

A POLIGERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: ETANOL E BIOMETANOL

*Maria Luiza Grillo Renó¹
José Carlos Escobar Palacio²
Electo Eduardo Silva Lora³*

Resumo

Neste trabalho são apresentadas duas rotas tecnológicas de produção de biocombustível provenientes da cana-de-açúcar no contexto da poligeração. O primeiro caso consiste numa destilaria autônoma de produção de etanol com uma capacidade de moagem de 380 toneladas de cana por hora, gerando excedentes elétricos para comercialização na rede a partir de seu sistema de cogeração baseado em turbinas de extração/condensação que opera com parâmetros de vapor de 6.5 MPa e 490 °C. No segundo caso será considerada uma planta de produção de biometanol a partir da gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar acoplada a uma destilaria de etanol, com uma capacidade de produção 50.000 toneladas de biometanol por ano. As duas alternativas tecnológicas de produção foram analisadas a partir de indicadores baseados na primeira e segunda lei da termodinâmica, assim como alguns indicadores econômicos. Os resultados mostraram que a implementação dos sistemas de poligeração na produção de biocombustíveis é benéfico a sustentabilidade pois aumenta o uso eficiente dos recursos demandados pelos processos da planta.

Palavras Chaves: Biocombustíveis, Biometanol, Cogeração, Etanol.

Abstract

This work presents two technological routes of biofuel production from sugarcane in the context of polygeneration. The first case is an autonomous distillery to produce ethanol with a crushing capacity of 380 tonnes of sugarcane per hour, generating surplus electricity for marketing in the electrical network by its cogeneration system based on turbine extraction / condensation that operates with parameters steam of 6.5 MPa and 490 ° C. In the second case will be considered a plant production of biomethanol by gasification of sugarcane bagasse that is coupled to an ethanol distillery, with a production capacity of 50,000 tons per year of biomethanol. The two technological alternatives were analyzed through indicators based on the first and second law of thermodynamics, as well as some economic indicators. The results showed that the implementation of polygeneration systems in biofuels production is benefict to the sustainability because increase the efficient use of resources demanded by the processes of the plant.

Keywords: Biofuels, Biomethanol, Cogeneration, Ethanol.

¹ malureno@yahoo.com.br, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, CP 50, Itajubá-MG, Brasil

² jocesobar@gmail.com, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, CP 50, Itajubá-MG, Brasil

³ electo@unifei.edu.br, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, CP 50, Itajubá-MG, Brasil

Nomenclatura

B	Bifurcação
B_f	Exergia do combustível
B_p	Exergia consumida pelo processo
$C_{\text{biocombustíveis}}$	Custo unitário dos Biocombustíveis
$C_{\text{eletricidade}}$	Custo unitário da eletricidade
$C_{\text{biocombustível}}$	Custo do biocombustível
C_c	Custo da cana-de-açúcar
$C_{\text{eletricidade}}$	Custo da eletricidade
E_b	Exergia do bagaço
E_{bcog}	Exergia do bagaço destinado a cogeração
E_{bBM}	Exergia do bagaço destinado a produção de biometanol
E_{caldo}	Exergia do caldo de cana-de-açúcar
E_{cana}	Exergia da cana-de-açúcar
E_{cog}	Exergia para geração
E_{etanol}	Exergia do etanol produzido
E_{metanol}	Exergia do metanol
$E + E$	Sistema de produção de eletricidade + etanol
$E+E+BM$	Sistema de produção de eletricidade + etanol + biometanol
FUE	Fator de Utilização de Energia
I_{exced}	Índice de eletricidade excedente
J	Junção
m_{comb}	Fluxo total de bagaço consumido pelas caldeiras
PCI	Poder Calorífico Inferior
P_e	Potência elétrica líquida
P_{ec}	Potência elétrica consumida
Q_u	Fluxo de calor útil para processo
R	Fator de escala
Sub	Subsistema
T_c	Toneladas de cana moída
$\dot{V}_{\text{biocombustível}}$	Produção horária de biocombustível
W	Potência produzida pelo sistema
W_{exced}	Excedente de energia elétrica
Z_{pp}	Custo de amortização, operação e manutenção dos equipamentos da planta
η_e	Eficiência elétrica
η_{exerg}	Eficiência exergética
η_{global}	Eficiência global da planta

1. INTRODUÇÃO

Embora tenha grandes quantidades de petróleo ainda para serem exploradas, o Brasil precisa continuar estimulando a investigação de novas fontes e de novos

processos de produção de combustíveis renováveis como forma de promover o desenvolvimento sustentável, criar empregos no campo e diversificar ainda mais a sua matriz energética.

OPró-Álcool foi um programa de sucesso e lançou as bases para que o país tenha atualmente um setor de biocombustíveis importante economicamente e reconhecido no mundo inteiro. Neste trabalho serão tratados dois biocombustíveis, o metanol e o etanol. O primeiro é produzido pela rota da gaseificação da biomassa, e o segundo pelo processo de fermentação alcoólica.

As principais características do processo produtivo destes dois biocombustíveis serão analisadas através de dois estudos de caso. O primeiro consiste numa destilaria autônoma convencional de produção de etanol, que gera excedentes elétricos pelo processo de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar.

O segundo é considerado uma planta de produção de metanol, a partir da gaseificação do bagaço, acoplada a uma destilaria de etanol. Neste sistema a demanda térmica também será suprida pelo processo de cogeração com bagaço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As principais características das rotas tecnológicas de produção dos biocombustíveis etanol e metanol, bem como da tecnologia de poligeração, estão apresentadas nos itens a seguir:

2.1 Poligeração

A poligeração é um conceito que se aplicado é muito vantajoso ponto de vista energético, como também uma das soluções viáveis para as emissões excessivas dos gases de efeito estufa e o consumo elevado de combustíveis fósseis (Yamashita e Barreto, 2005).

A poligeração pode ser definida como a produção combinada de dois ou mais serviços energéticos ou produtos manufaturados, procurando atingir o

máximo aproveitamento termodinâmico das fontes naturais utilizadas. Suas principais vantagens concentram-se em três aspectos:

- Eficiência energética: devido a forte integração entre geração de potência e síntese química, o aproveitamento energético de um sistema de poligeração é maior em relação a um sistema autônomo que produz os mesmos produtos.

- Combustíveis alternativos: produtos químicos produzidos por uma planta de poligeração podem ser usados para substituir combustíveis líquidos tradicionais, por exemplo, o metanol substituindo a gasolina, ou dimetil éter sendo usado no lugar de óleo diesel.

- Redução de emissões: um sistema energético poligeração em grande escala, normalmente apresenta tecnologias de captura do gás CO₂.

- Redução dos custos: um sistema de poligeração tem como benefício a redução dos custos dos produtos finais.

Atualmente existem várias configurações propostas aos sistemas de poligeração, muitos deles focando análises econômica, energética e exergética destes sistemas.

No trabalho de Ma *et al.* (2004) foi proposto um sistema energético de poligeração que produz eletricidade e metanol, utilizando como insumo energético o carvão mineral. Através de uma análise econômica e da eficiência energética obtida pelo sistema, eles chegaram à conclusão da viabilidade do sistema.

Já em Chen *et al.* (2006) foi feita uma análise energética e de eficiência energética entre plantas de poligeração produzindo eletricidade e dimetil éter e plantas autônomas produzindo somente dimetil éter. Uma das conclusões obtidas foi uma economia energética de aproximadamente 17% para as plantas de poligeração.

2.2 Biometanol

Atualmente existem várias rotas comerciais para a produção de metanol,

bem como estão em desenvolvimento tecnologias inovadoras para a sua produção. De acordo com Cifre e Badr (2007) o processo de produção do metanol a partir da biomassa segue os seguintes passos:

I - Pré-tratamento da matéria-prima:

As fontes de biomassa mais apropriadas para esta aplicação são a madeira e os resíduos de madeira. A preparação da matéria-prima depende das características da biomassa e do gaseificador, e normalmente inclui a redução de tamanho das partículas da biomassa e a sua secagem.

II - Gaseificação da biomassa:

A gaseificação de biomassa consiste na sua transformação em gás de síntese, que é a matéria-prima da síntese catalítica de combustíveis e outros produtos. A seleção e projeto de um sistema de gaseificação de biomassa depende das características da matéria-prima, custos e desempenho do equipamento avaliado, como também da capacidade.

III - Limpeza do gás de síntese:

O gás produzido na gaseificação, também conhecido como gás de síntese ou syngas, é uma mistura de CO e H₂, mas pode conter contaminante e por isso deve ser purificado antes de ser usado nos reatores de síntese catalítica. Ele pode conter alcatrão, partículas sólidas, álcalis, compostos de enxofre (geralmente a biomassa não tem enxofre) e cloro, os quais podem corroer o equipamento e também bloquear ou corromper a ação dos catalisadores.

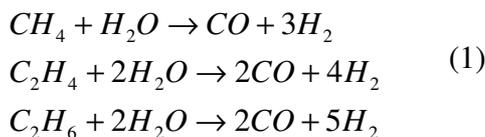
O gás pode ser limpo usando tecnologias convencionais, como resfriamento, filtração em baixa temperatura, e lavadores utilizando água. Outra possibilidade é a limpeza do gás a quente, usando filtros de cerâmicas e diversos reagentes operando a 350 – 800°C.

IV - Reforma dos Hidrocarbonetos:

Na presença de catalisadores, metano, alcatrão e outros hidrocarbonetos são reformados até CO e H₂ em altas temperaturas (830 – 1000°C).

As reações apresentadas na Equação

(1) representam o processo de reforma dos hidrocarbonetos, as reações são consideradas altamente endotérmicas e catalíticas (catalisador de níquel).



A reforma é favorecida em baixas pressões, mas elevadas pressões beneficiam economicamente (equipamentos menores). Reformadores típicos operam entre 1 e 3.5 MPa, com uma temperatura entre 830°C e 1000°C (Maiyaet *al.*, 2000).

V - Ajuste H₂/CO:

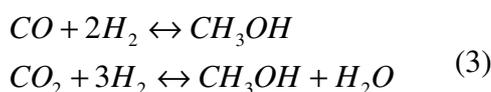
O ajuste da relação H₂/CO é realizado através da reação química do CO com H₂O, conforme mostrado na Equação (2).

Em experimentos laboratoriais tem-se alcançado bons resultados de síntese de metanol para uma relação H₂/CO pouco maior que 2 (Maiyaet *al.*, 2000).



VI - Síntese do Metanol:

O metanol é produzido pela hidrogenação dos óxidos de carbono (Equação(3)) na presença de catalisadores que são baseados em óxido de cobre, óxido de zinco ou óxido de cromo (Ouelletteet *al.*, 1995):



A primeira reação é a síntese do metanol primário. Uma pequena quantidade de CO₂ na alimentação (2 – 10%) age como um promotor da segunda reação e ajuda a manter a atividade catalítica. A estequiometria de ambas as reações é satisfeita quando o coeficiente R (Equação (4)) apresenta um mínimo de 2.03.

$$R = \frac{H_2 - CO_2}{CO + CO_2} \quad (4)$$

As reações de síntese do metanol são

exotérmicas e levam a uma diminuição líquida no volume molar. Portanto o equilíbrio é favorecido pela alta pressão e baixa temperatura. O calor liberado deve ser removido para manter a catálise e taxa de reação.

VII - Destilação:

Depois do resfriamento e separação das impurezas do gás, o metanol cru é processado numa unidade de destilação para alcançar a qualidade requerida.

2.3 Etanol de cana-de-açúcar

O processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar começa com o transporte da cana-de-açúcar da área de cultivo para a usina.

Na usina ocorre a lavagem da cana com água, sendo posteriormente transportada a um conjunto de facas rotativas e desfibradores, que preparam os caules para a moagem. Assim, a matéria-prima picada e já desfibrada é destinada às moendas para extração do caldo.

As próximas etapas do processo produtivo estão descritas a seguir (Santos, 2004):

Tratamento do caldo: O caldo passa por um tratamento primário de peneiramento, depois é submetido a um tratamento mais completo que implica na adição de cal, aquecimento e posterior decantação.

Já com o caldo livre de impurezas (areia, bagacilhos etc.) e devidamente esterilizado, o caldo está pronto para ser encaminhado para fermentação.

Preparo do mosto: O mosto é uma solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de forma a facilitar a sua fermentação. Ele é constituído de uma mistura de méis e caldo, com uma concentração de sólidos de aproximadamente 19 – 22° Brix.

Preparo do fermento: O processo de fermentação mais comumente utilizado nas destilarias do Brasil é o de Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação da levedura através da centrifugação do vinho.

Esta levedura recuperada, antes de

retornar ao processo fermentativo, recebe um tratamento severo, que consiste em diluição de ácido sulfúrico até alcançar um pH = 2.5, ou mais baixo (pH = 2), no caso de haver infecção bacteriana.

Fermentação: Nesta etapa os açúcares são transformados em álcool. As reações ocorrem em tanques denominados dornas de fermentação e os açúcares são transformados em álcool.

Durante a reação, ocorre uma intensa liberação de gás carbônico, a solução é aquecida e ocorre a formação de alguns produtos secundários como: álcoois superiores, glicerol, aldeídos, etc.

Ao terminar a fermentação, o teor médio de álcool nestas dornas é de 7% a 10%, e a mistura recebe o nome de vinho fermentado.

Centrifugação do vinho: Após a fermentação, o vinho é enviado às centrífugas para a recuperação do fermento. O concentrado do fermento recuperado, denominado leito de levedura, retorna para tratamento. O vinho, já com pequenas quantidades de leveduras, é enviado então para a destilação.

Destilação: O etanol presente neste vinho é recuperado por destilação, processo este que se baseia nos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separandoas.

3. ESTUDOS DE CASO

Em qualquer programa de diversificação produtiva na indústria sucroalcooleira a cogeração é um componente importante. Toda a energia utilizada para o processamento da cana, seja térmica ou elétrica, é possível de ser gerada na própria usina, utilizando totalmente ou parcialmente o bagaço resultante da extração do caldo. Portanto, os sistemas analisados utilizam sistemas de cogeração para a satisfação de suas demandas energéticas. Na continuação é realizada uma descrição dos estudos de casos analisados:

3.1 Sistema (Eletricidade + Etanol)

O sistema de produção de eletricidade + etanol (E+E) corresponde a uma destilaria autônoma de produção de etanol com uma capacidade de produção de 41,28 m³/h.

A demanda de energia elétrica, térmica e mecânica da planta é fornecida por um sistema de cogeração operando com parâmetros de pressão e temperatura de 8,0 MPa e 510 °C, utilizando turbinas de extração/condensação (CEST).

Os principais parâmetros de operação da planta de destilação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais parâmetros de operação da destilaria

Aquecimento	
Temperatura de entrada do vapor [°C]	115
Temperatura de saída de vapor [°C]	80
Evaporação	
Concentração inicial do caldo [°Brix]	15
Concentração final do caldo [°Brix]	22
Temperatura de entrada do vapor [°C]	115
Temperatura de saída do vapor [°C]	69
Resfriamento	
Temperatura de entrada da água [°C]	25
Temperatura de saída da água [°C]	34
Temperatura de entrada do caldo [°C]	68
Temperatura de saída do caldo [°C]	28
Fermentação	
Concentração de etanol na saída [%]	9
Destilação	
Concentração de etanol na saída [%]	95
Temperatura de entrada do vapor [°C]	115
Temperatura de saída do vapor [°C]	60
Consumo específico de vapor no processo [kgv/tc]	368

3.2 Sistema (Eletricidade + Etanol + Biometanol)

Para este estudo de caso (E+E+BM), considera-se que a planta de metanol está anexada a uma destilaria de etanol. A capacidade de produção da planta de metanol é estimada em 328 m³/dia e a planta de etanol em 2594 m³/dia.

O bagaço, um subproduto do processo de moagem da cana, tem como principais funções, neste sistema:

- Combustível para o sistema de cogeração que visa atender a demanda energética (energia elétrica, térmica e mecânica) das duas plantas;

- Matéria-prima para a produção de metanol pela rota da gaseificação do bagaço.

O sistema de cogeração é baseado em turbinas de extração e condensação, operando com parâmetros de pressão e temperatura de: 10 MPa / 520°C, 2 MPa / 300°C. Os principais parâmetros do sistema estão descritos na Tabela 2.

Na Tabela 3, estão listados os principais dados de consumo e produção da planta de metanol e da destilaria de etanol.

Tabela 2 – Parâmetros do sistema de cogeração

Desempenho dos Equipamentos e Sistema	
Eficiência da caldeira [%]	88
Eficiência isentrópica da turbina a vapor [%]	90
Potência instalada [MW]	78
Produção de vapor [t/h]	600
Combustível (Bagaço)	
Bagaço de cana-de-açúcar – PCI [kJ/kg]	7.560
Teor de umidade do bagaço [%]	50
Sistema de Moagem	
Pressão de entrada do vapor [Mpa]	2
Temperatura de entrada do vapor [°C]	320
Pressão do vapor de exaustão [Mpa]	0,170
Eficiência isentrópica da turbina [%]	60
Porcentagem de bagaço extraído da cana	27
Capacidade de moagem de cana-de-açúcar [t/h]	1.351
Condições ambientais	
Temperatura atmosférica [°C]	25
Pressão atmosférica [MPa]	0,1013

Tabela 3 – Dados de consumo e produção da destilaria de etanol e da planta de biometanol

Consumo de vapor total [kg/t cana]	369
Produção de metanol [m ³ /h]	14
Produção de etanol [m ³ /h]	114
Consumo de energia elétrica da planta de metanol [kWh/kg de metanol]	0,25

4. INDICADORES UTILIZADOS

Para realizar uma avaliação de desempenho nos dois estudos de caso, foi considerado um sistema de cogeração com bagaço em ambos os estudos, determinando índices de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da

Termodinâmica. A seguir são apresentados e definidos alguns deles (Feng et al., 1998):

4.1 Fator de Utilização de Energia (FUE)

Conhecido também como eficiência energética ou eficiência da primeira lei, é um indicador baseado no princípio físico da conservação de energia.

$$FUE = \frac{W + Q_u}{m_{comb} \times PCI} \quad (5)$$

Onde: PCI do bagaço é de 7.560 kJ/kg

4.2 Eficiência elétrica (η_e)

A eficiência de geração de potência não considera a parcela relativa ao calor de processo. A eficiência de geração é definida como:

$$\eta_e = \frac{W}{m_{comb} \times PCI} \quad (6)$$

4.3 Índice de eletricidade excedente (I_{exced})

Este índice é a razão do excedente de energia elétrica (W_{exced}) pela quantidade de cana moída (tc) em toneladas por hora:

$$I_{exced} = \frac{W_{exced}}{tc} \quad (7)$$

4.4 Eficiência exergética (η_{exerg})

Este índice se refere a eficiência calculada de acordo com a segunda lei da termodinâmica. Comparada a equação (4), tanto a energia do calor de processo é substituída pela exergia consumida pelo processo (B_p), quanto a energia do combustível é substituída pela exergia (B_f):

$$\eta_{exerg} = \frac{W + B_p}{B_f} \quad (8)$$

4.5 Eficiência global da planta (η_{global})

A fim de analisar a função produtividade de obtenção de energia e combustíveis a partir da cana-de-açúcar propõe-se dividir o somatório da energia do etanol, da eletricidade excedente e do metanol, pela energia contida na cana-de-açúcar, como mostra a equação a seguir:

$$\eta_{global} = \frac{E_{etanol} + W_{exced} + E_{metanol}}{E_{cana}} \quad (9)$$

4.6 Indicadores econômicos

Tendo em consideração que nos sistemas de poligeração analisados são obtidos múltiplos produtos com valor agregado, é preciso distribuir os custos totais da planta de forma racional e justa entre as diferentes formas de energia produzidas, já que os custos destas vão influenciar diretamente nos preços de cada um dos produtos finais (etanol + eletricidade e etanol + biometanol + eletricidade).

Para se chegar aos custos finais dos biocombustíveis e da eletricidade produzidos é preciso adotar um método justo de partição ou de rateio no sistema para que cada produto tenha um preço que reflita os custos reais envolvidos na sua produção, sem sobre-carregar um ou outro. Porém esta não é uma tarefa fácil, já que o melhor método de alocação de custos em plantas com múltiplos produtos é ainda tema de debates.

Atualmente, diversos autores apontam a exergia como a melhor forma de valorização dos fluxos de energia de uma planta. No caso dos sistemas de cogeração a exergia é a melhor forma de valorização do calor.

Neste trabalho o método de alocação de custos aplicado é baseado na Segunda Lei da Termodinâmica, ou seja, é utilizada uma metodologia de análise termoeconômica que combina o conceito de exergia com aspectos econômicos, na repartição dos custos da planta. Esta metodologia permite alocar os custos dos insumos, assim como os custos de

investimento, operação e manutenção dos equipamentos para os biocombustíveis (etanol + biometanol) e para a eletricidade em função da exergia efetivamente necessária para produzir cada um.

A alocação de custos nos sistemas de poligeração pode ser direcionada de duas formas diferentes dependendo do objetivo pretendido:

- Alocar todos os custos (cana-de-açúcar, investimento, operação e manutenção, etc.), para se chegar aos custos de produção dos biocombustíveis e da eletricidade durante o período de amortização dos equipamentos.

- Alocar os custos do combustível e da operação e manutenção, para se chegar aos custos de produção dos biocombustíveis e da eletricidade após a amortização dos equipamentos.

No presente estudo foi escolhido o primeiro método de alocação.

Formação de custos

Um sistema de poligeração pode ser considerado como um sistema ou um conjunto de subsistemas trocando fluxos (massa e energia) entre si e entre eles e o ambiente. Essas informações podem ser traduzidas em fluxos financeiros ou de custos (C).

As equações de custos representam o balanço dos fluxos contábeis tendo no primeiro membro o somatório das entradas e no segundo membro os fluxos de saída.

A composição de custos num sistema de poligeração como um único sistema, pode ser escrita de forma geral pela Equação (10), cujas parcelas estão expressas em unidade financeira pelo tempo (\$/h).

$$C_C + Z_{PP} = C_{biocombustível} + C_{eletricidade} \quad (10)$$

Como custos de entrada das plantas analisadas, têm-se o custo da cana-de-açúcar (C_C), e a parcela (Z_{PP}) referente aos custos de amortização, operação e manutenção dos equipamentos que compõem as plantas. Como produtos ou

saídas da equação têm-se os custos alocados aos biocombustíveis ($C_{biocombustível}$) e a potência elétrica ($C_{eletricidade}$).

Para calcular os custos de interesse, neste caso aos custos unitários de produção de eletricidade ($C_{eletricidade}$) e biocombustíveis ($C_{biocombustíveis}$), expressos em \$/kWh e \$/l, é conveniente que a Equação (10) seja escrita na forma da Equação (11).

$$C_C + Z_{PP} = c_{biocombustível} \cdot \dot{V}_{biocombustível} + c_{eletricidade} \cdot P_{eletrica} \quad (11)$$

Onde $\dot{V}_{biocombustível}$ é a produção horária de biocombustível e $P_{eletrica}$ é a potência elétrica líquida expressa em kW e m³/h, respectivamente.

A equação (11) não é ainda suficiente para resolver o problema de alocação de custos em sistemas de poligeração, já que são duas incógnitas ($C_{biocombustíveis}$ e $C_{eletricidade}$) que não têm relação direta entre si. O primeiro é um fluxo puramente volumétrico (ou mássico) enquanto o segundo é um fluxo energético.

Para obter o conjunto de equações auxiliares que permitam determinar os custos unitários dos principais produtos foi utilizado o equacionamento matemático proposto por Santos *et al.* (2006) e Frangopoulos (1994).

Os custos dos equipamentos que compõem as plantas dos dois estudos de caso analisados foram obtidos através de empresas fabricantes de equipamentos nacionais. Outros foram estimados através da Equação (12), que permite determinar os custos dos equipamentos com capacidade diferente a aqueles dos quais se possui informação. Neste caso, através do conhecimento das características técnicas e do custo destes equipamentos e de posse das características dos atuais da instalação, foi possível determinar o custo dos equipamentos existentes nas plantas consideradas.

$$\frac{Custo_a}{Custo_b} = \left(\frac{Capacidade_a}{Capacidade_b} \right)^R \quad (12)$$

Onde R é o Fator de escala (permite estimar o custo de um equipamento em caso que este possua dados de custo relativos à outra capacidade ou tamanho).

Durante o levantamento dos preços dos equipamentos, não estavam disponíveis todos os itens que podem ser incluídos na análise monetária, sendo necessário o estabelecimento de percentuais em relação ao preço de aquisição do equipamento. As porcentagens estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores percentuais empregados na estimativa dos custos dos equipamentos

Custos	Porcentuais [%]
Custo de Instalação	20
Custo das Tubulações	10
Custo da Instrumentação e Controle	6
Custo de Equipamentos Elétricos e Materiais	10
Custo das Construções Cíveis (Edifícios)	15
Custo de Operação & Manutenção	5

O investimento econômico requerido pelos sistemas de poligeração (E+E) e (E+E+BM) é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Investimento econômico requerido pelos sistemas de poligeração

Sistema	Investimento [Milhões US\$]
E+E	55.022.045,95
E+E+BM	163.545.468,92

O custo da planta de produção de metanol a partir de bagaço foi determinado com base no trabalho realizado por Hamelinck e Faaij (2002). A taxa de juros considerada foi de 8%

enquanto o período de amortização dos equipamentos foi de 10 anos.

5. RESULTADOS

5.1 Avaliação energética

Com base nas equações e definições apresentadas no item anterior, os principais resultados dos estudos de caso considerados (etanol + eletricidade; etanol + metanol + eletricidade) estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Índices de desempenho baseados na primeira e segunda lei da termodinâmica

Índice	Estudo de caso	
	Sistema E + E	Sistema E + E + BM
FUE (%)	67	79
η_e (%)	17	14
I_{exced} (kWh/t cana)	89,2	54,9
η_{exerg} (%)	24	22
η_{global} (%)	42	47

Na Tabela 6 pode ser observado que o fator de utilização de energia (FUE) é 15% maior para o sistema E+E+BM em relação ao sistema E+E, no entanto este indicador não permite a obtenção de conclusões adequadas sobre o desempenho dos sistemas por ser a eletricidade e o vapor energia com qualidades diferentes.

Já a eficiência elétrica (η_e), a eficiência exergética (η_{exerg}) e o índice de eletricidade excedente (I_{exced}) foram 3%, 2% e 34.3 % superiores no sistema E+E em relação ao sistema E+E+BM. Isto se justifica no fato que o processo de produção de biometanol demanda um alto consumo de energia elétrica, no processo de síntese que exige a pressurização do gás de síntese para favorecer as reações químicas de produção de biometanol. Por outro lado é necessária a realização de extrações de vapor em alta pressão e temperatura no sistema de cogeração do sistema E+E+BM para atender a demanda térmica dos processos de gaseificação de bagaço e síntese de

metanol da planta de produção de metanol.

Porém com relação á eficiência global (η_{global}), o sistema E+E+BM apresenta uma porcentagem 5 % maior que o E+E. Isto devido ao maior aproveitamento energético da cana-de-açúcar, na obtenção de 3 produtos (eletricidade, etanol e biometanol), ao contrário do outro sistema, onde produz somente 2 (eletricidade e etanol).

Portanto, em termos de aproveitamento energético global, o sistema E+E+BM apresenta-se como a melhor alternativa.

As vantagens energéticas oferecidas nos sistemas de poligeração analisados serão complementadas com a realização de uma análise econômica dos sistemas considerados

5.2 Avaliação econômica

Na Figura 1 é apresentada uma representação esquemática do processo de distribuição e formação de custos no sistema E+E de acordo como o propósito produtivo de cada subsistema que compõe a planta e a exergia consumida em cada etapa.

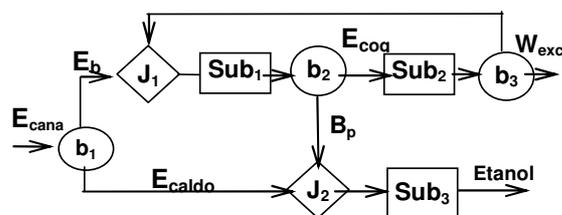


Figura 1. Alocação de custos no sistema E+E em função dos fluxos exérgicos da planta.

O subsistema 1 (Sub_1) da Fig. 1 representa todos os componentes da planta que injetam exergia no ciclo (bombas, caldeiras, desaerador, etc.), enquanto o subsistema 2 (Sub_2) representa alguns componentes que consomem exergia no ciclo (turbogeradores, condensadores, acionadores mecânicos), finalmente o subsistema 3 (Sub_3) representa as etapas do processo de produção de etanol

(aquecimento, evaporação, resfriamento, fermentação e destilação). Desta forma é possível conhecer o processo de formação de custos dos principais produtos da planta.

A equação (11) mostra que numa planta de poligeração os custos dos principais produtos estão um em função do outro, portanto, é necessário alocar o custo da cana de maneira proporcional no sistema global para evitar sobrecarregar o custo de um dos produtos obtidos. Isto implica que no caso de considerar que o bagaço que entra no sistema de cogeração tem um custo zero por ser um subproduto do processo, o custo da cana será carregado ao caldo obtido na moenda, tendo como consequência que o etanol produzido terá um custo maior ao custo real de produção enquanto a eletricidade terá um custo menor.

A Figura 2 mostra o resultado dos custos monetários unitários para os principais produtos do sistema E+E.

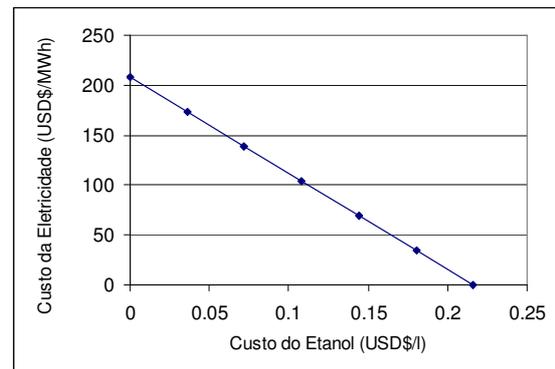


Figura 2. Custo monetário unitário dos principais produtos do sistema E+E.

Observa-se na Figura 2 que os custos da eletricidade estão em função dos custos do etanol e vice-versa. O que significa que na medida em que o custo de mercado do etanol aumenta, a produção do mesmo compensa economicamente a diminuição eventual no custo de compra da eletricidade excedente comercializada pelo sistema. De igual forma preços altos de compra de eletricidade excedente do sistema compensam economicamente diminuições no preço do mercado e do etanol.

Semelhante ao apresentado na

A implementação de sistemas de poligeração nas cadeias produtivas de biocombustíveis permitiram o aumento na sustentabilidade dos mesmos ao incrementar a eficiência na utilização dos recursos demandados pelo processo dado o melhor aproveitamento energético global da planta.

Economicamente foi demonstrado que nas plantas de poligeração, o custo econômico de um produto no mercado pode compensar a diminuição do custo de outro produto, o que permite uma maior segurança na rentabilidade econômica da planta.

A integração de uma planta de produção de metanol a partir de bagaço a uma destilaria convencional mostra-se como uma alternativa de diversificação da produção de biocombustíveis no Brasil.

Espera-se que nos próximos anos, o desenvolvimento tecnológico das tecnologias de produção de biometanol pela rota da gaseificação diminua os custos de produção deste biocombustível, o que aumentaria a viabilidade econômica de plantas de biometanol anexas, nas condições do setor sucroalcooleiro brasileiro.

7. REFERÊNCIAS

CHEN, B., JIN, H.G.,GAO, L.2006. Study of DME/power individual generation and polygeneration.*Journal of Engineering Thermophysics*, 27, 721-724.

CIFRE, P. G., BRAD, O. 2007. Renewable hydrogen utilization for the production of methanol.*Energy Conversion and Management*, 48, 519-527.

FENG, X.,CAI, Y., QIAN, L. 1998. A new performance criterion for cogeneration system.*Energy Conversion and Management*, 39, 1607-1609.

FRANGOPOULOS, C.A. 1994. Application of the thermoeconomic

functional approach to the CGAM problem. *Energy*, 19, n° 3, 323-342.

HAMELINCK, C. N., FAAIJ, A. C. 2002. Future prospect for production of methanol and hydrogen from biomass.*Journal of Power Sources*, 111, 1-22.

MA, L. W., NI, W. D., LI, Z., REN, T. J. 2004. Analysis of the polygeneration system of methanol and electricity based on coal gasification.*Power Engineering*, 24, 451-456.

MAIYA, P. S., ANDERSON, T. J., MIEVILLE, R. L., DUSEK, J. T., PICCIOLO, J. J., BALACHANDRAN, U. 2000. Maximizing H₂ production by combined partial oxidation of CH₄ and water gas shift reaction.*Applied Catalysis A:General*, 196, 65-72.

METHANEX, Methanol Price Sheet 2009 [Online]. Available: www.methanex.com/products/methanolprice.html [Accessed 10 June 2009].

OULLETTE, N.,ROGNER, H. H., SCOTT, D. S. 1995. Hydrogen from remote excess hydroelectricity. Part II: Hydrogen peroxide of biomethanol. *Int. J. Hydrogen Energy*, 20, 873-880.

SANTOS, J.J., NASCIMENTO, M.A., LORA, E.E. 2006.On the thermoeconomic modeling for cost allocation in a dual-purpose power and desalination plant. *In Proceedingof ECOS 2006*, Crete, Greece.

SANTOS, M. M. 2004. *Avaliação da expansão da produção de etanol no Brasil*, Centro de Estudos Estratégicos, Brasília.

YAMASHITA, K., BARRETO, L. 2005. Energyplexes for the 21st century: coal gasification for co-producing hydrogen, electricity and liquid fuels. *Energy*, 30, pp. 2453-2473.