

AValiação TERMOECONômica COMPARATIVA DE PROPOSTAS DE UNIDADES DE COGERAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO COMBUSTÍVEL FÓSSIL OU RENOVÁVEIS PROVENIENTES DA BIOMASSA

Rafael M. M. Freire, eng.rafaelmmf@gmail.com¹

Alex A. B. Santos alex.santos@fieb.org.br¹

¹ SENAI CIMATEC - Campus Integrado de Manufatura e Tecnologias, Salvador, Bahia, Brasil.

Resumo: As políticas de emissões e a busca pela independência da matriz energética dos combustíveis fósseis reforçam o emprego de fontes alternativas de energia. Nesse cenário a geração de energia através da biomassa tende a crescer sendo aplicada de diferentes formas. A transformação da biomassa em um combustível gasoso pode ser realizada por processos termoquímicos ou bioquímicos. A gaseificação da biomassa, processo termoquímico, é uma técnica que produz um combustível gasoso conhecido como gás de síntese que possui baixo poder calorífico capaz de gerar energia elétrica por meio de motores de combustão interna e de turbinas a gás. Já o biogás é produzido pelo processo bioquímico auxiliado pela decomposição da matéria orgânica. Esse trabalho trata de um estudo de propostas de unidades de cogeração de energia em um centro de pesquisa autoprodutor de energia elétrica e que necessita, também, de demanda térmica para refrigeração. Por meio da termoeconomia, são avaliadas três tipos de unidades de cogeração com motores de combustão interna que operem com o gás natural, biogás ou o gás de síntese. As análises energéticas, exergéticas e termoeconômicas das três propostas foram obtidas através do software Engineering Equation Solver (EES) e a comparação delas mostrou que o gás natural e o biogás são mais competitivos para geração de potência. Além disso, o gás de síntese, embora não esteja na maturidade da tecnologia, pode ser, no futuro, economicamente vantajoso nos projetos de cogeração de energia.

Palavras-chave: gás de síntese, biogás, análise exergética, análise termoeconômica, cogeração de energia.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem maior parte da sua matriz energética composta por centrais hidroelétricas as quais tem as cargas de operação influenciadas pela disponibilidade de água do reservatório. De uma forma geral, as fontes hídricas sofreram com o crescimento da população e foram atingidas pela poluição e pelas ações da sociedade. O histórico energético brasileiro mostra uma queda do potencial hidrelétrico no parque gerador. Conforme mostrado em Empresa de Pesquisa Energética (2016), a participação das hidrelétricas na geração de energia reduziu de 83% em 2005 para 63% em 2014. Para compensar essa queda, outras fontes de energia passaram a ter uma maior participação como é o caso das termelétricas e das eólicas. Dentre as termelétricas, é importante ressaltar a participação da energia renovável através da biomassa, em Chaves (2012) é explicado que ela contribui para a redução de emissões de poluentes na atmosfera e para a geração descentralizada de energia. Além disso, a ampliação da geração por biomassa diminui a dependência energética brasileira com os combustíveis fósseis.

A biomassa pode ser utilizada na queima direta, como é o exemplo de usinas que aproveitam o bagaço de cana em fornos e caldeiras para produção de calor e geração de potência por meio de uma turbina. É possível, também, aproveitá-la através de conversões bioquímicas ou termoquímicas para produção de um combustível ambientalmente vantajoso. Por meio desses processos, podem-se gerar o biogás ou o gás de síntese. De uma forma básica, a conversão bioquímica permite obter o biogás o qual é um combustível renovável atrativo e estudado por muitos trabalhos de pesquisa o qual tem como principal aplicação em motores de combustão interna para geração de energia elétrica. Em Lora (2012) é exposto que a gaseificação consiste em um processo termoquímico que converte a biomassa em um gás através de uma oxidação parcial por meio de agentes que podem ser o ar, vapor ou oxigênio. Esse combustível denominado como gás de síntese pode ser queimado em turbinas a gás e motores alternativos de combustão interna. Conforme Basu (2010), a aplicação da biomassa em queima direta produz uma maior quantidade dos principais poluentes atmosféricos se comparado ao processo de gaseificação de biomassa. Em Rajvanshi (1986) é dito que o gás é composto, basicamente, por hidrogênio, monóxido de carbono e uma pequena concentração de metano.

Uma das barreiras para utilização do gás de síntese e o biogás é o alto investimento de capital para implantar unidades de geração de energia. Antes de se fazer esse investimento, é necessário checar se o projeto é economicamente viável. Para conhecer melhor o potencial das unidades de geração de energia elétrica, pode-se utilizar uma ferramenta com base técnica que possibilite formular custos para uma análise econômica do processo. Isso é possível através da análise termoeconômica ou exergoeconômica. Alves (2007) expõe que a aplicação da exergoeconomia possibilita identificar, localizar e quantificar perdas envolvidas no sistema. Do ponto de vista técnico, isso ajuda determinar as potenciais melhorias para otimização do processo que, posteriormente, podem ser avaliadas financeiramente com o uso da análise econômica prevista no método.

Esse trabalho trata de análises termoeconômicas computacionais de propostas de unidades de cogeração que usam motores alternativos de combustão interna operando a gás natural, biogás ou gás de síntese com a finalidade de geração de energia elétrica para um centro de pesquisa. O objetivo é analisar e comparar o uso desses combustíveis por meio de ferramentas da termodinâmica tomando como base estudos de outros autores e as tecnologias existentes na atualidade para geração de potência através de cada combustível. Não serão quantificados os impactos ambientais que essas instalações hipotéticas poderiam provocar. Mas serão pontuadas as vantagens e desvantagens de se aplicar unidades de potência que façam uso do biogás e do gás de síntese.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

A capacidade de energia elétrica das unidades de cogeração foi dimensionada a partir da demanda ativa nas faturas do centro de pesquisa. Conforme Santo e Gallo (2017), admitiu-se que os motores de combustão interna acoplados a geradores e seus respectivos auxiliares necessitariam de 3% do valor da potência ativa total. Sendo assim, seria acrescentado esse valor para se obter a capacidade mínima necessária para as propostas de unidades.

Tabela 1. Demanda para geração de potência

Demanda Contratada	Equipamentos auxiliares e Perdas	Demanda Energética
2100,0 kW	64,9 kW	2164,9 kW

A energia elétrica deve ser gerada por dois motogeradores de potências iguais cuja a soma seja maior ou igual a demanda energética total. Para suprir parte da demanda de refrigeração do Centro de Pesquisa, foram adicionados chillers de absorção nos pontos de dissipação de calor do sistema dos motogeradores.

Tabela 2. Dados dos motogeradores

Dados	Biogás	Gás Natural	Gás de síntese
Potência	1200 kW	1200 kW	1200 kW
Fluxo de combustível 100% de carga	477 Nm ³ /h	251 Nm ³ /h	-
Temperatura dos gases de exaustão	459 °C	414 °C	395 °C
Eficiência Elétrica	-	-	35%

Os dados dos equipamentos (motogeradores e chiller de absorção) foram obtidos pela ficha técnica do fabricante, com exceção do motogerador do gás de síntese. Como a tecnologia para esse combustível ainda está em expansão, a temperatura dos gases de exaustão foi baseada em Martínez et al (2012), enquanto que a eficiência foi adotada igual ao obtido por Baratieri et al. (2009). A figura abaixo mostra um fluxograma geral das unidades propostas para cogeração de energia. Existe um chiller de absorção no sistema que aproveita energia dos gases de combustão e outro que aproveita a dissipação de calor da água da jaqueta dos motores.

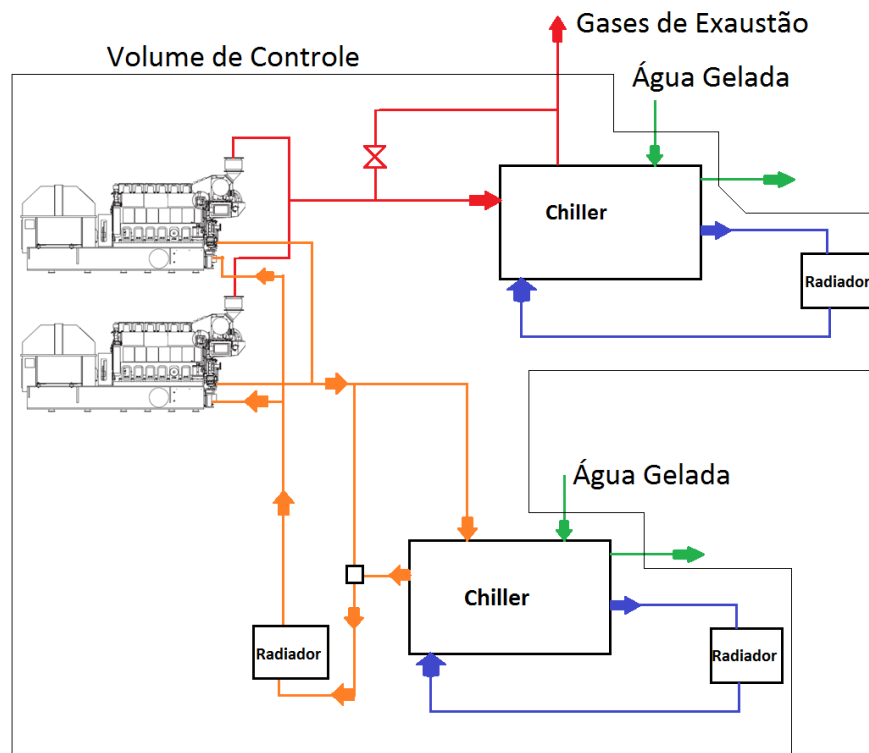


Figura 1. Fluxograma simplificado das unidades de cogeração de energia

Os custos relacionados com cada unidade foram adotados conforme tabela abaixo.

Tabela 3. Composição dos custos das unidades de cogeração

Unidades	Custo do Combustível	Ref.	Custo do Investimento	Ref.	Custo com manutenção	Ref.
Gás Natural	1,43 R\$/m ³	a	4254 R\$/kW	c	0,0052 R\$/MW	C
Biogás	1,36 R\$/m ³	e	4467 R\$/kW	b	0,0085 R\$/MW	b
Gás de Síntese	0,25 R\$/m ³	d	4758 R\$/kW	c	0,0154 R\$/MW	b

Fonte: a - <http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/tabela-tarifaria/>; b – Wickwire (2007); c – Energy Information Administration (2016); d – Villalba et al. (2014); e – Krich et al.(2005)

Os custos de investimento dos chillers foram estimados conforme equações mostradas por Abbaspour e Saraei (2014). Em Schöpfer (2015) é mostrado que os custos de manutenção para os chillers podem variar de acordo com o investimento. Segundo Gebhardt et al (2002), conforme citado por Schöpfer (2015), os sistemas a absorção possuem esses custos em torno de 1% do investimento do equipamento, enquanto que os sistemas por compressão o valor chega a 4%.

$$C_{Invest,absorção} = Pot_{refrigeração} (4253,7 Pot_{refrigeração}^{-0,4662}) \quad (1)$$

$$C_{Invest,compressão} = Pot_{refrigeração} (1052,2 Pot_{refrigeração}^{-0,3387}) \quad (2)$$

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

A análise técnica da unidade é feita pela aplicação das leis da termodinâmica a fim de obter os desempenhos para cada proposta e as perdas ainda existentes. São consideradas eficiências para produção de, apenas, eletricidade e para a situação com a cogeração, calor reaproveitado e eletricidade produzida nos motogeradores. O calor utilizado nos cálculos é a energia térmica retirada da água gelada utilizada na refrigeração. Por meio dessas considerações foram aplicadas a primeira e segunda lei da termodinâmica para cálculos, através do EES.

Abaixo o resultado das análises energéticas e exergéticas de cada unidade, sendo η a eficiência energética e ϵ a eficiência exergética.

Tabela 4. Eficiências de primeira e segunda lei das unidades de cogeração

Unidades			
Variáveis	Gás Natural	Biogás	Gás de Síntese
$\eta_{elétrica}$	43%	40%	35%
$\eta_{cogeração}$	69%	74%	61%
$\epsilon_{elétrica}$	41%	36%	34%
$\epsilon_{cogeração}$	42%	38%	35%

Percebe-se que as eficiências exergéticas são menores em comparação à energética. Pois o valor do fluxo exergético que entra no sistema é maior do que o fluxo energético, em razão do aumento da exergia química do combustível em relação ao poder calorífico inferior.

A unidade a gás natural apresentou as melhores eficiências exergéticas seguido da unidade a biogás, a qual segundo a primeira lei da termodinâmica possui melhor eficiência para cogeração. A maior temperatura de exaustão e a boa disponibilidade de energia na água da jaqueta garantiu maior capacidade de refrigeração para essa unidade. Nota-se, também, que a eficiência da unidade a gás de síntese foi elevada com a implementação dos chillers de absorção.

Após as análises termodinâmicas, com base na primeira e segunda lei, e no levantamento de todos os custos envolvidos em cada unidade, fez-se a análise econômica do investimento. Utilizou-se o custo nivelado de energia para se obter os custos de eletricidade e de cogeração considerando um tempo de vida de 15 anos dos projetos. Os custos de cogeração levam em conta a eletricidade economizada pela utilização de chillers de absorção, ao invés de chillers de compressão. Para se calcular os custos economizados, foram levados em consideração a tarifa local em hora de ponta, 2,1517 R\$/kWh, e fora de ponta, 0,3517 R\$/kWh.

Nas simulações das três propostas com a cogeração em todo o período de funcionamento do Centro de Pesquisa, obteve-se que não seria possível obter lucro. Isso ocorreu devido aos custos nivelados de cogeração serem superiores às tarifas cobradas pela distribuidora de energia elétrica no horário fora de ponta.

Tabela 5. Custos nivelados para operação nos períodos de ponta e fora de ponta

Período Hora de ponta e Fora de Ponta			
Variáveis	Gás Natural	Biogás	Gás de Síntese
$C_{elet,cogeração}$	0,3525 R\$/kWh	0,4051 R\$/kWh	0,6199 R\$/kWh
$C_{economizado}$	-0,0007 R\$/kWh	-0,053 R\$/kWh	-0,268 R\$/kWh
$Payback_{cogeração}$	-	-	-

Tabela 6. Custos nivelados e resultado das análises econômicas, apenas em hora de ponta

	Gás Natural	Biogás	Gás de Síntese
$C_{elet,cogeração}$	0,8743 R\$/kWh	0,926 R\$/kWh	1,1797 R\$/kWh
$Payback_{cogeração}$	4,832 anos	5,383 anos	11,86 anos
VPL	R\$ 7.424.682,96	R\$ 5.851.450,36	R\$ - 3.977.944,20
ROI	66,82%	49,74%	-

As unidades a gás natural e a biogás tiveram resultados positivos para operação em horário de ponta. Os resultados econômicos mostram que a aplicação da proposta a gás de síntese não seria economicamente vantajosa, visto que o valor presente líquido da unidade se torna negativo, assim como o retorno sobre o investimento. Vale ressaltar que as outras unidades, a gás natural e a biogás, possuem tecnologia com maior maturidade no mercado, influenciando a melhores desempenhos técnicos e econômicos.

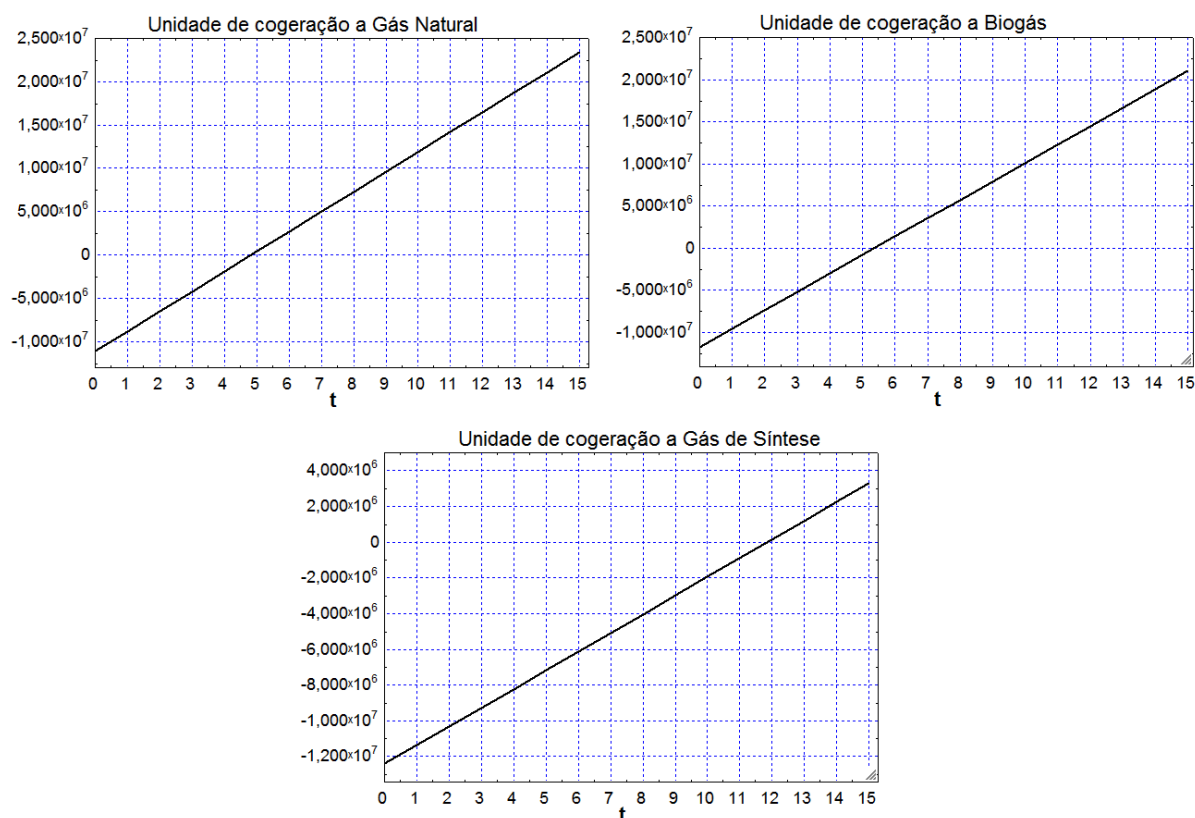


Figura 2. Fluxo de caixa acumulado das unidades de cogeração simuladas no EES – operação em hora de ponta

4. CONCLUSÃO

As análises termodinâmicas das três propostas mostraram que a cogeração acarreta em ganhos de eficiência ao sistema melhoria no fator de utilização de energia. A mesma energia de entrada passa a produzir potência elétrica e água gelada para o sistema de refrigeração do Centro de Pesquisa. Embora a unidade a gás de síntese tenha sido penalizada pela menor eficiência elétrica, a cogeração faz com que a unidade melhore sua eficiência energética e exergética.

É possível indicar que o custo nivelado de eletricidade, apenas para potência elétrica produzida, forneceria um payback menor e indicaria menos atratividade ao investimento. Mas ele seria mais adequado para avaliar o investimento da unidade de potência, pois não leva em conta a economia gerada pela utilização dos chillers de absorção.

5. REFERÊNCIAS

- Abbaspour, M.; Saraei, S. R. An innovative design and cost optimization of a trigeneration (combined cooling, heating and power) system. *International Journal of Environmental Research*, v. 8, n. 4, p. 971-978, 2014.
- Alves, L. G. Análise Exergoeconômica e Otimização de Diferentes Processos de Produção de Hidrogênio a Partir de Gás Metano. 2007. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.
- Bahiagás, Gás natural: benefícios ambientais no Estado da Bahia, Salvador: Solisluna Design e Editora, 2005.
- Baratieri, M.; Bosio, B.; Grigante, M.; Longo, G.A. The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: a comparative analysis. *Applied Thermal Engineering*, v. 29, n. 16, p. 3309-3318, 2009.
- Basu, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory – Second Edition, Elsevier, 2013).
- Chaves, L. I. Microgeração de energia elétrica com gás de síntese. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascável, 2012.
- Empresa de pesquisa energética, Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE, 2016. 452p.
- Energy Information Administration, Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, November 2016, US Department Energy, p. 1-201. <Disponível em: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capcost_assumption.pdf >. Acesso em: 17 Abril 2017.
- Gebhardt, M.; Kohl, H.; Steinrötter, Th. Preisatlas, Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Institut für Energie und Umwelttechnik eV (IUTA), p. 1-356, 2002.

- KRich, Ken et al. Biomethane from dairy waste: a sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California. Western United Dairymen, 2005.
- Lora E. E. S.; Venturini O. J. Biocombustíveis, Editora Interciência, 2012.
- Martínez, Juan Danie; Mahkamov, Khamid. Andrade, Rubenildo V.; Lora, Electo E. Silva. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. Renewable Energy, v. 38, n. 1, p. 1-9, 2012.
- Rajvanshi, Anil K. Biomass gasification. Alternative energy in agriculture, v. 2, n. 4, p. 82-102, 1986.
- SANTO, Denilson Boschiero do Espirito; GALLO, Waldyr Luiz Ribeiro. Utilizing primary energy savings and exergy destruction to compare centralized thermal plants and cogeneration/trigeneration systems. Energy, v. 120, p. 785-795, 2017.
- SChöpfer, Martin. Absorption chillers: their feasibility in district heating networks and comparison to alternative technologies. 2015. Dissertação (Mestrado em Energy Engineering and Management) –Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2015.
- Villalba, Luis Carlos Olmos et al. Technical and economical assessment of power generation technologies firing syngas obtained from biosolid gasification. Producción+ Limpia, v. 9, n. 1, p. 31-43, 2014.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores, Rafael Magalhães de Melo Freire e Alex Álisson Bandeira Santos, são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

COMPARATIVE THERMOECONOMIC EVALUATION OF PROPOSALS FOR ENERGY COGENERATION UNITS USING FOSSIL FUEL OR RENEWABLE FUELS FROM BIOMASS

Rafael M. M. Freire, eng.rafaelmmf@gmail.com¹

Alex A. B. Santos alex.santos@fieb.org.br¹

¹ SENAI CIMATEC - Campus Integrado de Manufatura e Tecnologias, Salvador, Bahia, Brasil.

Abstract. Emission policies and the search for the independence of the fossil fuels energy matrix reinforce the use of alternative sources of energy. In this scenario, the generation of energy through biomass tends to grow being applied in different ways. The transformation of the biomass into a gaseous fuel can be carried out by thermochemical or biochemical processes. Gasification of biomass, a thermo-chemical process, is a technique that produces a gaseous fuel known as syngas that has low calorific power and able of generating electric energy by means of internal combustion engines and gas turbines. Biogas is produced by the biochemical process aided by the decomposition of organic matter. This work deals with a study of the proposals of energy cogeneration units in an autoproducer research center of electric energy and that also requires thermal demand for refrigeration. Through thermoeconomics, three types of cogeneration units with internal combustion engines that operate with natural gas, biogas or synthesis gas are evaluated. The energy, exergetic and thermoeconomic analyzes of the three proposals were obtained through the Engineering Equation Solver (EES) software and the comparison of them showed that natural gas and biogas are more competitive for power generation. In addition, the synthesis gas, although not in the maturity of the technology, can be economically advantageous in cogeneration energy projects

Keywords: gas synthesis, biogas, exergetic analysis, thermoeconomic analysis, energy cogeneration.