Data do aceite: 12/05/2017

RESUMO: No presente trabalho, um modelo numérico computacional para avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de um sistema de cogeração para ser aplicado a um hotel de pequeno porte foi desenvolvido e implementado no programa *InteractiveThermodynamics* a fim de se verificar a capacidade de adequação às demandas de energia térmica e elétrica do hotel. Foram utilizados dados coletados in loco e, a partir dessas demandas, avaliou-se a possibilidade do hotel produzir sua própria eletricidade com motogeradores a Diesel, sendo o rejeito térmico aproveitado para a produção de água quente. Além dessa análise técnica, também foi realizada uma análise econômica através do método TIR – Taxa Interna de Retorno e uma análise ecológica da operação do motor. Dois cenários foram avaliados: o atual, para um hotel com capacidade para 60 pessoas, que apresenta uma potência elétrica instalada de cerca de 40 kW_e; e um cenário onde este hotel é ampliado para uma capacidade de 450 pessoas, passando a ter uma potência elétrica instalada de 300 kW_e. Como resultados obtidos verificou-se que ambos os cenários podem ser viáveis tecnicamente. Entretanto, o cenário atual não se viabiliza economicamente. Para o cenário futuro, onde o custo da energia elétrica aumenta significativamente, a viabilidade econômica é encontrada com

certa facilidade, apresentando uma TIR de 7,26 % ao mês, resultando em um *Payback* de 14,3 meses. Com relação à análise ambiental, verifica-se que o cenário futuro apresenta uma eficiência ecológica de 86,57 %, que caracteriza um sistema ecologicamente viável e de baixa emissão de poluentes.

Palavras-chave: Viabilidade técnica e econômica. Cogeração. Hotel. *InteractiveThermodynamics*. Eficiência ecológica.

ABSTRACT: In this paper, a computational numerical model to assess the technical, economic and environmental feasibility of a cogeneration system to be applied in a small hotel was developed and implemented in the Interactive Thermodynamics program in order to verify the adequacy of its capacity to thermal and electric energy demands. It was used data collected on the spot, and from these demands the possibility of the hotel to produce its own electricity from Diesel engine generator was evaluated, and the thermal waste was used for hot water production. In addition to this technical analysis, an economic analysis was also performed through the Internal Return Rate (IRR) method and an ecological analysis of the engine operation. Two scenarios were evaluated: the current one of a hotel for 60 people that presents an electric power of about 40 kWe; and a scenario where this hotel is enlarged to a capacity of 450 people, having an electric power of 300 kWe. As results, it was verified that both scenarios can be technically feasible, however, the current scenario is not economically feasible. For the future scenario, in which the cost of electric energy increases significantly, economic viability was found with certain ease, presenting an IRR of 7.26% per month, resulting in a Payback of 14.3 months. Regarding the environmental analysis, it can be seen that the future scenario presents an ecological efficiency of 86.57%, which characterizes an ecologically viable and low pollutant emission system.

Keywords: Technical and economic feasibility. Cogeneration. Hotel. Interactive Thermodynamics. Environmental efficiency.

Introdução

No presente cenário em que a economia mundial tem alta taxa de crescimento, demandando recursos naturais para geração de energia e aumento de capacidade produtiva, é impossível não entrar na discussão sobre os impactos que esse crescimento gera para o planeta. Essas discussões tratam sobre a disponibilidade dos recursos, sobre suas divisões em

recursos renováveis e não renováveis, sobre o impacto que a utilização destes recursos gera e, principalmente, sobre quais são as medidas a serem tomadas para se evitar um futuro catastrófico. Outro ponto que é muito importante ser levado em consideração, quando se trata da utilização dos recursos para produção de energia, é a questão econômica. Muitos dos recursos naturais se tornaram commodities e têm valores flutuantes no mercado.

Uma tendência mundial vem concentrando esforços para a reutilização de energias residuais para produção de um benefício energético, ao qual dá-se o nome de cogeração. Esta cogeração pode estar relacionada com a produção combinada de eletricidade, energia térmica para aquecimento e/ou resfriamento. Várias são as possibilidades de se aplicar esta técnica para produção combinada de energia, seja elétrica/térmica ou térmica para frio e calor, ou, ainda, uma combinação destes três insumos energéticos, sendo que muitas são as situações com possibilidades de implantação, tais como na indústria alimentícia, em hospitais, shoppings, hotéis, enfim, onde existe a possibilidade de combinar mais de uma forma de produção de energia a partir de uma mesma fonte primária.

Em função de instabilidades no cenário econômico, bem como de questões ambientais, o uso da cogeração em hotéis vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Além disso, o perfil de cargas de um hotel ajusta-se muito bem no conceito de cogeração, permitindo a produção de eletricidade, vapor, água quente e água gelada para o sistema de climatização. Vários são os estudos encontrados na literatura que abordam a viabilidade de se implantar a cogeração em hotéis. Oh et al. (2007) realizaram uma avaliação econômica para a implementação de um sistema de cogeração para um hotel ou um edifício de escritórios em Seoul, na Coreia. Xavier et al. (2005) realizaram um estudo visando determinar a viabilidade de um sistema de cogeração, utilizando motor de combustão interna, *chiller* de absorção e trocadores de calor. Siler-Evans et al. (2012), exploraram as variáveis que afetam a viabilidade de projetos de sistemas de cogeração. Herrera et al. (2014) apresentam uma avaliação termoeconômica e uma avaliação de custos exergeticos e exergoeconômicos de uma aplicação de cogeração que utiliza um motor Diesel em um sistema de refrigeração por ab-

sorção de amônia em água para a produção de energia elétrica e frio a partir de hidrogênio como combustível.

Observando este cenário, o objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de viabilidade técnica, econômica e ecológica da cogeração de energia para a produção de energia térmica e elétrica que atenda a demanda de um hotel de pequeno porte, com 32 quartos e capacidade máxima para hospedar 60 pessoas, localizado na cidade de Erechim/RS, Brasil.

Revisão Bibliográfica

Oh et al. (2007) realizaram uma avaliação econômica sobre um sistema de cogeração para um hotel ou um conjunto de escritórios em Seoul, na Coreia. Neste estudo, realizou-se o projeto de um sistema de cogeração que utiliza turbina a gás para determinar a viabilidade de implementação do sistema. A planta de cogeração proposta é constituída de uma turbina a gás e um boiler de recuperação de calor com boilers auxiliares. Neste projeto, para uma situação ideal, os autores assumiram que as demandas de calor e eletricidade são prioridades. Além disso, as demandas padronizadas de energia, de eletricidade, de calor e de resfriamento são dadas através das horas anuais de funcionamento. Assumiram também que a energia em excesso não pode ser comercializada, e que tanto o hotel quanto o conjunto de escritórios possuem grande demanda de aquecimento no inverno e de refrigeração no verão. Para este cenário, o investimento inicial seria de US \$ 1.302.400,00 para o hotel. Para fins de comparação, estabeleceu-se também um sistema energético de referência, onde o investimento inicial com todos os equipamentos seria de US \$ 615.400,00. Desconsiderando os custos com manutenção dos equipamentos e chegou-se à conclusão de que seria necessá-

rio um período de retorno de investimento de 6,24 anos e uma taxa interna de retorno de 21,9% para o caso do hotel, sendo que para o conjunto de escritórios, este período de retorno de investimento passa para 8,7 anos. Desta forma, este trabalho relata que o sistema de cogeração proposto é economicamente viável para o hotel, tendo em vista a alta demanda de energia requerida.

Muccillo (2014) projetou um sistema de micro-cogeração de energia, se atentado para a elaboração adequada do sistema, onde o mesmo pode ter um aproveitamento de 84% da energia envolvida. Somente 14% seria desperdiçado, sendo que este percentual também poderia ser aproveitado com a utilização de um permutador de calor para os gases de escape do moto-gerador, onde essa energia residual seria útil para a produção de água quente, levando a temperatura destes gases a níveis ambientais.

Em um estudo visando determinar a viabilidade de um sistema de cogeração utilizando Motor de Combustão Interna, Chiller de Absorção e Trocadores de Calor, Xavier et al. (2015) buscaram analisar aspectos técnicos, econômicos e ecológicos, levando em conta os requisitos térmicos e elétricos de um hotel hipotético localizado no Brasil. A produção de frio e calor é dada pelo calor residual dos gases de exaustão e pelo sistema de absorção. Foi determinada a eficiência térmica, o tempo de *payback*, os custos de produção, os indicadores de poluição e a eficiência ecológica. O estudo mostrou que a implementação deste tipo de sistema se mostra vantajosa para o setor terciário, indicando um período de *payback* menor do que 3 anos, um aumento da eficiência da planta de 35,7% (para geração de eletricidade) para 85,5% quando reutilizado o calor rejeitado pelo motor de combustão interna, além de apresentar uma eficiência ecológica de 96,7% (alta eficiência), ou seja, uma planta com baixa produção de poluentes.

Afonso e Rocha (2016) utilizaram um software HAP (*Hour Analysis Program*) para caracterizar que todos os dias de um mês teria o mesmo consumo horário de acordo com o perfil de utilização estabelecidos. Assim, como uma alternativa para as grandes instalações de energia convencionais, a produção descentralizada de eletricidade aparece como boa opção e, em particular, a cogeração, a fim de tirar vantagem das limitações inerentes da conversão de calor em trabalho. CHCP (*Combined Heat, Cooling and Power*), é um processo de exploração e produção de calor e energia combinada, em um sistema integrado. Para isso, além da análise energética realizada, também uma análise econômica detalhada foi feita a fim de avaliar a sua viabilidade e o risco em relação aos principais parâmetros a serem adotados, nomeadamente, o VPL (Valor Presente Líquido), a TIR (Taxa Interna de Retorno), o período de retorno e o PES (*Primary Economy Save*), além de emissões evitadas AE (análise energética) de CO₂. As principais conclusões obtidas são de que o CHCP contribui para uma economia de 57 TEP / ano, o AE sendo TEQ 68 CO₂ / ano. O período de retorno é de 3,6 anos.

No intuito de explorar as variáveis que afetam a viabilidade de projetos de sistemas de cogeração distribuídas, Siler-Evans et al. (2012) estudaram um hospital de New Jersey, propondo diferentes métodos para elevar a viabilidade e atratividade de sistemas de cogeração nos EUA. Com demanda elétrica de 300 kW_e e carga térmica de 260 kW_t, os autores avaliaram a implementação de sistemas de CHP e CCHP, através de uma modelagem CDF (*Cumulative Distribution Function*), implementada no software MATLAB. Foram adotados três diferentes cenários financeiros: Forecast de 2011-2016, repetição dos preços de 2010 para todos os anos do projeto e, finalmente, uma distribuição estatística de Monte Carlo, utilizando dados de 1990 a 2009. O artigo avaliou, também, a aplicação

de geradores do tipo turbina, microturbina e motor de combustão interna (Diesel), sendo que este último se mostrou uma melhor opção para aplicações de escala reduzida como é o caso de hospitais, prédios comerciais e hotéis.

Seo et al. (2010) realizaram um estudo de caso envolvendo 8 apartamentos no qual foi avaliando o quanto de energia poderia ser economizada, adotando-se o sistema de cogeração. Foi utilizada uma programação baseada no algoritmo *branch-and-bound* com base no método desenvolvido por Lang e Doig (1960) e Kuester e Mize (1973). Neste estudo, os oito edifícios de apartamentos, com áreas residenciais de 57.200 m² à 182.760 m², estavam localizados em várias cidades com diferentes condições climáticas. Os dados de consumo foram coletados, experimentalmente, após as avaliações de consumo. A partir de suas análises, verificou-se que a cogeração, operando em condições ótimas, pode reduzir o consumo de combustível fóssil em mais de 30% e retornar um ganho econômico de US\$ 3,6 por m²/ano se tarifas mais baixas de eletricidade e de gás forem aplicadas.

Herrera et al. (2014) apresentaram uma avaliação termoeconômica e de custos exergeticos e exergoeconômicos de uma aplicação de cogeração, utilizando um motor Diesel e um sistema de refrigeração por absorção de amônia para a produção de energia elétrica e ar condicionado. Os autores estudaram o uso de misturas de hidrogênio com óleo Diesel em diferentes potências e concentrações. Para a obtenção dos resultados foram utilizados os softwares *Gate Cycle* e o *Engineering Equation Solver* (EES). Verificou-se que com o aumento da concentração de hidrogênio no combustível, aumenta-se a eficiência exergetica tanto do motor como do sistema de refrigeração por absorção. Em cargas baixas, a cogeração apresenta menor desempenho quando comparada com o desempenho do sistema em cargas elevadas. Quando a carga do motor aumenta, a eficiência exergetica do

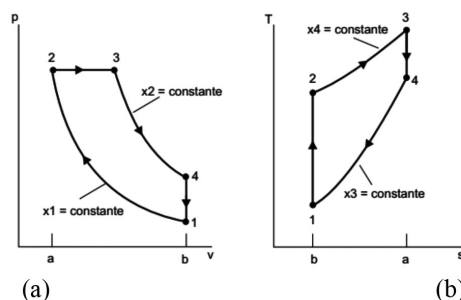
sistema de refrigeração por absorção é reduzida devido ao aumento das irreversibilidades no sistema de refrigeração. Foi verificado, também, que a maior destruição de exergia no sistema de refrigeração ocorre no evaporador e no absorvedor.

Modelagem Matemática

Modelo Térmico

O ciclo-padrão a ar Diesel, mostrado na Figura 1, é adotado neste trabalho para modelagem do motor de combustão interna a Diesel, utilizado para compor a planta de cogeração de energia elétrica e térmica a ser comissionada no hotel. Para a modelagem do ciclo-padrão ar Diesel, são utilizados os princípios da termodinâmica, sendo que o fluido de trabalho deste ciclo é considerado como sendo ar nas condições de um gás perfeito.

Figura 1 - Diagrama $p-v$ (a) e diagrama $T-s$ (b) para o ciclo motor padrão a ar Diesel.



Este ciclo é composto por quatro processos distintos, sendo que dentre eles há dois processos isoentrópicos (1-2 e 3-4), um processo isobárico (2-3) e um processo isocórico (4-1). A modelagem deste ciclo é realizada utilizando-se a primeira e a segunda leis da termodinâmica e, também, o modelo de gás perfeito. As propriedades adotadas são as do ar na temperatura média entre os diferentes pontos do ciclo.

Os processos isoentrópicos, considerando-se a expansão em processo politrópico com $n=k$, onde $s_2 = s_1$, ou seja entropias antes e após os processos de compressão ou expansão, podem ser resolvidos por:

$$\frac{T_I}{T_F} = \frac{v_F}{v_I}^k \quad \text{e} \quad (1)$$

e

$$\frac{p_F}{p_I} = R_c^k \quad (2)$$

onde relação de compressão R_c é

$$R_c = \frac{v_I}{v_F} \quad (3)$$

sendo os índices I e F referem-se aos estados inicial e final, respectivamente, T é a temperatura em K, v é o volume específico em m^3/kg , k é uma constante isoentrópica do processo e p a pressão termodinâmica em Pa.

A modelagem do processo isobárico 2-3 envolve aplicação da primeira lei da termodinâmica desconsiderando-se geração de trabalho, variação de energia cinética e potencial, que para o regime permanente resulta em

$$q_H = c_p (T_F - T_I) \quad (4)$$

onde q_H é o calor transferido ao fluido de trabalho, por unidade de massa, em J/kg, que representa a ignição e combustão da mistura ar-combustível, c_p é o calor específico do fluido a pressão constante em J/kg.K. A modelagem do processo isocórico 4-1 também envolve aplicação da primeira lei da termodinâmica novamente desconsiderando-se geração de trabalho, variação de energia cinética e potencial, que para o regime permanente resulta em

$$q_L = c_v (T_F - T_I) \quad (5)$$

onde q_L é o calor transferido do fluido de trabalho, por unidade de massa, em J/kg, que representa exaustão dos gases de combustão do motor, c_v é o calor específico do fluido a volume constante em J/kg.K. Todavia, como o q_H trata-se do calor por unidade de massa, para o cálculo do rendimento térmico é necessária a obtenção da vazão mássica do combustível para determinar o calor total transferido no processo, Q_H , em W. Assim,

$$Q_H = q_H \cdot \dot{m}_c \quad (6)$$

onde \dot{m}_c é a vazão mássica do combustível em kg/s. Com isso é possível determinar o rendimento térmico do ciclo Diesel, por meio de

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{liq}}}{Q_H} \quad (7)$$

onde W_{liq} é o trabalho líquido gerado pelo ciclo-motor em W.

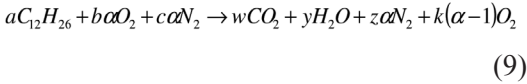
Modelagem da Combustão

A vazão mássica de combustível necessária para entregar a quantidade de calor desejada para operação do ciclo-motor nas condições de projeto é determinada a partir da composição química do combustível, o óleo Diesel, juntamente com a vazão mássica de ar. A vazão mássica de combustível pode ser obtida aplicando-se a primeira lei para um sistema reagente, câmara de combustão, da seguinte forma.

$$\dot{m}_c = \frac{Q_H}{PCI_{\text{diesel}} \cdot \eta_c} \quad (8)$$

onde PCI_{Diesel} é o poder calorífico inferior

do Diesel e η_c é o rendimento da combustão, sendo esta modelada pela seguinte reação química:



onde α é o excesso de ar.

Para a determinação da vazão dos gases de combustão, necessária para a modelagem dos trocadores de calor de recuperação energética, deve-se, primeiramente, determinar a vazão de ar, por meio do sequenciamento mostrado a seguir. A massa de ar teórica, em kg_{ar}/kg_{comb} , na quantidade estequiométrica pode ser calculada por

$$m_{ar-teórica} = 11,51 \cdot C + 34,28 \cdot \left(H_2 - \frac{O_2}{7,937} \right) + 4,31 \cdot S \quad (10)$$

e a massa de ar real, também em kg_{ar}/kg_{comb} , é dada por

$$m_{ar-real} = m_{ar-teórica} \cdot \alpha \quad (11)$$

O excesso de ar é necessário para garantir a queima completa do combustível, pois devido a inércia química, a quantidade estequiométrica pode não garantir a combustão total. Todavia, o valor de α não deve ser elevado a ponto de baixar a temperatura da chama. A vazão de ar real, em kg_{ar}/s , então é obtida por,

$$\dot{m}_{ar-real} = m_{ar-real} \cdot \dot{m}_c \quad (12)$$

A massa teórica dos gases de combustão, em kg_{gas}/kg_{comb} , pode ser obtida por,

$$m_{gas-teórica} = 3,664 \cdot C + 8,937 \cdot H_2 + 1,998 \cdot S + 0,7865 \cdot m_{ar-teórica} \quad (13)$$

e a massa real dos gases, também em kg_{gas}/kg_{comb} , é dada como sendo:

$$m_{gas-real} = m_{gas-teórica} + (\alpha - 1) \cdot m_{ar-teórica} \quad (14)$$

Portanto, pode-se calcular a vazão dos gases de combustão, em kg_{gas}/s , com

$$\dot{m}_{gas-real} = m_{gas-real} \cdot \dot{m}_c \quad (15)$$

Trocadores de Calor

O ciclo combinado de cogeração envolve para em estudo o aproveitamento do rejeito térmico do bloco do motor e dos gases de combustão para a produção do suprimento de água quente do hotel. Considera-se que, em função do gradiente de temperaturas, seja utilizado um trocador de calor casco e tubos para pré-aquecimento da água do hotel a partir da troca térmica com o bloco do motor. Para tal, faz-se um balanço de energia sobre o conjunto motogerador obtendo-se a energia correspondente a troca térmica no trocador de calor, já que são conhecidas as trocas térmicas com os gases de combustão, assim como o trabalho líquido produzido no motor. Após o fluxo de água passar pela etapa de pré-aquecimento, este é direcionado a um segundo trocador de calor, também do tipo casco e tubos, onde é aquecido até a temperatura final a partir troca de calor com os gases de combustão expelidos pelo motor. Adota-se para este processo a primeira lei da termodinâmica dada por

$$Q_T = \eta_T \dot{m}_{gas-real} c_{p,gases} \Delta T_{gases} = \dot{m}_{água} c_{p,água} \Delta T_{água} \quad (16)$$

onde Q_T é a taxa de transferência de calor em W, $\dot{m}_{água}$ é a vazão mássica de água em kg/s , η_T é o rendimento da troca térmica no trocador de calor e ΔT é a variação de temperatura do fluido em K. Os sub-índices *gases* e *água* representam respectivamente os fluidos de trabalho, gases de combustão e água.

Modelo Ecológico

Para a análise ecológica é importante determinar a eficiência ecológica da planta

de cogeração, que leva em conta a eficiência térmica e a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera e meio-ambiente. O equacionamento proposto é baseado no estudo feito por Vilella (2007). Primeiramente é calculado o dióxido de carbono equivalente – $(CO_2)_e$, que é feito a partir da divisão do valor de concentração máxima de CO_2 (10000 mg/m^3) permitida pelos padrões de qualidade do ar correspondentes para NO_x , SO_2 e MP (Material Particulado) em uma hora. A expressão para calcular o $(CO_2)_e$ é (VILELLA, 2007):

$$(CO_2)_e = (CO_2) + (SO_2)_e + (NO_x)_e + (MP)_e \quad (17)$$

onde $(SO_2)_e = 80$ (SO_2) (dióxido sulfúrico equivalente em (CO_2)), $(NO_x)_e = 50$ (NO_x) (óxido de nitrogênio equivalente em (CO_2)) e $(MP)_e = 67$ (MP) (material particulado equivalente em CO_2). O melhor combustível é aquele que apresenta o menor valor de $(CO_2)_e$ obtido na queima do mesmo. Para quantificar o impacto ambiental define-se o “indicador de poluição” (Π_g) dado por (VILLELA, 2007):

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{Qi} \quad (18)$$

onde Π_g é o indicador de poluição em kg/MJ , $(CO_2)_e$ é o dióxido de carbono equivalente em kg/kg_c e Qi é o poder calorífico inferior do combustível PCI ou LHV (*Low Heating Value*) em MJ/kg .

Determinados os valores de $(CO_2)_e$ e Π_g , é possível calcular a eficiência ecológica (ε), que visa avaliar os efeitos poluentes de plantas termoelétricas, mostrado na Eq. (18). Assim,

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204 \cdot \eta_{pl}}{\eta_{pl} + \Pi_g} \cdot \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0,5} \quad (19)$$

onde ε e η_{pl} são as eficiências ecológica e a da planta termelétrica em %.

A eficiência ecológica integra num só coeficiente os aspectos que definem a intensidade do impacto ambiental de uma unidade termelétrica: a composição do combustível, à tecnologia de combustão, o indicador de poluição e a eficiência da conversão. O valor de ε varia (entre 0 e 1) e é diretamente proporcional à eficiência da planta termelétrica (η_{pl}), e inversamente proporcional ao valor do indicador de poluição (Π_g). Do ponto de vista ecológico, um valor mínimo admissível para a eficiência ecológica seria igual a 0,5 que seria chamado de “Valor Crítico de Eficiência Ecológica” sendo que quando $\varepsilon = 0$, considera-se situação insatisfatória (muito poluidor), mas $\varepsilon = 1$ indica uma situação ideal (poluição zero) (VILLELA, 2007).

Análise Financeira

Para saber se a aplicação de um sistema de cogeração é realmente uma boa opção, além da viabilidade técnica, é crucial realizar também uma análise financeira para se conhecer a viabilidade econômica da instalação. Essa análise deve levar em conta vários aspectos da implantação como: investimento inicial, custo anual de manutenção e redução de custo de operação do hotel.

Existem algumas maneiras de se avaliar econômica e financeiramente uma alternativa de investimento e, dentre elas, tem-se a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL), bem como o tempo de retorno de investimento (*payback*) (CASAROTTO FILHO e KOPITTKE, 2000). Para esse trabalho ambos os métodos foram utilizados.

O VPL consiste em achar uma série uniforme anual (A) equivalente ao fluxo de caixa de todos os investimentos considerando-se uma Taxa de Mínima Atratividade (TMA), ou seja, encontra-se uma série uniforme equivalente para os valores de todos os custos e receitas para cada projeto utilizando-se esta TMA. Com a análise do fluxo de caixa,

calcula-se o VPL de todos os termos do fluxo de caixa para somá-los ao investimento inicial. O melhor projeto é aquele que tiver o maior VPL. Assim, com uso da calculadora HP 48 G, resolve-se a seguinte equação para obtenção do VPL do investimento,

$$VPL = -1000 + 200 + (P/A, I, 6) = 0 \quad (20)$$

onde P é o capital, A é o número de parcelas e I é a taxa de juros.

Para o presente modelo, adota-se a taxa mínima de atratividade como sendo da caderneta de poupança, que equivale atualmente a 0,6942% a.m.. Estima-se um tempo de cinco anos (60 meses) para a análise da TIR.

Modelo Físico

Cenário Atual

Neste artigo adotou-se como objeto de estudo um hotel de pequeno porte, situado na região norte do Rio Grande do Sul. O empreendimento possui 32 quartos, capacidade máxima para hospedar 60 pessoas e um restaurante que opera apenas na parte da manhã. Os serviços de lavanderia são terceirizados. A lotação média ao longo do ano é de 60%.

A configuração energética original do hotel é composta por sistemas de aquecimento tradicionais, com aquecedores a gás liquefeito de petróleo (GLP) em um boiler. A energia elétrica demandada pelo hotel é fornecida diretamente pela rede da concessionária. A refrigeração dos quartos e ambientes de uso comum é realizada através de condicionadores de ar do tipo *Splitter*. O hotel conta com painéis solares que pré-aquecem a água admitida da rede de distribuição e um reservatório térmico dedicado a este sistema. Foram levantados

também os dados de consumo de energia, consumo de água, custos de energia e GLP. As Tabelas I e II apresentam as demandas e consumos atuais e os custos pagos pelo hotel sobre os insumos, respectivamente.

Tabela I - Demandas atuais do hotel.

Variável	Consumo / Demanda
Água quente	150 m ³ /mês
Elettricidade	40 kW _e /mês
GLP	756 kg/mês

Tabela II - Preços dos insumos.

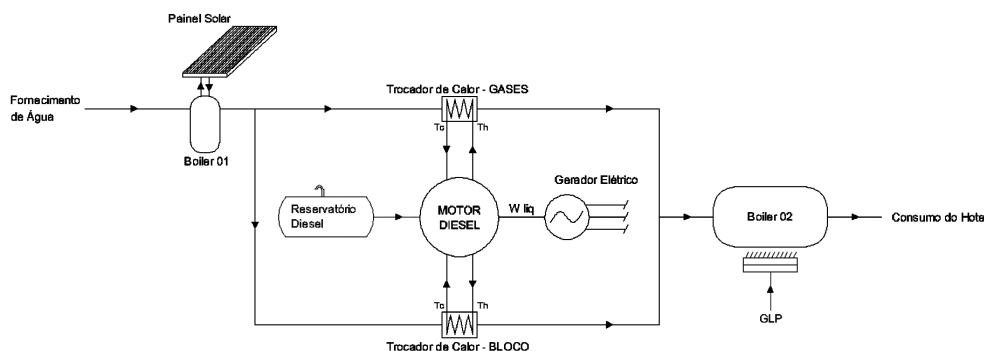
Insumo	Custo Médio
Elettricidade	0,21 R\$/kW _e
GLP	5 R\$/kg

Cenário Futuro 1

No intuito de se obter um maior aproveitamento da energia utilizada no hotel, foi proposta a implementação de um sistema de cogeração adequado à demanda do hotel e interligado ao sistema já existente. Para o acionamento do sistema de cogeração escolheu-se um motogerador operando segundo o ciclo Diesel, modelo GTA 315 SI 31 do fabricante WEG. Este equipamento dispõe de 611 cv de potência com eficiência de 33%, de acordo com o fabricante. Conforme Siler-Evans et al. (2012), motores alternativos são economicamente viáveis para empreendimentos com menor demanda energética.

Para o aproveitamento do calor gerado pelos gases de exaustão e do bloco do motor a Diesel foram utilizados dois trocadores de calor tipo casco e tubos a fim de regenerar a energia que seria desperdiçada pelo motor. Adota-se, também, um gerador elétrico para transformar energia mecânica produzida no eixo (trabalho de eixo) do motor em energia elétrica disponível para a rede elétrica. Na Figura 2 é apresentado o sistema de cogeração proposto.

Figura 2 - Sistema de Cogeração.



Para a temperatura dos gases de exaustão coletados do motor encontrou-se o valor de 1008 K (734,85°C). De acordo com Xavier et al. (2015), a temperatura média dos gases de exaustão do motor Diesel giram em torno de 532°C. Sendo assim, descontou-se 150 K deste valor de forma a considerar as perdas até a utilização no trocador de calor, concordando com a literatura.

Conforme Bando et al. (2009), a escolha do tamanho do motor adotado no sistema de cogeração depende da relação de consumo de energia elétrica e térmica. Motores maiores (mais eficientes), seriam indicados para aplicações com maior demanda de eletricidade. Uma maior quantidade de motores menores (menos eficientes) pode ser interessante para casos em que a demanda térmica supera a elétrica. No hotel estudado neste artigo, obtém-se melhor aproveitamento do sistema, adotando-se um motor de combustão com eficiência aproximada de 30%. A aplicação de motores mais eficientes, conforme descrito por Afonso e Rocha (2016) causaria maior produção de energia elétrica em comparação com a térmica, causando um desbalanceamento na relação geração-demanda.

Cenário Futuro 2

Um segundo cenário futuro foi idealizado, considerando um hotel com carga

elétrica de 300kW_e e 804kW_t térmicos, o que representaria um hotel com capacidade máxima para 450 pessoas, considerando-se a mesma taxa de ocupação de 60%. Nesta configuração, a ordem de grandeza das demandas sobe, de forma a aumentar os índices de viabilidade do sistema de cogeração. Para atender as demandas neste cenário foi proposto a utilização de um parque de motores, com 6 unidades exatamente iguais aos propostos na Seção 6.1.

Propriedades Físicas

Para a modelagem do ciclo Diesel, as propriedades termodinâmicas e químicas adotadas são apresentadas na Tabela III.

Tabela III - Propriedades – Modelo Diesel.

Propriedade	Valor adotado
PCI (Diesel)	42286 kJ
η_c	0,95
R	0,287 kJ/kg.K

Nesta tabela, PCI é o poder calorífico inferior do óleo Diesel, é a eficiência do ciclo e R é a constante universal dos gases. O programa utilizado para modelar o sistema de cogeração, o *Interactive Thermodynamics*, possui tabelas termodinâmicas completas em sua base de dados. Esta característica permite calcular cada calor específico de acordo com a temperatura do processo no ponto avalia-

do. No modelo de combustão adotou-se o equacionamento detalhado na Seção 4.1. As constantes empíricas e a composição do GLP são apresentadas na Tabela IV.

Tabela IV - Propriedades Modelo de combustão.

Propriedade	Valor adotado
E_a	0,9
O_2	0
S	0,035
C	0,844
H_2	0,121

Nesta tabela E_a é o excesso de ar no cálculo da combustão, O_2 , S, C e H_2 são os componentes químicos do ar de admissão. Nesta avaliação $Ea = 0,9$ representa combustão rica.

Condições de Contorno

Como dados de entrada, foram estabelecidos alguns parâmetros que permitiram ao modelo resolver o ciclo termodinâmico e as reações químicas. A Tabela V apresenta os parâmetros fixados como condição de contorno. Para o ciclo Diesel foi prescrita a relação de compressão r_v , pressão de entrada p_I , temperatura de entrada T_I , além das constantes k_1 e k_2 . Após o estudo da demanda elétrica do hotel, estipulou-se um trabalho líquido W_{liq}

Tabela V - Condições de contorno.

Propriedade	Valor adotado
r_v	20
p_I	100 kPa
T_I	288,15 K
k_1	1,40
k_2	0,40
W_{liq}	40 kW _e
η_{Term}	33 %
Taentrada	292,15 K
Taboiler	323,15 K
η_A	0,85
η_B	0,85

de 40kW_e. Segundo o fabricante do motorizador, a eficiência térmica resultante no equipamento gira em torno de 33%.

Admitiu-se que a temperatura de entrada da água, admitida da rede externa do fornecedor, é de 19°C. Como condição de operação atual, a temperatura do boiler é fixa em 50°C. Em relação aos trocadores de calor adotou-se uma eficiência de troca térmica de 0,85 para o trocador de calor dos gases de exaustão e de 0,85 para o trocador de calor da água de refrigeração do motorizador.

Metodologia Computacional

O software *Interactive Thermodynamics* – IT é um pacote desenvolvido para auxiliar na solução de problemas termodinâmicos. No IT, as equações são montadas e através de um método numérico resolve conjuntos de equações em forma de um sistema determinado, número de equações igual número de incógnitas. Porém, o grande diferencial do IT é a sua capacidade de resolver uma grande variedade de problemas usando *viewpads*, que auxiliam o usuário a desenvolver modelos complexos através da busca automática em tabelas termodinâmicas, onde através de uma referência de fluido mais dois dados como pressão e temperatura ou pressão e entalpia o programa fornece o valor tabelado. (MORAN e SHAPIRO, 2005).

O modo de solução de equações para análise financeira utilizado pela calculadora HP 48g funciona a partir de um algoritmo de busca para identificação de um intervalo onde a função muda de sinal, indicando a existência de uma raiz ou solução, utilizando então um método numérico para realizar a conversão para solução. Tal solução é determinada pelo valor inicial no campo de entrada da incógnita e se acaso nenhum dos valores estiver presente, a calculadora usa um valor padrão de zero. Com isso, é

possível buscar mais de uma solução para a equação, alterando o valor inicial no campo de entrada da incógnita. (HEWLETT PACKARD, 2006).

Resultados e Discussão

Avaliação Termodinâmica

Analisando-se o cenário futuro 1, o sistema proposto para a demanda elétrica de 40kW_e é capaz de suprir completamente a demanda térmica (água quente) de $60,11\text{kW}_p$, reservando o consumo de GLP do boiler apenas para sobredemandas ou emergências. Para as demandas apresentadas, o uso de apenas um motogerador é suficiente, fornecendo a sinergia energética ideal. O consumo de água quente do hotel de $1,916\text{ m}^3/\text{h}$ é plenamente atendido pelo sistema.

Considerando-se o sistema proposto para o cenário futuro 2, com demanda elétrica de 300kW_e , é necessário utilizar um parque de motores com unidades menores em detrimento a um motor de grandes dimensões (eletricamente mais eficiente), de forma a garantir o balanço ideal entre energia térmica e elétrica. A eficiência global do sistema é determinada pela relação entre a energia aproveitada e a energia produzida. Para ambas configurações propostas, a eficiência global obtida corresponde a $89,9\%$. Novamente as demandas térmica e elétrica foram atingidas com o sistema proposto.

Avaliação Ecológica

A eficiência ecológica calculada para o sistema de cogeração proposto foi de $86,57\%$, mostrando-se um valor bem acima do valor crítico de eficiência ecológica (seria de 50%), resultando em um sistema pouco poluente, comparáveis aos dados obtidos por Villela (2007), que são de $94,1\%$ e $89,4\%$, para sistemas sem e com a queima suplementar de combustível.

Avaliação Econômica

Para a avaliação do cenário atual considere-se que para o consumo de energia elétrica mensal, os custos sejam de R\$ $2.017,00$ e a potência elétrica contratada pelo hotel seja de 40kW_e , dados estes retirados de pesquisa em campo. Para o aquecimento de água dos banheiros, atualmente, é utilizado um boiler, sendo necessário para o seu funcionamento mensal 756 kg de gás liquefeito de petróleo (GLP), que gera um custo de R\$ $3.780,00$, também obtidos após análise em campo.

Implementando o sistema de cogeração, utilizando um conjunto motor de 134 cv com dois trocadores de calor equivalentes a $107,25\text{kW}_t$ para reaproveitamento do rejeito térmico, estima-se um custo total em torno de R\$ $70.000,00$, incluindo a instalação deste conjunto. Tendo em vista que o calor do motor supre totalmente a demanda de água quente do hotel, evita-se o consumo de GLP para o aquecimento desta água. No entanto, assumindo que este motor consuma 26 litros de óleo Diesel por hora, e que este tenha sua operação restrita basicamente a três horas por dia, entre 18 e 21 horas, fazendo com que o hotel passe a ter um gasto mensal de R\$ $7.361,70$, adotando-se R\$ $3,14$ como o preço do óleo Diesel por litro.

Analisando os atuais gastos mensais, que são de R\$ $5.797,00$, contemplando a compra de GLP e de eletricidade, e os novos gastos mensais com a cogeração, contemplando a compra de óleo Diesel, que resultam em R\$ $7.361,70$, fica evidente que o novo sistema se torna inviável economicamente.

Com relação ao cenário futuro onde a capacidade do hotel é aumentada para 450 pessoas, projetando linearmente as novas cargas térmicas e elétricas a partir do cenário atual, tem-se a potência elétrica do hotel aumentada para 300kW_e e a térmica para 804kW_p , sendo que esse aumento obriga o hotel a optar por duas faixas de tarifas, azul ou verde, em

Tabela VI - Parâmetros para análise financeira.

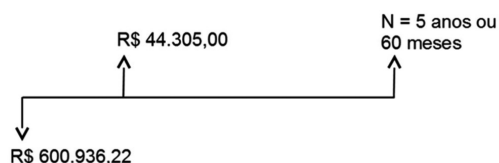
	Potência consumida (kw _e)	Ocupação (60%)	Capacidade térmica (kW _t)	GLP (R\$/mês)	Energia elétrica (R\$/mês)
Atual	40	36	107,25	3.780,00	2.017,00
Futuro	300	270	804,375	28.975,50	77.760,00

função do aumento de demanda e consumo. Para o caso a ser avaliado neste hotel opta-se pela tarifa verde em função da demanda estar vinculada ao horário de pico, equivalente a 3 horas do dia, entre o período das 18:00 às 21:00 horas, conforme constatado em loco nas instalações atuais do hotel. Nesse horário de pico assume-se que o valor, atualmente, gasto em energia elétrica seja aumentado em oito vezes para o novo cenário. Para esta nova configuração, o hotel passa a assumir os dados apresentados na Tabela VI, os quais têm um aumento linear de 7,5 vezes.

Lembrando que este sistema de cogeração é utilizado durante 3 horas por dia, com seis motores de 180 cv (146 kW_e), custando cada um cerca de R\$ 90.000,00, o investimento inicial fica em torno de R\$ 540.000,00. Como o consumo de cada motor é de 35l/h, resulta num total de 630 litros por dia e, assumindo o custo do óleo Diesel igual a R\$ 3,14, o gasto mensal passa a ser de R\$ 59.346,00.

Além dos investimentos na aquisição dos motores, faz-se necessário o investimento em dois trocadores de calor, um para aproveitamento térmico da água quente do bloco do motor, que precisa de uma área equivalente de 5,56 m² para sua potência térmica, e outro com área de 8,61 m² para aproveitamento do calor residual dos gases de combustão. Após análise de mercado, estima-se um custo de fabricação e transporte para estes equipamentos equivalente a R\$ 445,00 por m², resultando assim em um investimento igual a R\$ 6.305,00. Somando o investimento no parque de motores, mais os dois trocadores de calor, considerando um custo de dez por cento para a instalação, resulta num investimento inicial total de R\$ 600.936,22.

Neste novo cenário evita-se o gasto mensal de com energia elétrica e GLP, estimado em um total de R\$ 106.717,00, baseado nos valores acima descritos na Tabela 6. No entanto, o cenário futuro passa a ter um gasto mensal de R\$ 59.346,00 com óleo Diesel mais R\$ 3.066,00 de manutenção, resultando em R\$ 62.412,00, tendo então uma economia mensal de R\$ 44.305,00. Fazendo o fluxo de caixa para estes valores, como mostrados na Figura 3, tem-se para 60 meses uma TIR equivalente a 7,26% a.m., muito superior à taxa mínima de atratividade (TMA) da caderneta de poupança que equivale a 0,69% a.m. (janeiro de 2016), apontando a viabilidade do investimento. Para estas condições tem-se um *payback* de 14,3 meses, demonstrando alta atratividade do investimento.

Figura 3 - Fluxo de caixa do cenário futuro.

Conclusões

A cogeração mostrou-se de fato como uma alternativa de aproveitamento energético notadamente eficiente, com números que atingem a faixa de 90% de eficiência, o que significa que quase todo o potencial energético do combustível é utilizado pela planta, seja na forma de eletricidade ou calor. Como objetivo principal, este artigo realizou o estudo de viabilidade técnica, econômica

e ecológica da cogeração de energia em um hotel de pequeno porte, utilizando motores que operam o ciclo Diesel para uma demanda de 40 kW_e , posteriormente, 300 kW_e , num caso hipotético. Do ponto de vista técnico, a cogeração mostra-se viável para ambos os casos, onde apenas deve-se tomar o cuidado com a configuração dos motores. Para o caso hipotético, é vantajoso utilizar mais motores, resultando em menor eficiência, ao invés de um único grande motor, assim dissipando mais energia para atender a demanda térmica do hotel. Ambos os casos atingiram eficiências energéticas de 89,95%, e eficiência

ecológica de 86,57%, o que representa um sistema altamente eficiente do ponto de vista ambiental e ecológico. No entanto, do ponto de vista econômico, quando a demanda elétrica é baixa (caso de 40 kW_e), o custo da energia comprada é baixo a ponto de inviabilizar o custo de instalação e manutenção da planta de cogeração. No entanto, aumentando a demanda para 300 kW_e , as taxas de fornecimento de eletricidade aumentam de maneira que o investimento se torna bastante atraente. Isto comprovou-se através dos cálculos de retorno de investimento, que apresentou *payback* de apenas 14,3 meses para esta configuração.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, C.; ROCHA, C.. Evaluation of the economic viability of the application of a trigeneration system in a small hotel. **Future Cities and Environment**, Portugal, 2016.
- HERRERA, M. D. M.; ARRIETA, F. R. P.; SODRE, J. R. Thermoeconomic assessment of an absorption refrigeration and hydrogen-fueled Diesel power generator cogeneration system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, p. 4590-4599, 2014.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos**. 9. ed. Atlas: São Paulo, 2000.
- HEWLETT PACKARD – **User Guide HP 50g** ed. 1, 2006
- KUESTER, J.L; MIZE, J.H. **Optimization techniques with Fortran**. McGraw-Hill, 1973.
- LAND, A.H.; DOIG, A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. **Econometrica**, vol. 28 (3), p. 497-520, 1960.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; SCOFANO NETO, F. (Trad.). **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MUCCILLO, M.; GIMELLI, A.; Experimental development, 1D CFD simulation and energetic analysis of a 15 kW micro-CHP unit based on reciprocating internal combustion engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 71, p. 760-770, 2014.
- OH, S.; OH, H.; KWAK, H. Economic evaluation for adoption of cogeneration system. **Applied Energy**, v. 84, p. 266-278, 2006.
- SEO, H.; SUNG, J.; OH, S.D.; OH, H.S; KWAK, H.Y. Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea. **Ener. and Build.**, v. 40, p. 961-967, 2008.
- SILER-EVANS, K., MORGAN, M.G., AZEVEDO, I.L. Distributed cogeneration for commercial buildings: Can we make the economics work? **Energy Policy**, n. 42, p. 580-590, 2012.
- XAVIER, B. H.; TUNA, C.E.; ARAÚJO, F.H.M.; SILVEIRA, J.L. Cogeneration with internal combustion engine and absorption refrigeration system (ars) operating with natural gas: technical, economical and environmental issues. In: **23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. December 6-11, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015.