

GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA¹

Electricity Generation from Biomass Gasification

Cristina Aparecida Vilas Bôas de Sales², Rubenildo Vieira Andrade² e
Electo Eduardo Silva Lora²

Resumo: O artigo apresenta uma análise técnico-econômica da utilização da gaseificação de biomassa acoplada a diferentes acionadores primários, como motores alternativos de combustão interna, microturbinas a gás, motor de combustão externa (motor Stirling) e célula combustível para geração em pequena escala. A análise comparativa das tecnologias consideradas se limita à utilização em regiões isoladas da rede elétrica. O trabalho também apresenta as principais características das tecnologias consideradas na análise.

Palavras-chaves: Biomassa, gaseificadores, análise econômica e geração de eletricidade.

Abstract: This paper presents a techno-economic evaluation of the use of biomass gasification combined with different technologies such as: reciprocating engine, gas microturbine, Stirling engine and fuel cells for small-scale electricity generation. The comparative evaluation of the technologies is limited to their utilization in isolated areas. This paper also presents the main characteristics of these technologies.

Keywords: Biomass, gasifiers, economic evaluation, electricity generation.

1 INTRODUÇÃO

Considera-se biomassa todo material de origem orgânica, como madeira, detritos animais e resíduos orgânicos. Atualmente são de grande interesse as florestas energéticas e os resíduos agrícolas como cascas de arroz, serragem e bagaço de cana (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional - BEN (BRASIL, 2005), no Brasil cerca de 43,9% da oferta interna de energia tem origem em fontes renováveis, enquanto no mundo essa taxa é de 13,6% e nos países

desenvolvidos é de apenas 6%. Os 56,1% restantes são de origens fósseis. Da participação em energia renovável, 14,4% corresponde à geração hidráulica e 29,4%, à biomassa.

As pesquisas no setor de energias alternativas foram desenvolvidas com o objetivo de diversificar a matriz energética brasileira, diminuir a dependência por combustíveis fósseis e contribuir para redução das emissões de gases de efeito estufa. Porém, as fontes renováveis de energia não poderiam se desenvolver sem um incentivo governamental e, por isto, alguns programas foram criados para atender a esse objetivo. Dentre

¹ Recebido para publicação em 21.8.2006 e aceito em 25.9.2006.

² Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos – NEST, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Caixa Postal 50, 37500-903 Itajubá-MG, <crstinasales@unifei.edu.br>, <electo@unifei.edu.br>, <ruben@unifei.edu.br>.

esses programas destacam-se o Proálcool, Proinfa e Probiodiesel (NAE, 2005).

2 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Segundo Bridgwater (1995), a gaseificação é a conversão térmica da biomassa em uma mistura gasosa (combustível) na presença de um agente oxidante, em condições abaixo da estequiométrica. Os principais compostos formados nesse processo são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e nitrogênio (N₂), com traços de C₂H₄, C₂H₆ e C₃H₆, bem como alcatrão e particulado. A conversão é realizada por meio da oxidação parcial da biomassa à alta temperatura, geralmente entre 500 e 1.100 °C. O agente oxidante utilizado pode ser o ar, oxigênio puro ou vapor. O gás produzido em um gaseificador cujo agente de oxidação é o ar tem poder calorífico entre 4 e 6 MJ Nm⁻³, enquanto se o agente for O₂ puro é possível obter gás com cerca de 10-20 MJ Nm⁻³. Esse é conhecido como gás pobre, devido ao seu baixo poder calorífico.

O processo de gaseificação da biomassa ocorre em equipamentos denominados gaseificadores, onde o gás passa por quatro zonas no interior do reator: secagem da biomassa, pirólise, combustão e redução. A umidade admitida da biomassa para o processo de gaseificação é de 5 a 25%, que é removida à temperatura de 100 °C na zona de secagem. A pirólise é uma zona do reator onde há a degradação térmica da biomassa na ausência de oxigênio. Esta é convertida em alcatrão, voláteis e sólidos (carvão), à temperatura de cerca de 280-450 °C. Em gaseificador de leito fluidizado não é possível definir essas zonas.

3 TIPOS DE GASEIFICADORES

Para Ciferno (2002), os gaseificadores podem ser classificados, segundo a pressão, em atmosféricos ou pressurizados, e segundo

o tipo de leito, em fixo ou fluidizado. Os gaseificadores de leito fixo se dividem em concorrente, contracorrente e fluxo cruzado; os de leito fluidizados se dividem em borbulhante e circulante.

Gaseificador de leito fixo: Esse sistema apresenta a vantagem de utilizar tecnologia simples, porém há limite de dimensionamento à planta de 10-15 t biomassa seca por hora, e normalmente opera à temperatura de 1.000 °C. Dependendo da direção do fluxo do ar, os gaseificadores de leito fixo são classificados em: contracorrente (*updraft*), concorrente (*downdraft*) ou fluxo cruzado (*cross-flow*). São sistemas simples e eficientes, trabalhando com combustíveis de alta densidade e granulometria (10-100 mm), sendo indicados para gaseificar madeira e carvão; na China estão sendo desenvolvidos projetos com cascas de arroz.

Gaseificador de leito fluidizado: este sistema tem a vantagem de fornecer distribuição uniforme da temperatura e possibilitar bom contato entre sólido e gás, boa circulação das partículas de biomassa e velocidade de reação. Esse tipo de gaseificador normalmente utiliza um leito de areia com granulometria média de 250 µm, que geralmente intensifica a troca de calor entre as partículas, aumentando a eficiência do processo. O gaseificador de leito fluidizado permite trabalhar com uma ampla faixa de combustíveis sólidos, além de ser um sistema de maior capacidade produtiva. Esse tipo de gaseificador é classificado em leito fluidizado borbulhante (LFB) e em leito fluidizado circulante (LFC), podendo ser atmosférico ou pressurizado.

No Quadro 1 estão as principais condições operacionais dos diferentes tipos de gaseificadores.

4 COMPOSIÇÃO DO GÁS

De acordo com Hasler e Nussbaumer (1999), o gás produzido a partir da gaseificação contém impurezas como voláteis, alcatrão,

Quadro 1 - Condições operacionais dos gaseificadores (OLOFSSON, 2005)
Table 1 - Operational conditions of gasifiers (OLOFSSON, 2005)

Tipo de Gaseificador	Contracorrente	Concorrente	Fluxo Cruzado	Fluidizado Borbulhante	Fluidizado Circulante
Tipo de combustível	madeira	madeira	madeira	madeira	madeira
Alimentação de biomassa (t d ⁻¹) base seca	<10	<15	<1	5-180	10-110
Poder calorífico (MJ Nm ⁻³)	4 a 5 (ar)	5 (ar)	-	4,5 a 7,9(ar), 4 a 6 (ar e vapor) e 5,5-13 (O ₂ e vapor)	4 a 7 (ar)
Conteúdo de alcatrão (mg Nm ⁻³)	35.000	500-1.000	-	13.500	baixo
Agente gaseificador	ar, oxigênio ou vapor	ar, em alguns casos pode-se usar vapor	ar	ar; oxigênio ou vapor	ar, oxigênio ou vapor
Pressão (bar)	atmosférica	atmosférica	atmosférica	1 a 35	1 a 19
Temperatura (°C)	300-1.000	300-1.000	300-1.000	650-950	800-1.000

amônia e ácido cianídrico, dependendo do tipo de tecnologia empregada, que podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos que utilizam esse gás.

A concentração de contaminantes varia de acordo com o gaseificador utilizado, como mostrado no Quadro 2.

5 LIMPEZA DO GÁS

O gás deve ser limpo antes de ser aplicado em sistema de geração de potência (motores de combustão interna, turbinas, entre outros), e deve atender a padrões de qualidade ambiental. A escolha do sistema de limpeza dos gases depende de uma série de fatores, como a eficiência, o nível de emissão desejado, o custo operacional e de investimento, o espaço disponível, a temperatura, a característica do gás, o tamanho das partículas de biomassa, entre outros (Quadro 3).

6 APLICAÇÃO DO GÁS DE BIOMASSA

O gás de biomassa gerado em gaseificadores pode ser utilizado para diversas

finalidades, entre as quais podem ser citadas: a queima em queimadores de caldeiras para geração de vapor; a queima em secadores para secagem de peças de cerâmicas; e a queima em câmaras de combustão de motores de combustão interna (diesel e Otto) e externa (*Stirling*), turbinas a gás e células combustíveis.

A utilização do gás de biomassa para geração de energia elétrica pode ser feita de diferentes formas, todavia algumas alternativas podem ser mais atrativas que outras, devido ao tratamento que esse gás precisa ter para ser utilizado e a fatores econômicos. No Quadro 4 está a qualidade do gás requerida para diferentes aplicações tecnológicas.

7 ACIONADORES PRIMÁRIOS

O sistema de geração de eletricidade em pequena escala engloba diferentes tecnologias, cuja análise incluirá motor de combustão interna, combustão externa (*Stirling*), microturbinas e células combustíveis. As características das diversas tecnologias estão no Quadro 5.

Quadro 2 - Características do gás produzido no gaseificador, visando sua aplicação em turbinas a gás
Table 2 - Characteristics of gas produced in gasifiers for application in gas turbines

Tipo de Gaseificador	Agente Gaseificador	Composição do Gás					PCS (MJ Nm ⁻³)	Qualidade do Gás	
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		Alcatrão	Particulados
Leito Fluidizado	ar	9	14	20	7	50	5,4	médio	pobre
Contracorrente	ar	11	24	9	3	53	5,5	pobre	Bom
Concorrente	ar	17	21	13	1	48	5,7	bom	médio
Concorrente	O ₂	32	48	15	2	3	10,4	bom	bom

Quadro 3 - Redução do teor de alcatrão e particulados, utilizando diferentes sistemas de limpeza (HASLER; NUSSBAUMER, 1999)

Table 3 - Reduction of tar content and particulates using different gas clean systems (HASLER; NUSSBAUMER, 1999)

Sistema de Limpeza	T (°C)	Redução do Teor de Particulados (%)	Redução do Teor de Alcatrão (%)
Filtro de areia	10 a 20	70 a 99	50 a 97
Torre de lavagem	50 a 60	60 a 98	10 a 25
Lavador Venturi	-	-	50 a 90
Precipitador eletrostático	40 a 60	>99	0 a 60
Filtro de mangas	130	70 95	0 a 50
Absorvente de alcatrão de leito fixo	80	-	50
Craqueamento catalítico	900	-	>95

Quadro 4 - Qualidade do gás requerida para diferentes aplicações tecnológicas

Table 4 - Quality of gas required for different technological applications

Teor de Compostos	Motor de Combustão Interna	Turbina a Gás	Células a Combustível
	(mg Nm ⁻³)		
Particulados	<50	<30	-
Alcatrão	<100	-	<1
Metais alcalinos	-	<0,25	-
NH ₃	<55	<0,25	-

7.1 Motor de combustão interna

De acordo com Vianna Júnior (2001), uma tecnologia muito difundida em escala comercial são os motores alternativos de combustão interna, devido ao seu reduzido

custo de instalação, sua simplicidade e fácil manutenção, além do fato de poderem ser operados com gás proveniente da gaseificação de biomassa.

Segundo Nogueira e Lora (2003), um problema notável da utilização dessa tecnologia é com relação à remoção de particulados e alcatrão do gás para ser utilizado nos motores.

7.2 Motor Stirling

O motor Stirling consiste de um motor alternativo a pistão movido por fonte externa de calor, e de forma semelhante a ciclos de vapor utiliza sistema fechado de expansão dos gases para obter potência mecânica. No entanto, deve-se ressaltar que sua eficiência depende da temperatura do gás.

Quadro 5 - Comparação entre os acionadores primários (LENSUS e ALAKANGAS, 2004)
Table 5- Comparison of primary activators (Lensus & Alakangas, 2004)

Dado Técnico	Microturbina	Motor Stirling	Motor de Combustão Interna	Célula Combustível
Potência (kW)	15-10.000	25-250	10-150	50 a 3.000
Eficiência elétrica (%)	30-38	15-35	15-35	33-50
Eficiência térmica (%)	45-50	50-60	60-80	-
Eficiência total (%)	75-85	75-85	80-90	-
Produção de calor (°C)	85-100	85-100, vapor	60-80	-
Tempo de operação (h)	25.000-60.000	50.000-75.000	50.000-60.000	-
Custo específico do equipamento (US\$ kW ⁻¹)	300-1.000 (micro) 400-650 (turbina)	3.000	500-1.000	1.000-4.000

O motor Stirling pode ser movido por qualquer fonte capaz de fornecer calor para seu acionamento, desde combustíveis fósseis até renováveis, sendo uma tecnologia que não precisa de resfriamento do gás e nem de sistema de limpeza.

O sistema gaseificador acoplado a motor Stirling (Figura 1) apresenta eficiência global de 17,7%, sendo a eficiência elétrica do motor Stirling de cerca de 30,6%, uma vez que parte da energia é perdida na etapa de combustão ou na transferência de calor (JENSEN; CARLSEN, 2002).

7.3 Turbina a gás

A turbina a gás é uma máquina térmica na qual se aproveita diretamente a energia liberada na combustão, armazenada nos gases produzidos, que se expandem, gerando eletricidade. As turbinas apresentam eficiência em torno de 20 a 25%.

De acordo com Lensus e Alakangas (2004), são denominadas microturbinas as turbinas com capacidade elétrica entre 25 e 250 kWe, e de turbinas as de capacidade superior a 250 kWe. As microturbinas se caracterizam por ser do tipo radial, operando com velocidade de rotação nominal, e por ter mancais suspensos a ar, de ligas metálicas e

cerâmicas resistentes a altas temperaturas e de componentes eletrônicos de alta potência.

Uma turbina a gás pode ser operada com gás de gaseificação de biomassa, embora a integração entre a turbina e o gaseificador ainda não se apresente em escala comercial, havendo poucos projetos demonstrativos. Nessa tecnologia devem ser considerados alguns fatores, como a operação da turbina com um gás de baixo poder calorífico; devem ser determinadas a pressão de operação do gaseificador, a integração do fluxo de ar e de combustível com o resto do sistema, a limpeza e o resfriamento do gás, como também deve ser considerado o sistema de turbina a gás em ciclo combinado, para aumentar a eficiência do processo.

7.4 Célula combustível

De acordo com Fuel Cell Handbook (2002), as células a combustível são dispositivos que convertem a energia química de uma reação, envolvendo hidrogênio e ar, em eletricidade.

Uma célula consiste de dois eletrodos (ânodo e cátodo), separados por um eletrólito de diferentes composições químicas, onde o H₂ passa pelo ânodo e o O₂, pelo cátodo. O Quadro 6 apresenta as características dos

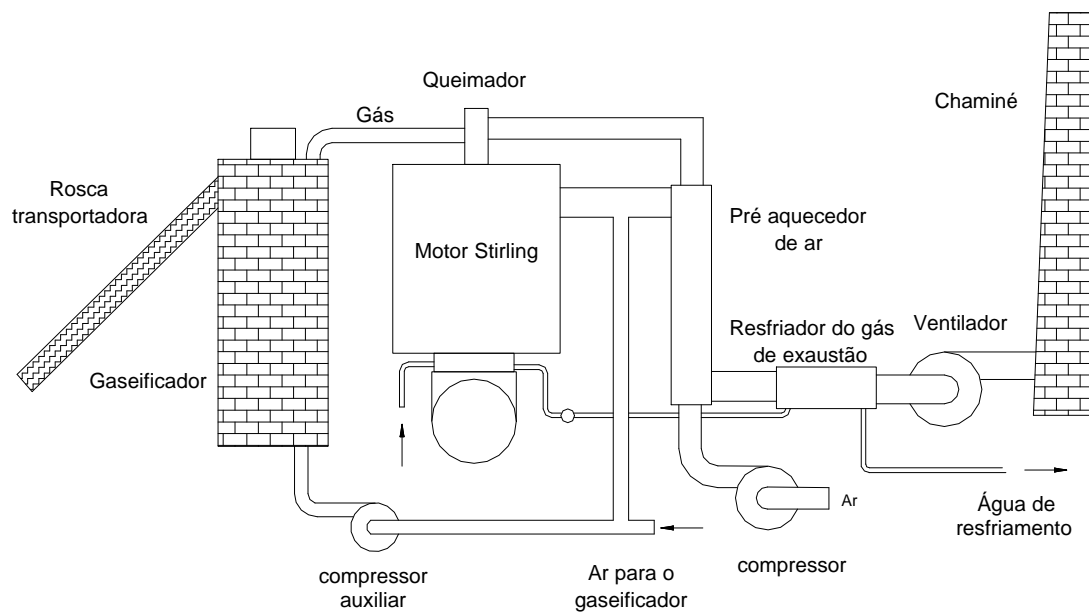


Figura 1 - Sistema gaseificador acoplado a motor Stirling (JENSEN; CARLSEN, 2002).

Figure 1 - Gasification System connected with Sirling engine (JENSEN; CARLSEN, 2002).

Quadro 6 - Características de diferentes tipos de células combustíveis (FUEL CELL HANDBOOK, 2002)

Table 6 - Characteristics of different types of fuel cells (FUEL CELL HANDBOOK, 2002)

Tipo de Célula	Alcalina (AFC)	Membrana de Troca de Próton (PEM)	Ácido Fosfórico (PAFC)	Carbonato (MCFC)	Óxido de Sólido (SOFC)
Eletrólito	Solução aquosa alcalina de hidróxido de potássio	Polímero ácido orgânico poli-perfluorosulfônico	Ácido fosfórico estabilizado	Solução carbonato Molten	Eletrólito sólido de cerâmica
Unidade de potência típica (kW)	≤100	0,1-500	5-200 (plantas de até 5.000)	800-2.000 (plantas até 100.000)	2.5-100.000
Eficiência elétrica	até 70%	até 50%	40-45%	50-57%	45-50%
Custo específico (\$ kW ⁻¹)	-	4.000	3.000-3.500	800-2.000	1.300-2.000
Disponibilidade comercial	Não-disponível para cogeração	P&D	sim	P&D	P&D
Temperatura de operação (°C)	71,11-98,89	48,88-98,89	160-210	676,66	815,55-982,22
Pressão de operação (bar)	-	1,013-5,10	1,013-8,13	1,013-3,033	1,013 ≥ 10,34
Aplicações	Espacial e militar	Geração de energia, ônibus, propulsão automotiva	Geração de energia	Geração de energia	Geração de energia

diferentes tipos de células combustíveis. O sistema gaseificador/células MCFC deve apresentar eficiência de 32-43,5%. Para células do tipo SOFC, a eficiência a obter é de 54,4%.

8 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA

Para analisar a melhor opção tecnológica para conversão de biomassa em eletricidade em pequena escala, serão consideradas algumas rotas tecnológicas, que serão objetos de uma análise técnico-econômica. As tecnologias empregadas nessa análise podem ser divididas em dois cenários e englobam dois tipos de gaseificadores, os de leito fixo e os de leito fluidizado, sendo, respectivamente, acoplados a acionadores primários, como verificado na Figura 2.

- a) Sistema gaseificador/motor alternativo de combustão interna (gás/MACI).
- b) Sistema gaseificador/motor Stirling (gás/MS).
- c) Sistema gaseificador/célula combustível (gás/CC).

d) Sistema gaseificador /turbina a gás (gás/TG) (*).

O Quadro 7 apresenta o estado-da-arte das tecnologias para geração de eletricidade, em diferentes faixas de potência.

Os cálculos foram efetuados, considerando a taxa de câmbio em 2,2R\$/US\$, a taxa de juros de 12%, o tempo de operação definido em 6.570 horas por ano e o gás com um poder calorífico de 5,6 MJ kg⁻¹.

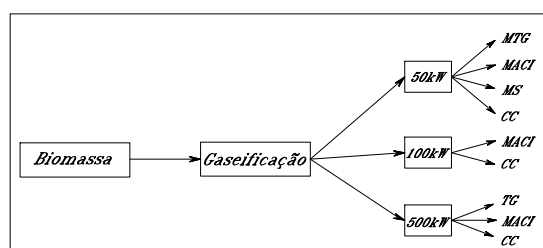


Figura 2 - Rotas tecnológicas consideradas na análise técnico-econômica.

Figure 2 - Technological routes considered in techno-economic evaluation.

(*) O Nest-Unifei está desenvolvendo projetos que visam testes e demonstrações dessas tecnologias.

Quadro 7 – Estado-da-arte das tecnologias disponíveis para geração de eletricidade de diferentes faixas de potência

Table 7 – State of the art of the available technologies for generating electricity in different power bands

Faixa de Potência kW	Tecnologia	Maturidade Tecnológica			Viabilidade Comercial			Comentário
		A	M	B	A	M	B	
50 kW	Gaseificação/MCI		X			X		Pouca opção comercial de projetos com êxito
	Gaseificação/MTG			X			X	Projetos de investigação em execução
	Gaseificação/MS		X				X	Projetos de investigação em execução
	Gaseificação/FC			X			X	Projetos de investigação em execução
100 e 500 kW	Gaseificação/MCI	X				X		Demonstração/ unidade comercial
	Gaseificação/FC			X			X	Modelagem matemática

A tarifa média de compra de energia elétrica foi estimada em 150R\$ MWh⁻¹, de acordo com dados obtidos do último leilão de energia (2005), com a relação gás/combustível no gaseificador igual a 2,46 e considerando cerca de 40 R\$ t⁻¹ de biomassa.

No Quadro 8 estão os custos dos acionadores, do gaseificador e do sistema de limpeza

do gás, assim como os custos totais de investimento.

No Quadro 9 estão os cálculos da avaliação econômico-financeira das rotas tecnológicas empregadas.

Os resultados obtidos na análise técnico-econômica são representados pelas variantes TIR, custo de energia gerada em R\$ MWh⁻¹ e

Quadro 8 - Custo dos equipamentos e custo total das tecnologias utilizadas

Table 8 - Cost of equipment and total cost of the technologies applied

Custos dos Equipamentos e Custos Totais para Tecnologias	Unidade	G/MCAI			G/MTG G/TG		G/MS	G/CC		
		50	100	500	50	500	50	50	100	500
Potência	kW	50	100	500	50	500	50	50	100	500
Preço do acionador	(10 ³) R\$	55	110	550	165	1.100	330	440	880	4.400
Custo O&M (*)	R\$ kWh ⁻¹	0,0286			0,0132		0,037	0,12		
Custo do gaseificador	(10 ³) R\$	50	167	834	50	834	50	50	167	834
Custo do sistema de limpeza	(10 ³) R\$	20			20		20	30		
Auxiliares	(10 ³) R\$	1			1		1	1		
Custo do reservatório de combustível	(10 ³) R\$	1			1		1	1		
Custo dos equipamentos	(10 ³) R\$	127	299	1.406	182	1.956	387	412	859	4.166
Custo de instalação, eng. e outros	(10 ³) R\$	19,1	44,9	210,9	27,3	293,4	58,1	61,8	128,9	624,9
Custo total de investimento	(10 ³) R\$	146,1	156,3	1.616,9	209,3	2.249	445,1	473,8	987,9	4.791

Quadro 9 - Resultados da avaliação técnico-econômica

Table 9 - Techno-economic evaluation results

Avaliação Técnico-econômica	Unidade	G/MCAI			G/MTG G/TG		G/MS	G/CC		
		50	100	500	50	500	50	50	100	500
Potência	kW	50	100	500	50	500	50	50	100	500
Investimento analisado	R\$ ano ⁻¹	21.444	35.084	130.191	30.730	330.266	65.344	69.565	129.639	596.211
Custo com combustível	R\$ ano ⁻¹	12.041	24.082	120.410	12.041	120.410	13.761	8.601	1.7201	86.007
Custo O&M	R\$ ano ⁻¹	9.395	18.790	93.951	4.336	43.362	12.286	39.420	78.840	394.200
Custo operacional anual total	R\$ ano ⁻¹	42.880	77.956	344.552	47.108	494.039	91.391	117.586	225.680	1.076.418
Custo da energia elétrica gerada	R\$ MWh ⁻¹	130,53	118,66	104,89	143,40	150,39	278,21	357,95	343,50	327,68
Custo investimento específico	R\$ kWinstal ⁻¹	2.921,0	2.389,5	1.773,4	4.186,0	3.038,4	8.901,0	9.476,0	8.829,5	8.121,4
Tempo de retorno	anos	4,45	3,45	2,43	6,28	4,07	9,93	8,82	7,85	6,89
Valor presente líquido	R\$	138.773	324.997	1.900.037	61.951	1.131.817	1.544	30.744	119.208	912.163
Taxa interna de retorno	%	29,7	36,7	49,8	19,6	30,1	12,1	13,7	15,6	17,9

investimento específico em R\$ kW⁻¹, instalado nas Figuras 3 4 e 5.

Pela Figura 3 observa-se que a tecnologia com maior taxa interna de retorno, considerando as diferentes faixas de potência, é o motor alternativo de combustão interna, seguido da turbina das microturbinas a gás. O motor Stirling e a célula combustível apresentaram valores muito baixos da TIR.

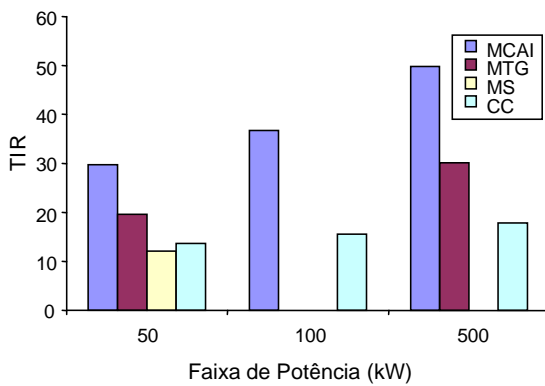


Figura 3 - Valor da TIR em função das faixas de potência.

Figure 3 - TIR value in function of the power bands.

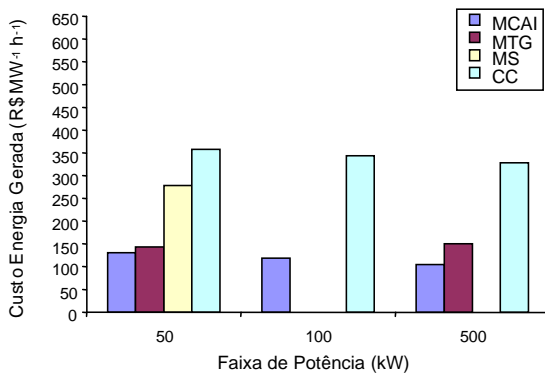


Figura 4 - Custo de energia gerada em função das faixas de potência.

Figure 4 - Cost of the energy generated in function of the power bands.

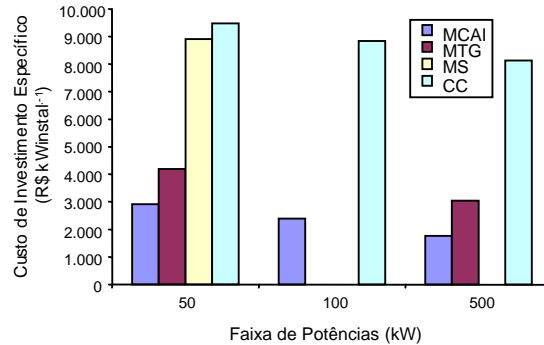


Figura 5 - Custo de investimento específico em função das faixas de potência.

Figure 5 - Cost of specific investment in function of the power bands.

De acordo com as Figuras 4 e 5, o custo de geração de energia e o custo de investimento específico foram menores para o motor e a turbina, enquanto os custos se apresentam elevados para o motor Stirling e a célula combustível.

9 CONCLUSÕES

Os resultados da análise técnico-econômica apresentam valores da taxa interna de retorno (TIR), do custos de geração de eletricidade e do custo de investimento específico muito diferentes entre as faixas de potência e entre as tecnologias consideradas.

A tecnologia que apresenta maior viabilidade econômica é o motor alternativo de combustão interna, uma vez que possui maior taxa interna de retorno, menor custo de geração de energia e menor custo de investimento específico, comparadas às outras tecnologias.

A tecnologia gaseificador/microturbina a gás apresentou valores favoráveis de viabilidade, aproximando-se dos sistemas de motores alternativos, enquanto para o motor Stirling e a célula combustível a taxa interna de retorno é muito baixa e os custos de geração de energia e investimento específico são elevados.

A análise econômica mostrou que para tecnologias emergentes como o motor Stirling e a célula a combustível tornarem-se viáveis, o valor da tarifa média de compra de energia elétrica deveria ser muito alto, da ordem de 400 R\$ MWh⁻¹, e o tempo de retorno de aproximadamente dez anos. Isso pode desencorajar os investimentos nesse tipo de tecnologia, uma vez que a tarifa média de energia gira em torno de 200 R\$ MWh⁻¹. No entanto, na análise não foi considerado o ciclo de vida, o que poderia conduzir a valores mais adequados. Também deve ser considerado que as tecnologias analisadas estão em fase de desenvolvimento, não tendo atingido uma escala comercial.

Alguns autores prognosticam, em um período de 10 – 15 anos, custos específicos para os acionadores motor Stirling e célula a combustível na ordem de 3.300 R\$ kW⁻¹ (1500 U\$ kW⁻¹). Nesse caso, o tempo de retorno desses investimentos estaria na faixa de 4,3 e 3 anos.

REFERÊNCIAS

- BRIDGWATER, A. V. The Technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation, *Fuel*, v. 74, n. 5, p. 631-653, 1995.
- NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – NAE. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica. Brasília: 2005. (Cadernos NAE, 4)
- CIFERNO, J. P.; MARANO, J. J. **Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production**. Departamento de Energia dos Estados Unidos and National Energy Technology Laboratory, 2002.
- FUEL CELL HANDBOOK. 6.ed. US-DOE/NETL, November, 2002.
- HASLER, P.; NUSSBAUMER, T. H. Gas cleaning for IC engine application from fixed bed biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**, v. 16, p. 385-395, 1999.
- JENSEN, N. et al. CHP from updraft gasifier and stirling engine. In: EUROPEAN CONFERENCE AND TECHNOLOGY EXHIBITION ON BIOMASS FOR ENERGY, INDUSTRY AND CLIMATE PROTECTION, 12., 2002, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: 2002. p. 726-729.
- LENSU, T., ALAKANGAS, E. Small-scale electricity generation from renewable energy sources. A glance of selected technologies, their market potential and future prospects-VTT. 2004. OPET (Report, 13).
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia, Balanço Energético Nacional 2005. 2005.
- NOGUEIRA, L. A.; LORA, H. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2.ed. 2003.
- OLOFSSON, I.; NORDIN, A. SÖDERLIND, U. **Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquid fuels**. Umea: University of Umea, 2005. 90 p.
- VIANNA JÚNIOR, A. L. et al. Estudo comparativo de microsistemas de geração baseados em combustíveis. CEPEL, 2001.