

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE PLANTA INDUSTRIAL PARA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

JOÃO T. MENEZES NETO, AYLTON J. ALVES, ELDER G. DOMINGUES, VINÍCIUS CARVALHAES

*Núcleo de Estudos e Pesquisas Experimentais, Instituto Federal de Goiás
Rua 75, Setor Central, 74055-110, Goiânia, GO, BRASIL*

*E-mails: joaotelesneto@yahoo.com.br, praylton@hotmail.com,
prof.eldergd@gmail.com, vinicius.carvalhaes@ifg.edu.br*

Abstract— This work analyzed the technical and economic efficiency of the application of fluidized bed gasification technology as an alternative for the final destination of municipal solid waste (MSW) in an industrial plant, in which the obtained gas can be used as an alternative source for generation of thermoelectric power. The tests carried out in a pilot plant pointed to the technical and economic feasibility of the technology to be used without considering, in this preliminary study, any measures for the optimization of gasification and thermoelectric generation processes.

Keywords— Energy use, gasification, municipal solid waste, Rankine cycle, technical and economic evaluation.

Resumo— Este trabalho analisou a eficiência do ponto de vista técnico e econômico da aplicação de tecnologia de gaseificação em leito fluidizado como alternativa para destinação final de resíduos sólidos urbanos – RSU em uma planta industrial, na qual o gás obtido poderá ser usado como fonte alternativa para a geração de energia termelétrica. Os testes realizados em planta piloto apontaram para a viabilidade técnica e econômica da tecnologia a ser empregada sem considerar, neste estudo preliminar, medidas para a otimização do processo termoquímico e de geração termelétrica.

Palavras-chave— Aproveitamento energético, avaliação técnico-econômica, ciclo Rankine, gaseificação, resíduos sólidos urbanos.

1 Introdução

Resíduos sólidos urbanos – RSU, inerentes ao metabolismo das cidades e oriundos das atividades de consumo doméstico e da limpeza e varrição de áreas públicas (BRASIL, 2010), têm se tornado uma preocupação do ponto de vista da sustentabilidade das cidades, não apenas no que diz respeito à quantidade gerada, mas também das formas de tratamento adotadas em sua neutralização (MESJASZ-LECH, 2014).

Ocorre que a destinação inadequada de RSU é responsável por poluição e degradação ambiental, emissão de gases do efeito estufa, disseminação de doenças e vulnerabilidade social entre outros problemas (AZEVEDO et al., 2015). PRADO FILHO e SOBREIRA (2007) corroboram ao afirmar que RSU caracterizam-se como agentes causadores de degradação do ambiente urbano e natural podendo ser meios para proliferação e desenvolvimento de vetores de doenças infecciosas.

Segundo ARAUJO et al. (2013), o crescimento dos padrões de consumo e variedade de produtos leva à geração de volumes cada vez maiores e mais diversificados de resíduos, à obsolescência cada vez mais crescente dos produtos forçadas pela sociedade industrial e à presença de produtos não biodegradáveis interrompendo ciclos biológicos naturais acarretando em consequências tanto locais quanto globais.

Dados de 2016 (ABRELPE, 2017) mostram que no Brasil 78,3 milhões de toneladas de RSU foram geradas. Deste total, 71,3 milhões de toneladas foram coletadas, revelando que ao menos 9% de todo RSU

gerado não possui coleta e disposição final adequadas, permanecendo no local onde foram gerados. De todo RSU coletado, 58,4 % são destinados a aterros sanitários enquanto os outros 41,6% são dispostos inadequadamente no meio ambiente em lixões ou aterros controlados, que não possuem sistemas de medidas adequadas para proteção do meio ambiente contra danos e degradação. Esses dados mostram que os sistemas de disposição final de resíduos estão sobrecarregados e um dado ainda mais preocupante mostra que no país 12,4 milhões de toneladas de RSU ainda são depositadas em lixões causadores de poluição ambiental e diversos problemas de saúde.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2010, prevê medidas de redução, reuso, reciclagem e aproveitamento energético desses resíduos antes que eles sejam dispostos no ambiente.

A composição gravimétrica média do RSU brasileiro, que mostra a fração dos diferentes materiais na composição do resíduo, é apresentada na Tabela 1 (ABRELPE, 2012).

Tabela 1. Composição Gravimétrica Média do RSU Brasileiro.

Material	%	t/ano
Metais	2,9	1.610.499
Papel, papelão e tetrapak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.824
Matéria orgânica	51,4	28.554.702
Outros	16,7	9.274.251
Total	100,0	55.534.440

Os dados da Tabela 1 mostram que existe o potencial de exploração econômica com possibilidade de aplicação desde processos de reciclagem ou reuso até o aproveitamento energético, este último objeto de estudo deste trabalho.

Dadas suas características, o aproveitamento energético configura uma das soluções ambientalmente adequadas para a destinação final de RSU, possibilitando redução dos resíduos dispostos e prolongamento da vida útil de aterros existentes além de diminuição da poluição de solos e água (ABRELPE, 2015).

As principais tecnologias de aproveitamento energético de RSU são o gás de aterro sanitário, a digestão anaeróbica, a incineração, a gaseificação e a pirólise (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

No Brasil, conforme dados do Banco de Informações de Geração – BIG (MME, 2018), existem 19 usinas termelétricas em operação que exploram a energia do biogás de aterros sanitários perfazendo uma potência instalada de aproximadamente 132 MW, que corresponde a 0,08% da capacidade de geração do país.

Como proposta de desenvolvimento deste trabalho é apresentada a tecnologia de gaseificação como alternativa tecnológica para o aproveitamento energético de RSU possibilitando o tratamento e valorização econômica destes resíduos como fonte alternativa e renovável de energia através da geração distribuída.

Foi realizada a avaliação técnico-econômica de uma planta industrial real, em estágio de implantação na cidade de Boa Esperança/MG, resultado da execução do projeto de pesquisa e desenvolvimento- P&D intitulado “Aproveitamento Energético e Geração de Energia Elétrica de Resíduos Sólidos Urbanos a partir de Reator Termoquímico”. O projeto está sendo executado pela concessionária de energia Furnas Centrais Elétricas S.A., no âmbito dos projetos de P&D regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. O referido projeto propõe usar tecnologia de gaseificação baseada em reator termoquímico de leito fluidizado circulante para geração de gás, a partir dos RSU gerados no município, a ser posteriormente utilizado em caldeira para queima e geração de vapor de água que acionará uma turbina gerando energia elétrica em ciclo Rankine.

2 Gaseificação em Leito Fluidizado Circulante

A produção de energia através da gaseificação de biomassa possui mais de cem anos de existência, mas foi esquecida ao longo do tempo devido à competição com o baixo preço dos combustíveis fósseis.

Atualmente, quando se trata da conversão de RSU, para MATSAKAS et al. (2017), a gaseificação envolve processos complexos de conversão e ainda se encontra em estágio de desenvolvimento técnico. Os principais desafios da tecnologia são a solução de

problemas técnicos e econômicos relacionados à alta heterogeneidade do RSU visto no número de usinas que operam em condições inferiores às comerciais, contabilizadas em cerca de 100 unidades ao redor do mundo (INTHARATHIRAT; SALAM, 2016).

LORA (2012) explica a gaseificação como um processo de conversão termoquímica de um material sólido ou líquido, que contém carbono em sua composição, em um combustível gasoso através da oxidação parcial a temperaturas elevadas.

O processo de gaseificação consiste de uma série de processos exotérmicos e endotérmicos que, a depender dos parâmetros do processo, resulta principalmente na formação de monóxido de carbono – CO, hidrogênio – H₂, metano – CH₄ e gás carbônico – CO₂ (BIZZO et al., 2011).

Uma variedade de gaseificadores é utilizada em processos de gaseificação e devido às suas características podem ser agrupados em diferentes categorias (MELO, 2008). Quanto ao tipo de leito podem ser gaseificadores de leito fixo, gaseificadores de leito fluidizado e a gaseificação assistida por plasma.

O gaseificador em leito fluidizado foi desenvolvido antes da Segunda Guerra Mundial para aplicação na gaseificação de carvão tendo sido posteriormente adaptado para as indústrias química e petroquímica (CENBIO, 2002).

A tecnologia providencia um ambiente em que o material sólido, quando em contato com o ar de gaseificação (ar atmosférico, por exemplo), calor e um leve aumento na pressão, assume o comportamento de um fluido enquanto as reações de transformação acontecem (MENDOZA, 2009).

Segundo KINTO et al. (2002), o material de composição do leito, normalmente composto por areia, arrasta o sólido aumentando o contato deste com o elemento oxidante e, conseqüentemente, aumentando a taxa de reação.

Gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo borbulhante ou circulante. O gaseificador de leito fluidizado borbulhante possui baixa conversão de carbono e menor eficiência de processo se comparado com os gaseificadores de leito circulante. Estes últimos são mais eficientes devido à recirculação das partículas sólidas no interior do reator, possibilitando maior tempo de residência dessas partículas no reator e, portanto, maior taxa de conversão de carbono (BIZZO et al., 2011).

3 Metodologia

A usina para gaseificação e geração de energia elétrica a partir de RSU é um projeto experimental a ser instalado no município de Boa Esperança/MG. segundo último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade tem uma população de 37.038 habitantes (IBGE, 2010) e atualmente conta com um vertedouro a céu aberto,

popularmente conhecido como lixão, para destinação final dos RSU coletados na cidade.

O projeto de pesquisa consiste da instalação de uma planta industrial de tratamento de RSU composta por uma unidade de recebimento e tratamento dos resíduos gerados na cidade para produção de combustível derivado de resíduo – CDR, uma planta de gaseificação na qual o CDR produzido será convertido em gás através de um reator termoquímico em leito fluidizado circulante e uma planta de geração de energia na qual o gás produzido é queimado para geração de eletricidade em ciclo Rankine, conforme ilustrado pela Figura 1.

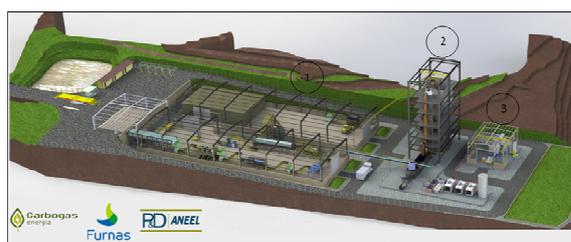


Figura 1. Ilustração da planta completa. (1- Planta de processamento de RSU; 2- Planta de gaseificação CDR; e 3- Usina termelétrica ciclo Rankine)

As características técnicas de projeto da usina estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da Planta de Tratamento de RSU.

Parâmetro	Valor	Unidade
i. Linha de Processamento RSU		
Horas de funcionamento	10	Horas
Vazão de entrada	5.500,0	kg/h
Granulometria de entrada RSU	In natura	
Umidade de entrada RSU	50,0	%
Vazão de saída	3.005,6	kg/h
Granulometria final CDR	25,0	mm
Umidade final CDR	15,0	%
Densidade CDR	250,0	kg/m ³
ii. Reator Termoquímico		
Consumo diário de CDR	30.055,9	kg
Horas de funcionamento	24	Horas
Vazão mássica CDR	1.252,3	kg/h
Volume de gás produzido	2.736,4	Nm ³ /h
Massa de gás produzido	3.218,3	kg/h
Cinza + Particulado + Calcário	340,0	kg/h

Parâmetro	Valor	Unidade
iii. Geração de Energia Elétrica		
Potência Nominal	1000	kW
Rendimento da caldeira	95	%
Rendimento da turbina	99	%
Fator de capacidade	95	%
Consumo de energia elétrica total da planta	260,0	kW

A viabilidade técnica foi dada pela eficiência do processo de gaseificação em um reator termoquímico de leito fluidizado circulante e estimativa de potência elétrica disponível em ciclo Rankine. A viabilidade econômica se deu pela avaliação de indicadores econômicos através de uma análise econômica determinística.

3.1 Avaliação Técnica

A eficiência do processo de gaseificação foi calculada a partir de testes realizados em uma planta piloto de 1 MWth de potência instalada.

Para realização dos testes em planta piloto, amostras de RSU foram coletadas segundo a norma brasileira ABNT NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004), preparadas e destinadas parte para análise laboratorial de caracterização e parte para o processo de gaseificação. Essas etapas estão ilustradas na Figura 2.



Figura 2. Coleta e preparo das amostras: 1- Ponto de coleta; 2- Primeira etapa de trituração; 3- Segunda etapa de trituração; e 4- Quarteamento da amostra (granulometria 10 mm).

Durante os testes de gaseificação, as amostras de CDR, em sacos de cerca de 200 kg, são içadas e inseridas em um sistema alimentador, composto por três eclusas e um parafuso transportador ao final, que introduz o combustível no interior do gaseificador em um leito fluidizado, a base de areia, onde ocorre a mistura do mesmo com o ar de gaseificação. Este processo ocorre em temperatura uniforme a cerca de

825 °C. A Figura 3 mostra o preparo das cargas CDR para inserção no sistema de gaseificação.



Figura 3. Cargas de CDR prontas para os testes de gaseificação.

Ao deixar a câmara de reação o gás produto passa por um ciclone interno que devolve ao leito parte do particulado arrastado e segue por dois trocadores regenerativos, onde é resfriado. Em seguida, um lavador tipo Venturi procede com tratamento do gás em via úmida, a temperaturas em torno de 100 e 200°C, retirando gases ácidos, particulados e seus contaminantes metálicos e orgânicos. Esta etapa inclui a inserção de calcário para remover o enxofre presente na mistura. Finalmente o gás produto é encaminhado a uma fornalha e *flare* onde é queimado, sendo previamente coletado para análise.

A Tabela 3 mostra os parâmetros de realização dos testes.

Tabela 3. Parâmetros de Realização dos Testes.

Parâmetro	Valor	Unidade
Descarga média de CDR	111	kg/h
Descarga média de ar do processo	111	kg/h
Descarga média de gás produto úmido	221	kg/h
Vazão média de gás produto úmido	180	Nm ³ /h
Temperatura média do leito	825	°C
Temperatura final do gás	40	°C
Dias de duração do teste	4	Dias
Tempo de duração do teste	37	Horas
Massa de CDR processada	4.109	kg

A eficiência do processo de gaseificação é estudada com base nas leis da termodinâmica, que determinam que toda energia é transformada de uma for-

ma para outra, mas sem que, no entanto, esteja livre de perdas (REED; DAS, 1981). Seguindo essa lógica, a eficiência do processo, conhecido por eficiência do gás frio, é admitida pela razão entre a energia química do gás e a energia química do combustível e é dada pela Equação (1) conforme LA VILLETTA et al. (2017).

$$\eta_{EGF} = 100 \times \left[\frac{v_{gás} \times PCI_{gás}}{v_{CDR} \times PCI_{CDR}} \right] \quad (1)$$

Em que, η_{EGF} é a eficiência de gás frio; $v_{gás}$ é a descarga média de gás úmido; $PCI_{gás}$ é o poder calorífico inferior de gás úmido; v_{CDR} é a descarga média do combustível derivado de resíduo; e PCI_{CDR} é o poder calorífico inferior do combustível derivado de resíduo.

A potência elétrica estimada pode ser obtida pela equação (2) (Çengel, 2006). No cálculo da referida potência são levados em consideração as características e disponibilidade do RSU conforme operação da usina. A eficiência global do ciclo de potência, neste caso ciclo Rankine, foi considerada segundo apresentado por CARVALHAES (2013) em seu trabalho.

$$W_{el} = \eta_{global} \times v_{gás} \times PCI_{gás} \quad (2)$$

Em que: W_{el} é a potência elétrica, em kW; η_{EGF} é o rendimento global do ciclo Rankine; $v_{gás}$ é a descarga média de gás úmido; e $PCI_{gás}$ é o poder calorífico inferior de gás úmido.

3.2 Avaliação Econômica

A análise econômica para a implantação da usina se deu a partir da geração de energia estimada no estudo técnico, para um horizonte de planejamento de 20 anos, prazo de operação da usina.

O fluxo de caixa para o período de operação da usina foi obtido a partir da estimativa de custos e receitas decorrentes de sua implantação.

A modelagem do fluxo de caixa segue metodologia proposta por BRASIL (2016) e as premissas técnicas e econômicas utilizadas para realização de avaliação econômica estão apresentadas na Tabela 4 que segue.

Tabela 4. Parâmetros do Fluxo de Caixa.

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência gerada ¹	-	-
Potência consumida pela planta	259,60	kW
Vida útil do projeto	20	Anos
Custo de implantação	26.182.683,76	R\$

Parâmetro	Valor	Unidade
Preço da energia	0,55	R\$/kWh
Custo médio ponderado de capital – CMPC	7,16	%
Taxa de aplicação de recursos – R_a	9,63	%
Taxa de captação de recursos – R_c	8,35	%
O&M linha de processamento de RSU	13,49	% de investimento na linha de processamento de RSU
O&M planta de gaseificação e geração de energia	5,57	% de investimento na planta de gaseificação e geração de energia elétrica
Seguro da usina	0,3	% de investimento
Tarifa de uso do sistema de distribuição – TUSD	6,61	R\$/kW

Nota: ¹ A potência gerada, importante na determinação de receitas de operação da usina, resulta da manipulação de dados e aplicação de fórmulas objeto de estudo desse trabalho, portanto, será detalhada no Item 3 – Resultados e Discussões.

A potência consumida e a vida útil seguem especificação do fornecedor dos equipamentos. O investimento inicial foi obtido através de edital de chamada pública, exceto pelo custo de conexão, obtido de MEDEIROS et al. (2017). O preço da energia adotado é dado pela tarifa média ponderada horo-sazonal – verde A4, para a faixa de tensão de 2,3 a 25kV da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), assim como a TUSD. Os valores do CMPC, R_a e R_c foram obtidos a partir de metodologia de ANEEL (2014). O O&M da linha de processamento de RSU e da planta de gaseificação e geração de energia foi considerado com base no trabalho de INFIESTA (2015). O seguro da usina adotado conforme estudo de PINHEIRO NETO (2017) para outras usinas a partir de fontes alternativas.

Para a análise de viabilidade econômica do projeto, uma vez determinado o fluxo de caixa do mesmo, utilizou-se os indicadores valor presente líquido – VPL, taxa interna de retorno – TIR e *payback* descontado.

4 Resultados e Discussões

4.1 Avaliação Técnica

Os resultados analíticos de caracterização e poder calorífico do CDR e do gás seguem conforme apresentado na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente. O gás foi submetido à cromatografia gasosa com detector de condutividade térmica e análise contínua, enquanto o CDR a análises físico-químicas e termogravimétricas para determinação de poder calorífico, metais, teor de cinzas e umidade e composição elementar, sendo apresentados nas respectivas tabelas seus valores médios.

Tabela 5. Caracterização do CDR tal qual Recebido para Análise.

Parâmetro	Valor	Unidade
Carbono	48,7	% massa
Hidrogênio	5,7	% massa
Oxigênio	30,4	% massa
Nitrogênio	0,87	% massa
Enxofre	0,22	% massa
Cloreto	1,37	% massa
Umidade	4,7	% massa
Cinzas	8,4	% massa
Poder Calorífico Superior	17,0	MJ/kg
Poder Calorífico Inferior	15,8	MJ/kg

Tabela 6. Caracterização do Gás Produzido.

Parâmetro	Valor	Unidade
Metano	5,84	% volume
Hidrogênio	4,03	% volume
Monóxido de carbono	10,61	% volume
Dióxido de carbono	11,96	% volume
Etano	0,24	% volume
Etileno	2,14	% volume
Propano	0,74	% volume
Butano	0,08	% volume
Água	7,98	% volume
Nitrogênio	56,39	% volume
Poder Calorífico Superior	6,64	MJ/Nm ³
	5,41	MJ/kg
Poder Calorífico Inferior	6,04	MJ/Nm ³
	4,92	MJ/kg

De acordo com a classificação proposta em BIZZO et al. (2011), segundo o poder calorífico, o gás produzido pode ser dividido em três categorias:

1. Baixo poder calorífico até 5 MJ/Nm³;
2. Médio poder calorífico de 5 a 10 MJ/Nm³;
3. Alto poder calorífico acima de 10 MJ/Nm³ A 40 MJ/Nm³.

Da Tabela 6 tem-se que o poder calorífico inferior do gás produzido é de 6,04 MJ/Nm³, tratando-se de um gás de médio poder calorífico com possibilidade de queima para geração de energia elétrica.

A eficiência do processo de gaseificação, dada pela aplicação dos valores médios de PCI (Tabela 5 e Tabela 6) e vazões de realização dos testes de gaseificação (Tabela 3) em (1), resultou em um valor médio de 62%, semelhante àqueles esperados em literatura (REED; DAS, 1981; BEGUN et al., 2014), sem que, no entanto, nenhuma avaliação de melhoria da eficiência do gaseificador tenha sido estudada.

A potência elétrica em ciclo Rankine encontrada, dada pela Equação (2), foi de 1.539,4 kW, que descontada da potência necessária para operação da planta, estimada em 260,0 kW, é suficiente para garantir a operação de toda a planta industrial e ainda apresentar potência líquida de 1.279,4 kW disponível para injeção na rede elétrica da distribuidora.

4.2 Avaliação Econômica

Uma vez determinado o fluxo de caixa, a aplicação de métodos de análise de investimentos, através de indicadores econômicos de viabilidade, calculados em planilha eletrônica, permitiu avaliar o desempenho econômico esperado para a implantação da tecnologia. A Tabela 7 sintetiza os resultados encontrados, considerando a TMA como o custo de capital próprio de 9,63%.

Tabela 7. Indicadores de Viabilidade Econômica.

Parâmetro	Valor	Unidade
VPL	4.445.142,81	R\$
TIR	12,1	% a.a.
Payback descontado	13,2	Anos

Do ponto de vista do VPL, a análise de viabilidade econômica indicou a viabilidade do projeto, uma vez que o VPL foi maior que zero (R\$ 4.445.142,81).

Por apresentar fluxo de caixa convencional, utilizou-se o método da TIR como indicador de desempenho interno do projeto chegando-se a um resultado de 12,1% a.a. resultando como viável uma vez que foi maior que a TMA adotada (9,63%).

Ainda segundo o Payback descontado temos a indicação de viabilidade do projeto dado que o período de retorno do investimento (aproximadamente 13 anos e 2 meses) foi inferior ao período de vida útil da usina (20 anos).

5 Conclusão

No contexto de discussão da sustentabilidade de cidades, a inovação tecnológica ocupa papel importante na promoção de alternativas para a gestão de seus conflitos. Entre esses conflitos, aqueles decorrentes da geração e má gestão dos resíduos sólidos podem ser sanados ou dirimidos através da aplicação de inovações tecnológicas.

A tecnologia de gaseificação demonstra alinhamento com as necessidades atuais de intervenção das

cidades nas questões relacionadas ao meio ambiente e cidadania, no que diz respeito ao gerenciamento de RSU, conferindo rota tecnológica para destinação final e aproveitamento energético destes resíduos, contribuindo para a geração distribuída e diversificação da matriz energética.

Ainda que nenhum estudo sociológico ou ambiental tenha sido executado até este ponto, benefícios como redução de volume para disposição final de resíduos, diminuição de emissão de gases do efeito estufa, eliminação de pontos de poluição de solo e águas e riscos de proliferação de doenças podem ser constatados decorrentes da intervenção tecnológica em questão. Portanto, avaliações ambientais e sociológicas cabem como indicações para trabalhos futuros.

Do ponto de vista dos desempenhos técnico e econômico analisados no âmbito deste trabalho, as análises de caracterização do gás demonstraram um combustível de médio poder calorífico passível de queima conforme constatado nos testes de gaseificação.

Para a eficiência do processo de gaseificação encontrada, a potência elétrica estimada no estudo chegou a valores suficientes para manutenção da operação de toda a planta além de exportação de energia para a rede elétrica, apontando para a viabilidade da tecnologia como constatado na avaliação econômica. Ressalte-se, contudo, nenhum estudo para melhoria da eficiência do reator termoquímico foi executado, restando daí possibilidade de melhoria de seu desempenho e objeto de estudos futuros.

Agradecimentos

Agradecemos a Furnas Centrais Elétricas S.A. pela viabilização do estudo na disponibilização de dados e recursos, bem como ao Instituto Federal de Goiás pelo esforço na investigação de tecnologias em processos sustentáveis.

Referências Bibliográficas

- ABNT (1992). NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. ABNT, Rio de Janeiro - RJ.
- Abrelpe (2012). Caderno informativo Resíduos Sólidos Urbanos. Abrelpe, São paulo - SP.
- Abrelpe (2015). Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil. Abrelpe, São paulo - SP.
- Abrelpe (2017). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016. Abrelpe, São paulo - SP.
- Araujo, B. G. P. et al. (2013). Resíduos Sólidos Urbanos: Análise sobre situação do conjunto Albano Franco – Riachão do Dantas-SE. Revista Eletrônica da Faculdade José Augusto Vieira, Vol.4; pp. 45- 58.

- Azevedo, P. B. et al. (2015). Diagnóstico da degradação ambiental na área do lixão de Pombal – PB. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Vol.10, No. 1; pp. 20- 34.
- Begun, S. et al. (2014). An experimental investigation of solid waste gasification using a large pilot scale waste to energy plant. *Procedia Engineering*, Vol.90; pp. 718-724.
- Bizzo, W. A. et al. (2011). Capítulo V: Sistemas de combustão de resíduos sólidos para geração de energia. In: Autores. *Escola de Combustão III. Rede Nacional de Combustão*, Salvador - BA.
- Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília - DF.
- Brasil (2014). Custo de capital da geração. Aneel, Brasília - DF.
- Brasil (2016). Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETES no Brasil a partir do biogás. *Probiogas*, Brasília - DF.
- Carvalhoes, V. (2013). Análise do potencial energético de resíduo sólidos urbano para conversão em processos termoquímicos de gaseificação. *Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília - DF.*
- CENBIO (2002). Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existente no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte. *CENBIO*, São Paulo - SP.
- Çengel, Y. A. e Boles, M. A. (2006). *Termodinâmica*. McGraw-Hill, São Paulo - SP.
- IBGE (2010). Censo demográfico: características da população e dos domicílios. IBGE, Rio de Janeiro - RJ.
- Infiesta, L. R. (2015). Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema - Projeto CIVAP. *Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.*
- Intharathirat, R. and Salam, P. A (2016). Valorization of MSW-to-energy in Thailand: Status, challenges and prospects. *Waste Biomass Valor*, Vol.7, No. 2, pp. 31- 57.
- Kinto, O. T. et al. (2002). Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo. *GEPEA – USP*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242759985_ENERGIA_DA_GASEIFICACAO_DE_BIOMASSA_COMO_OPCAO_ENERGETICA_D E_DESENVOLVIMENTO_LIMPO.
- La Villetta, M. et al. (2017). Modeling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 74; pp. 71-88.
- Lora, E. E. S. (2012). *Biocombustíveis*. Interciência, Rio de Janeiro - RJ.
- Medeiros et al. (2017). Technical and economic feasibility of using microturbines for the energy utilization of landfill gas. In *IEEE CHILECON 2017*.
- Mesjasz-Lech, A. (2010). Municipal Waste Management in Context of Sustainable Urban Development. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 151, pp. 244- 256.
- MME (2010). Capacidade de Geração no Brasil. Brasília - DF. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidade_brasil/capacidadebrasil.cfm.
- Prado Filho, J. F. e Sobreira, F. G. (2007). Desempenho operacional e ambiental de unidades de reciclagem e disposição final de resíduos sólidos domésticos financiadas pelo ICMS Ecológico de Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. 12, No. 1.
- Matsakas, L. et al. (2017). Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol.26; pp. 69- 83.
- Melo, B. A. (2008). Avaliação computacional de um sistema de gaseificação em leito fluidizado utilizando o software CSFB. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG.*
- Mendoza, M. A. G. (2009). Projeto e avaliação computacional do desempenho de leito fluidizado circulante para obtenção de gás de síntese a partir de bagaço de cana de açúcar. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG.*
- Pinheiro Neto, D. (2017). Processo de otimização aplicada à análise de risco de investimento em geração de energia elétrica com fontes renováveis. *Tese (Doutorado em engenharia elétrica e de computação) – Escola de Engenharia Elétrica, mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO.*
- Reed, T. B. and Das, A. (1981). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Solar Energy Research Institute, USA.