

ANÁLISES EXERGÉTICAS, PRELIMINARES, DA COGERAÇÃO A PARTIR DE CULTIVOS FLORESTAIS E DA UTILIZAÇÃO DE CULTIVOS FLORESTAIS COMO FONTE PRIMÁRIA PARA CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

Sérgio Inácio Gomes
sergioig@copel.com
Copel - Companhia Paranaense de Energia
Luiz Mário Matos Jorge
Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani
Paulo Roberto Paraíso
Wagner André dos Santos Conceição
Cid Marcos Gonçalves Andrade
lmmj@deq.uem.br
ravag@deq.uem.br
paulo@deq.uem.br
wagner@deq.uem.br
cid@deq.uem.br
Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Química

Resumo. As reservas fósseis irão se esgotar, num futuro próximo, ou terão os seus custos proibitivos para serem utilizadas como combustíveis e na geração de energia elétrica. Além do que, o uso de combustíveis fósseis, sob qualquer forma, têm sido danoso para o meio ambiente. Neste trabalho fazemos a análise exergética, preliminar quantitativa, de três alternativas de utilização da energia proveniente de cultivos florestais (madeira). A primeira com a conversão direta da madeira em energia elétrica, a segunda usando metade da madeira para gerar energia elétrica e vapor para ser usado no processo de gaseificação, com a outra metade, seguido com a geração de energia elétrica numa célula combustível; e a terceira usando usando uma planta de coogeração acoplada a gaseificação da madeira, e a célula combustível. Como, teoricamente, haveria de se esperar, devido a ter a priori, menos fontes de irreversibilidades, a conversão direta da energia dos cultivos florestais em energia elétrica se mostrou mais favorável do ponto de vista exergético, e a terceira a pior alternativa. Entretanto, não se pode descartar a possibilidade da utilização da energia proveniente dos cultivos florestais como fonte primária em células combustíveis, isto irá depender em que situações operacionais se pretende utilizar a energia. Palavras-chave: Cultivos florestais, Células combustíveis, Análise exergética, Cogeração, Gaseificação

EXERGY ANALYSIS, PRELIMINARY, OF COGENERATION FROM FORESTS PLANTATIONS AND UTILIZATION OF FOREST PLANTATIONS HOW PRIMARY SOURCE FOR FUEL CELL

Abstract. The fossil sources will be exhausted in the near future or have their costs prohibitive for use as fuel and to generate electricity. Furthermore, the use of fossil fuels in any form, have been harmful to the environment. In this work we make the exergy analysis, preliminary quantitative, for three alternatives using of energy from forest plantations (wood). The first with the direct conversion of wood energy in power; in the second, half of the wood is used to generate electricity and steam to be used in the process of gasification, with the other half, followed with the generation of electric power in fuel cell; and the third using a cogeneration plant coupled to gasification of wood, and fuel cell. How, in theory, would be expected due to have a priori, less sources of irreversibility, the direct conversion of energy into electric energy from forest plantations was more favorable from the exergy point of view, and the third is the worst alternative. However, we can not discard the possibility of the use of energy from the forest plantations as a primarysource in fuel cell; this will depend on operational situations where you want to use the energy. Keywords: Forest plantations, Fuel cells, Exergetic Anlysis, Cogeneration, Gasification.

1. INTRODUÇÃO

Os depósitos fósseis deverão se esgotar ou terão seus preços proibitivos para o uso como combustíveis num futuro próximo, assim como temos a urgente necessidade de diminuir o seu uso, devido aos evidentes problemas ambientais e/ou climáticos que seu uso tem causado ao planeta. Desta forma, faz-se mister o estudo e desenvolvimento de alternativas energéticas renováveis, menos poluentes e socialmente mais propícias. Segundo White & Plaskett (1981) a biomassa vegetal, na forma de madeira ou rejeitos secos, foi a primeira e durante muito tempo, a universal e única forma de combustível usado para o preparo de alimentos, aquecimento, e mais tarde, para a manufatura e até recentemente era abundante. Com o crescimento populacional e a demanda industrial estes suplementos se tornaram escassos e, assim, tivemos a necessidade de se mudar para combustíveis com maior densidade energética e de uso mais conveniente, como os combustíveis fósseis. Entretanto, o uso abusivo de combustíveis de origem fóssil tem causado problemas climáticos, que senão irreversíveis, neste momento, o serão com certeza no futuro, assim volta-se a atenção para fontes de energia limpas e renováveis como a biomassa. O problema da grande geração de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis, que é o principal responsável pelo aquecimento global, é evidente. Assim, além da necessidade de se diminuir o consumo de combustíveis fósseis temos a necessidade de se sequestrar o CO₂ que tem se acumulado no planeta; conforme Randal & Dell (2008) tivemos um acréscimo de 25% na atmosfera terrestre do século XVIII até hoje, passamos de 280-300 ppmv (partes por milhão em volume) para 360-380 ppmv. Vanek & Albright (2008) propõe três principais formas de sequestro: o sequestro indireto (feito pelos cultivos florestais); o sequestro direto via estocagem geológica e o sequestro direto via conversão do CO₂ em materiais inertes. Cada um destes métodos apresentam vantagens e desvantagens. Do ponto de vista ecológico e social acreditamos que o sequestro indireto é o mais viável, principalmente para os países tropicais, onde temos grande incidência solar, e que tenham grandes extensões de terras agricultáveis. Muitas têm sido as formas e alternativas de uso de energias renováveis, como pode-se ver em Aßmann et al (2006) e em Rosillo-Calle et al (2007), porpostas. As principais contribuições apresentadas nestes livros são de experiências ou estudos de casos para diferentes regiões ou países. São contribuições importantes, no entanto carecem, na maior parte delas, de possibilidade de generalização. A possibilidade do uso de cultivos florestais para a geração de energia elétrica tem sido alvo de alguns estudos como pode-se encontrar em Hiser (1977); Klass (1981), White & Plaskett (1981), estes estudos, no entanto, são feitos mais voltados para os resíduos gerados em florestas do que propriamente em ter-se as árvores, da floresta, como fontes diretas para a geração de energia elétrica. Alguns trabalhos foram feitos neste sentido por Gomes et al (2006), Gomes et al. (2007) e Gomes (2007). A eletricidade é a energia cinética dos elétrons e não pode ser estocada desta forma. Ela pode, entretanto, ser transformada em energia potencial na forma de componentes químicos (como em uma bateria). O Hidrogênio, diferentemente da bateria, é um material já na forma de energia potencial e pode ser armazenado até que dele se queira fazer uso, que pode ser como combustível. As células combustíveis são aparatos de conversão eletro-química, que produzem eletricidade a partir de combustíveis. As células combustíveis a Hidrogênio, usam-no como combustível e o Oxigênio como oxidante. As células combustíveis, diferentemente das baterias podem ser alimentadas continuamente com o combustível. Krüger (2006) apresenta as quatro formas de se obter o Hidrogênio: Métodos Químicos, Eletrólise, Métodos Térmicos e Processos de Conversão Biológicos. Em todos os métodos existe, evidentemente, a necessidade de se usar energia. Rosen & Scott (1998) fazem uma análise energética e exérgica dos métodos de obtenção de Hidrogênio: reforma do vapor de metano, gaseificação do carvão, eletrólise e processos integrados. O CENBIO (2002) faz um estudo do Estado da Arte da Gaseificação de Biomassa. Tosonsen et (2008) faz análises exérgicas de cinco alternativas comerciais ou plantas pilotos de gaseificadores de Biomassa. De & Biswal (2005) apresenta a possibilidade de combinação de ciclo de coogeração com gaseificação do Carvão. Gosh & De (2006) apresentam uma análise exérgica de uma planta de coogeração usando a gaseificação do Carvão, assim como um ciclo combinado de potência turbina-gás e célula de combustível.

Neste trabalho analisamos, do ponto de vista da exergia, um ciclo de potência convencional, uma segunda alternativa, um ciclo de cogeração que partilha o combustível com um processo de gaseificação e célula combustível, e uma abordagem próxima a executada por Gosh & De (2006a) e (2006b), onde temos um processo de gaseificação seguido por uma planta de geração de potência e a seguir uma célula combustível. As células combustíveis usadas na análise é a SOFC (solid oxide fuel cell) e a gaseificação é executada num equipamento padrão que usa uma pequena energia externa para operar. Como era de se esperar, teoricamente, a primeira alternativa se mostra mais favorável do ponto de vista exergético, a segunda pode ser também uma boa alternativa, a terceira nos parece que deve ser descartada, do ponto de vista exergético.

2. AVALIAÇÃO DOS ESQUEMAS PROPOSTOS

2.1 Definições e equacionamento básico

A exergia de cada corrente, E , é composta por quatro termos:

$$E = E_p + E_c + E_f + E_q \quad (1)$$

As energias potencial (E_p) e cinética (E_c) vamos desprezar nesta análise. A exergia física e químicas são calculados em relação ao “estado morto”, isto é, em relação as condições ambientais normais, ou seja, $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $P_0 = 1 \text{ atm}$. E podem ser definidas como o máximo de exergia a ser obtido quando o sistema passa de um estado específico até o “estado morto” e atinja o equilíbrio com o meio ambiente, por conveniência pode-se definir a exergia térmica que é a soma da exergia física com a exergia química, que aqui será E . Para o cálculo da exergia térmica é necessário o conhecimento da composição química do combustível, assim como é necessário se ter as composições dos gases de saída e as exergias químicas do ar de combustão, da água e dos vapores formados. Se não temos energia, na forma de calor, sendo transferido do sistema para as vizinhanças e nem das vizinhanças para o sistema, a exergia entrando no sistema é a soma das exergias entrando com as correntes mais o trabalho que entra:

$$E_e = \sum (E_i)_e + \sum (W_i)_e \quad (2)$$

Onde o subíndice i refere-se a qualquer corrente ou trabalho que entre. De forma similar podemos escrever para as saídas:

$$E_s = \sum (E_i)_s + \sum (W_i)_s \quad (3)$$

A exergia perdida é a diferença entre a exergia que entra (E_e) e a exergia que sai (E_s):

$$I = E_e - E_s \quad (4)$$

A eficiência exergética pode ser definida como:

$$\psi = \frac{E_s}{E_e} \quad (5)$$

2.2 Alternativas propostas para análise

A escolha das três alternativas se deu em se partir de uma forma mais simples até uma mais complexa em termos de integração mássica e energética, o que vem a ser também integrada em termos exergéticos, ou que aparentemente seria, pelo menos no que se concerne as fontes de destruição de exergia externas, as internas serão discutidas na seqüência. Alternativa I: Aqui tratamos de uma planta de potência padrão, Fig. 1, tendo como combustível a madeira, assume-se que a madeira esta em condições de ser queimada. Admitimos que a turbina gera diretamente potência.

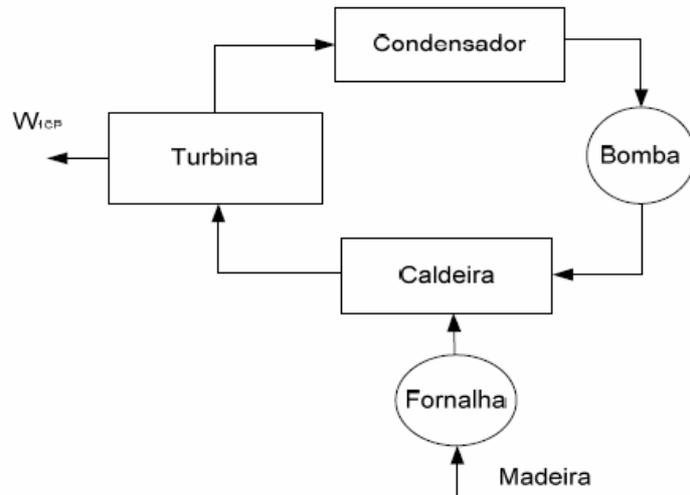


Figura 1. Esquema da alternativa I

A eficiência exergética do sistema de geração de vapor pode ser expressa por:

$$\psi_1 = \frac{\dot{W}_{tcp}}{\dot{m}.e_M} \quad (6)$$

Onde ψ_1 é a eficiência exergética do processo global, \dot{W}_{tcp} é a potência desenvolvida pelo ciclo, \dot{m} é a vazão mássica do combustível, no caso a madeira, e_M é a exergia específica da madeira.

Alternativa II:

Esta alternativa, Fig. 2, considera que o conteúdo do combustível é dividido, sendo que metade alimenta o gaseificador e a outra metade o ciclo de potência (no caso o ciclo é um ciclo de cogeração, pois parte do vapor da turbina é usado no gaseificador). O gaseificador é um gaseificador padrão que necessita de pouca energia externa para funcionar, e a célula combustível é do tipo SOFC (solid oxide fuel cell). Temos neste caso geração de potência na turbina e na célula combustível.

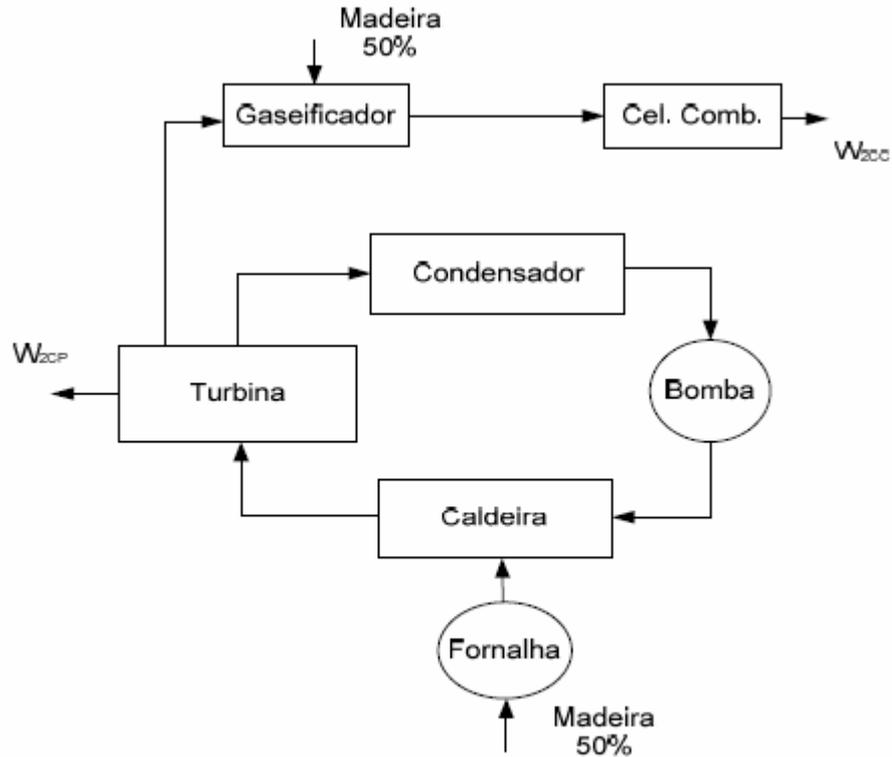


Figura 2. Esquema da alternativa II

Para o ciclo de potência a eficiência exergética consideramos a mesma da alternativa anterior, mesmo com a retirada de parte do vapor da turbina para ser usada no gaseificador, para a nossa análise isto não irá alterar os resultados de forma significativa.

A eficiência exergética do gaseificador é:

$$\psi_{2G} = \frac{e_G}{e_M} \quad (7)$$

Onde ψ_{2G} é a eficiência exergética do gaseificador, e_G é a exergia específica dos gases na saída do gaseificador e e_M é a exergia específica da madeira, conforme já definido acima.

A eficiência exergética da célula combustível é:

$$\psi_{2CC} = \frac{W_{2CC}}{E} \quad (8)$$

Onde ψ_{2CC} é a eficiência exergética da célula combustível, W_{2CC} é o trabalho desenvolvido pela célula combustível e E é a exergia total dos gases na saída do gaseificador.

Alternativa III:

Nesta alternativa, Fig. 3, a aparentemente mais integrada em termos de massa e energia, nos temos a madeira alimentando o gaseificador, os gases que saem do mesmo servem como fonte de energia para o ciclo de coogeração acima e depois seguem para a célula combustível onde temos a geração de potência.

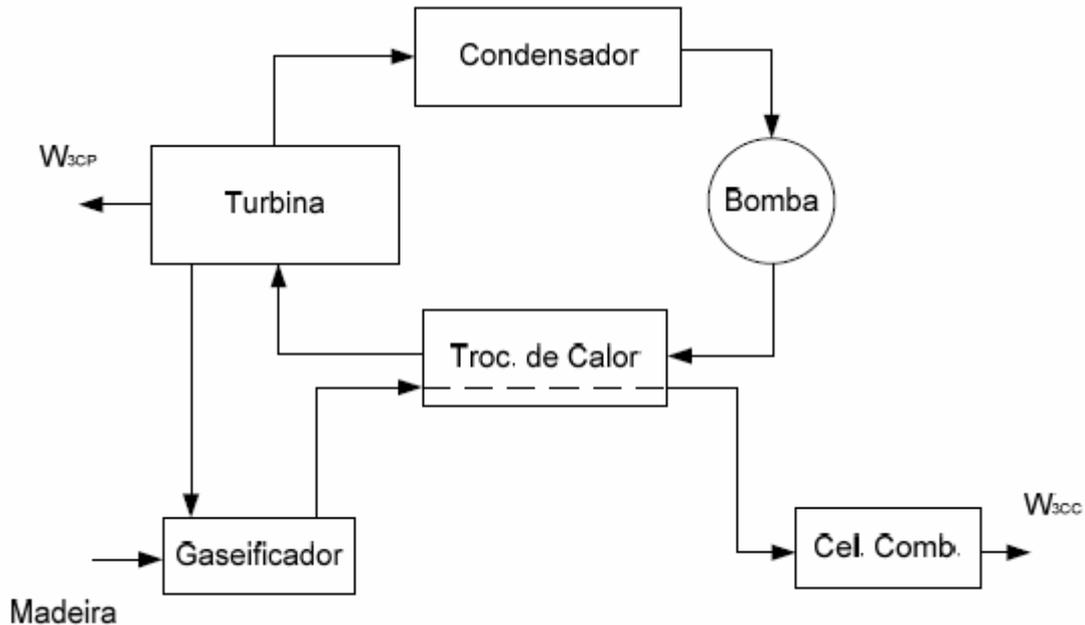


Figura 3. Esquema da alternativa III

Para esta alternativa consideramos as válidas as mesmas eficiências exergeticas definidas pelas Eq. (6), (7) e (8).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir fazemos uma análise do ponto de vista exergetico para as alternativas e quando necessário avaliamos a geração de potência. As análises são feitas de forma preliminar usando dados da literatura.

3.1 Avaliação da alternativa I

Segundo Kanoglu et al. (2007), para um exemplo hipotético, muito próximo da realidade temos $\eta_1=24,7\%$. Em Szargut et al. (1988) $\eta_1= 20,2\%$, segundo apresentado em Moran & Shapiro (2008), $\eta_1= 30,0\%$. Vamos admitir aqui um valor médio, $\eta_{1M}= 25,0\%$. Tanto Morgan & Shapiro (2008) quanto Szargut et al. (1988) avaliam, e mostram em exemplos hipotéticos, que é possível se elevar em aproximadamente 10 pontos a eficiência exergetica, com coisas simples, que se tem normalmente na prática; isto é, alterações na planta para torná-la mas eficiente, como pré-aquecimento do ar de combustão, com o superaquecimento e/ou reaquecimento do vapor e pré-aquecimento da água de entrada da caldeira. Assim o valor da eficiência exergetica para os ciclos de potência estão em torno de 35,0%, que a podemos chamar de eficiência “ideal”. Este tipo de planta tenta evitar perdas de exergia interna e externamente.

3.2 Avaliação da alternativa II

Para o ciclo de potência consideramos a mesma da alternativa anterior, com a mesma consideração. Ptasinski et al. (2007) apresenta o valor de $\Psi_{2G}=75,0\%$ para a madeira, não deixa claro qual o tipo de madeira, mas os valores devem ser próximos a isto. Akkaya et al (2007) apresenta o valor de $\Psi_{2CC}=43,0\%$. Assim a eficiência exergética para estas duas etapas será: $\Psi_{2GX}\Psi_{2CC}=31,4\%$. Como metade da massa de madeira foi usada para gerar potência no ciclo de potência, que com as implementações de regeneração tem uma eficiência exergética de 35%, e a outra metade da madeira foi usada para gerar potência a partir dos gases do gaseificador que alimentam a célula combustível, conclui-se que a quantidade de potência a ser gerada nesta alternativa é inferior a alternativa I.

3.3 Avaliação da alternativa III

Para esta alternativa utilizamos também os mesmos valores de eficiências exergéticas dos casos anteriores. Segundo o que Ghosh & De (2006a) mostram em seu trabalho (no trabalho a planta é um pouco mais complexa, mas acreditamos que isto não altera a nossa análise), a potência gerada pela célula combustível numa melhor condição de operação é de 18,5 MW e a potência gerada no ciclo de potência, nesta mesma condição de operação é de 3,0 MW. Se considerarmos as Equações (6) e (8). No caso da Eq. (6), aqui vamos considerar a eficiência como "ideal", o denominador neste caso é a exergia que vem dos gases da saída do gaseificador, assim esta exergia é de $3,0/0.35=8.6$ MW. Usando-se a equação (8) vemos que a exergia que foi usada pela célula combustível foi de $18.5/0.43=43$ MW. Portanto, a exergia que havia saído do gaseificador é a soma destas exergias: 51,6 MW. Ora, se essa exergia tivesse sido usada diretamente na célula combustível, a potência que seria gerada é $51,6 \times 0.43=22.2$, que é maior do que a que foi obtida na planta $18,5+3,0=21,5$. Desta forma não vemos sentido no acoplamento deste ciclo de um ciclo de potência, uma vez demonstrado que ele está em série com uma etapa que tem maior eficiência exergética à frente.

3.4 Comparação entre as alternativas I, II e III e comentários

Como teoricamente poderia se prever a alternativa I se mostrou a mais eficiente, desde que feitas as modificações para se chegar a eficiência exergética "ideal". Do que foi analisado chegase a conclusão de que do ponto de vista exergético é mais vantajoso se gerar potência diretamente da queima da madeira.

A alternativa II não é tão desvantajosa, vai depender da situação operacional. Uma alternativa que não avaliamos, mas que é fácil de se chegar a uma conclusão seria a conversão direta da madeira no gaseificador e os gases para a célula combustível gerando eletricidade, a eficiência exergética deste processo estaria perto de 31%, e a energia a ser gasta no gaseificador poderia vir do próprio processo, quando em regime permanente.

Com relação a alternativa III não vemos possibilidade de sucesso, os autores dos trabalhos devem ter se equivocado em seus cálculos. Quando uma tecnologia nova aparece, normalmente se busca a sofisticação de procedimentos e algumas vezes se esquece de fundamentos básicos.

Levando-se em conta as referências consultadas, nos parece que o processo de gaseificação para a produção de combustível para as células combustíveis deve se restringir, preferencialmente, a combustíveis fósseis, desde que acoplado a um processo de purificação dos gases, ou no caso de biomassa, materiais com conteúdo energético mais baixo do que a madeira e de mais difícil combustão.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho procuramos usar uma ferramenta altamente poderosa na análise de ciclos termodinâmicos, que é a análise exergética. Fizemos isto para avaliar três possibilidades de arranjos para se gerar potência (eletricidade) a partir da madeira, englobando nestas alternativas, ciclos de potência, gaseificadores e células combustíveis. A alternativa que se mostrou mais viável foi a aparentemente mais simples. No entanto, somente esta análise preliminar não é definitiva, outros fatores devem ser levados em conta.

REFERÊNCIAS

- Akkaya, A. V. et al. Exergetic performance coefficient analysis of a simple fuel cell system. *Int. J. of Hydrogen Energy*, n. 32, pp. 4600–4609.
- Aßmann, D., et al., eds., 2006. *Renewable Energy: A Global Review of Technologies, Policies and Markets*. Earthscan. 320 p.
- CENBIO. 2002. *Estado da Arte da Gaseificação. Relatório Técnico*. São Paulo.
- De, S. & Biswal, S. K. Thermodynamic analysis of a coal gasification and split Rankine combined cogeneration plant. Part 2: exergy analysis. *J. Power and Energy*, v. 29, pp. 179-185.
- Gomes, S. I., et al. 2006. Análise Preliminar da Viabilidade de Cultivos Florestais para Produção de Energia Elétrica. *Espaço Energia*. n. 4, pp. 1-10.
- Gomes, S. I., et al. 2007. Análise de Viabilidade de Plantações Florestais para Produção de Energia Elétrica. In: 3º Encontro Técnico-Científico da 7ª Ecolatina. Belo Horizonte, pp.1-6
- Gomes, S. I., 2007. Análise de Viabilidade de Cultivos Florestais para fins de Produção de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá- Departamento de Engenharia Química. 121 p.
- Ghosh, S. & De, S., (2006a). Energy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell. *Energy*. n. 31, pp. 345–363.
- Ghosh, S. & De, S., (2006b). Exergy analysis of a cogeneration plant using coal gasification and solid oxide fuel cell. *Int. J. Energy Res.* n. 30, pp. 647–658.
- Hiser, M. L. ed., 1977. *Wood Energy: Proceedings of Governor William G. Milliken's Conference*. Ann Arbor Science. 152 p.
- Kanoglu, M., et al., (2007). Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants. *Energy Policy*. n. 35, pp. 3967–3978.
- Klass, D. L. ed., 1981. *Biomass as a Nonfossil Fuel Source*. American Chemical Society. 564 p.
- Kruger, P., 2006. *Alternative Energy Resources: The Quest for Sustainable Energy*. John Wiley & Sons. 248 p.
- Ptasinski, K. J. Et al. (2007). Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy*. n. 32, pp. 568–574.
- Moran, J. M. & Shapiro, H. N. (2008). *Fundamentals Thermodynamics*. John Willey & Sons, Inc. 928 p.
- Randal D. A. J. & Dell, R. M., 2008. *Hydrogen Energy: Challenges and Prospects*. RSC Publishing.
- ROSEN, M. A. & SCOTT, D. S. 1998. Comparative efficiency assessments for a range of Hydrogen production processes. *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, n. 8, pp. 653-659.
- Rosillo-Calle, F., et al., eds., 2007. *The Biomass Assessment Handbook*. Earthscan. 270 p.
- Szargut, J. Et al. (1988). *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metalurgical Processes*. Springer-Verlag. 332 p.
- Toonssen, R., et al, 2008. Exergy analysis of hydrogen production plants based on biomass gasification. *Int. J. Hydrogen Energy*. v. 33, pp. 4074–4082.
- Vanek, F. M. & Albright, L. D., 2008. *Energy Systems Engineering: Evaluation & Implementation*. McGraw-Hill. 532 p.
- White, L. P. & Plaskett, L. G., 1981. *Biomass as Fuel*. Academic Press. 211 p.