



ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE CICLO DE POTÊNCIA COM COGERAÇÃO PARA A INDÚSTRIA MADEIREIRA

Paulo C.O.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, IEM.EFEI
Av. BPS 1303 CEP 37500

Marco A. R. N.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, IEM.EFEI
Av. BPS 1303 CEP 37500

***Resumo.** Um estudo de um ciclo de potência aplicado à indústria madeireira é apresentado. A energia elétrica e o calor de processo gerados no ciclo simples de turbinas a gás com cogeração são analisados, sendo o combustível biomassa gaseificada a partir dos resíduos gerados no processo de beneficiamento da madeira, para diferentes temperaturas dos gases na entrada da turbina e razão de pressão do ciclo. Considera-se a turbina operando no ponto de projeto. As indústrias do setor madeireiro serão representadas pelas serrarias, indústrias de compensados e aglomerados. Finalmente é feita uma análise econômica onde se expressam os custos da energia produzida por este ciclo para distintos pontos de operação do do mesmo, considerando diferentes parâmetros térmicos e operacionais do ciclo.*

***Palavras-chave:** Energia, Ciclo de potência, Cogeração*

1-Introdução

A geração de eletricidade a partir de fontes renováveis tem chamado substancial atenção neste final de século. Dentre esta fontes, as fontes renováveis de energia, que utilizam de biomassa como combustível tem assumido um papel relevante, inspirando uma série de estudos, pesquisas e desenvolvimento de projetos. Com o desenvolvimento tecnológico é notável, principalmente na década de 90, o interesse em consolidar a tecnologia de gaseificação de biomassa conjugado com turbinas a gás nos ciclos térmicos, que em faixas moderadas de potência apresentam altas eficiências e baixos custos de capital.

No Brasil, com as mudanças que vêm ocorrendo na legislação do setor elétrico, abrindo espaço para negociação de excedentes de energia a preços atrativos, também têm contribuído para viabilização e implementação de sistemas de cogeração para suprimento das demandas de eletricidade e calor de processo. A aplicação desta tecnologia tem mostrado suas potencialidades técnicas, econômicas e ambientais, sendo que a última não será considerada neste estudo, visto que é uma forma mais racional de se utilizar os recursos energéticos.

1.1 Caracterização do problema

A indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos no processo de beneficiamento da madeira. Esta geração ocorre nos processos normais ou mesmo antes de a madeira ser introduzida no processo propriamente dito, pois, através de inspeções, conclui-se que determinadas peças não atingirão os requisitos de qualidade para atender as exigências do mercado consumidor, e tornando-se resíduo juntamente com as costaneiras, aparas, pó de serra etc.

Atualmente ainda é possível constatar que neste segmento industrial existem uma série de indústrias que queimam esses resíduos a céu aberto, simplesmente para livrarem-se do volume acumulado em seus parques de atividade. É importante observar que neste ramo de atividade demanda-se eletricidade para o acionamento das máquinas e calor de processo para promover a secagem da madeira que proporciona, entre outras vantagens, maior durabilidade e estética da mesma. A implantação de um sistema de cogeração utilizando resíduos oriundos do processo de beneficiamento mostra-se como uma alternativa para o auto suprimento destas demandas energéticas. Além disso, com o atual quadro sócio-econômico brasileiro, por diversas razões, constata-se um crescimento na demanda de energia elétrica, o que requer uma ampliação nos sistemas de fornecimento, cujas concessionárias tem despendido esforços para acompanhar tal crescimento, principalmente devido à escassez de recursos para ampliação do parque gerador. Finalmente vale lembrar que o Brasil se encontra próximo à linha do equador privilegiando-se dos elevados índices solarimétricos e de pluviosidade que são determinantes para o crescimento da biomassa.

2. Indústria Madeireira

É o ramo da atividade que possui, atualmente, uma posição expressiva na produção de madeira beneficiada no Brasil, processando por volta de 14% do total da madeira advinda do setor florestal que engloba, também, o fornecimento para os setores de Celulose e Carvão Vegetal, conforme dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura (1990).

As indústrias desse setor, produzem grande quantidade de resíduos no processo de beneficiamento da madeira. Foram utilizados, conforme a “Tabela 1” os seguintes valores baseados nos dados da FAO (1990) para o percentual de geração de resíduos em função do volume recebido para o beneficiamento.

Tabela 1. Percentual médio de geração de resíduos

Tipo de indústria	Percentual de geração de resíduos
Serrarias	50
Fábrica de compensados	40
Fábrica de aglomerados	30

Essas indústrias demandam energia elétrica. A Tabela 2, mostra o consumo médio de energia elétrica e térmica por metro cúbico de madeira processada e as respectivas potências demandadas para cada modalidade de indústria, segundo dados da FAO (1990). Para a determinação dessas potências considerou-se um volume de 200m³ processados diariamente, de modo contínuo, utilizando-se do valor do percentual de geração de resíduos conforme a “Tabela 1”.

Tabela 2. Consumos específicos e demandas de eletricidade e calor de processo para cada segmento da indústria madeireira

	Calor		Eletricidade	
	Específico (kWh/m ³)	Potência (kW)	Específica (kWh/m ³)	Potência (kW)
Serrarias	472	3933	72	600
Compensados	1541	12842	230	1917
Aglomerados	819	6825	180	1500

O calor de processo, geralmente, deve ser entregue para o sistema na forma de vapor saturado com temperatura compreendida na faixa de 100 a 150°C.

3. Ciclo estudado

Neste trabalho apresenta-se um estudo de um ciclo simples proposto por Boyce (1982), com turbinas a gás utilizando biomassa gaseificada como combustível, em um sistema de cogeração. Optou-se por estudar este ciclo devido à sua simplicidade, requerendo menores investimentos, e ainda tendo em vista que esta configuração é uma alternativa nova para suprimento das demandas energéticas da indústria madeira caso venha a se confirmar.

Neste ciclo, conforme mostra a “Fig. 1”, o ar necessário à gaseificação é fornecido por um soprador(B). Os gases gerados no gaseificador(G) submetem-se a um processo de resfriamento(TC) para que seja feita a limpeza dos mesmos antes de serem enviados à câmara de combustão(CC). Para se obter uma maior eficiência energética introduziu-se um trocador(TC) de calor entre o gaseificador e o compressor de gases (C), com a finalidade de aproveitar o calor sensível dos gases na saída do gaseificador, pré-aquecendo a água de alimentação da caldeira de recuperação(CR), assim como promovendo o resfriamento do mesmo.

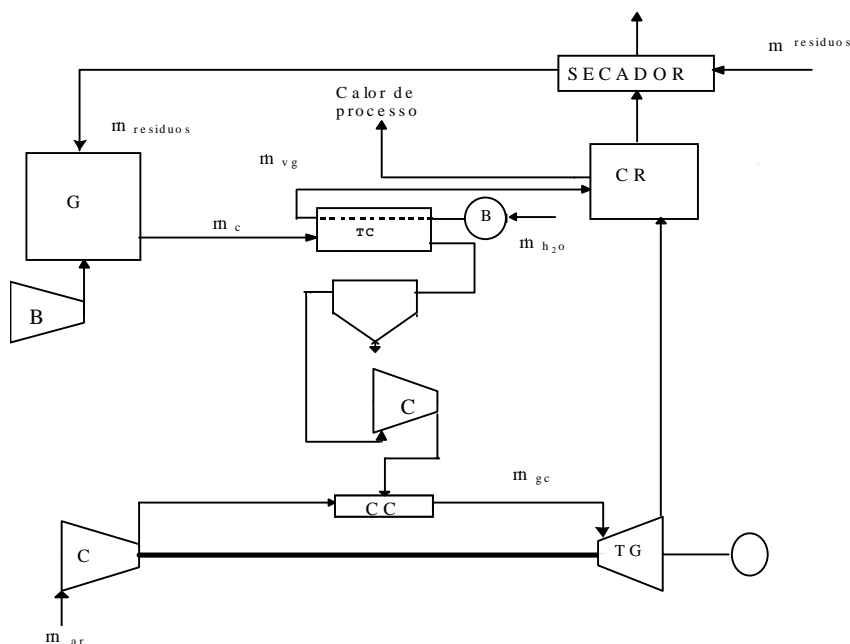


Figura 1 - Ciclo simples de turbinas a gás

Após o resfriamento e limpeza, é realizada a compressão desses gases, para que sejam introduzidos na câmara de combustão juntamente com o ar a alta pressão, fornecido pelo

compressor principal. Estes, ao deixarem a câmara de combustão, estão sob a forma de gases produtos da combustão em alta temperatura, expandem-se na turbina gerando eletricidade. Na saída da turbina, normalmente, os gases estão a alta temperatura, próprios para serem introduzidos em uma caldeira de recuperação, onde se permite gerar vapor para o processo de beneficiamento da madeira. Devido à alta demanda de calor de processo, essas indústrias geralmente necessitam de uma complementação térmica através da queima suplementar, utilizando um combustível fóssil na caldeira de recuperação. Nos ciclos propostos, são utilizados gases da combustão na saída da caldeira de recuperação, a uma temperatura suficiente para promover a secagem dos resíduos, antes de serem enviados ao gaseificador propriamente dito.

4. Metodologia

Fez-se uma modelagem térmica do ciclo aplicando-se basicamente a primeira lei da termodinâmica e equação da continuidade para determinação dos principais parâmetros térmicos considerando o regime permanente. Na modelação realizada, os componentes do ciclo, são considerados como “caixas pretas”, focalizando-se a atenção para os parâmetros de entrada e saída destes. Os resultados foram obtidos a partir de um programa desenvolvido para este fim, contendo uma serie de sub-rotinas específicas para os componentes integrantes do ciclo e o programa principal o de gerenciamento.

Quanto aos resultados, dentre os diversos intermediários exibidos pelo programa, enfatizou-se a energia elétrica gerada e o calor útil gerados para diferentes razões de pressão do ciclo e temperaturas na entrada da turbina a gás. A análise econômica foi obtida realizando-se um levantamento dos custos de investimento e operacionais e dentre os diversos métodos de alocação existentes optou-se por utilizar um método de partição de custos em base energética, com intuito de se determinar um valor monetário por unidade de energia gerada, ou seja, para eletricidade US\$/kWh e para calor de processo US\$/MJ.

5. Resultados Térmicos

Os resultados térmicos foram obtidos através de simulações do ciclo, a partir de uma série de parâmetros como, temperatura ambiente, umidade relativa, altitude local, temperatura máxima na entrada da turbina a gás (TET), perda de pressão nos componentes da turbina e do ciclo, razão de pressão do ciclo (R_p), eficiências da turbina/compressor, frações molares dos combustíveis, volume de madeira processado diariamente. Além disso foram feitas considerações na modelagem térmica deste ciclo, algumas destas se relacionam serão relacionadas a seguir:

- Considerou-se que o gás ao sair do sistema de limpeza possui uma temperatura de 80 °C e possui características próprias para ser comprimido para a câmara de combustão e posteriormente expandido na turbina. Admite-se deste forma que o nível de particulados e de alcatrão deste gás não exceda os níveis exigidos para operação de turbinas a gás.
- Considerou-se que o gaseificador utilizado é de leito fluidizado circulante e admitiu-se a utilização de craqueadores no mesmo, para auxiliar na limpeza do gás produzido.
- Admitiu-se para este estudo um volume de madeira processado igual a 200m³ por dia.
- Admitiu-se a eficiência politrópica do compressor e da turbina de 89% e 90% respectivamente.
- Considerou-se a eficiência do Combustor de 99%.
- Considerou-se eficiência da caldeira de recuperação de 98%;

As Tabelas 3, 4 e 5 mostram os valores obtidos da simulação dos ciclos onde se obtém a potência elétrica gerada (Pot) e o calor de processo (Cug) em função da razão de pressão do ciclo, para distintos valores de temperatura na entrada da turbina a gás nas 3 indústrias estudadas.

Tabela 3. Potência elétrica e calor útil produzido pelo ciclo por metro cúbico de madeira processado a partir dos resíduos de biomassa em uma serraria

RP	TET=1200 K		TET=1300 K		TET=1400 K	
	Pot (kW)	Cug (kW)	Pot (kW)	Cug (kW)	Pot (kW)	Cug (kW)
10	7,66	7,85	7,57	9,88	7,49	8,84
15	8,69	6,52	8,06	7,10	8,51	7,59
20	9,36	5,06	9,05	6,23	9,13	6,75
25	9,95	4,90	9,76	5,56	9,66	6,11

Tabela 4. Potência elétrica e calor útil produzido pelo ciclo por metro cúbico de madeira processado a partir dos resíduos de biomassa na indústria de compensados

RP	TET=1200 K		TET=1300 K		TET=1400 K	
	Pot (kW)	Cug (kW)	Pot (kW)	Cug (kW)	Pot (kW)	Cug (kW)
10	6,13	6,28	6,06	6,70	5,99	7,07
15	6,95	5,22	6,88	5,68	6,80	6,07
20	7,49	4,48	7,42	4,98	7,34	5,40
25	7,88	3,95	7,81	4,45	7,73	4,88

Tabela 5. Potência elétrica e calor útil produzido pelo ciclo por metro cúbico de madeira processado a partir dos resíduos de biomassa na indústria de aglomerados

RP	TET=1200 K		TET=1300 K		TET=1400 K	
	Pot (kW)	Cug (kW)	Pot (kW)	Cug(kW)	Pot (kW)	Cug (kW)
10	4,59	4,71	4,54	5,03	4,49	5,30
15	5,21	3,91	5,16	4,26	5,10	4,55
20	5,61	3,36	5,56	3,73	5,50	4,05
25	5,94	2,94	5,85	3,33	5,30	3,66
30	6,13	2,59	6,08	3,01	6,02	3,35

Tabela 6. Eficiência de geração de energia elétrica para diferentes temperaturas na entrada da turbina a gás e relação de pressão do ciclo

RP	TET=1200 K		TET=1300 K		TET=1400 K	
	Eficiência					
10	0,28		0,26		0,24	
15	0,32		0,30		0,29	
20	0,35		0,33		0,32	
25	0,37		0,36		0,35	

Para este estudo considerou-se que o fornecimento do resíduo para o gaseificador ocorre constante ao longo do tempo. Observa-se, nas Tabelas 3, 4 e 5 que as maiores potências elétricas geradas são obtidas para as menores temperaturas dos gases na entrada da turbina. Isto ocorre devido ao sistema de operação que foi proposto, onde a quantidade de

madeira processada, nas respectivas modalidades de indústria, foi considerada constante ao longo do tempo e conseqüentemente a quantidade de resíduos gerados no processo, também foi admitido que ocorria alimentação contínua e constante do gaseificador, proporcionando uma vazão constante de gás combustível. Diante desta condição, para se trabalhar com temperaturas menores dos gases, na entrada da turbina, é necessário que o compressor envie uma quantidade maior de ar para a câmara de combustão, aumentando a relação ar-combustível e conseqüentemente o fluxo total através da turbina, o que permite obter eficiência e potências maiores.

6. Análise econômica

Nesta etapa, dentre os diversos métodos existentes para alocação de custos em ciclo de potência empregando cogeração, optou-se pelo método de alocação de custos em base energética. Inicialmente fez-se um levantamento do custo de equipamentos e estabeleceu-se uma série de parâmetros econômicos, como taxa de desconto de 20 % ao ano taxa de juros de 25%, uma inflação de zero e o custo do resíduo de biomassa também igual zero. Foi admitido uma vida útil dos equipamentos de 20 anos e que o pagamento do custo de investimento deve ser feito em parcelas fixas ao longo tempo. Estes dados foram introduzidos em um programa computacional, desenvolvido para este, fim com intuito de se obter parâmetros que permitem a comparação do custo da energia elétrica e calor gerados neste ciclo de potência frente as demais alternativas de suprimento destes insumos energéticos. Inicialmente foi feito um levantamento dos custos de equipamentos, para cada ponto de operação, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7. Custos dos equipamentos para relação de pressão de 10 e temperatura na entrada 1300 °C

Custo com equipamentos		
Gaseificador:	1235,00	Mil US\$
Turbina a gás:	1044,00	Mil US\$ *
Caldeira de recuperação:	177,48	Mil US\$
Compressor gaseificador:	9,41	Mil US\$
Compressor de gás de biomassa:	126,90	Mil US\$ *
Trocador de calor:	121,00	Mil US\$
Bomba:	1,50	Mil US\$
Condicionador de resíduos	5,00	Mil US\$
Lavadores de gases:	30,00	Mil US\$
Instrumentação e controle: (4% CE)	110,01	Mil US\$
Secador de biomassa:(5% CE)	137,51	Mil US\$
Custo total com equipamentos:	2997,82	Mil US\$

* custo para relação de pressão de 10 e temperatura dos gases na entrada da turbina de 1300 °C

O custo de investimento ou custo de capital é a parcela associada aos investimentos necessários à implantação do empreendimento energético, neste estudo praticamente representado pelos preços dos equipamentos que foram obtidos a partir de contato com fabricantes, fazendo-se analogia com outros ciclos do gênero e utilizando-se estimativas de custo, apresentadas por Bohem (1987), o qual emprega relações do tipo:

$$C = C_r * (S/S_R)^m \quad (1)$$

Sendo C o preço do equipamento a determinar, Cr o preço de um equipamento de referência válido para uma capacidade de referência S_R (ambos tabelados), S a capacidade do equipamento onde se deseja determinar o custo e m o fator de escala na correlação entre custo e o porte do equipamento (também tabelado). Para os componentes onde foram admitidos seus preços, utilizaram-se os seguintes critérios:

- a) Instrumentação e controle contribuem com 4% do custo de investimento conforme mencionou Ree e Waldheim (1996).
- b) Secador de biomassa contribui com 5% do custo de investimento.
- c) O preço da caldeira de recuperação foi admitido como 17% do preço da turbina, conforme mencionou Walter e Llagostera(1995).

Desta maneira, o custo global de investimento em equipamentos será o soma dos preços dos equipamentos que compõem o sistema.

Na implantação efetiva de um ciclo, com a finalidade de gerar energia, incide uma série de custos além do investimento em equipamentos. Estes se traduzem em transporte, taxas, obras civis, montagem, entre outros. Tais custos não são de fácil determinação e assumem valores diferentes para cada planta, pois dependem de uma série de condições, como localidade, legislação vigente em cada país ou estado, incentivos, disponibilidades locais, o possível aproveitamento de uma infra-estrutura já existente (obra civil, equipamentos auxiliares), etc. Para estes custos adicionais, neste estudo, foi considerado 15% do custo com equipamentos para instalação dos mesmos e 10% para obras civis e infra-estrutura.

6.2 Resultados da análise econômica

Os resultados obtidos desta análise se apresentam sob forma gráfica que expressa os valores do custo de geração da energia elétrica, EE (US\$/kWh) assim como o custo de geração do calor de processo CC (US\$/MJ), para TET=1000K, 1200K e 1400K, considerando uma serraria processando 200 m³/dia.

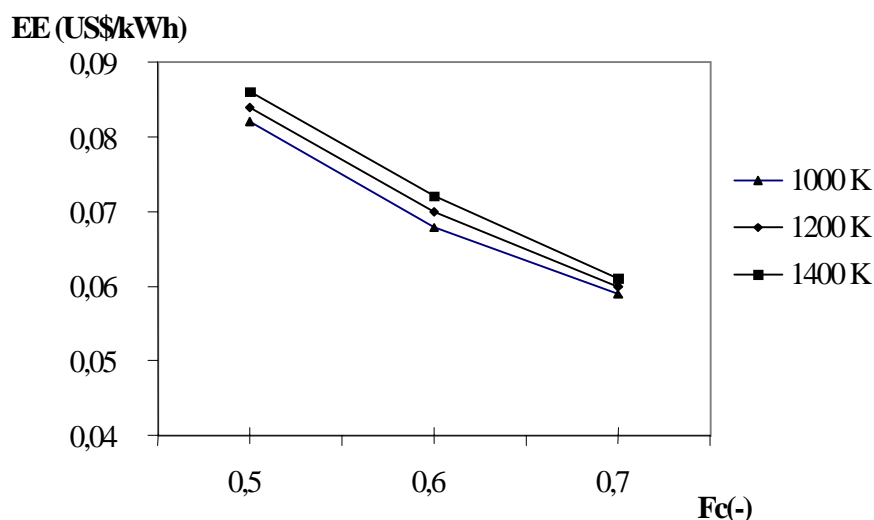


Figura 2 – Custo da energia elétrica gerada em função do fator de capacidade (Fc) para razão de pressão do ciclo igual 10.

A “Figura 2” mostra um decréscimo acentuado no preço da energia elétrica a medida em que se utiliza mais efetivamente a máquina, por exemplo, para a TET=1000 e Fc=0,5

obtem-se 0,082 US\$/kW; para esta mesma temperatura mas com $F_c=0,7$ obtém-se 0,059 US\$/kW.

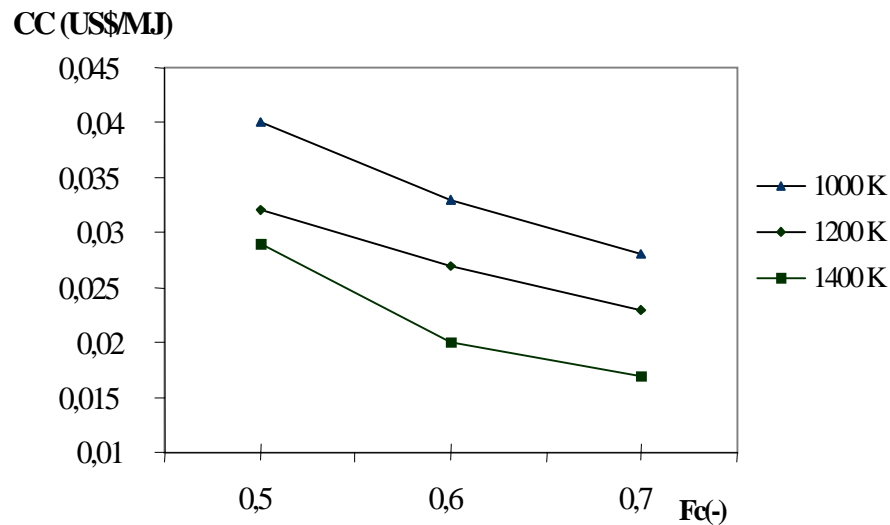


Figura 3 – Custo do calor de processo gerado em função do fator de capacidade para razão de pressão do ciclo igual a 10.

De forma inversa o calor de processo “Fig. 3”, neste caso verifica-se maior produção de calor à medida que se aumenta a TET e conseqüentemente obtém-se menores custos de geração.

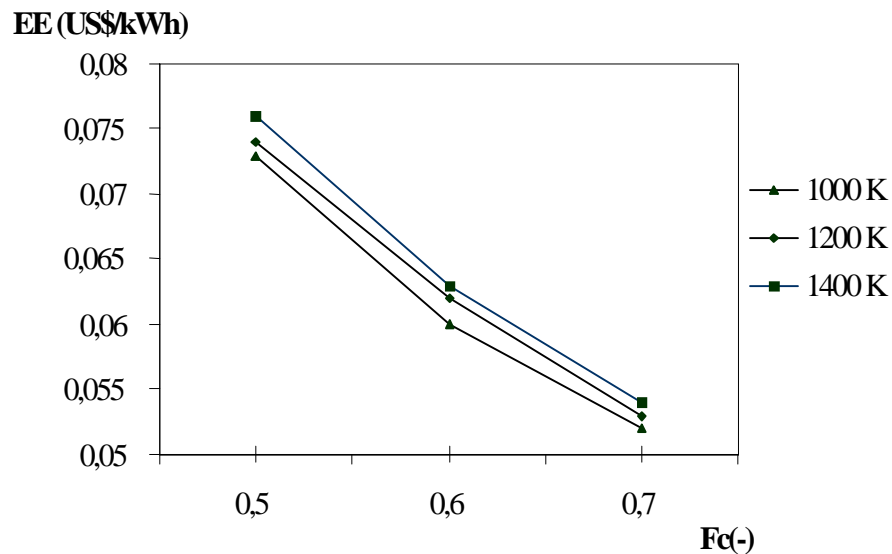


Figura 4 – Custo da energia elétrica gerada em função do fator de capacidade para razão de pressão do ciclo igual 15

Na “Figura 4” verifica-se que os menores custos de geração são obtidos à medida que aumenta-se a razão de pressão do ciclo. Este comportamento pode ser melhor observado na “Fig. 6”.

A “Figura 5”, como pode ser visto, possui um comportamento oposto ao “Fig. 4” pois o custo para produção de calor de processo aumenta à medida em que incrementa-se a razão de pressão do ciclo.

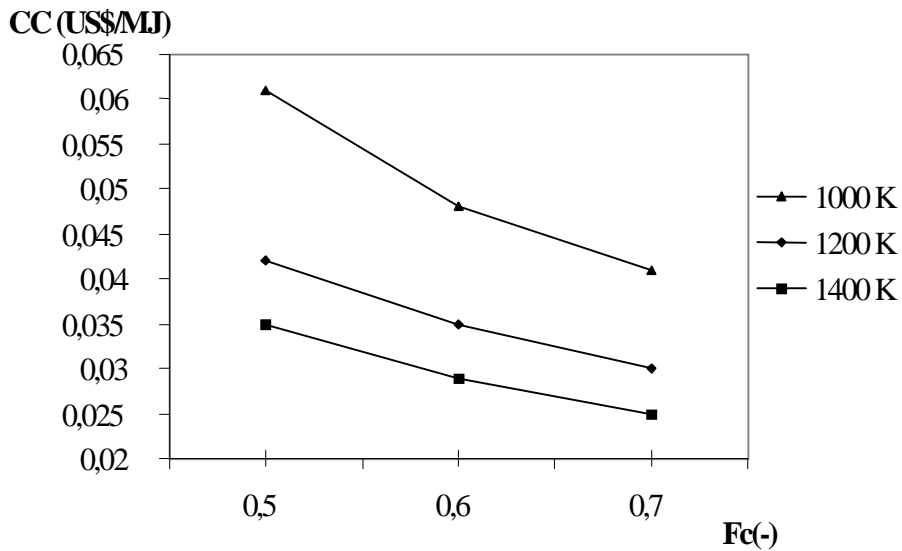


Figura 5 – Custo do calor de processo gerado em função do fator de capacidade, para razão de pressão do ciclo igual 15

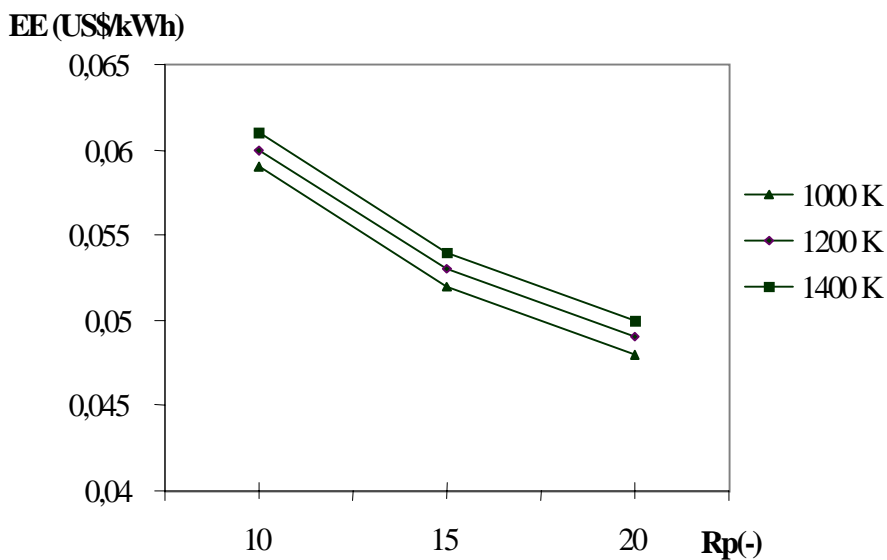


Figura 6 – Custo da energia elétrica gerada em função da razão de pressão do ciclo para fator de capacidade Fc igual a 0,7

Foram feitas simulações com o programa computacional para as indústrias de compensados e aglomerados e os resultados encontrados foram similares ao encontrado para as serraria.

7. Conclusões

Os custos obtidos para energia elétrica, gerada a partir dos resíduos de biomassa em um ciclo de potência com cogeração, utilizando turbina a gás, ainda são elevados para serem comercializados considerando o cenário atual. No entanto, principalmente, quando se opera o

sistema com fatores de capacidades elevados obtém-se valores capazes de se tornarem competitivos, principalmente, quando se considera o custo de geração de energia em comunidades isoladas. Quanto ao calor de processo, este ciclo produz um custo de geração mais elevado que os ciclos convencionais, por exemplo, com a queima em uma caldeira, este situa-se por volta 0,004 US\$/MJ, mais atraente do que o encontrado neste estudo.

REFERÊNCIAS

ANDRE, F. REE, V.R. et al, "Gaseification of biomass Wastes and Resíduos For Electricity".

BOYCE, M.P., 1982, "Gas Turbine Engineering Handbook", Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

FAO, 1990, "Energy Conservation in the Mechanical Forest Industries", Forestry paper 93, Roma.

LARSON, E.D. AND WILLIAMS, R.H., 1990, "Biomass-Gaseifier Steam Inject Gas Turbine Cogeneration", Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Transactions of the ASME, Vol.112, pp.158-168.

NOGUEIRA, L.A.H., 1996, "Sistemas BIG (Biomass Integrated Gaseification) com turbinas a Gás para Geração Termelétrica", Itajubá, pp.19-29.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 1990, "A Sociedade Brasileira e Seu Patrimônio Florestal", São Paulo.

THERMODYNAMICAL AND ECONOMICAL ANALYSES OF POWER CYCLE FOR THE WOOD INDUSTRY

Abstract

This paper presents results of a simple gas-turbine biomass-integrated system applied in a wood industry. The results comprise both thermodynamical and economical aspects. The former analyses the heat and power yield in a cogeneration system, the fuel of which is gas from the wood wastes, gasified in a fluidized bed gasifier. Different turbine inlet temperatures and pressure ratios are used; the gas turbine is operated at the design point. Energy costs related to the cycle regarding specific operation and thermal parameters are calculated and analysed.

Key word: Energy, power cycle, cogeneration