

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VIABILIDADE ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE MOTORES A BIOGÁS ACOPLADOS A
SISTEMA DE REMOÇÃO DE GÁS CARBÔNICO

por

Guilherme Geremia

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2013

VIABILIDADE ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE MOTORES A BIOGÁS ACOPLADOS A
SISTEMA DE REMOÇÃO DE GÁS

por

Guilherme Geremia

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Dr. Francis H. Ramos França

Prof^a. Dr^a Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14 de novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui registrado meu sincero agradecimento às seguintes pessoas:

Aos meus pais pelo apoio incondicional neste caminho,

Aos colegas da escola de engenharia, pela ajuda e pelos momentos compartilhados,

Aos colegas de trabalho, Douglas Luz, Marcelo de Andrade Batista, Paulo Rogério Henke de Azevedo e Wagner da Silveira dos Santos, pelos inúmeros “galhos quebrados”,

Ao Prof. Dr. Marcelo Farenzena pela ajuda e orientação com as simulações,

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, por abraçar uma causa quase perdida e pela imensa disponibilidade e boa vontade,

À Hannah Celtan, pelo apoio prestado nesta jornada e pela revisão do texto.

Ao cara que inventou o café.

"É perigoso sair porta afora. Você pisa na Estrada, e, se não controlar seus pés, não há como saber até onde você pode ser levado."
- Bilbo Baggins. O Senhor dos Aneis.

GEREMIA, G. **VIABILIDADE ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE MOTORES A BIOGÁS ACOPLADOS A SISTEMA DE REMOÇÃO DE GÁS CARBÔNICO**. 2013. 27 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Este trabalho visa avaliar a viabilidade energética de um equipamento para enriquecimento de metano em correntes de biogás acoplado a um motor de combustão interna alternativo. O biogás é enriquecido pela retirada de gás carbônico por meio de um processo de absorção física com água, simulado pelo software ASPEN. Os dados de simulação são utilizados para treinar uma rede neural, resultando em um modelo que responde aos parâmetros de vazão de água, temperatura da água no processo e fração mássica de metano. A corrente de biogás enriquecida alimenta um modelo de motor de combustão interna alternativo, cujo comportamento foi encontrado na literatura. As diferentes concentrações do biogás afetam a eficiência e a potência do motor. A simulação do sistema acoplado mostrou-se viável para a maior parte da faixa analisada. Obteve-se um ganho de até 6,45% na potência e até 3,34% na eficiência da instalação, ao operar o motor a 3600 rpm. Nos apêndices, é disponibilizado o código do programa usado para desenvolver este trabalho, no software EES.

PALAVRAS-CHAVE: metanização, biogás enriquecido, separação de gases, absorção de gás carbônico

GEREMIA, G. **ENERGETIC FEASIBILITY OF THE OPERATION OF BIOGAS INTERNAL COMBUSTION ENGINES CONNECTED TO A CARBON DIOXIDE REMOVAL SYSTEM.** 2013. 27 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This work aims at evaluating the energetic feasibility of equipment for methane enrichment on biogas flows connected to an alternative internal combustion engine. Biogas is enriched by removing carbonic dioxide with a physical absorption process, simulated by ASPEN software. Data from the simulation are used to train an artificial neural network, resulting in a mathematical model that responds to the parameters of water flow, water temperature during the process and methane's mass fraction in biogas. The enriched biogas flow is the inlet to an alternative internal combustion engine's mathematical model, which the behavior was found on the literature. The different concentration of the biogas affects engine's efficiency and power. The simulation of the system connected showed to be feasible to most part of the analyzed speed range. A gain of up to 6.45% in power and 3.34% in system's efficiency were obtained while operating the engine at 3600 rpm. In the appendix, the code of the generated program used to develop this work is available.

KEYWORDS: methanization, enriched biogas, gas separation, carbon dioxide absorption

LISTA DE SÍMBOLOS

k_H – constante de Henry [mol.kpa/ m³]

c_a – concentração molar do componente a na solução [mol/m³]

p_a – pressão parcial do componente a de uma mistura gasosa [kPa]

Q – razão de alimentação [kg_{água}/ kg_{biogás}]

η – eficiência [adim]

n – rotação [rpm]

P – potência [kW]

x_1 – fração molar de metano do biogás na origem [adim]

x_3 – fração molar de metano do biogás na descarga do equipamento de absorção [adim]

y_1 – fração mássica de metano do biogás na origem [adim]

y_3 – fração mássica de metano do biogás na descarga do equipamento de absorção [adim]

c_p – calor específica com pressão constante [kJ/kg]

c_v – calor específica com volume constante [kJ/kg]

h – entalpia [kJ/kg]

T – temperatura [K] ou [°C], conforme indicado

β – aumento relativo do poder calorífico inferior [adim], expresso em % do valor inicial

f – frequência

n_p – número de polos

ψ – aumento relativo de potência [adim], expresso em % do valor inicial

ε – aumento relativo de eficiência [adim], expresso em % do valor inicial

ÍNDICE

Pág.

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. REFERENCIAL TEÓRICO	2
3.1 O biogás	2
3.2 Processo de absorção física	3
3.3 Redes neurais artificiais	3
4. PROCESSO DE ABSORÇÃO FÍSICA	4
5. ACOPLAMENTO DO ABSORVEDOR AO MOTOR	6
5.1 Obtenção de curvas dos motores	6
5.3 Compressão do biogás [van Wylen, 2003]	8
5.4 Bombeio de água	10
6. RESULTADOS E ANÁLISE	10
7. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I – Código do programa gerado em EES	16
APÊNDICE II – Curvas de ajuste obtidas pelo Microsoft Excel	20

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo energético a nível mundial, algo inerente ao crescimento populacional e ao desenvolvimento socioeconômico, traz consigo a necessidade de explorar fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, haja vista que os recursos naturais disponíveis não são inesgotáveis.

Dentre as alternativas disponíveis, encontra-se o biogás. Trata-se de um combustível gasoso formado pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica, como dejetos de animais domésticos, restos de alimentos, esgoto cloacal, etc.

Por ser a biomassa uma fonte indireta de aproveitamento da energia solar [MMA, 2013], ela pode ser considerada uma fonte de energia renovável. Como é oriundo da biomassa, o biogás também pode ser considerado uma fonte de energia renovável. Entretanto, é sabido que o metano, um dos principais componentes do biogás, é cerca de 25 vezes mais prejudicial ao efeito estufa do que o gás carbônico [US EIA, 2009]. Isso faz com que sua combustão seja ambientalmente atrativa.

Um dos grandes problemas ao usar o biogás para geração de energia é a grande fração de gás carbônico, um gás inerte à combustão. Isto faz com que ocorram perdas de potência e de rendimento ao utilizá-lo em motores de combustão interna [Guo, et al., 2010]. Portanto, tem-se a necessidade de investigar métodos para separar o metano do gás carbônico.

Este trabalho investigou a viabilidade energética do uso de um equipamento para concentração de metano no biogás por meio de absorção física do gás carbônico com água. A corrente enriquecida foi usada para alimentar um modelo de motor de combustão interna, permitindo a análise da integração energética do sistema.

O trabalho visa esclarecer sob quais condições o processo de enriquecimento do biogás é vantajoso, e se os ganhos em potência e eficiência compensam os gastos energéticos da operação do equipamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos métodos mais empregados [Persson, 2003] para a remoção de dióxido de carbono é o de PSA (*Pressure Swing Adsorption*). O método consiste em expor o biogás ao carvão ativado em altas pressões para promover a adsorção, e posteriormente, com auxílio de uma bomba de vácuo, dessorver o gás carbônico e regenerar o carvão ativado. A desvantagem deste método é a necessidade da remoção prévia da água e, especialmente, do gás sulfídrico, para não contaminar o carvão. [Hagen et al., 2001]. Este processo também pode eliminar nitrogênio e oxigênio do biogás.

Outro importante processo para tratamento de biogás é o de absorção por água. Além do dióxido de carbono, ele também é eficiente para a remoção de gás sulfídrico e amônia [Hagen et al., 2001]. A água utilizada no processo pode ser renovada continuamente ou regenerada. Neste segundo caso, reduz-se o consumo de água, mas o consumo de energia é aumentado [Vaghdal, 1999]. Usa-se o processo de absorção com água renovada quando este insumo é disponível, como em estações de tratamento de esgoto [Vaghdal, 1999].

Também é possível remover o dióxido de carbono por absorção química. A grande vantagem é que o metano é inerte para o fluido absorvente, ou seja, é possível obter uma altíssima concentração de metano na corrente de saída e o soluto praticamente não o arrasta [Persson, 2003]. O fluido absorvente deve ser regenerado após o processo de absorção, em um processo com alto consumo energético, o que o torna mais adequado a situações em que se deseja obter um produto final com altíssima qualidade [Persson, 2003].

É possível separar o dióxido de carbono através do método de separação por membranas. A ideia é que algumas substâncias passam por certo tipo de membranas finas mais facilmente do que outras [López, 2010]. A vazão depende basicamente da seletividade da membrana utilizada e da pressão parcial do componente que se deseja separar, bem como da diferença de pressão entre os dois lados da membrana. Como a pressão parcial é proporcional

à fração molar de um gás, perde-se eficiência na separação quando a fração de dióxido de carbono é muito baixa.

Magalhães et al., 2006, desenvolveram um sistema de baixo custo para purificação de biogás proveniente de pequenos biorreatores utilizando apenas água. Aumentou-se em aproximadamente 55% o poder calorífico do gás por unidade de massa. Foi demonstrado que a quantidade de dióxido de carbono removido do biogás aumenta com o aumento da pressão na absorvedora e com o aumento da vazão de água. Os autores, porém, não investigaram o efeito do equipamento sobre a fração de gás sulfídrico do biogás, nem o custo energético do uso do processo.

Para reduzir a corrosão causada pelo gás sulfídrico presente no biogás, Maizonnasse et al., 2011, sugerem o uso de trocadores de calor entre gases de escape e o biogás para evitar condensação de umidade proveniente do biogás. Esta é uma alternativa de tratamento de baixo custo, aplicável especialmente para pequenas instalações, onde processos mais sofisticados são inviáveis. A desvantagem do aquecimento é que, ao aumentar-se a temperatura de um gás, também é aumentado o seu volume específico, o que resulta em perda de potência para motores de combustão interna. Os mesmos autores também indicam que a troca do lubrificante deve ser mais frequente ao usar o biogás, e que devem ser usados óleos lubrificantes com alto TBN (*total base number*), para compensar a redução do pH do óleo de cárter.

Um grande problema ao operar motores de combustão interna alternativos com biogás, especialmente quando este é proveniente de aterros sanitários, é a formação de depósitos na câmara de combustão [Sevimoglu e Tansel, 2012]. Os autores identificaram que a formação de depósitos pode ser reduzida drasticamente com uso de filtros de carvão ativado. A dificuldade do uso destes filtros é o alto custo energético para a regeneração com vapor, o que a torna inviável para pequenos produtores.

Porpatham et al., 2007, investigaram experimentalmente a influência da redução da concentração de gás carbônico na performance de um motor de ignição por centelha para regime estacionário. Com a redução da concentração de gás carbônico na mistura, possibilitou-se a operação do motor com razões de mistura mais pobres, além de ser melhorada a eficiência global. Este trabalho, porém, não investigou como o comportamento do motor varia com a rotação, e apenas uma pequena faixa de concentrações de metano foi utilizada.

Guo, et al., 2010, fizeram algumas simulações utilizando o software Modelica para investigar o desempenho de motores de ciclo Otto alimentados com misturas de biogás enriquecido com GLP (gás liquefeito de petróleo) ou gás natural para a produção de energia, obtendo resultados teóricos para o comportamento de um motor monocilíndrico. Também foram feitas simulações com aumento da taxa de compressão, para aproveitar a alta octanagem do biogás, e com adiantamento do ângulo da centelha, para compensar a baixa velocidade de queima. Este trabalho é particularmente interessante, pois são comparados resultados obtidos ao usar diferentes combinações de biogás e gás natural, situação análoga ao aumento da fração de metano no biogás.

O desempenho de motores *dual-fuel* diesel-biogás pode ser melhorado com o enriquecimento do biogás com hidrogênio (H_2) ou metano (CH_4). Gómez-Montoya et al., 2012, obtiveram resultados positivos na emissão de CO e conseguiram melhorar a estabilidade de funcionamento. Com uma adição de 20% de metano no biogás, foi possível aumentar em até 17% a pressão média efetiva no cilindro, medida experimentalmente.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O biogás

O biogás é um combustível obtido através da digestão anaeróbia de material orgânico, e consiste basicamente de uma mistura gasosa de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de carbono (H_2S) e, dependendo da origem, nitrogênio (N_2).

A quantidade e a composição do biogás dependem do tipo de material orgânico, do processo e do método de coleta. Segue abaixo uma tabela com a composição esperada para o biogás de acordo com a origem, segundo Hagen et al., 2001.

Tabela 3.1 – Composição comum do biogás [Hagen et al., 2001]

Componente	Biogás de esterco	Biogás de aterro sanitário
Metano	60-70%	45-55%
Dióxido de carbono	30-40%	30-40%
Nitrogênio	<1%	5-15%
Gás sulfídrico	10-2000 ppm	50-300 ppm

No biogás proveniente de aterros sanitários, observa-se que a fração de metano é menor, ao passo de que há grande presença de nitrogênio. Isto ocorre devido à infiltração de ar atmosférico no processo de coleta [Abrelpe, 2013]. Já para o biogás proveniente de dejetos animais, nota-se a presença de grandes quantidades de gás sulfídrico. Este gás, ao entrar em contato com água livre, tende a formar ácido sulfúrico, o que pode causar corrosão em equipamentos mecânicos [Maizonnasse et al., 2011].

Um aspecto interessante do biogás, ao ser utilizado como combustível em motores de combustão interna, é que, segundo Persson, 2003, produz menores emissões atmosféricas do que o diesel e a gasolina no que diz respeito a óxidos de enxofre, de nitrogênio e monóxido de carbono.

3.2 Processo de absorção física

A absorção física consiste num processo onde uma corrente gasosa é colocada em contato com uma corrente líquida. A corrente líquida absorve um ou mais componentes da corrente gasosa, e há uma migração de moléculas presentes na fase gasosa para a fase líquida, até que seja atingido um ponto de equilíbrio. [Roitman, 2002]. Este ponto de equilíbrio é regido pela Lei de Henry, conforme equação 3.1

$$K_H = \frac{c_a}{p_a} \quad (3.1)$$

onde K_H é constante de Henry, c_a é a concentração do componente absorvido e p_a é a pressão parcial do componente.

Sabe-se que, tanto ao aumentar a fração de um componente de mistura gasosa quanto ao aumentar a pressão total da mistura, aumenta-se a pressão parcial do componente. Portanto, se for desejado remover o máximo de um componente de uma mistura gasosa, deve-se procurar operar com pressões maiores.

É importante lembrar que há uma relação entre a constante de Henry e a temperatura do líquido, portanto, ela só é de fato uma constante se a temperatura for fixa. O aumento da temperatura faz com que a solubilidade máxima de um componente gasoso na água diminua [Sander, 1999].

3.3 Redes neurais artificiais

Redes neurais artificiais (RNA) são estruturas computacionais baseadas no funcionamento do cérebro humano. Uma RNA pode ser treinada a partir de um conjunto de dados e, a partir disto, produzir saídas para dados de entrada diferentes daqueles utilizados em seu treinamento. De acordo com Hagan et al, 1996, a capacidade de aprendizado de uma RNA a torna mais flexível e poderosa do que uma formulação paramétrica tradicional, possibilitando

a modelagem de fenômenos complexos, além de lidar melhor com ruídos e dados incompletos ou imprecisos. Haykin, 2001, dá a seguinte definição para rede neural artificial:

“Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

1) O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem.

2) Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.”

Os neurônios recebem diferentes estímulos, cada um deles ponderado por um peso. Esta primeira parte do processamento é denominada transformação linear. O somatório dos produtos dos estímulos pelos pesos, chamada de função aditiva, é utilizado pela função de ativação na segunda parte do processamento, que produzirá os valores de saída.

Usualmente, a arquitetura de uma rede neural é dividida em três partes: a camada de entrada, onde são inseridos os dados de entrada, a camada oculta, onde há uma ou mais camadas de neurônios, e a camada de saída, onde os dados de saída são apresentados.

Uma rede neural para simulação de funções consiste basicamente em ajustar os pesos da primeira parte do processamento, comparando os valores de saída com os valores esperados de saída.

4. PROCESSO DE ABSORÇÃO FÍSICA

O equipamento de absorção física, mostrado na Fig. 4.1, é composto por um vaso de pressão, um compressor de biogás e uma bomba d'água.

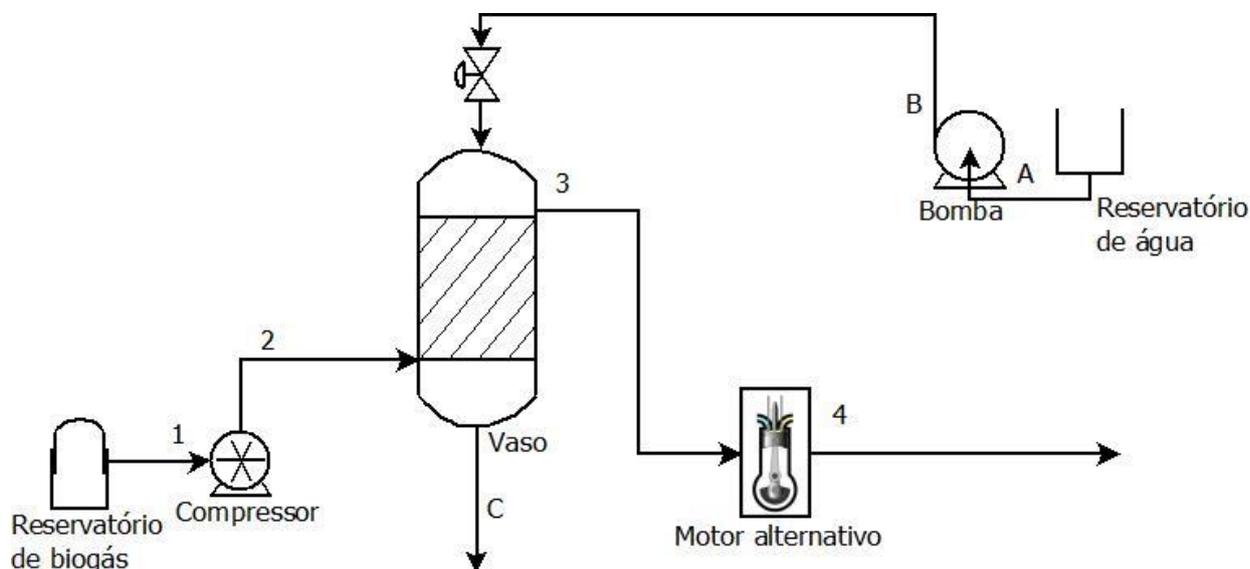


Fig. 4.1 Diagrama do sistema acoplado de enriquecimento de biogás com absorção física de gás carbônico com um motor de combustão interna alternativo

O biogás é primeiramente succionado pelo compressor no ponto 1. Neste ponto, ele é rico em dióxido de carbono. O compressor comprime o biogás e o envia para o vaso de pressão, ao mesmo tempo em que uma bomba succiona água do ponto A, e a injeta em contracorrente. A água é injetada pelo topo do vaso, para possibilitar o escoamento por gravidade. Ao entrar em contato com o biogás, a água absorve parte do dióxido de carbono presente.

Ao deixar o equipamento, no ponto C, a água carrega uma parte do dióxido de carbono do biogás. Já o biogás deixa o equipamento no ponto 3 enriquecido em metano.

O modelo de simulação do sistema de absorção foi elaborado no software ASPEN Plus 24.1, pelo professor Marcelo Farenzena, do Departamento de Engenharia Química da UFRGS. Foi usado o pacote ELECNRTL para propriedades, e o modelo REDFRAC, próprio para processos de destilação e absorção. Variando os parâmetros de entrada (fração mássica de metano na entrada do equipamento de absorção, temperatura da água no processo e vazão de água), obtiveram-se a fração mássica de metano e de gás carbônico na saída do equipamento. A vazão de biogás ficou condicionada àquela da água, definindo um parâmetro de operação aqui denominado de razão de alimentação Q , expressa em kg de água por kg de biogás. Assim, a simulação do sistema de absorção foi efetuada para uma razão de alimentação entre 4 e 8 kg de água por kg de biogás, para a temperatura entre 283 e 323 K e para a concentração de metano na entrada entre 0,50 e 0,75 em volume.

A partir dos dados simulados, uma rede neural foi treinada com auxílio do Software Matlab, com 10 neurônios na camada oculta, três na camada de entrada e dois na camada de saída. O algoritmo utilizado para otimizar a rede é o de Levenberg-Marquardt, e para avaliar o desempenho, foi usado o método da raiz quadrada média do erro.

De posse da rede treinada, foi possível investigar o comportamento do equipamento de absorção para diversos parâmetros de entrada, dentro da faixa escolhida para simulação.

Na Fig 4.2, é possível observar a variação da concentração de metano em função da temperatura da água para diferentes razões de alimentação.

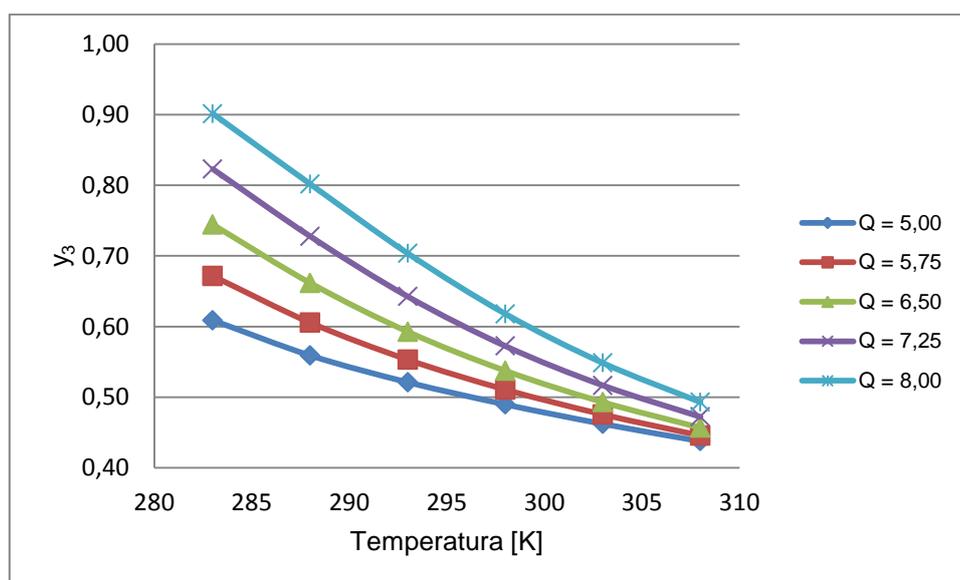


Fig. 4.2 – Concentração de metano na saída (y_3) em função da temperatura da água do absorvedor para diferentes razões de alimentação (Q) e x_1 de 0,6

Temperaturas menores da água levam a resultados melhores de enriquecimento do biogás, devido ao aumento da solubilidade do gás carbônico na água [Portier, Rochelle, 2004]. Neste trabalho, porém, será fixada a temperatura de 25° C para a água, pois se considera que esta seja a condição de operação frequentemente encontrada.

A Fig. 4.3 apresenta a variação da concentração de metano na saída do equipamento em função da razão de alimentação para diferentes concentrações de metano na entrada. Entende-se por razão de alimentação (Q) o quociente da vazão de água pela vazão de biogás na entrada do equipamento, expressa em kg de água por kg de biogás.

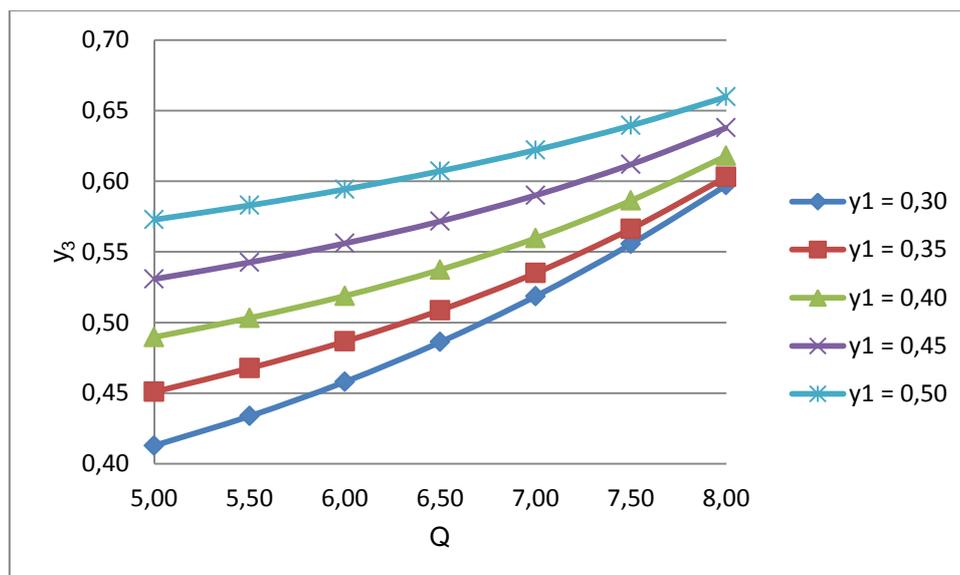


Fig. 4.3 – Fração mássica de metano no biogás na descarga do equipamento (y_3) em função da razão de alimentação (Q) para diferentes frações mássicas de metano na admissão (y_1)

Conforme o esperado, a fração de metano na saída do equipamento aumenta à medida que se aumenta a vazão de água. É possível que melhores resultados fossem obtidos com vazões maiores de água, porém, isto extrapolaria as faixas simuladas. Limita-se, portanto, a vazão máxima de água a oito vezes a vazão de biogás, em massa. Outro ponto importante é que as curvas para as diferentes frações de metano na admissão são aproximadamente paralelas, ou seja, a diferença entre a concentração da entrada e a da saída varia pouco com a concentração na entrada, exceto para concentrações muito baixas de metano na entrada, onde os resultados tentem a ser melhores.

A partir dos dados destas curvas, criou-se uma função de interpolação linear no EES, de modo a permitir que seja analisado o comportamento do equipamento de absorção em qualquer valor da faixa.

5. ACOPLAMENTO DO ABSORVEDOR AO MOTOR

5.1 Obtenção de curvas dos motores

Os dados de desempenho do motor simulado neste trabalho foram retirados de Guo et al., 2010, porque os autores forneceram os resultados do funcionamento do motor em toda sua faixa de operação, variando tanto a concentração do metano na mistura combustível quanto a rotação do motor. Os dados foram originalmente concebidos para biogás enriquecido com gás natural, ou seja, haveria também uma pequena fração de etano e propano no gás, que foram desconsiderados neste trabalho. Observa-se no gráfico a seguir as curvas obtidas para eficiência do motor, com o metano em base molar:

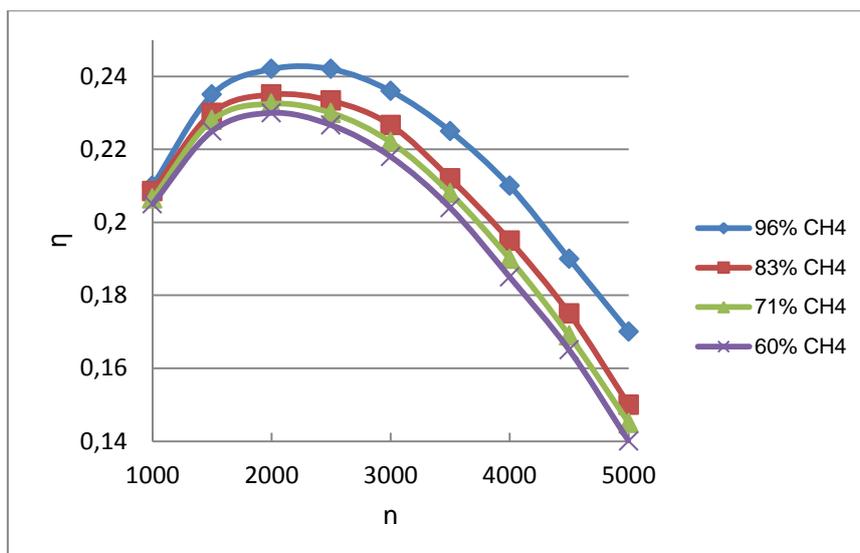


Fig. 5.1 – Curvas de eficiência térmica do motor (η) em função da rotação do motor (n) para diferentes concentrações volumétricas de metano no combustível [Adaptado de Guo et al., 2010]

Como era esperado, é possível notar que maiores concentrações de metano levam a uma melhora na eficiência térmica, uma vez que reduzem os gases inertes presentes no cilindro. Nota-se também que a diferença é mais expressiva quando se aumenta a rotação do motor. Este comportamento pode ser explicado pela redução na velocidade de reação causada pelo excesso de gás carbônico. Conforme a rotação é aumentada, é reduzido o tempo para a reação, o que torna o efeito mais evidente [Porpatham et al., 2007].

Como também é possível observar, a eficiência térmica máxima ocorre por volta de 2000 rpm, e varia muito pouco com a concentração do biogás.

A potência desenvolvida pelo motor pode ser vista na Fig. 5.2.

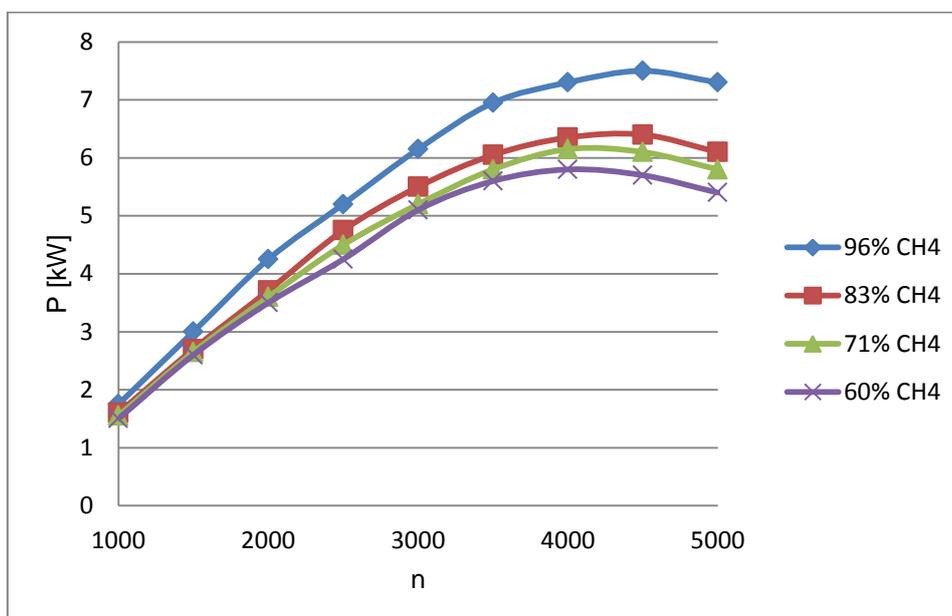


Fig. 5.2 – Curvas de potência em função da rotação do motor (n) para diferentes concentrações volumétricas de metano no biogás [Adaptado de Guo et al., 2010]

Similarmente ao que foi visto no gráfico anterior, aqui também é possível notar que as curvas se afastam mais em rotações maiores do motor. A potência máxima para o motor

operando com 96% de metano no combustível ocorre com aproximadamente 4500 rpm. Nota-se que a rotação em que ocorre a potência máxima tende a reduzir com o aumento da fração de biogás.

A partir destas curvas, foram geradas duas funções de interpolação no software EES. Através delas, é possível obter uma aproximação para a potência e para a eficiência térmica do motor em qualquer rotação ou concentração de metano dentro da faixa de validade dos modelos.

5.3 Compressão do biogás [van Wylen, 2003]

Para compressão do biogás para o equipamento de absorção, optou-se por considerá-lo uma mistura binária de gás carbônico e metano, já que estes dois gases representam quase o total da mistura, modelados como gás ideal. Desta forma, tem-se que

$$x_{\text{CO}_2} + x_{\text{CH}_4} = 1 \quad (5.1)$$

$$y_{\text{CO}_2} + y_{\text{CH}_4} = 1 \quad (5.2)$$

onde x representa a fração molar e y a fração mássica de cada um dos gases. Para calcular a energia necessária para compressão do biogás, primeiramente calcula-se o coeficiente isentrópico k para a mistura gasosa, dado por:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (5.3)$$

onde c_p e c_v são os calores específicos a pressão e a volume constante.

Do modelo de Dalton para misturas gasosas, obtém-se o calor específico da mistura como segue:

$$y_{\text{CO}_2} c_{v,\text{CO}_2} + y_{\text{CH}_4} c_{v,\text{CH}_4} = c_{v,\text{mistura}} \quad (5.4)$$

$$y_{\text{CO}_2} c_{p,\text{CO}_2} + y_{\text{CH}_4} c_{p,\text{CH}_4} = c_{p,\text{mistura}} \quad (5.5)$$

A razão das temperaturas na compressão isentrópica para a mistura gasosa é dada por:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (5.6)$$

onde p_1 é a pressão inicial (neste trabalho, considerado como uma atmosfera), p_2 é a pressão do equipamento de absorção (duas atmosferas para os dados da simulação da absorção), e T_1 e T_2 as temperaturas inicial para a compressão (25 °C neste trabalho) e final isentrópica, respectivamente.

Do modelo de gás ideal, sabe-se que a variação da entalpia é função apenas da temperatura, isto é:

$$c_p = \frac{dh}{dT} \quad (5.7)$$

onde h é a entalpia específica da mistura gasosa. Separando os termos da derivada e integrando para os limites, tem-se:

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p dT = \int_1^2 dh \quad (5.8)$$

O calor específico é função apenas da temperatura para um gás ideal. Porém, como a variação da pressão, e, portanto, da temperatura, neste trabalho é relativamente pequena (uma atmosfera e cinco graus celsius, aproximadamente), é razoável supô-lo constante. Desta forma, resolvendo-se as integrais, chega-se a:

$$c_p(T_2 - T_1) = h_{2,s} - h_1 \quad (5.9)$$

onde T_1 e $T_{2,s}$ são as temperaturas inicial e final do processo, respectivamente, e c_p avaliado na temperatura inicial do processo. O subscrito s na temperatura final indica processo isentrópico.

Num próximo passo, calcula-se a temperatura final para um processo real, isto é, irreversível. Para tal, utiliza-se o conceito de eficiência isentrópica, ou seja, a razão entre a variação da entalpia do processo isentrópico e do processo real:

$$\eta_{\text{isentrópica}} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_{2,r} - h_1} \quad (5.10)$$

onde o subscrito r indica que se trata da propriedade no processo real. Segundo a bibliografia consultada [van Wylen, 2003], a eficiência isentrópica para equipamentos de compressão fica, em geral, entre 0,7 e 0,9. Para este trabalho, será considerada igual a 0,7.

De posse dos valores obtidos acima, a temperatura do processo real na saída do compressor pode ser calculada substituindo a equação 5.9 na equação 5.10:

$$\eta_{\text{isentrópica}} = \frac{c_p(T_{2,s} - T_1)}{c_p(T_{2,r} - T_1)} \approx \frac{(T_{2,s} - T_1)}{(T_{2,r} - T_1)} \quad (5.11)$$

Para a eficiência mecânica do compressor, será adotado o valor de 0,5.

Por fim, calcula-se o valor total da potência demandada pelo compressor no processo:

$$\dot{W}_{\text{compressor}} = \frac{c_p(T_{2,r} - T_1)}{\eta_{\text{isentrópico}} \eta_{\text{mecânico}}} \dot{m} \quad (5.12)$$

onde $\dot{W}_{\text{compressor}}$ é a potência consumida pelo compressor e \dot{m} é a vazão mássica de gás no processo.

A Fig. 5.5 mostra o valor do trabalho requerido para comprimir um kg de biogás em função da fração molar de metano na sua composição:

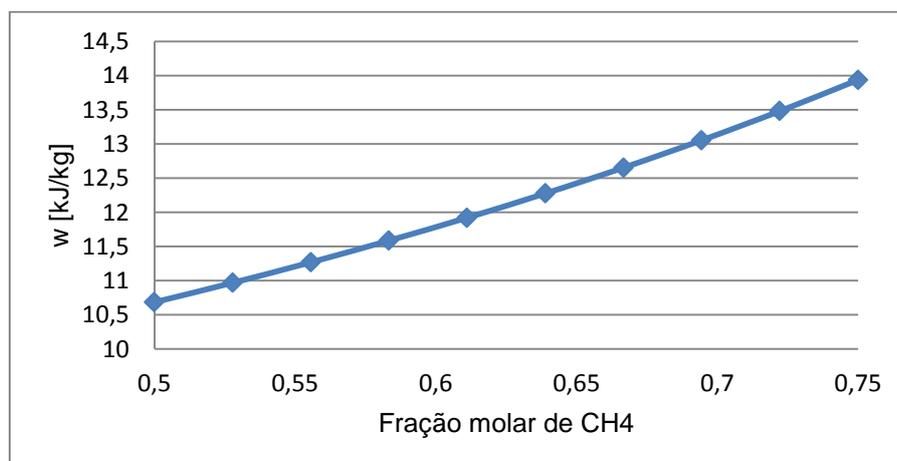


Fig. 5.3 – Energia para compressão do biogás para a pressão do absorvedor em função da fração molar de metano na mistura

Nota-se o aumento da energia necessária para comprimir o biogás com o aumento da fração de metano no biogás. Este comportamento é esperado devido à menor massa específica do metano em relação ao gás carbônico, ou seja, há um volume maior para o compressor comprimir.

5.4 Bombeio de água

Ao tratar com líquido comprimido, são raros os dados disponíveis em tabelas termodinâmicas para entalpia. O que se costuma fazer em situações onde é necessário obtê-la é somar à entalpia de líquido saturado o produto do volume específico pela diferença de pressão. Assim, o trabalho específico para o bombeio pode ser calculado da seguinte forma:

$$w_{bombeio} = \frac{(p_B - p_A) v}{\eta_{bomba}} \quad (5.13)$$

onde $w_{bombeio}$ é o trabalho específico consumido para bombear a água para o equipamento de absorção, p_A e p_B são as pressões na entrada e na saída da bomba, respectivamente uma e duas atmosferas absolutas, e v é o volume específico do líquido bombeado.

6. RESULTADOS E ANÁLISE

A potência consumida pela a bomba e pelo compressor do sistema de absorção são apresentadas no gráfico a seguir, para uma fração molar de 0,65 de metano na entrada:

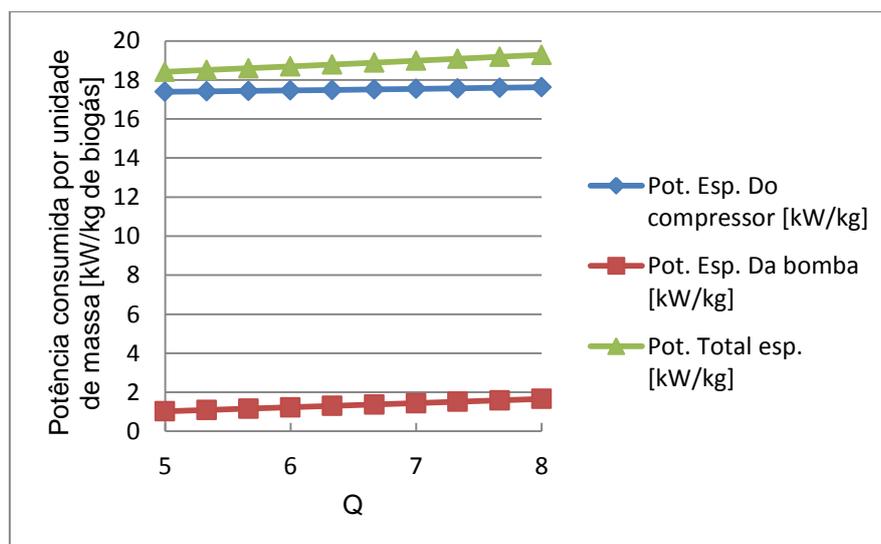


Fig. 6.1 – Consumo de potência do equipamento de absorção

Observa-se que a potência consumida pela bomba representa uma fração pequena daquela consumida pelo equipamento. Desta forma, é razoável supor que os melhores resultados serão obtidos para maiores razões de alimentação de água.

A seguir, é apresentado o comportamento do poder calorífico inferior em base mássica do biogás concentrado, na descarga do equipamento de absorção, para uma razão de alimentação de 8 kg de água por kg de biogás:

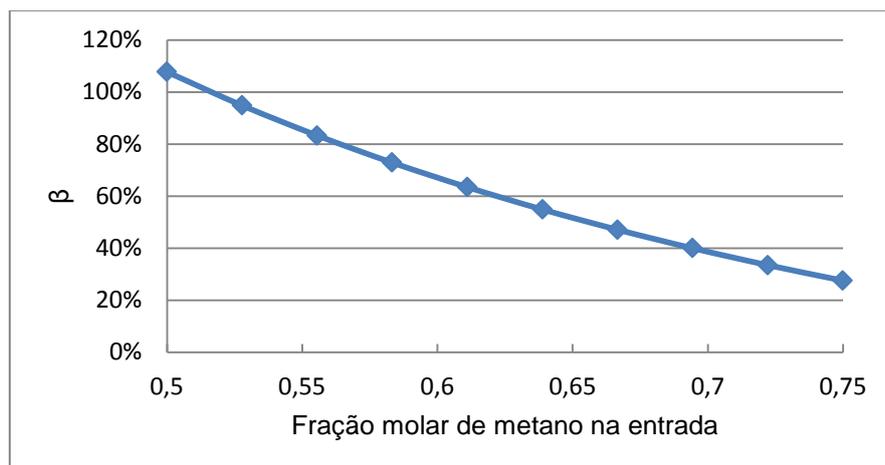


Fig. 6.2 – Comportamento do poder calorífico inferior [kJ/kg] do biogás para uma razão de alimentação de 8 kg de água/ kg de biogás

Nota-se que o aumento relativo do poder calorífico inferior do biogás (β) é muito maior para valores menores de concentração de metano na entrada.

É de grande interesse analisar a rotação com que o motor deve atuar para o caso de ser acoplado a um gerador de energia elétrica. A frequência de saída f para um gerador síncrono pode ser calculada pela seguinte equação [Excitatriz Estática, 2013]:

$$f = \frac{n p}{120} \quad (6.1)$$

onde n é a rotação do motor em rpm, np é o número de polos e f a frequência.

Motores alternativos para geração de energia elétrica são operados de forma a manter a frequência do gerador similar a da rede elétrica. Portanto, devem ser avaliados prioritariamente os pontos em que a operação resulta numa frequência de corrente de 60 Hz. Substituindo este valor na Eq. 6.1, tem-se:

$$n = \frac{7200}{np} \quad (6.2)$$

Na Tab. 6.1 são mostrados os resultados da equação para seis, quatro e dois polos:

Tab. 6.1 – Rotação do motor para frequência de 60 Hz em função do número de polos

np	n
6	1200
4	1800
2	3600

Como a rotação para seis polos é muito baixa (1200 rpm), desconsidera-se este ponto. Optou-se por investigar o comportamento para rotações de 1800 e 3600 rpm. Nas duas tabelas a seguir, são dados os valores de potência para o motor em função da concentração de metano no biogás, com e sem o equipamento de absorção, para diferentes composições de biogás e razão de vazões máxima.

Tab. 6.2 – Dados de potência líquida e eficiência global do sistema para diferentes concentrações de CH_4 na entrada (x_1), a 1800 rpm

1800 rpm									
x_1	60%			65%			70%		
	Sem absorção	Com absorção	Diferença	Sem absorção	Com absorção	Diferença	Sem absorção	Com absorção	Diferença
Eficiência global	22,94%	23,29%	1,53%	23,06%	23,32%	1,13%	23,19%	23,36%	0,73%
Potência líq. [kW]	3,137	3,292	4,94%	3,181	3,305	3,90%	3,225	3,322	3,01%

Tab. 6.3 – Dados de potência líquida e eficiência global do sistema para diferentes concentrações de CH_4 na entrada (x_1), a 3600 rpm

3600 rpm									
x_1	60%			65%			70%		
	Sem absorção	Com absorção	Diferença	Sem absorção	Com absorção	Diferença	Sem absorção	Com absorção	Diferença
Eficiência global	20,04%	20,71%	3,34%	20,24%	20,77%	2,62%	20,45%	20,84%	1,91%
Potência líq.	5,678	6,044	6,45%	5,773	6,077	5,27%	5,867	6,119	4,30%

No caso do sistema operando sem o equipamento de absorção, a potência líquida corresponde à própria potência do motor. No caso do sistema operando com o equipamento, a potência líquida é a diferença entre a potência do motor e aquela consumida pelo equipamento. Nota-se que os resultados foram melhores com o sistema operando a 3600 rpm, o que é coerente com o que foi observado anteriormente ao descrever as curvas do motor.

A seguir, são exibidas as figuras que representam o ganho percentual de eficiência (ϵ) (Fig. 6.3) e o ganho percentual de potência (ψ) (Fig. 6.4) do sistema acoplado, respectivamente, ao utilizar o equipamento para absorção com razão de alimentação máxima e comparadas com os resultados sem o equipamento.

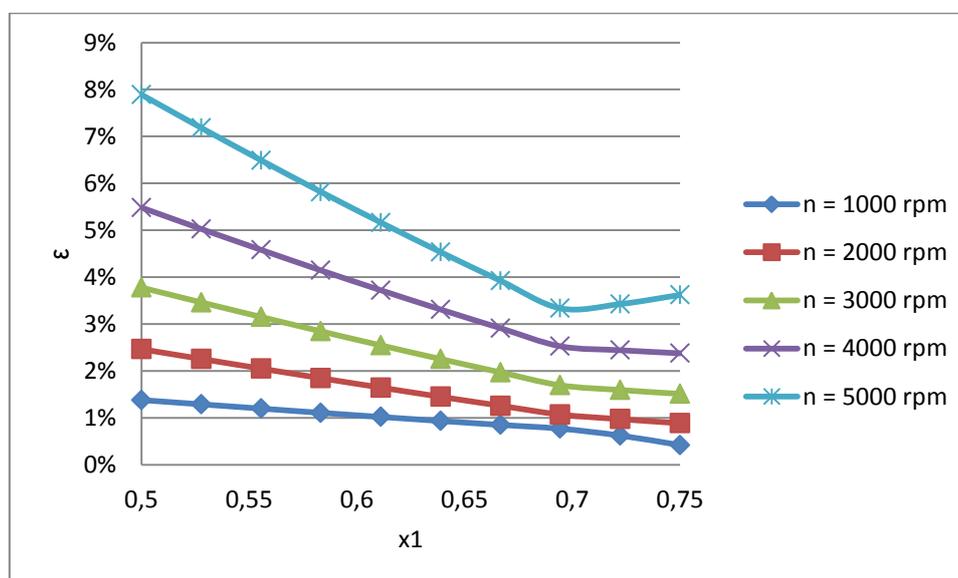


Fig. 6.3 – Aumento relativo de eficiência (ϵ) do sistema em função da fração molar de metano na entrada (x_1) ao utilizar equipamento para absorção com razão de alimentação máxima para diversas rotações do motor (n)

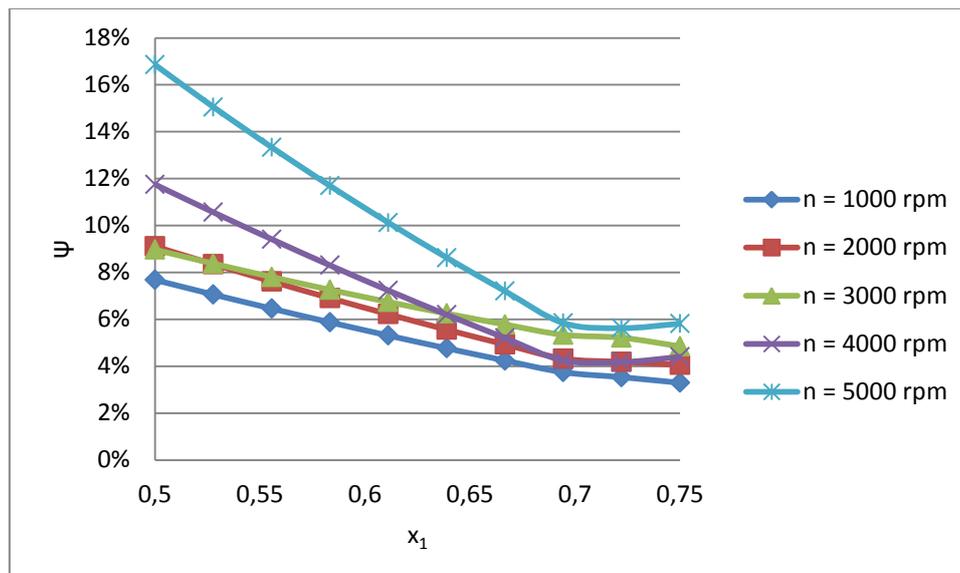


Fig. 6.4 – Aumento relativo de potência (ψ) do sistema em função da fração molar de metano na entrada (x_1) ao utilizar equipamento para absorção com razão de vazão máxima para diversas rotações do motor (n)

Nota-se que o uso do equipamento de absorção é mais vantajoso no que se refere à potência do que à eficiência. É importante notar que esses gráficos representam o quociente entre a diferença da potência com e sem o equipamento e a potência sem o equipamento, ou seja, os pontos em que ocorrem os maiores aumentos não necessariamente são os pontos em que ocorrem os máximos de potência e eficiência.

6.1 Avaliação de incertezas

No decorrer do trabalho, considerou-se que o biogás pode ser modelado como um mistura binária de gás carbônico e metano, ambos tratados como gases ideais. Sabe-se, no entanto, que este também contém frações de outros componentes, como gás sulfídrico, nitrogênio, umidade e amônia [Hagen et al., 2001]. Isto pode induzir algum erro nos resultados obtidos.

Os valores de potência e eficiência para as faixas em que não haviam dados disponíveis foram interpolados linearmente. Apesar do intervalo entre os valores usados para interpolação ser relativamente pequeno, sempre haverá um erro associado. As curvas importadas para o EES também carregam consigo alguma incerteza, haja vista que foram obtidas através de polinômios ajustados.

7. CONCLUSÕES

Pode-se notar que o funcionamento do sistema é melhor quando a vazão do equipamento de absorção é o máximo da faixa, 8 kg de água por kg de biogás. Além de aumentar a absorção de gás carbônico, o aumento da vazão aumenta muito pouco o consumo energético do equipamento de absorção.

O maior aumento relativo de potência e de eficiência do sistema ocorre quando o biogás não tratado possui baixa concentração de metano e quando o motor está em altas rotações.

Após analisar os dados obtidos neste trabalho, conclui-se que a utilização do equipamento de absorção é viável energeticamente. Houve aumento de potência e de eficiência em todos os casos, isto é, o uso do equipamento de absorção é energeticamente viável para todos os valores de concentração de metano e de rotação do motor dentro da faixa.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se que os dados obtidos pela simulação utilizada no desenvolvimento deste trabalho não levaram em consideração pressões

maiores do que uma atmosfera. Como a Lei de Henry prevê que a concentração de uma espécie gasosa em água é proporcional à pressão parcial, seria interessante realizar outra simulação levando em conta aumentos maiores de pressão.

A partir de 2014, todas as regiões metropolitanas em território nacional deverão ter suas frotas de ônibus e caminhões abastecidas apenas com óleo diesel S-10. Ocorre que o tratamento em unidades de hidrorrefino para obter um diesel com quantidade tão baixa de enxofre (10 ppm em massa) consome grandes quantidades de hidrogênio. A principal forma de obter hidrogênio é a partir do gás natural, através do uso de catalisadores em altas pressões e temperaturas. Acontece que a produção nacional de gás natural tem grande dificuldade de suprir toda esta demanda. Tem-se então a possibilidade de investigar a possibilidade de purificar o biogás a ponto de que se possa utilizá-lo no tratamento de diesel.

Os resultados obtidos neste trabalho foram de caráter puramente teórico. Seria interessante investigar experimentalmente quais são os resultados do uso deste processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrelpe, “**Atlas brasileiro de emissão de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**”, 2013

Excitatriz Estática, “**Geradores Síncronos - Princípio de Funcionamento**”, <http://excitatrizestatica.com.br/gruposgeradores.htm>, acessado em 10/11/2013.

Gómez-Montoya, J. P., et al, “**Effect of hydrogen-enriched biogas on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine**”, Universidad De Antioquia, 2012

Guo, J., Qin, C., Schmitz, G., “**Numerical Investigation on the Performance of Spark Ignition Engine Used for Electricity Production Fuelled by Natural Gas/Liquefied Petroleum Gas-Biogas Blends with Modelica**”, 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, Anais, p. 682-687, 2010.

Hagen, M., et al., “**Adding gas form biomass to the gasgrid**”, Swedish Gas Center, 2001

Hagen, M.T.; Demuth, H. B.; Beale, M. H. “**Neural Network Design**”, PWS Pub., 1996.

Haykin, S., “**Redes neurais – princípios e prática**”, 2ª ed., Bookman Companhia Editora, 2001.

López, D.G.S., “**SEPARAÇÃO DE CO₂ EM GASES DE COMBUSTÃO – APLICAÇÃO DE MEMBRANAS E CRIOGENIA**”, Dissertação de mestrado, PROMEC-UFRGS, 2010

Magalhães, E.V., et al., “**Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂**”, Engenharia na Agricultura v.14, n.4, p. 226-237, 2006

Maizonnasse, M., Plante, J.S., Oha, D., Laflamme, C.B., “**Investigation of the degradation of a low-cost untreated biogas engine using preheated biogas with phase separation for electric power generation**”, Elsevier, Renewable Energy 55 , p. 501-513, 2011.

Ministério do Meio Ambiente, “**Energias renováveis**” <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis>, acessado em 10/11/13.

Persson, M., **“Evaluation of upgrading techniques for biogas”**, Lund Institute of Technology, 2003.

Porpatham, E., Ramesh, A., Nagalingam, B., **“Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine”**, Indian Institute of Technology Madras, 2007.

Portier, S., Rochelle C., **“Modelling CO₂ solubility in pure water and NaCl-type waters from 0 to 300 °C and from 1 to 300 bar Application to the Utsira Formation at Sleipner”**, Institut Français du Pétrole, 2004.

Roitman, V., **“Curso de formação de operadores de refinaria: operações unitárias”** PETROBRAS, 2002.

Sander, R., **“Compilation of Henry’s Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental”**, Air Chemistry Department - Max-Planck Institute of Chemistry, 1999.

Sevimoglu, O., Tansel B., **“Composition and source identification of deposits forming in landfill gas (LFG) engines and effect of activated carbon treatment on deposit composition”**, Elsevier, Journal of Environmental Management 128, p. 300-305, 2013.

U.S. Energy Information Administration, **“Emissions of greenhouse gases in the United States”**, <ftp://ftp.eia.doe.gov/pub/oiaf/1605/cdrom/pdf/ggrpt/057308.pdf>, 2009, acessado em 05/11/2013.

Vaghдал, K., **“Distribution av biogas I naturgasnetet”**, Swedish Gas Center, 1999.

van Wylen, G.J., et al., **“Fundamentos da Termodinâmica”**, Edgard Blucher Ltda., 6ª edição, 2003.

APÊNDICE I – Código do programa gerado em EES

```
{TCC 2013/2
```

```
Guilherme Geremia
```

```
Orientador: Dr. Paulo Smith Schneider
```

```
Acomplamento de motores e absorvedora
```

```
}
```

```
FUNCTION absorvedora(y;Q) {Criação de função absorvedora(y;Q) => Q é a vazão de água da absorvedora por kg de gás e y a fração MÁSSICA de metano na entrada; função interpola entre as curvas conhecidas}
```

```
{Primeiro passo: calcular os valores da absorvedora onde a equação é conhecida}
```

```
z_500 := 0,2794*y^2 + 0,5252*y + 0,2393
```

```
z_575 := 0,3806*y^2 + 0,3674*y + 0,3083
```

```
z_650 := 0,4166*y^2 + 0,2587*y + 0,3722
```

```
z_725 := 0,3201*y^2 + 0,2583*y + 0,4193
```

```
z_800 := 0,1337*y^2 + 0,3319*y + 0,4559
```

```
{Segundo passo: interpolar entre as vazões cujas equações são conhecidas}
```

```
if (Q<5) then
```

```
absorvedora := z_500
```

```
else
```

```
if (Q>= 5) and (Q<5,75) then
```

```
absorvedora := z_575 - ((z_575-z_500)*(5,75-Q))/0,75
```

```
else
```

```
if (Q>=5,75) and (Q<6,5) then
```

```
absorvedora := z_650 - ((z_650-z_575)*(6,5-Q))/0,75
```

```
else
```

```
if (Q>=6,5) and (Q< 7,25) then
```

```
absorvedora := z_725 - ((z_725-z_650)*(7,25-Q))/0,75
```

```
else
```

```
if (Q>=7,25) and (Q< 8) then
```

```
absorvedora := z_800 - ((z_800-z_725)*(8-Q))/0,75
```

```
else
```

```
if (Q>=8) then
```

```
absorvedora := z_800
```

```
endif
```

```
end
```

```
functionmotor_eficiencia(rpm; x_3) {funciona p/ 0,6<=x_3<=0,96}
```

```
x=rpm/1000
```

```

y_96 = 0,000553846*x^5 - 0,0088951049*x^4 + 0,0562307692*x^3 - 0,1843822844*x^2 +
0,30821072262*x + 0,0383333333
y_83 = -0,0005967366*x^4 + 0,0090328930*x^3 - 0,0581841492*x^2 + 0,1474639990*x + 0,1111111111
y_71 = 0,0003589744*x^5 - 0,0059696970*x^4 + 0,0395209790*x^3 - 0,1392954545*x^2 +
0,2461579254*x + 0,0658333333
y_60 = 0,0001641026*x^5 - 0,0030442890*x^4 + 0,0229324009*x^3 - 0,0952187257*x^2 +
0,1909132090*x + 0,0893333333

if (x_3>0,96) then motor_eficiência := y_96 else

if (x_3<=0,96) and (x_3>0,8267) then
motor_eficiência := y_96 - ((y_96-y_83)*(0,96-x_3))/(0,96-0,8267)
else

if(x_3<=0,8267) and (x_3>0,7133) then
motor_eficiência := y_83 - ((y_83-y_71)*(0,8267-x_3))/(0,8267-0,7133)
else

if(x_3<=0,7133) and (x_3>0,6) then
motor_eficiência := y_71 - ((y_71-y_60)*(0,7133-x_3))/(0,7133-0,6)
else

if(x_3<=0,6) then motor_eficiência = y_60

endif
endif
endif
endif
end

functionmotor_potência(rpm; x)

z=rpm/1000

y_96 = 0,0066666667*z^5 - 0,1037296037*z^4 + 0,5485431236*z^3 - 1,5316433568*z^2 +
4,5495687646*z - 1,725
y_83 = -0,0045128205*z^5 + 0,0781351981*z^4 - 0,5683449883*z^3 + 1,6610722609*z^2 +
0,1120652681*z + 0,3266666667
y_71 = 0,0097435897*z^5 - 0,1545454546*z^4 + 0,8635780886*z^3 - 2,4128787880*z^2 +
5,2675874126*z - 2,025
y_60 = 0,0292307692*z^5 - 0,4363636364*z^4 + 2,3937645688*z^3 - 6,2818181820*z^2 +
9,7035198136*z - 3,9083333334

if (x>0,96) then motor_eficiência := y_96 else

if (x<=0,96) and (x>0,8267) then
motor_potência := y_96 - ((y_96-y_83)*(0,96-x))/(0,96-0,8267)
else

if(x<=0,8267) and (x>0,7133) then
motor_potência := y_83 - ((y_83-y_71)*(0,8267-x))/(0,8267-0,7133)
else

if(x<=0,7133) and (x>0,6) then
motor_potência := y_71 - ((y_71-y_60)*(0,7133-x))/(0,7133-0,6)
else

if(x<=0,6) then motor_potência = y_60

```

```

endif
endif
endif
endif
end

```

```

#####PROGRAMA COMEÇA
AQUI#####
#####
#####}

```

{Constantes físicas, propriedades importadas, dados de entrada e relações}

```

LHV_CH4 = 50016           {Poder calorífico inferior do metano em kJ/kg, obtido do}
MW_CH4 = 16
MW_CO2 = 44
MW_H2O = 18
p_1 = 101
p_2 = 203
p_A = 101
p_B =203                 {Evitar mudar p_2 enquanto equação da absorvedora não considerar pressão...}
T_amb = 25               {...nem temperatura nem equação da absorvedora serão corrigidos}
eta_bomba = 0,5
eta_compressor_isoentrópica = 0,7
eta_compressor_mecânica = 0,5
k_H=3,4E-2/101,325      {Constante de Henry}

```

{Variáveis "livres" do programa. Deixo-as comentadas para usar nas ParametricTables}

```

m_dot_A_prime=8         {Vazão de água em relação à vazão de biogás}
{rpm=5000}
{x_1 = 0,65}
y_3 = absorvedora(y_1;m_dot_a_prime)
y_1=(x_1*MW_CH4)/(x_1*MW_CH4+(1-x_1)*MW_CO2)
y_3 = (x_3*MW_CH4)/(x_3*MW_CH4+(1-x_3)*MW_CO2)
y_CO2_1 + y_1 = 1
x_CO2_1 + x_1 = 1

```

{Primeiro passo: calcular consumo de combustível, potência e eficiência do motor}

```

P_prime = motor_potência(rpm; x_1)
P = motor_potência(rpm; x_3)
eta_motor = motor_eficiência(rpm; x_3)
eta_prime_motor = motor_eficiência(rpm; x_1)
m_dot_1 = P/(eta_motor*y_1*LHV_CH4)
m_dot_prime_1 = P_prime/(eta_prime_motor*y_1*LHV_CH4)

```

{Segundo passo: calcular a potência de compressão}

```

T_m =T_amb
{T_m = (T_amb+T_saída_r)/2} {Variação de temperatura DESATIVADA- EES tem dificuldade com
equações não lineares!!! -> Precisa ser corrigido para trabalhar com pressões maiores.
No momento, é considerada temperatura ambiente para variação de entalpia na
compressão de 101 kPa => 203 kPa}

```

```

cp_CO2 = Cp(CO2;T=T_m)
cv_CO2 = Cv(CO2;T=T_m)
k_CO2 = cp_CO2 / cv_CO2

```

$$R_{CO2} = c_{p_CO2} - c_{v_CO2}$$

$$h_{CO2_1} = \text{Enthalpy}(CO2; T=T_{amb})$$

$$c_{p_CH4} = C_p(CH4; T=T_m)$$

$$c_{v_CH4} = C_v(CH4; T=T_m)$$

$$k_{CH4} = c_{p_CH4} / c_{v_CH4}$$

$$R_{CH4} = c_{p_CH4} - c_{v_CH4}$$

$$h_{CH4_1} = \text{Enthalpy}(CH4; T=T_{amb})$$

$$c_{p_1} = c_{p_CH4} * y_1 + c_{p_CO2} * y_{CO2_1} \quad \{\text{Determinação das propriedades da mistura gasosa; VARIAÇÃO DE TEMPERATURA COM A COMPRESSÃO FOI DESATIVADA!}\}$$

$$c_{v_1} = c_{v_CH4} * y_1 + c_{v_CO2} * y_{CO2_1}$$

$$k_1 = c_{p_1} / c_{v_1}$$

$$R_1 = R_{CH4} * y_1 + R_{CO2} * y_{CO2_1}$$

$$h_1 = h_{CH4_1} * y_1 + h_{CO2_1} * y_{CO2_1}$$

$$(p_2/p_1)^{(k_1-1)/k_1} = T_{2_s} / T_{amb} \quad \{\text{Compressão politrópica reversível}\}$$

$$h_{2_s} = h_1 + c_{p_1} * (T_{2_s} - T_{amb}) \quad \{\text{Subíndice "s" indica reversível}\}$$

$$h_{2_r} = h_1 + c_{p_1} * (T_{2_r} - T_{amb})$$

$$\eta_{compressor_isoentrópica} = (h_{2_s} - h_1) / (h_{2_r} - h_1)$$

$$w_{compressor_prime} = h_{2_r} - h_1$$

$$W_{dot_compressor} = (w_{compressor_prime} * m_{dot_1}) / \eta_{compressor_mecânica} \quad \{\text{Potência consumida pelo compressor}\}$$

{Terceiro passo: calcular a energia de bombeio}

$$w_{bomba_prime} = (p_B - p_A) * v_{\text{água}} \quad \{\text{Energia consumida na bomba por unidade de massa}\}$$

$$v_{\text{água}} = \text{Volume}(\text{Water}; T=T_{amb}; P=p_A)$$

$$W_{dot_bomba} = (w_{bomba_prime} / \eta_{bomba}) * m_{dot_A} \quad \{\text{Potência consumida na bomba}\}$$

$$m_{dot_A} = m_{dot_A_prime} * m_{dot_1}$$

{Quarto passo: calcular potência consumida na absorvedora, EROEI, diferença de eficiência e potência}

$$W_{dot_absorvedora} = W_{dot_bomba} + W_{dot_compressor}$$

$$EROEI = (y_1 * LHV_{CH4} * m_{dot_1}) / W_{dot_absorvedora} \quad \{\text{Energy Recovered on Energy Invested}\}$$

$$W_{dot_líq} = P - W_{dot_absorvedora}$$

$$k_H = c_{CO2} / (x_1 * p_2)$$

$$m_{dot_CO2_C_max} = (c_{CO2} * MW_{CO2} * m_{dot_A}) / MW_{H2O} \quad \{\text{calcula o máximo de CO2 que poderia ser removido pela água na pressão...}\}$$

{da absorvedora com a pressão parcial do CO2 na entrada.}

$$\Delta P = P - P_{prime}$$

$$\Delta \eta = \eta_{motor} - \eta_{prime_motor}$$

$$\eta_{global} = W_{dot_líq} / (m_{dot_1} * y_1 * LHV_{CH4})$$

$$\text{ganho_potência} = (W_{dot_líq} - P_{prime}) / P_{prime}$$

$$\text{ganho_eficiência} = (\eta_{global} - \eta_{prime_motor}) / \eta_{prime_motor}$$

APÊNDICE II – Curvas de ajuste obtidas pelo Microsoft Excel

- Fração mássica de metano na saída do equipamento de absorção, em função da fração na entrada, para 25°C e diversas razões de alimentação:

$$Q=8,00: y_3 = 0,1337y_1^2 + 0,3319y_1 + 0,4559$$

$$Q=7,25: y_3 = 0,3201y_1^2 + 0,2583y_1 + 0,4193$$

$$Q=6,50: y_3 = 0,4166y_1^2 + 0,2587y_1 + 0,3722$$

$$Q=5,75: y_3 = 0,3806y_1^2 + 0,3674y_1 + 0,3083$$

$$Q=5,00: y_3 = 0,2794y_1^2 + 0,5252y_1 + 0,2393$$

- Potência gerada pelo motor, em função da rotação ($c=n/1000$), para diversas frações de metano na saída do equipamento de absorção (x_3):

$$x_3 = 0,96: P = 0,0066666667c^5 - 0,1037296037c^4 + 0,5485431236c^3 - 1,5316433568c^2 + 4,5495687646c - 1,7250000000$$

$$x_3 = 0,83: P = -0,0045128205c^5 + 0,0781351981c^4 - 0,5683449883c^3 + 1,6610722609c^2 + 0,1120652681c + 0,3266666667$$

$$x_3 = 0,71: P = 0,0097435897c^5 - 0,1545454546c^4 + 0,8635780886c^3 - 2,4128787880c^2 + 5,2675874126c - 2,0250000000$$

$$x_3 = 0,6: P = 0,0292307692c^5 - 0,4363636364c^4 + 2,3937645688c^3 - 6,2818181820c^2 + 9,7035198136c - 3,9083333334$$

- Eficiência obtida pelo motor (η), em função da rotação ($c=n/1000$), para diversas frações de metano na saída do equipamento de absorção (x_3):

$$x_3 = 0,96: \eta = 0,0067c^5 - 0,1037c^4 + 0,5485c^3 - 1,5316c^2 + 4,5496c - 1,725$$

$$x_3 = 0,83: \eta = -0,0045c^5 + 0,0781c^4 - 0,5683c^3 + 1,6611c^2 + 0,1121c + 0,3267$$

$$x_3 = 0,71: \eta = 0,0097c^5 - 0,1545c^4 + 0,8636c^3 - 2,4129c^2 + 5,2676c - 2,025$$

$$x_3 = 0,60: \eta = 0,0292c^5 - 0,4364c^4 + 2,3938c^3 - 6,2818c^2 + 9,7035c - 3,9083$$

Todas as curvas obtidas possuem $0,99 \leq R^2 \leq 1,00$.