

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EVAPORAÇÃO DE CHORUME COM O REJEITO TÉRMICO DE MOTOGERADORES A
BIOGÁS UTILIZADOS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

por

Diego Fernandes Schroeder

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

EVAPORAÇÃO DE CHORUME COM O REJEITO TÉRMICO DE MOTOGERADORES A
BIOGÁS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

por

Diego Fernandes Schroeder

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Dra. Marina Seelig

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 08 de Julho de 2013.

Schroeder, D. F., “**Evaporação de chorume com o rejeito térmico de motogeradores a biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos.**” 2013. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários geram efluentes que devem ser controlados e tratados. Isto cria uma oportunidade de mitigação dos custos dessa operação pelo aproveitamento do potencial energético. Este trabalho analisa a utilização do rejeito térmico de motogeradores, alimentados a biogás de aterro, para a evaporação de chorume. O chorume é considerado como sendo água, e aplica-se um modelo de evaporação de uma gota e balanços de energia para identificar os parâmetros que mais influenciam no processo do tipo *spray* em coluna vertical. Destacam-se o diâmetro inicial da gota, a velocidade da gota e a temperatura dos gases. Quanto menor o diâmetro das gotículas, maiores são as taxas de evaporação, em certas condições, aproximadamente 45% do volume são evaporados com um diâmetro inicial de 150 μm enquanto que o percentual é de 7 para gotas de 500 μm . Comportamento semelhante pode ser observado com o aumento da temperatura dos gases de exaustão. Por outro lado a velocidade da gota, mesmo contribuindo com o aumento da taxa de transferência de calor devido à convecção, a redução do tempo de permanência faz com que reduza a taxa de evaporação com altas velocidades da gota. Conclui-se, a partir do balanço de energia, que é viável realizar a evaporação de chorume utilizando o rejeito térmico de um motogerador a biogás, atingindo valores de energia consumida de 3120 kJ/kg e taxa de evaporação de 100 kg/h de chorume evaporado.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos sólidos urbanos, RSU, evaporação de chorume, valorização energética de resíduos, biogás, aterro sanitário.

Schroeder, D.F., **Leachate evaporation using waste heat of biogas motogenerator in municipal solid waste landfills**. 2013. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

Municipal solid waste disposed in landfills generate effluents that must be treated and controlled. This creates an opportunity to mitigate costs of this operation by harnessing potential energy. This study analyses the use of waste heat of a motogenerator powered by landfill biogas in leachate evaporation. Leachate is considered as pure water and was applied a model of evaporation of a droplet and energy balances to identify most relevant parameters that influences the process of vertical spray column evaporation. It's emphasized the initial droplet diameter, velocity and the gases temperature. With smaller droplets, high evaporation rates are possible, in certain conditions, approximately 45% of the volume is evaporated with a diameter of 150 μm while 7% to 500 μm droplets. Similar behavior is observed as the exhaust gases temperature increase. Regarding velocity, however, even contributing with the increase of heat transfer rate duo to effects of convection, reducing the residence time causes a decrease in evaporation rate with high droplets velocities. It follows from the energy balance, that it is viable to accomplish the evaporation of leachate using the waste heat from a biogas power generator, obtaining values of energy consumed 3120 kJ/kg and evaporation rate of 100 kg/h of leachate evaporated.

KEYWORDS: municipal solid waste, MSW, leachate evaporation, biogas, waste to energy

ÍNDICE

Pg.

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
3.1 Constituição do Chorume	2
3.2 Evaporação do chorume.....	3
4. METODOLOGIA	5
4.1 Descrição do Evaporador de Chorume	5
4.2 Motor de combustão interna alternativo.....	6
4.3 Modelo de evaporação de uma gota esférica	7
4.4 Balanço de Energia	9
5. RESULTADOS	10
5.1 Estudo de sensibilidade	11
6. CONCLUSÃO	13
REFERÊNCIAS.....	14
ANEXOS	16

1. INTRODUÇÃO

Diferentemente dos resíduos líquidos e gasosos, que depois de devido tratamento são lançados nos corpos de água e no ar, os resíduos sólidos precisam ser lançados em aterros adequados de acordo com sua classificação. A Política Nacional de Resíduos Sólidos [Brasil, 2010] prevê o acompanhamento de metas nacionais e estaduais para o aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros sanitários, e os equipamentos básicos estão disponíveis comercialmente. Já o aproveitamento dos líquidos gerados, o chorume, é um desafio, sendo o comum sua destinação para estações de tratamento de esgoto.

Os tratamentos usuais para o chorume derivam de processos físico-químicos, biológicos ou uma combinação de ambos [Bacelar, 2010]. No primeiro grupo, o tratamento pode envolver tecnologias como filtração, diluição, coagulação/floculação, precipitação, evaporação, sedimentação, oxidação química e osmose reversa [Libânio, 2002]. Já no segundo grupo estão tratamentos como vermicompostagem, processos aeróbios, como lodos ativados, lagoas aeradas e filtros biológicos, e processos anaeróbios em lagoas ou ainda por wetlands onde ocorre a metabolização e fixação dos poluentes pela biomassa vegetal [Ferreira, 2001]. Alguns tratamentos podem ser realizados no próprio aterro, como é o caso da evaporação. Ela reduz sensivelmente o volume do líquido, sobrando um resíduo sólido concentrado (borra), que pode ser disposto no próprio aterro, além de resíduos gasosos, que podem ser liberados para a atmosfera ou tratados [Gomes, 2009]. Os gases emitidos pela evaporação do chorume sem tratamento prévio contêm altos níveis de poluentes como cloretos, amônia e outras formas nitrogenadas [Tavares, 2011].

A evaporação pode ser natural ou forçada. O primeiro caso é indicado para regiões com alto nível de insolação e demanda maiores áreas e tempo de secagem. Já a evaporação forçada permite maiores velocidades de secagem em um espaço menor. Pode utilizar a combustão do biogás gerado pelo próprio aterro como fonte de energia térmica no processo [Bacelar, 2010].

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise energética da evaporação do chorume com a utilização do rejeito térmico dos motogeradores de eletricidade a biogás utilizados em aterros de resíduos sólidos urbanos, caracterizando um sistema de cogeração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos envolvendo de evaporação do chorume foram realizados, mesmo com diferentes focos sobre o tema chegaram à algumas conclusões semelhantes. Birchler (1994) realizou testes em laboratório para avaliar a eliminação de contaminantes através da destilação de três amostras de chorume, obteve sucesso em eliminar até 95% de impurezas iônicas com uma destilação ácida, com ajuste no pH. A autora, utilizando o método de Monte Carlo, testou teoricamente a viabilidade de utilizar a combustão do metano emitido pelo aterro para evaporar o chorume gerado. Concluiu que esta é uma opção viável para a maioria dos aterros com mais de 2 anos de operação.

Silva e Segato (2002) caracterizaram as propriedades do chorume gerado pelo aterro sanitário de Bauru e investigaram a produção e aproveitamento do gás para evaporação do chorume. O chorume em geral apresentou pH elevado, acima de 7,0, e taxas de demanda química de oxigênio (DQO) relativamente baixas. A produção de biogás ao longo da vida útil do aterro foi estimada pelo método proposto por Tchobanoglous (1996), que se baseia na composição do lixo e frações rapidamente e lentamente degradáveis. A média de chorume gerado durante a vida útil do aterro, que pode durar 25 anos, é de aproximadamente 1700 kg/h. A partir do poder calorífico do metano, os autores estimaram a eficiência do sistema de coleta

do gás e do trocador de calor para evaporação do chorume. Chegaram à conclusão que com 70% do gás coletado, valor considerado viável devido a perdas no sistema, seria possível a evaporação completa do chorume gerado pelo aterro entre o sétimo e o décimo segundo ano de funcionamento, tornando-se inviável nos demais anos. Com apenas 50% coletado, não seria viável em nenhum ano, e com 90%, viável entre o quarto e o décimo segundo ano. Porém, de acordo com a literatura, é difícil um sistema capaz de alcançar 90% do gás de aterro coletado, isto se deve às fugas do gás para o ambiente e perdas no sistema.

Rehman (2003) modelou, construiu e realizou testes em um evaporador piloto para chorume em um aterro sanitário em Ottawa, Canadá. Empregou a combustão do metano em um queimador como fonte de calor. Utilizou para comparação, água e o próprio chorume do aterro. Chegou à conclusão de que o biogás possui energia suficiente para evaporar o chorume. Constatou ainda, que mesmo conseguindo concentrar compostos não voláteis como boro e cloretos na borra, ainda se torna necessário tratamento para os efluentes do processo, visto que a fração evaporada apresentou alta concentração de elementos voláteis como amônia.

Pagliuso e Regattieri (2008) verificaram que há mais energia disponível no biogás do que a necessária para incinerar o chorume, a partir de balanços energéticos e de espécies. Tendo como base o aterro de São Carlos, o trabalho mostrou também a necessidade de tratamento do gás efluente emitido na incineração, pois o nível de substâncias poluentes, como cloreto de hidrogênio (HCL) e monóxido de nitrogênio (NO) presentes ultrapassam os limites legais.

Um evaporador à energia solar para testes foi desenvolvido por Sá et al (2012) afim de avaliar a viabilidade de utilizar somente a energia solar para evaporação do chorume. O equipamento é composto de um tanque raso com uma cobertura de vidro inclinada, permitindo que o vapor de água resultante do chorume condense e escorra até pontos de captação. Indicado para regiões com altos níveis de insolação, o evaporador mostrou-se eficiente no tratamento, gerando um efluente de boa qualidade que pode inclusive ser aproveitado na agricultura. Por ser um sistema fechado, o equipamento obteve baixas taxas de evaporação. A utilização do evaporador à energia solar apresenta-se como boa alternativa para aterros de pequeno porte em regiões com alto índice de insolação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Constituição do Chorume

O chorume é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas como o “líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio)” [ABNT, 1992]. O chorume é formado pela decomposição da matéria orgânica no lixo, causada por micro-organismos e pela percolação de água que atravessa a massa do lixo, arrastando partículas e outros materiais em suspensão. A água é composta pela umidade presente no próprio lixo, infiltração da chuva ou ainda água do subsolo que atinge por capilaridade a massa orgânica. O modo de colocação dos resíduos no aterro também é relevante para a formação do chorume. Há procedimentos para diminuir a quantidade de chorume produzido, contudo, sua geração em aterros de resíduos sólidos urbanos é inevitável, o que torna indispensável um correto tratamento para disposição no ambiente. A Tabela 1 apresenta a composição padrão e a faixa de variação de chorumes em aterros novos e antigos [Tchobanoglous, 1993].

Tabela 1: Composição típica de chorume em aterros sanitários [Tchobanoglous, 1993]

Características	Valores (mg/l)		
	Novos aterros (menos de 2 anos)		Aterros antigos (mais de 10 anos)
	Faixa de variação	Típico	
DBO ₅	2.000-30.000	10.000	100-200
COT (carbono orgânico total)	1.500-20.000	6.000	80-160
DQO	3.000-60.000	18.000	100-500
Sólidos suspensos totais	200-2.000	500	100-400
Nitrogênio orgânico	10-800	200	80-120
Nitrogênio amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	4-100	30	5-10
Alcalinidade como CaCO ₃	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total como CaCO ₃	300-10.000	3.500	200-500

3.2 Evaporação do chorume

A evaporação ou secagem térmica do chorume resulta em teores de sólidos da ordem de 90 a 95%, contra 20 a 30% na desidratação mecânica, resultando em uma redução significativa de custos com transporte [Checoni, 2002]. No processo de evaporação, grande parte dos elementos poluentes permanece concentrada na borra, porém, os gases emitidos apresentam algumas partículas sólidas e concentrações altas de compostos poluentes como cloretos, amônia, dioxinas e furanos. Logo, a evaporação não deve ser utilizada como única forma de tratamento, apesar de ser bastante eficiente na eliminação de alguns elementos como metais pesados e partículas sólidas suspensas no chorume [Rehman, 2003].

Há diversos sistemas de secagem e evaporação para eliminar a fração líquida de uma mistura, que serão citados a seguir. Geralmente, o termo secagem é utilizado quando relativamente pequenas quantidades de água são eliminadas do líquido e evaporação quando se trata de quantidades maiores [McCabe et al., 2005]. Evaporadores e secadores podem ser classificados em diretos e indiretos. No primeiro caso, o material entra em contato direto com o meio de secagem, que pode ser ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido. Como há contato direto entre o material úmido e o meio, a troca de calor é mais eficiente. Já na indireta o material úmido permanece separado do meio de secagem, que ocorre geralmente através de paredes metálicas. Dessa forma, há uma redução na formação de odores. A Figura 1 mostra os dois modos de classificação.

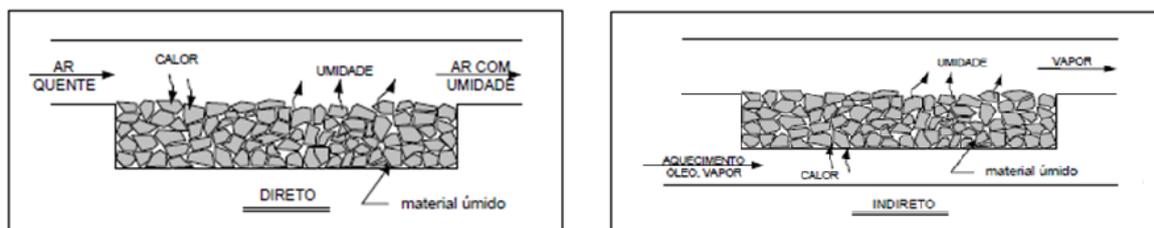


Figura 1: Processo de evaporação direta(esq.) e indireta (dir.) [Checoni, 2002].

Os tipos de evaporadores mais encontrados na literatura são:

- Evaporador de circulação natural em tubos horizontais

Vapor d'água (fonte quente) escoar no interior de tubos horizontais e o líquido a ser concentrado fica em seu exterior. Usado para líquidos não viscosos, com alto coeficiente de transferência de calor e que não depositem partículas [Geankoplis, 2003].

- Evaporador de circulação natural em tubos verticais

Vapor d'água (fonte quente) escoar no exterior de tubos verticais e o líquido a ser concentrado fica em seu interior. Não é utilizado para líquidos viscosos [Geankoplis, 2003].

- Evaporador de tubos longos verticais

O líquido a ser concentrado é bombeado e escoar em altas velocidades em tubos de 3 a 10 metros de comprimento. Geralmente o líquido passa somente uma vez pelos tubos, com baixo tempo de permanência [Geankoplis, 2003].

- Evaporador de película descendente

Uma variação do tipo de tubos longos verticais, onde o líquido é alimentado por cima e flui pelas paredes do tubo em uma película fina. Possui alto coeficiente de transferência de calor [Geankoplis, 2003].

- Evaporador em *spray*

O líquido passa por uma corrente de gás quente na forma de uma névoa de gotículas (*spray*). Em contato com o gás quente o líquido é evaporado. Por se tratar de um evaporador do tipo direto, resulta em altas taxas de evaporação. [Geankoplis, 2003]

- Secadores rotativos

É um dos tipos de secadores mais empregados para secagem de lodos biológicos, e podem ser do tipo direto ou indireto. São constituídos por um ou mais cilindros rotativos onde o lodo é deslocado continuamente ao longo da sua geratriz inferior pela ação de pás direcionadoras presas na face interna do cilindro que também promovem o revolvimento do material. [Checoni, 2002]

- Secadores de soleiras múltiplas

Consiste de um tubo cilíndrico vertical contendo várias soleiras anulares e horizontais montadas umas sobre as outras. O lodo é despejado na parte superior do equipamento e arrastado para fora e para dentro nas soleiras sucessivamente até a saída na parte inferior. O calor é transferido para o material através das soleiras, que são aquecidas por óleo ou vapor. [Checoni, 2002]

O material seco é descarregado na parte inferior do equipamento em uma tremonha e transportado para os silos de armazenamento, uma parte é recirculada no secador, misturada com o lodo úmido na entrada para iniciar a formação de novos grânulos. Dessa forma é possível determinar o tamanho de grãos no final do processo. Isto é útil para determinadas aplicações, como por exemplo na agricultura.

- Secadores a transporte pneumático

Conhecido também como "*flash dryer*", este secador consiste de um longo tubo vertical através do qual o material úmido é arrastado para cima por uma corrente de ar quente enquanto a umidade é transferida para o fluido. O material seco é misturado ao úmido, triturado e pulverizado contra a corrente de gás aquecido que evapora rapidamente a água da mistura.

Ao final do tubo, a corrente chega a um ciclone que separa os gases dos sólidos. [Checoni, 2002]

- Secadores de leito fluidizado

Material a ser seco é alimentado na parte superior de um leito vertical, as partículas são fluidizadas por ar ou gás aquecido que é soprado na parte inferior. A mistura e transferência de calor acontecem muito rápido, e o material seco é retirado pela lateral próximo ao fundo. Há uma considerável fuga de partículas sólidas na exaustão do gás. A instalação de ciclones e filtros é necessária para uma melhor recuperação de sólidos. [McCabe et al, 2005]

4. METODOLOGIA

Foi analisado o acoplamento de um evaporador de chorume do tipo *spray* acoplado à descarga dos gases de combustão de um motor alternativo utilizado para gerar energia elétrica a partir do biogás do próprio aterro. Esta configuração caracteriza a operação em regime de cogeração de calor e eletricidade.

4.1 Descrição do Evaporador de Chorume

O evaporador escolhido foi do tipo direto em coluna vertical onde o chorume é pulverizado em gotas (*spray*) com meio secante em contracorrente. Esta configuração garante elevadas taxas de transferência de calor graças a grande área de contato da superfície das gotas em relação ao volume de líquido. Além de eliminar resistências térmicas entre interfaces do equipamento com os fluidos. Em comparação com evaporadores de tubos metálicos, os problemas decorrentes da deposição de partículas sólidas na tubulação e corrosão são amenizados. A Figura 2 mostra o equipamento de modo esquemático.

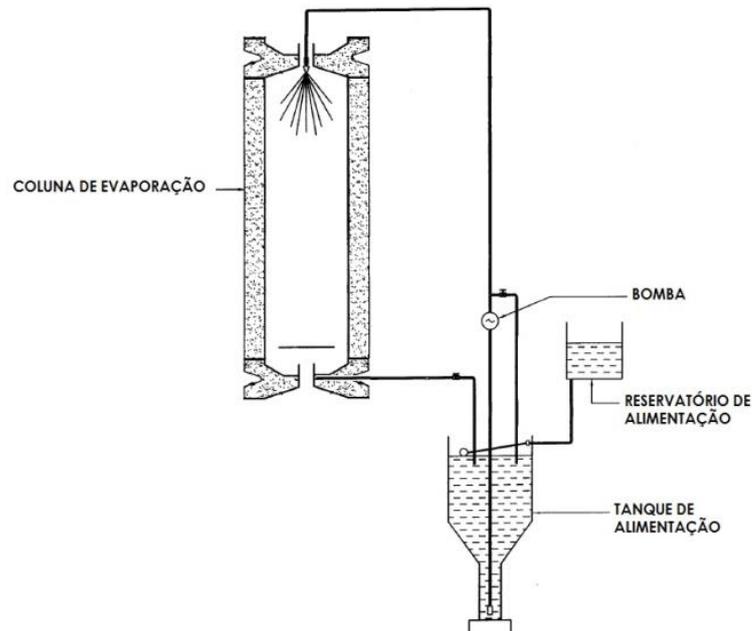


Figura 2: Evaporador em coluna vertical. [Adaptado de Rehman, 2003]

O chorume é pulverizado em um bocal na parte superior da coluna de evaporação, enquanto os gases de combustão a alta temperatura entram pela parte inferior. A evaporação acontece no interior da coluna cilíndrica, e os gases quentes em conjunto com a fração evaporada do chorume saem da coluna pela abertura superior. A evaporação direta permite

que tanto os gases do motor, quanto os gases gerados pela evaporação do chorume sejam encaminhados ao mesmo sistema de tratamento ao final do processo. A fração não evaporada do chorume é coletada na parte inferior e devolvida ao tanque de alimentação. O objetivo do equipamento é a redução de volume do chorume, logo as desvantagens que este tipo de evaporador apresenta, como a dificuldade em prever taxas de evaporação e teores de sólido da borra resultante de forma precisa, não são parâmetros relevantes no processo.

Considerando a baixa concentração de sólidos suspensos totais, da ordem de 500 mg por litro de chorume, apresentada na Tabela 1, as propriedades do chorume foram assumidas como sendo as da água pura. Rehman (2003), e Pagliuso e Regattieri (2008), também relataram que essa é uma aproximação aceitável para a análise energética.

4.2 Motor de combustão interna alternativo

O gás utilizado como meio secante no evaporador é o resultado da queima do biogás em um motor de combustão interna utilizado para conversão de eletricidade. As propriedades dos gases de combustão foram calculadas com o auxílio do *software* simulador de processos HYSYS Process v2.2. A composição dos gases de exaustão do motor, apresentada na Tabela 2 e obtido por Gewald *et al* (2012), foi calculado a partir da medição da concentração de oxigênio dos gases de exaustão de um motor *GE Jenbacher* a biogás e assumindo a queima completa do combustível.

Tabela 2: Composição dos gases de exaustão do motogerador a biogás [Gewald *et al*, 2012].

	Composição [%vol.]
CO ₂	6.86
H ₂ O	11.08
O ₂	8.35
N ₂	73.71

As propriedades foram calculadas para uma faixa de temperaturas de 340°C a 600°C a pressão atmosférica, seguindo a ficha técnica do motor Scania SGI 12^a, adaptado para queima de gás natural. A Tabela 3 apresenta as propriedades dos gases de exaustão do motor, considerando a composição citada. As demais propriedades utilizadas no modelo foram obtidas das tabelas do *software Engineering Equation Solver v9.18*.

Tabela 3: Propriedades dos gases de exaustão [HYSYS Process v2.2].

T(°C)	Viscosidade μ [N s m ⁻²] $\times 10^3$	Calor específico c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Condutividade térmica k_g [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Massa específica ρ [kgm ⁻³]
340	0.02910	1152	0.04545	0.5631
400	0.03121	1168	0.04921	0.5129
460	0.03328	1183	0.05288	0.4709
520	0.03537	1197	0.05648	0.4353
580	0.03749	1211	0.06000	0.4047
600	0.03820	1216	0.06115	0.3954

4.3 Modelo de evaporação de uma gota esférica

A modelagem da evaporação de uma gota em fluxo contracorrente com gases proposta por Coelho e Costa (2007) e Rehman (2003), considera uma gota esférica à temperatura T_s (°C) em um meio infinito e em repouso, com temperatura T_∞ (°C). O meio fornece energia para evaporar a gota, que difunde da superfície para o meio, diminuindo a massa e o raio r_s (m) ao longo do tempo até sua completa evaporação ($r_s = 0$). A Figura 3 apresenta gota em um meio infinito e em repouso.

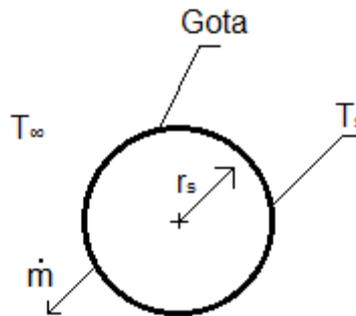


Figura 3: Evaporação de uma gota esférica em meio infinito, em repouso.

As seguintes hipóteses simplificativas foram utilizadas:

1. Processo de evaporação em regime quase-estacionário, significa que a cada instante o processo pode ser descrito como em regime estacionário.
2. A gota é composta somente por um componente, no caso, água pura.
3. Temperatura da gota é uniforme e igual a temperatura de ebulição da água a pressão atmosférica. Desprezada fase transiente de aquecimento da gota.
4. Número de Lewis é considerado unitário, o que significa que as difusividades térmica e mássica são consideradas iguais. Com isso é possível utilizar equações simplificadas.
5. Todas as propriedades termofísicas da fase gasosa, como condutividade, massa específica, calor específico, etc, são constantes. Para o cálculo do calor específico e condutividade foram utilizados valores médios da temperatura do meio T_∞ e a temperatura da gota T_s devido a grande variação dessas propriedades na interface líquido-gás.
6. Troca de calor por radiação desprezada.

A taxa de evaporação instantânea \dot{m} (kg s⁻¹) é dada por:

$$\dot{m} = \frac{4\pi k_g r_s}{c_{pg}} \ln \left[\frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{h} + 1 \right] \quad (4.1)$$

onde k_g ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) é a condutividade térmica do gás, r_s (m) o raio instantâneo da gota, c_{pg} o calor específico do gás ($kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$), e h o calor de vaporização ($kJ\ kg^{-1}$). O primeiro termo entre colchetes é conhecido como número de transferência de Spalding B , dado por

$$B = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{h} \quad (4.2)$$

O número de transferência B é uma razão da energia disponível e a necessária para a evaporação. O balanço de massa da gota fornece a taxa em que a massa da gota diminui com o tempo:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\dot{m} \quad (4.3)$$

Escrevendo a massa como sendo o volume multiplicado pela massa específica (ρ_g), e substituindo equação (4.1) na (4.3), obtém-se:

$$\frac{dD^2}{dt} = -\frac{8k_g}{\rho_g c_{pg}} \ln(B + 1) \quad (4.4)$$

A equação 4.4 é expressa em função do diâmetro D (m), indicando a relação linear entre o tempo e o quadrado do diâmetro da gota. Integrando e considerando o lado direito da equação como $-K$, definido como a constante de evaporação, obtém-se a equação seguinte, conhecida como lei do D^2 :

$$D^2(t) = D_0^2 - Kt \quad (4.5)$$

Uma vez conhecido o diâmetro inicial da gota D_0 e a constante de evaporação K , a equação permite calcular o tempo de vida (t_d) da gota, que corresponde ao tempo em que a gota evapora completamente.

$$t_d = \frac{D_0^2}{K} \quad (4.6)$$

A utilização dessas equações requer a escolha adequada dos valores das propriedades c_{pg} e k_g . Estas propriedades foram assumidas constantes, mas podem variar consideravelmente na fase gasosa entre a superfície da gota e o meio, entre os pontos de temperatura T_s e T_∞ . Coelho e Costa (2007) apresentaram aproximações de Law e Williams (1972) para o ajuste dessas propriedades:

$$c_{pg} = c_{p,vap}(\bar{T}) \quad (4.7)$$

$$k_g = 0,4k_{vap}(\bar{T}) + 0,6k_\infty(\bar{T}) \quad (4.8)$$

onde o índice *vap* se refere à fase gasosa da substância da gota, e \bar{T} é a média aritmética de T_s e T_∞ .

Para gotas que se encontram com certa velocidade relativa com o meio, uma correção semi-empírica no coeficiente de evaporação K , proposta por Ranz e Marshal, 1952, (apud Rehman, 2003), foi empregada:

$$K' = K \cdot (1 + 0,3Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}) \quad (4.9)$$

O número de Reynolds, Re , é baseado no diâmetro inicial da gota e a velocidade relativa da gota com o meio, e também com a viscosidade e massa específica do gás. Já o número de Prandtl, Pr , é calculado com as propriedades do gás [Rehman, 2003]. A equação 4.9 permite considerar também um fator convectivo na troca de calor, até então desprezado.

Com valor corrigido do coeficiente de evaporação K' , substituindo em (4.6), foi calculado o tempo de evaporação de uma gota esférica com velocidade relativa com o meio. Considerando o comprimento L da coluna do evaporador e a velocidade da gota, é possível calcular o percentual evaporado, Ev , com as relações entre os diâmetros:

$$Ev = \frac{m_{va}}{m_d} = \frac{m_d - m_{liq}}{m_d} = 1 - \left(\frac{D}{D_0}\right)^3 \quad (4.10)$$

4.4 Balanço de Energia

A vazão de churume \dot{m}_c (kg s^{-1}) com temperatura inicial T_1 (K), e calor específico c_{pa} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), entra no evaporador pelo bocal instalado na parte superior, onde é envolvido por gases em contracorrente, com \dot{m}_g , T_2 e c_{pg} . O material evaporado do churume, \dot{m}_{va} (kg s^{-1}), misturado aos gases de combustão deixam o evaporador pela abertura superior. O concentrado, \dot{m}_s (kg^{-1}), é retirado na parte inferior. A Figura 4 apresenta um diagrama com os fluxos de entrada e saída do evaporador.

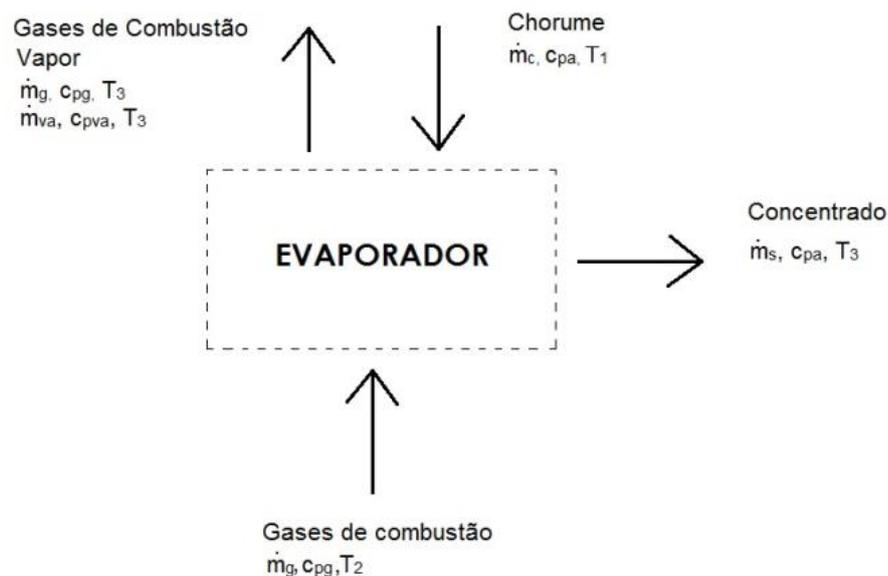


Figura 4: Diagrama de fluxos do evaporador.

O balanço de energia pode ser escrito como,

$$\dot{m}_c c_{pa} T_1 + \dot{m}_g c_{pg} T_2 = \dot{m}_{va} c_{pva} T_3 + \dot{m}_s c_{pa} T_3 + \dot{m}_g c_{pg} T_3 + h \dot{m}_{va} \quad (4.11)$$

A temperatura interna do evaporador foi considerada uniforme e todas as correntes saem com a mesma temperatura, T_3 . O balanço de massa de água que cruza o evaporador fornece a quantidade de água evaporada do churume:

$$(4.12)$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_s + \dot{m}_{va}$$

Os cálculos foram desenvolvidos em uma planilha eletrônica no *Microsoft Excel 2010*, onde foi possível alterar as propriedades do meio para análise das condições de operação do evaporador.

5. RESULTADOS

Com a temperatura dos gases em 340°C, em uma coluna de 1 metro de comprimento, tamanho inicial da gota e velocidade de 200 µm e 20 m/s respectivamente, considerando também a velocidade dos gases de 0,1 m/s, aproximadamente 18% do volume de uma gota são evaporados na coluna cilíndrica. Rehman (2003), chegou ao valor de 24% com condições semelhantes. A diferença é devido ao fato dos modelos apresentarem diferenças. Foi utilizado como meio secante gases de um queimador de metano, além de considerar a desaceleração da gotícula devido à massa de gás em contracorrente. Por outro lado, a modelagem deste trabalho, para efeitos de simplificação visto que o tempo de permanência da gota na coluna é muito pequeno, a desaceleração foi desprezada e a velocidade foi considerada constante ao longo da coluna. As propriedades da interface, que neste trabalho foram utilizadas aproximações de Law e Willians(1972), também foram abordadas de forma diferente por Rehman (2003). O comportamento do percentual evaporado para outras condições de temperatura pode ser observado na Figura 5.

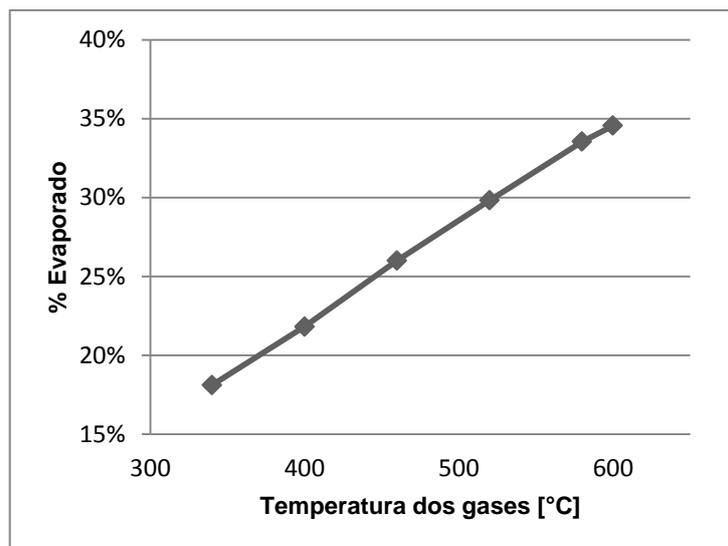


Figura 5: Percentual do volume evaporado de uma gota esférica para diferentes temperaturas dos gases de combustão para coluna de 1 metro.

A velocidade e diâmetro inicial da gota foram baseados em catálogos de fabricantes do bocal, que fornecem a capacidade do bocal em litros por hora, a pressão da bomba e o diâmetro da abertura. Com essas informações foi possível estimar a velocidade inicial da gota. O diâmetro é dado diretamente em tabelas, de acordo com o modelo e parâmetros de operação do bocal. Com o objetivo de comparar resultados e validar o modelo, o comprimento da coluna escolhido foi o mesmo utilizado por Rehman (2003) em um evaporador piloto.

Resultados apresentados na Figura 5 indicam a grande influência da temperatura dos gases na evaporação da gota na coluna. Na faixa de temperatura de operação do motor, de 340°C a 600°C, com as condições citadas, o percentual evaporado da gotícula varia de 18% à

aproximadamente 35%. O modelo considera o comportamento de uma única gota em um meio infinito, com propriedades constantes em um processo quase-estacionário, o que pode não corresponder com a situação real. Em um spray, a interação das gotas depende da distância entre elas, que em alguns casos pode ser de apenas alguns diâmetros de distância [Sirignano, 1999]. Contudo, a análise do comportamento individual de uma gota face às mudanças dos parâmetros de operação permite prever também o comportamento do *spray*, que é formado por múltiplas gotas.

5.1 Estudo de sensibilidade

Diversas simulações foram realizadas a fim de encontrar as variáveis mais importantes para o processo de evaporação na coluna. Mantida em 520°C a temperatura dos gases, velocidade da gota em 20 m/s, velocidade do ar em 0,1 m/s, ao variar o diâmetro inicial da gota foi possível constatar a elevada influência deste parâmetro no processo. A Figura 6 apresenta o resultado destas simulações.

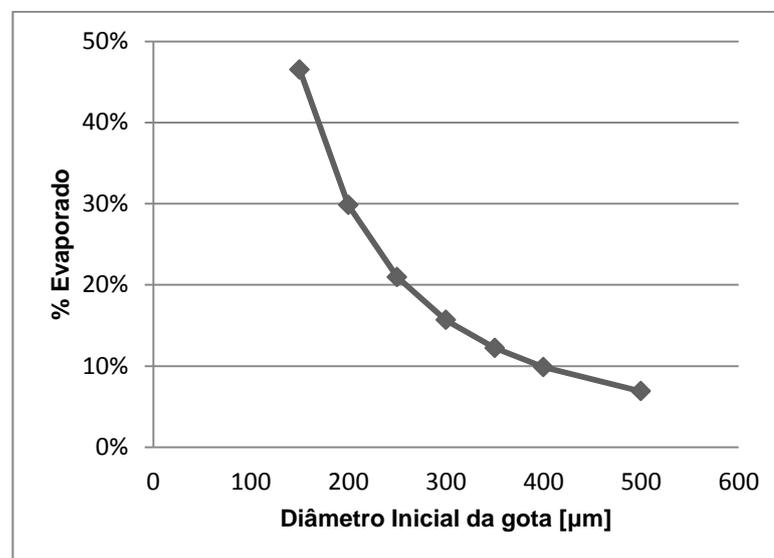


Figura 6: Percentual do volume evaporado para faixa de diâmetros iniciais da gota para uma coluna de 1 metro.

Com a diminuição do diâmetro inicial da gota, de 500 μm para 150 μm , houve um aumento na taxa de evaporação, de 7% para 46%, aproximadamente. Apresentando um comportamento exponencial. Isso se deve ao aumento da área de contato da superfície com o fluido quente, sendo o tempo para evaporação completa da gota diretamente proporcional ao quadrado de seu diâmetro inicial. Este resultado fornece embasamento para selecionar o tipo de bocal e pressão do sistema capaz de fornecer os diâmetros adequados.

A velocidade da gota também é dependente do tipo do bocal e pressão do sistema. A Figura 7 mostra o comportamento da evaporação em função da velocidade da gota para diferentes comprimentos de coluna.

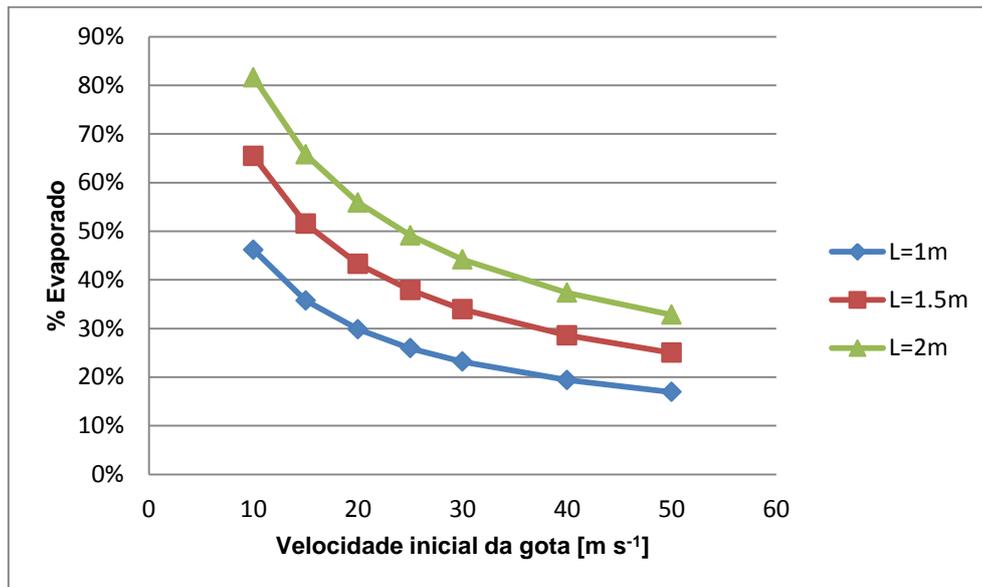


Figura 7: Comportamento para diferentes velocidades da gota e comprimentos de coluna, diâmetro inicial da gota de 200 μm .

O impacto da variável velocidade inicial de uma gota de 200 μm , com velocidade e temperatura do ar de 0,1 m/s e 520°C pode ser observado. O aumento do número de Reynolds, que é da ordem de uma centena para velocidades de 40 m/s, faz com que a taxa de evaporação aumente. Isto é devido à correção de Ranz e Marshall (1992), vide equação 4.9, a qual permite considerar também a influência da convecção na evaporação da gotícula. Em contrapartida, a redução do tempo de permanência da gota na coluna em função do aumento da velocidade da gota supera a influência da convecção no processo, o que reduz a fração evaporada. Levando em consideração somente a variável velocidade, em uma situação real, as curvas da Figura 7 estariam ligeiramente deslocadas para cima, pois ao considerar a velocidade constante, há uma redução no tempo de permanência da gota na coluna. Foi possível atingir aproximadamente 80% do volume de uma gota evaporada com a velocidade inicial em 10 m/s em uma coluna de 2 metros. Velocidades muito baixas são difíceis de atingir quando valores altos de vazão são requeridos em um *spray*, logo, esta situação pode não ser viável.

A influência da velocidade dos gases de exaustão na evaporação do chorume, apresentada na Figura 8, é pequena. Contribuem para isso os baixos valores em comparação à velocidade da gota e o fato de desconsiderar a desaceleração causada pela força de arraste.

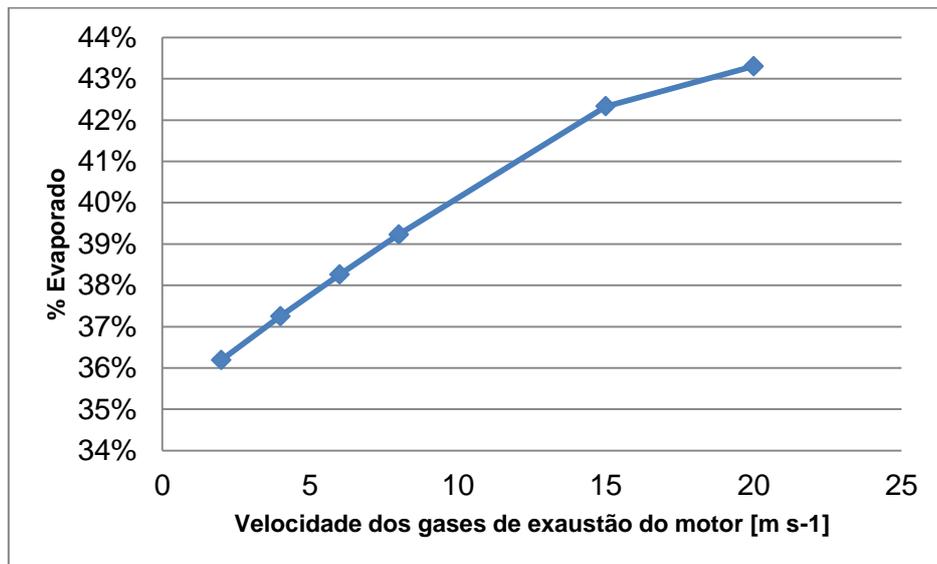


Figura 8: Percentual do volume evaporado para diferentes velocidades dos gases de exaustão do motor com temperatura 520°C, velocidade da gota 20 m s⁻¹, diâmetro 200 µm.

Mesmo com uma grande variação na velocidade dos gases de exaustão, de 2 a 20 m/s, com os demais parâmetros constantes, a fração evaporada da gota não aumentou de forma relevante, com aumento de aproximadamente 7%, passando de 36% para 43%.

O balanço de energia, equação 4.11 e 4.12, permite estimar a eficiência do evaporador acoplado ao motor, considerando o comprimento da coluna de 2 metros para maiores taxas de evaporação, um bocal capaz de fornecer uma vazão de 200 kg/h de água, diâmetro inicial da gota de 200 µm e velocidade de 30 m/s, vazão e temperatura dos gases de exaustão de 1540 kg/h e 580°C. A energia necessária para evaporar 1 kg de chorume foi de aproximadamente 3120 kJ, com uma taxa de evaporação de cerca de 100 kg/h. Birchler, 1994, considerando propriedades da água, chegou ao valor de aproximadamente 2840 kJ/kg e ressaltou que o valor depende das configurações do processo. Silva e Segato, 2002, estimaram o valor de 2587 kJ/kg evaporado. Rehman, 2003, em trabalho experimental com a construção de um evaporador piloto do tipo *spray* em coluna vertical, obteve valores entre 2490 e 3100 kJ/kg.

6. CONCLUSÃO

A análise do acoplamento da coluna do evaporador ao motogerador proposto mostrou que é viável a evaporação parcial do chorume com o rejeito térmico de motogeradores a biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos.

Com a utilização do modelo de evaporação de uma gota esférica desenvolvido, mesmo com suas limitações, foi possível analisar os principais parâmetros que influenciam a taxa de evaporação em um evaporador do tipo *spray* em coluna vertical. São os parâmetros mais relevantes: o tamanho da gota, a velocidade da gota e a temperatura dos gases. O diâmetro inicial da gota, conseqüentemente a seleção do bocal e os parâmetros de operação, se mostraram de grande importância nesse processo de evaporação. Com um diâmetro de 150 µm, cerca de 45% da gota é evaporada enquanto que o percentual cai para 7 para gotas maiores, da ordem de 500 µm. Comportamento similar pode ser observado com a temperatura dos gases de exaustão do motor, variando de 18% com gases à 340°C para 35% com temperaturas de 600°C. Isto corresponde a faixa de operação do motor analisado. Quanto à

velocidade da gota, a diminuição do tempo de permanência na coluna faz com que haja uma redução no percentual evaporado de cada gota apesar do aumento na taxa de transferência de calor devido à convecção, variando de 46% a 17% para velocidades de 10 e 50 m/s respectivamente.

Em termos energéticos, pode-se concluir que os gases residuais do gerador têm energia suficiente para evaporar o chorume, tendo uma energia consumida por quilograma de chorume evaporado de cerca de 3120 kJ, e taxa de evaporação de 100 kg/h.

A utilização da evaporação como tratamento foi analisada em diversos trabalhos. De um modo geral, esse processo consegue tratar parcialmente o chorume, mas o vapor gerado contém níveis elevados de elementos poluidores, como cloretos, amônia, etc. A composição do chorume de cada aterro varia conforme o tipo de resíduo depositado, influências climáticas e o tempo de permanência. Por esse motivo, uma análise caso a caso, com testes em laboratório de amostras do chorume é necessária para um correto dimensionamento dos sistemas de tratamento.

Como sugestão para novos estudos pode-se realizar uma avaliação de aterro específico quanto à geração de chorume e biogás ao longo de sua vida útil para verificar se há energia suficiente no motogerador para que todo o chorume gerado possa ser evaporado com os gases residuais. Ou ainda dimensionar os processos de tratamento do chorume de um aterro específico.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992, **NBR 8419/1992**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Bacelar, H. A. M., “**Tratamento de lixiviados produzidos em aterro de resíduos sólidos urbanos por meio da evaporação forçada**” 94 folhas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2010.

Brasil. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

Birchler, R. D., “**Landfill Leachate Treatment by Evaporation**”, ASCE, Journal of Environmental Engineering, Vol 120, Nº 5, 1994.

Checoni, A. D., “**Secagem Térmica de Lodos de Esgoto. Determinação da Umidade de Equilíbrio**”, 163 folhas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 2002.

Ferreira, J. A., “**Uma Revisão das Técnicas de Tratamento de Chorume e a Realidade do Estado do Rio de Janeiro**”, 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

Geankoplis, C. J., “**Transport Processes and Separation Transport Principles**”, Prentice Hall, 4ª edição, 2012.

Gewald, D; Siokos, K.; Karellas, S.; Spliethoff, H., “**Waste heat recovery from landfill gas-fired power plant.**” Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 16, Elsevier, 2012.

Gomes, L. P., **“Estudo de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras”**, ABES, 1ª edição, Rio de Janeiro, 2009.

Libânio, P. A. C. **“Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume”**, 175 folhas. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2002.

McCabe, W. L.; Smith, J. C.; Harriott, P., **“Unit Operations of Chemical Engineering”**, McGraw Hill, 7ª edição, Nova York, 2005.

Pagliuso, J.D., Regattieri, C.R., **“Estudo do Aproveitamento da Energia do Biogás Proveniente da Incineração do Chorume para Geração de Eletricidade”**, Revista Brasileira de Estudos Ambientais, vol 16 , 2008.

Rehman, A., **“Landfill Leachate Treatment Using Evaporation Technology”**, 251 folhas. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da *Carleton University, Ottawa, Canadá*, 2003.

Sá, L. F.; Jucá, J. F. T.; Motta Sobrinho, M. A. **“Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar.”**, 14 folhas. *Ambi-Água*, Taubaté, vol 7, Universidade Federal de Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2012.

Silva, C. L.; Segato, L. M., **“Tratamento de Líquidos Percolados por Evaporação Através do Aproveitamento de Gás de Aterros Sanitários.”** XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, São Paulo, 2002.

Sirignano, W. A., **“Fluid dynamics and transport of droplets and sprays”**, Cambridge University Press, 1ª edição, Nova York, 1999.

Tavares, B. F. D., **“Tratamento de Chorume: Análise dos Efluentes da Evaporação Forçada”**, 71 folhas. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2011.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S.A., **“Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues”**, McGraw Hill International Editions, 1993 *apud* Hamada, J., **“Estimativas de Geração e Caracterização do Chorume em Aterros Sanitários”**, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Bauru – SP, 1999.

ANEXOS

Catálogo do bocal *spray*.



HYDRAULIC ATOMIZING SPRAY NOZZLES,
STANDARD SPRAY



FINE SPRAY NOZZLES

PERFORMANCE DATA

Inlet Conn. (in.)	Nozzle Type						Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (mm)	Core No.	Capacity (liters per hour)*										Spray Angle (°)**		
	LN	LNN	LND	LNND	N	NN				M	2	3	4	7	15	20	35	45	80	3	6	20
1/4	•	•					.30	.41	106	-	-	-	-	-	3.1	4.0	4.6	6.1	-	-	51	
	•	•					.40	.41	108	-	-	-	-	-	4.1	5.4	6.1	8.2	-	-	58	
	•						.50	.41	109	-	-	-	-	-	4.4	5.1	6.7	7.6	10.2	-	-	63
	•	•					.60	.41	206	-	-	-	3.6	5.3	6.1	8.1	9.2	12.2	-	-	35	65
	•	•					1	.51	210	-	3.9	4.6	6.0	8.8	10.2	13.5	15.3	20	45	62	72	
	•	•					1.5	.51	216	4.8	5.9	6.8	9.0	13.2	15.3	20	23	31	65	70	72	
	•	•					2	.71	216	6.4	7.9	9.1	12.1	17.7	20	27	31	41	70	75	77	
	•	•					3	.71	220	9.7	11.8	13.7	18.1	26	31	40	46	61	65	70	73	
	•	•					4	1.1	220	12.9	15.8	18.2	24	35	41	54	61	82	72	81	84	
	•	•					6	1.1	225	19.3	24	27	36	53	61	81	92	122	73	79	81	
	•	•					8	1.5	225	26	32	36	48	71	82	108	122	163	85	89	91	
	•	•					10	1.6	420	32	39	46	60	88	102	135	153	204	82	84	86	
	•	•					12	1.9	420	39	47	55	72	106	122	162	183	245	78	82	85	
	•	•					14	1.9	421	45	55	64	84	124	143	189	214	285	85	88	90	
	•	•					16	2.2	421	52	63	73	96	141	163	216	245	326	83	86	88	
	•	•					18	1.9	422	58	71	82	109	159	183	243	275	367	81	84	86	
•	•					20	2.1	422	64	79	91	121	177	204	270	306	408	75	78	80		
•	•					22	1.9	625	71	87	100	133	194	224	297	336	449	70	72	75		
•	•					26	2.2	625	84	103	119	157	230	265	351	398	530	73	74	77		

*At the stated pressure in bar.
Maximum operating pressure depends on material and application. Call for specific recommendations.

Catálogo do motor SCANIA SGI 12A.

GENERATOR	ENGINE	
	60Hz	50Hz
Model:	SGI 12A	SGI 12A
Standby Power (kVA):	330	275
Mechanical efficiency Standby (%):	41	36,7
Electrical efficiency Standby (%):	36,3	33
Radiator Frontal Area J.W (m²):	1,228	
Radiator Frontal Area IC (m²):	0,864	
Natural Gas Consumption (60) Standby (kW):	728	666
Natural Gas Consumption (60) Prime (kW):	660	605
Natural Gas Consumption (60) Base (kW):	535	516
Natural Gas Intake Pressure (psi):	5 psi	
Control System:	E3-LBTS Lean Burn Trim System	
Air Intake Flow (kg/h):	1980	1650
Radiator fan air flow (m³/s):	7,8	6,5
Engine Electric System (Vdc):	24	
Flywheel housing:	SAE #1	
Flywheel:	SAE 14*	
Flywheel Inertial Moment (kg.m²):	2,74	
Exhaust Gas Maximum Temperature (°C):	600 (+/-50)	
Exhaust Gas Flow (kg/h):	1850	1540
Exhaust Gas Maximum backpressure (mmH2O):	500	
Exhaust connection diameter (pol):	5	
Jacket water heat rejection (kW):	110	100
Jacket water flow (m³/h):	21,6	18
Intercooler water heat rejection (kW):	66	55
Intercooler circuit water flow (m³/h):	4,32	3,6
Cylinders:	6 in line	
Bore and stroke (mm):	127 x 154	
Displacement (L):	11,7	
Compression ratio:	11:1	
Rotation direction:	Counterclockwise from the flywheel	
Dry engine weight (kg):	980	
Generator Type:	Synchronous, brushless, 2/3 pitch special for deforming loads	
Power factor:	0,8	
Insulation class:	180 °C (H)	
Temperature rise:	125 °C	
Protection degree:	IP21	
Total harmonic distortion:	<5 %	
Short circuit current:	3x In, during 5 seconds	