

PRODUÇÃO DE ÁGUA GELADA COMPLEMENTAR PARA UM LATICÍNIO: O USO DO BIOGÁS PRODUZIDO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Villela, I. A. C. - iraides@debas.faenquil.br

Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Engenharia Química de Lorena

Napoleão, D. A. S. – diovana@feg.unesp.br

Silveira, J. L. - joseluz@feg.unesp.br

Departamento de Energia - UNESP – Universidade Estadual Paulista

Avenida Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – 12.516-410 Guaratinguetá - SP

Resumo - Este trabalho analisa a possibilidade do aproveitamento energético do biogás gerado no Reator Anaeróbico da Estação de Efluentes de um Laticínio de médio porte, localizado no Vale do Paraíba. Neste laticínio a produção de biogás é de $80\text{Nm}^3/\text{h}$, com uma composição de mistura em base molar de metano (62,5 %), nitrogênio (13,4%), monóxido de carbono (5%), dióxido de carbono (2,4 %), vapor de água (2,4 %) e ácido sulfídrico (14,1%). O biogás gerado é simplesmente queimado num “flair”, seguindo as normas recomendadas e desperdiçando esse potencial energético para o uso no próprio processo industrial. Nesse sentido, propõe-se nesse trabalho a queima direta desse biogás para acionar um sistema de refrigeração por absorção utilizando como fluido de trabalho a amônia. O teor de ácido sulfídrico na mistura permite a utilização do calor disponível nos gases oriundos da queima do biogás, em níveis de temperatura de até 230°C (pinch point). Este potencial residual permite a produção de cerca de 7,3 kg/s de água gelada complementar a 1°C . Assim efetua-se análises energéticas e mostra-se a viabilidade técnica da utilização desse biogás para melhorar a produção de água gelada no referido laticínio.

Palavras-chave: Refrigeração, biogás, máquina de absorção

1. INTRODUÇÃO

Até pouco tempo, o biogás era simplesmente encarado como um sub-produto, obtido a partir da decomposição anaeróbia de aterros naturais surgidos do acúmulo desordenado de lixo e terra, onde esses gases se acumulam em bolsões ou ficam dispersos nas partes porosas das substâncias digeridas. A outra fonte geradora de biogás – os aterros sanitários – se constituem basicamente de resíduos sólidos (orgânicos e minerais) entrepostos em camadas de terra e que, com o correr dos anos se compactam tornando-se impermeáveis à penetração do oxigênio do ar, facilitando o desenvolvimento de bactérias anaeróbias e consequentemente, a formação do biogás. No entanto, o desenvolvimento econômico dos últimos anos e a crescente demanda e o aumento do preço dos produtos derivados do petróleo, tem incentivado pesquisas em novas fontes alternativas direcionadas para a produção de energia, mais economicamente viáveis.

No setor industrial o processo de biodigestão apresenta maior potencialidade e o biogás tem possibilidades de atuar como alternativa mais eficiente e mais econômica. Entre as atividades industriais mais indicadas à utilização da biodigestão como geradora de combustíveis, tem-se o tratamento antipolvente de

resíduos e dejetos e como produtora de adubos estariam os abatedouros, as indústrias de laticínios, as extratoras de óleos vegetais, as destilarias de álcool e usinas de açúcar, as agroindústrias produtoras de produtos alimentícios e ainda as criações de aves, suínos e bovinos.

O presente trabalho objetiva o aproveitamento do biogás gerado no Reator Anaeróbico da Estação de Tratamento de Efluentes (Fig. 1), que atualmente é queimado e jogado ao meio ambiente, e que será utilizado como fonte de energia residual. O combustor deverá possuir uma válvula de ar de modo a manter a temperatura de queima desses gases em torno de 1000 °C (valor limite). A vazão desses gases oriundos da combustão acionará o sistema de refrigeração por absorção (SRA) de NH₃ + H₂O, para produzir água gelada complementar a 1^oC, necessária ao processo.

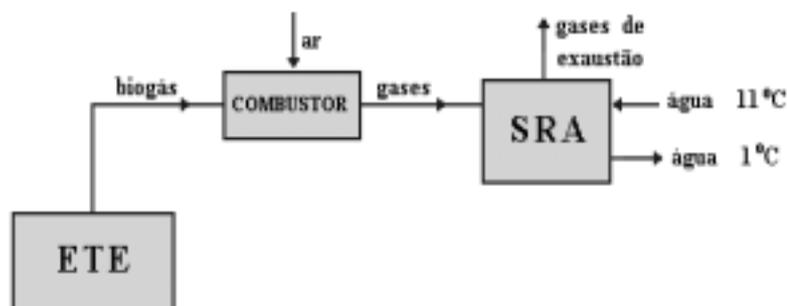


Figura 1- Esquema da instalação proposta

2. A PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA ESTAÇÃO DE EFLUENTES

Através de amostras fornecidas pela Cooperativa e do uso de um cromatógrafo pode-se obter a composição em base mássica e volumétrica, determinar o poder calorífico inferior deste biogás: 22.475,80 kJ/Nm³; sendo os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás da Cooperativa

COMPONENTE	% VOLUME	% MASSA
CH ₄	62,7	46,79
N ₂	13,4	17,46
CO	5,0	6,51
CO ₂	2,4	4,91
H ₂ O	2,4	2,01
H ₂ S	14,1	22,32

A produção mínima e máxima do biogás na Estação de Tratamento de Efluentes da Cooperativa apresentaram-se entre 58 e 102 Nm³/h, respectivamente, para dias normais de operação, perfazendo uma produção média de 80 Nm³/h.

3. DADOS GERAIS DO CONSUMO DE VAPOR, DEMANDAS DE ELETRICIDADE E DE POTÊNCIA FRIGORÍFICA NO PROCESSO

Com base nas informações da Cooperativa de Laticínios, foram obtidos os gráficos do consumo de vapor, demandas da eletricidade e potência frigorífica no processo, em função da hora do dia, mostrados na Fig. 2.

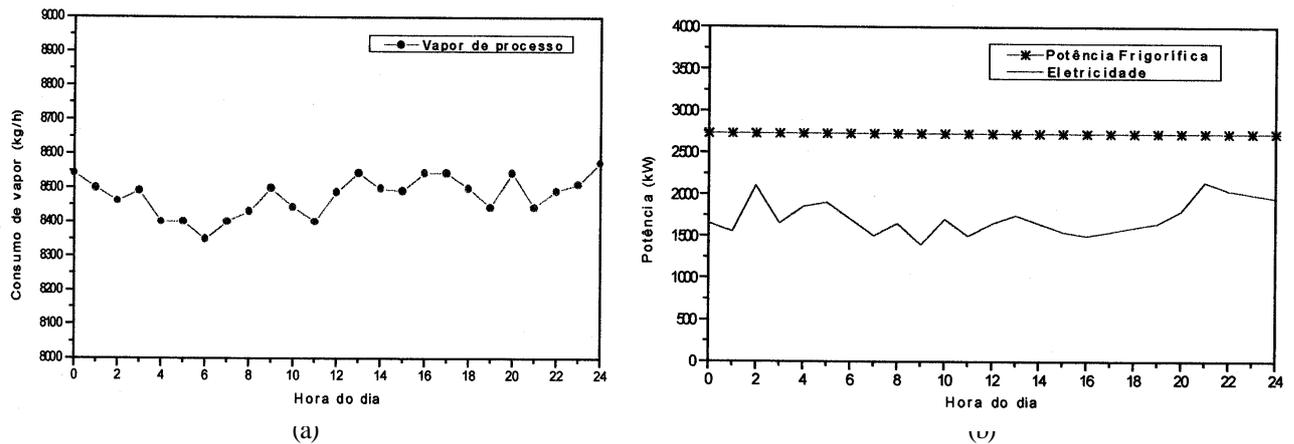


Figura 2 - Consumo de vapor no processo (a) e demanda de eletricidade e potência frigorífica (b)

No caso da potência frigorífica trata-se da produção de água gelada a 1°C , para o funcionamento da câmara frigorífica da unidade.

4. PROPOSTA DE UM COMBUSTOR DE BIOGÁS

O combustor detalhado na Fig. 3 é constituído de uma câmara em aço carbono revestida internamente com tijolos refratários e isolantes. Para a vazão média de produção de biogás ($80\text{ Nm}^3/\text{h}$, a câmara possuirá um volume interno de $1,63\text{ m}^3$ e para a vazão mínima $58\text{ Nm}^3/\text{h}$), de acordo com Silveira et al. (1997).

O biogás disponível na unidade será comprimido até atingir uma pressão adequada de trabalho para o queimador, que deverá ser projetado em liga metálica especial para a operação em ambiente de alta temperatura. O ar de combustão será provido por um compressor radial e sua vazão deverá ser controlada e medida, de forma a fornecer um excesso em torno de 220% (2,2 vezes a vazão estequiométrica). Esse excesso de ar fornecerá produtos de combustão na faixa de 1000°C .

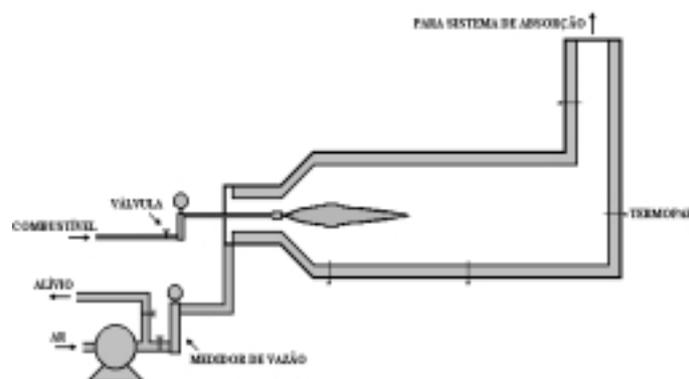


Figura 3 - Esquema do combustor de biogás

5. FUNCIONAMENTO DA INSTALAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ABSORÇÃO AMÔNIA E ÁGUA

Os sistemas de absorção são máquinas de produção de frio ou quente e que operam com um dos princípios mais primitivos de refrigeração. O ciclo usa um absorvente como um fluido secundário (H_2O) para absorver um fluido primário, sendo este um refrigerante que é vaporizado (NH_3). O processo de evaporação absorve calor, suprimindo assim a refrigeração necessária. Geralmente os equipamentos de absorção de amônia e água são usados em grandes aplicações industriais, que requerem baixas temperaturas para o processo de resfriamento; nestes ciclos utiliza-se amônia como refrigerante e água como absorvente (Costa, 1976).

O sistema de refrigeração por absorção consiste basicamente de um evaporador, um absorvedor, um condensador, gerador, trocador de calor, uma pequena bomba e auxiliares. Normalmente, na parte inferior do sistema é localizado o absorvedor e o evaporador, ocupando uma única carcaça, sendo que na parte superior, em uma outra carcaça estão localizados o gerador e o condensador.

A Figura 4 apresenta o esquema da instalação de uma máquina de absorção utilizando a mistura de amônia e água, proposta para a Cooperativa de Laticínios. No gerador ocorrerá a dissociação da amônia, mediante o calor fornecido pelos gases de exaustão no ponto 20. Essa solução forte de amônia, dissociada no gerador, será então encaminhada ao retificador, onde ocorrerá seu enriquecimento em amônia, garantindo que uma pequena fração de água seja deslocada para o gerador no ponto 8. Do retificador, a solução rica de amônia, será encaminhada para o condensador, onde será liquefeita e fluirá para o evaporador; sendo antes expandida isoentalpicamente (válvula de expansão), acarretando um decréscimo em sua temperatura e pressão.

No absorvedor, a solução fraca de amônia proveniente da solução não dissociada absorverá o vapor de amônia do evaporador, formando-se uma solução forte em amônia, recomeçando-se novamente o ciclo.

Ocorre a produção de água quente através da passagem de água da rede pelo absorvedor e posteriormente pelo condensador aproveitando os calores cedidos, elevando a temperatura no caso de $25^{\circ}C$ para $36^{\circ}C$.

A produção de água gelada que é o objetivo desse trabalho é obtida através da passagem de água de retorno do processo, a uma temperatura de $11^{\circ}C$ pelo evaporador, obtendo-se finalmente água gelada a $1^{\circ}C$ (ponto 19).

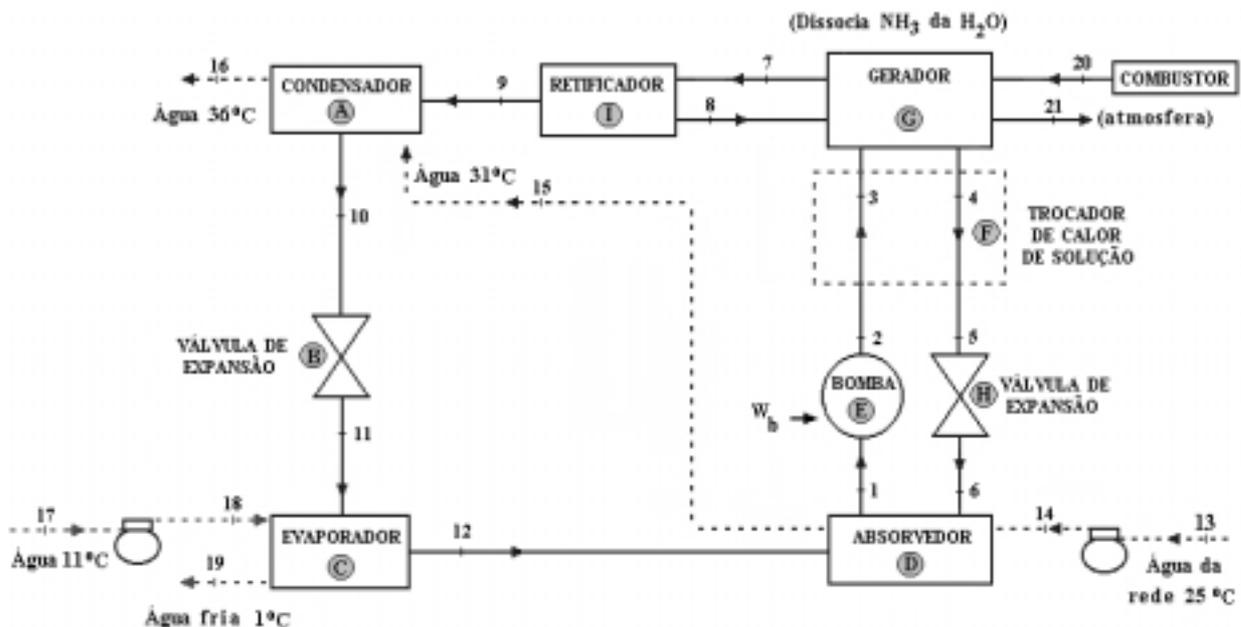


Figura 4 - Configuração do sistema de refrigeração por absorção

Os parâmetros termodinâmicos do ciclo de absorção estão apresentados na Tabela 2 referentes a Fig. 4. Os dados foram gerados e adaptados segundo as indicações de Herold et al. (1996).

Tabela 2 - Dados termodinâmicos do sistema de refrigeração por absorção

PONTOS	P [MPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	x [kg/kg]
1	0,240	40,00	-42,282	0,474	0,368
2	1,555	40,50	-39,235	0,479	0,368
3	1,555	110,70	306,75	1,465	0,368
4	1,555	131,00	401,62	1,652	0,268
5	1,555	40,50	0,86	0,533	0,268
6	0,204	40,70	0,83	0,537	0,268
7	1,555	108,00	1547,49	4,891	0,944
8	1,555	108,00	264,12	1,354	0,368
9	1,555	44,00	1294,19	4,173	0,999
10	1,555	40,00	190,12	0,659	0,999
11	0,240	-14,50	190,12	0,763	0,999
12	0,240	-10,00	1264,27	5,000	0,999
13	0,150	25,00	105,00	0,367	0,000
14	0,200	25,00	105,05	0,367	0,000
15	0,180	31,00	130,11	0,451	0,000
16	0,160	36,00	150,97	0,520	0,000
17	0,150	11,000	46,340	0,166	0,000
18	0,200	11,00	46,39	0,166	0,000
19	0,180	1,00	4,34	0,015	0,000
20	0,360	970,00	-	-	-
21	0,200	250,00	-	-	-

6. ANÁLISE ENERGÉTICA DO SISTEMA

A análise de um sistema de refrigeração por absorção é feita através do balanço energético da instalação, o que torna indispensável o conhecimento perfeito do equilíbrio entre o fluido refrigerante adotado e a substância absorvente. A seguir são descritos os cálculos necessários, sendo que o equacionamento refere-se ao ciclo da Fig.4 Para os cálculos realizados, utilizou-se o valor de 22 475,80 kJ/Nm³, como poder calorífico inferior do biogás.

Sabendo que o calor no gerador se refere ao fluxo entregue pelos gases, tem-se a seguinte equação:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_{\text{gases}} = \dot{m}_{\text{gases}} \cdot C_{p \text{ gases}} \cdot \Delta T \quad (1)$$

No SRA o coeficiente de performance para a produção de frio (em simples estágio) varia entre 0,4 - 1,0 Petbow (1991). Adotou-se um COP = 0,75 obtendo o fluxo de calor do evaporador, segundo a equação:

$$\dot{Q}_e = \text{COP}_f \cdot \dot{Q}_g \quad (2)$$

Do balanço de energia determina-se os fluxos de calor do evaporador e do condensador:

$$\dot{Q}_e + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{12} h_{12} \quad (3)$$

$$\dot{Q} + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (4)$$

De acordo com Keating (1993), baseando-se na temperatura média da água, para se determinar a vazão de água fria e quente, utilizou-se os valores $C_{p_{ag}} = 4,2026 \text{ kJ/kg K}$ e $C_{p_{ag}} = 4,1790 \text{ kJ/kgK}$, respectivamente, obtendo-se as seguintes equações:

- Para o fluxo de água fria:

$$\dot{m}_{af} = \frac{\dot{Q}_e}{C_{p_{ag}} \cdot (T_{18} - T_{19})} \quad (5)$$

- Para o fluxo de água quente:

$$\dot{m}_{aq} = \frac{\dot{Q}_c}{C_{p_{ag}} \cdot (T_{16} - T_{15})} \quad (6)$$

A vazão mássica de gases de exaustão, nos pontos 20 e 21, é determinada pela relação estequiométrica determinada em $21,23 \text{ kg ar/kg biogás}$ de acordo com Barclay (1995), Keating (1993) e Wylen (1993):

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_b + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_b + 21,23 \cdot \dot{m}_b = 22,23 \cdot \dot{m}_b \quad (7)$$

Através das equações acima e considerando o aspecto de proporcionalidade, adotou-se a vazão mássica do ponto 8 (Herold et al., 1996), obtendo-se as vazões mássicas correspondentes associadas aos pontos da Fig. 4, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazões mássicas do sistema de refrigeração por absorção

FLUIDOS	PONTOS	VAZÕES MÁSSICAS [kg/s]	
		58 Nm ³ /h	80 Nm ³ /h
H₂O + NH₃	1	0,5000	0,7000
	2	0,5000	0,7000
	2	0,5000	0,7000
	3	0,5000	0,7000
	4	0,2928	0,4142
	5	0,2928	0,4142
	6	0,2928	0,4142
	7	0,2283	0,3141
	8	0,0211	0,0283
	9	0,2072	0,2858
	10	0,2072	0,2858
	11	0,2072	0,2858
H₂O	12	0,2072	0,2858
	13	10,9498	15,1032
	14	10,9498	15,1032
	15	10,9498	15,1032
	16	10,9498	15,1032
	17	5,2966	7,3057
	18	5,2966	7,3057
	19	5,2966	7,3057
GASES DE QUEIMA	20	0,3582	0,4940
	21	0,3582	0,4940

Para se determinar o fluxos de calor do absorvedor, gerador e retificador, utiliza-se as equações a seguir, obtidas também do balanço energético associado aos respectivos componentes.

$$\dot{Q}_a + \dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_1 h_1 \quad (8)$$

$$\dot{Q}_g + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (9)$$

$$\dot{Q}_r + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9 \quad (10)$$

Por último, pode-se definir a potência de bomba do sistema:

$$\dot{W}_b = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 \quad (11)$$

Os valores energéticos (fluxos de calor e trabalho de bomba) associados a vazão de biogás mínima de 58 Nm³/h e média de 80 Nm³/h são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados gerais do sistema

ITEM [kW]	58 Nm ³ /h	80 Nm ³ /h
\dot{Q}_a	283,35	391,28
\dot{Q}_c	228,80	315,58
\dot{Q}_e	222,60	307,03
\dot{Q}_g	296,79	409,37
\dot{Q}_r	79,53	108,72
W_b	1,52	2,13

Na Figura 5 temos a variação dos fluxos de calor em função do volume de biogás produzido, variando entre 58 Nm³/h (mínimo) e 80 Nm³/h (médio)

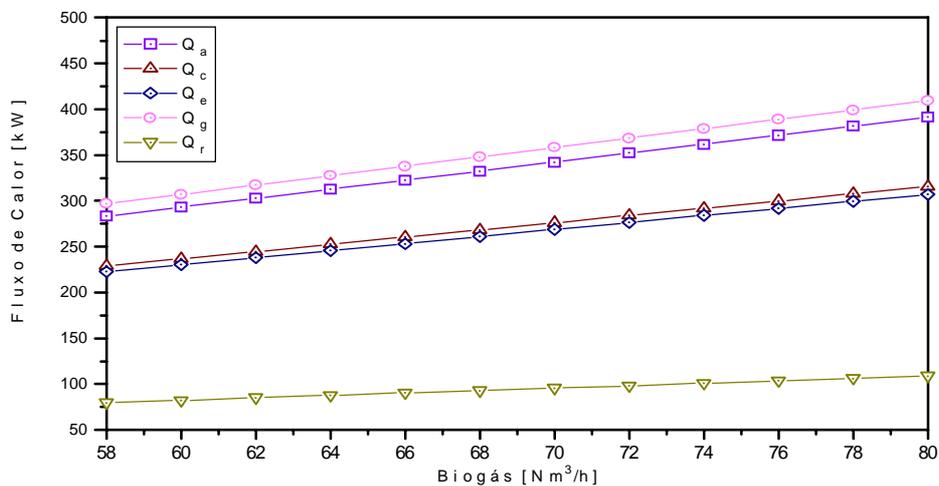


Figura 5 - Variação dos fluxos de calor em relação ao volume de biogás

Através das equações 5 e 6 obtém-se os fluxos de água fria e quente cujos resultados são apresentados na Tabela 5, em função da produção de biogás.

Tabela 5 - Vazões de água fria e quente na máquina de absorção

FLUXOS[kg/g]	58 Nm ³ /h	80 Nm ³ /h
\dot{m}_{af}	5,30	7,31
\dot{m}_{aq}	10,95	15,10

Na Figura 6 temos a variação das vazões mássicas de água fria e quente em função da produção de biogás.

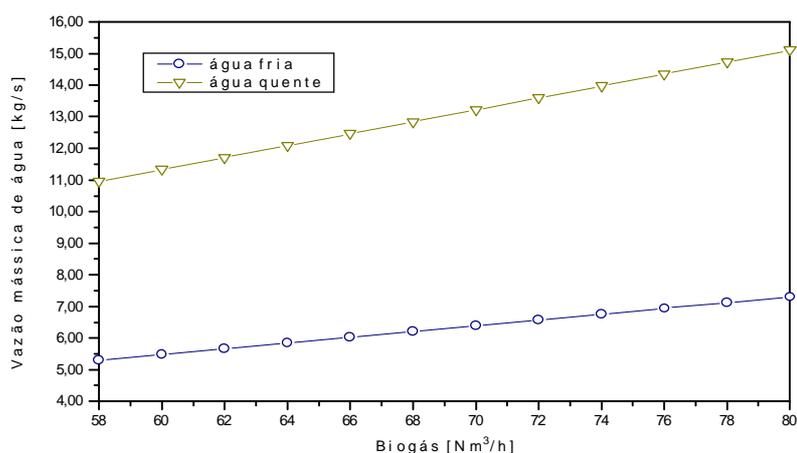


Figura 6- Variação das vazões mássicas de água fria e quente em função do volume de biogás

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho procura-se abordar os aspectos técnicos da utilização do biogás gerado na Estação de Tratamento de Efluentes de uma Cooperativa de Laticínio, quantificando os valores energéticos associados e a relativa facilidade de instalação para o real aproveitamento do biogás dispersado através de queimas em “flair” para a atmosfera.

Em geral as máquinas de refrigeração por absorção são utilizadas em grandes aplicações industriais, que requerem baixas temperaturas para o processo de resfriamento.

Desse modo, a implantação de uma máquina de refrigeração por absorção analisada neste trabalho têm uma grande vantagem, pois utiliza a energia térmica (biogás gerado na própria Cooperativa) em lugar de elétrica.

Do ponto de vista energético, percebe-se que existe uma maior vantagem em projetar um sistema baseado na vazão média de 80 Nm³/h de biogás, associado a uma maior produção de água gelada.

Para o próximo trabalho serão abordados aspectos relativos a análise exergética, análise de viabilidade econômica e ainda análise termoeconômica do sistema proposto ao escopo desse artigo.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro que possibilitou a execução deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SILVEIRA, J. L. e CARVALHO JR, J. A., 1997, maio; "Proposta de Assessoria Técnica: Estudo para melhorar em 30% o sistema de geração de água gelada na Leite Paulista".
- COSTA, Ê. C., 1976; "Física Industrial – Refrigeração", editora Meridional EMMA, v. II, Porto Alegre, p 175.
- HEROLD et al., 1996 ; "Absorption Chillers and Heat Pumps", 1996, Reinhard Radermacher Sanford A. Klein, CRC PRESS, New York, p. 329.
- PETBOW, G. S., 1998 ; Catálogo do Fabricante, London.
- KEATING, E. L., 1993 ; "Applied Combustion", Marcel Dekker, Inc., pp. 512-52.
- BARCLAY, F. J., 1995 ; "Combined Power and Process - An Exergy Approach" Mechanical Engineering Publications Limited, London, p. 155.
- VAN WYLEN, G. J. e SONNTAG, R. E., 1993 ; "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", Tradução da 4ª edição Americana, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.

NOMENCLATURA

Símbolos:

- $C_{p_{ag}}$ - calor específico da água [kJ/kg.K];
- H - entalpia específica [kJ/kg];
- \dot{m} - vazão mássica [kg/s];
- \dot{m}_{af} - vazão mássica de água fria [kg/s];
- \dot{m}_{aq} - vazão mássica de água quente [kg/s];
- \dot{m}_{ar} - vazão de ar de admissão [kg/s];
- \dot{m}_b - vazão mássica de biogás [kg/s];
- \dot{Q}_a - fluxo de calor do absorvedor [kW];
- \dot{Q}_c - fluxo de calor do condensador [kW];
- \dot{Q}_e - fluxo de calor do evaporador ou potência frigorífica [kW];
- \dot{Q}_g - fluxo de calor do gerador [kW];
- \dot{Q}_{gases} - fluxo de calor dos gases de exaustão [kW];
- \dot{Q}_r - fluxo de calor do retificador [kW];
- s - entropia específica [kJ/kg.K];
- T - temperatura [K];
- W_b - potência de bomba [kW]
- ΔT - variação da temperatura dos gases [°C].

Subscritos

- af - água fria
- ag - água
- aq - água quente

Abreviaturas

- ETE - Estação de Tratamento de Efluentes
- SRA - Sistema de Refrigeração por Absorção

COMPLEMENTARY COLD WATER PRODUCTION FOR A DAIRY INDUSTRY: THE USE OF BIOGAS GENERATED IN THE EFFLUENT TREATMENT STATION

ABSTRACT

In this paper is analysed the possibility energetic utilization of biogas in the effluent treatment station of a medium dairy industry located in São Paulo state. In this station are produced about 80 Nm³/h of biogas, with a molar composition of 62,5% of CH₄, 13,4% of N₂, 5% of CO, 2,4% of CO₂, 2,4% of steam H₂O e 14,1% of H₂S. The generated biogas is today burning in a flair, according the national rule, with evident losses of energetic utilization potential. The purpose of this paper is the direct utilization of this biogas to run an absorption refrigeration system utilizing H₂O + NH₃ mixture. The level of H₂S in the biogas permits the energy recovery of the available heat in minimum temperature level up to 230° C, according to the pinch point proceeding. This potential of energy recovery permits a complementation of the cold water production (7,3 kg/s) at 1°C. So, is made the energetic analysis of the proposed installation showing the technical feasibility of the actual use of the generated biogas, to produce usefull energy.

Keywords: Refrigeration, biogas, absorption machine.