

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ELIMINAÇÃO DO EFLUENTE LÍQUIDO DE ATERROS SANITÁRIOS A PARTIR DE
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

por

Andrés Felipe Loaiza Patiño

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2017

ELIMINAÇÃO DO EFLUENTE LÍQUIDO DE ATERROS SANITÁRIOS A PARTIR DE
INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

por

Andrés Felipe Loaiza Patiño
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Aprovada por:

Prof. Dr Julio Cezar Mairesse Siluk PPGEF / UFSM

Prof. Dr. Geraldo Antônio Reichert..... PPGEFAM / UCS

Dr. Mario Saffer.....Engebio

Prof.^a Dr.^a Leticia Jenisch Rodrigues.....PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família, meus pais, Martha e Guillermo pelo amor e apoio incondicional, amo vocês. Aos meus irmãos Toño, William, e Pity, minha irmã Jenny que sempre acreditaram em mim.

Agradeço imensamente a minha companheira Vitória, pelo apoio, suporte, tolerância e amor durante esta caminhada, por acreditar em mim e me motivar nos momentos que pensei que não iria conseguir concluir este trabalho.

Ao meu orientador Paulo Smith Schneider que mesmo sem me conhecer aceitou me orientar, a ele meu muito obrigado pela confiança, pelos ensinamentos e pela paciência ao longo desta jornada.

Aos colegas do Laboratório LETA, colegas do GESTE e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC).

Aos professores da banca avaliadora.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Por último agradeço ao povo Brasileiro pela acolhida, que fez esta experiência acadêmica se tornar uma experiência de vida.

Axe !!!

RESUMO

O presente trabalho propõe sistemas para eliminar o efluente líquido (lixiviado) de um aterro sanitário a partir da combustão do efluente gasoso (biogás) gerado no mesmo local, caracterizando a integração energética dos dois efluentes. As gerações de biogás e lixiviado são referentes ao aterro de Guajuviras e são estimadas usando o modelo de IPCC, 2006 e o modelo de balanço hídrico respectivamente, estimando também suas incertezas de geração. Os resultados foram obtidos para a fase de operação e posteriormente de fechamento de um aterro real, com uma incerteza estimada de 50%. A integração energética dos efluentes é primeiramente verificada para situações de máxima eficiência por meio de balanços de massa e energia. Em sequência, cinco propostas conceituais de sistemas são apresentadas, tendo em comum a completa eliminação do lixiviado a partir da energia do biogás. Os sistemas Combustor-Evaporador (CE) e Incinerador-Evaporador (IE) tem como produto apenas a evaporação do lixiviado, e consomem cerca de 30% do biogás disponível no aterro. Os sistemas Motor-Evaporador (ME), Combustor-Motor-Evaporador (CME) e Incinerador-Motor-Evaporador (IME) são montados com a finalidade de aproveitar o excedente de biogás, mantendo sempre a evaporação completa do lixiviado. O desempenho dos sistemas propostos é avaliado por meio de indicadores técnico-ambientais e financeiros ao longo de um período de vinte anos, e sua importância é ordenada usando elementos da análise hierárquica de processos (AHP). Todos os sistemas propostos indicam ser viáveis, destacando-se aqueles que produzem energia elétrica, que se mostraram mais atraentes do ponto de vista técnico-ambiental, porém com investimentos específicos altos. Os sistemas que promovem a eliminação do lixiviado e produzem eletricidade com o excedente de biogás (CME e IME) são os mais viáveis financeiramente, com payback de 7 e 8 anos, VPL na média de US \$4.790.00 e TIR de 39% aproximadamente. A AHP indica que os sistemas baseados em cogeração têm pesos similares, variando só em 3% ao serem avaliados num viés ambiental. Da mesma forma, o cenário de viés financeiro apresentou uma pequena diferença entre os sistemas CME, IME e CE.

Palavras-chave: Biogás de aterro; Lixiviado; Integração energética de efluentes de aterro; Análise financeira; Análise hierárquica de processos.

ABSTRACT

The present work proposes systems to carry out the thermal decommissioning of the liquid effluent (leachate) from a sanitary landfill through the combustion of the gas effluent (biogas) produced in the same place, characterizing the energy integration of the two effluents. The biogas and leachate productions refer to the Guajuviras landfill and are estimated using the IPCC model, 2006, and the water balance model respectively, their production uncertainties are also estimated. The results are obtained for the operation phase and afterwards for a former real landfill, with an estimated uncertainty of 50%. The energy integration of effluents is first verified for situations of maximum efficiency through mass and energy balances. In the sequence, five conceptual proposals of systems are presented, having in common the complete reduction of the leachate from the biogas energy. The simplest CE and CI systems have only the leachate evaporation, and consume about 30% of the biogas available in the landfill. The ME, CME and IME systems are set up to take advantage of the biogas surplus, always maintaining complete evaporation of the leachate. The performance of the proposed systems is evaluated through technical-environmental (PEB and PEL) and financial indicators (IES, NPV, TIR and PB) over a period of twenty years, and their importance is ordered using the Analytic Hierarchy Process (AHP). All proposed systems indicate that they are feasible, especially those that produce electricity, which have been more attractive from an environmental and technical point of view, but with high specific investments (IES). The systems that promote leachate abatement and produce electricity with biogas surplus (CME and EMI) are the most financially viable, with paybacks of 7 and 8 years, NPV average of US \$ 4,790.00 and IRR of approximately 39%. The AHP indicates that the cogeneration-based systems have similar weights, varying only by 3% when evaluated in an environmental bias. Likewise, the financial bias scenario presented a small difference between the CME, EMI and EC systems.

Keywords: LFG; LFL; Landfill effluents energy integration; Financial analysis; AHP.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Revisão Bibliográfica	2
1.3	Formulação do problema	7
1.4	Objetivos	8
1.5	Organização do texto	8
2	FUNDAMENTAÇÃO	10
2.1	Efluente gasoso - Biogás	10
2.1.1	Formação do biogás de aterro	10
2.1.2	Composição do biogás de aterro	12
2.2	Efluente líquido – Lixiviado.....	14
2.2.1	Composição do lixiviado.....	14
2.3	Balanco de energia e estequiometria na combustão	17
2.4	Modelagem termodinâmica de equipamentos	20
2.4.1	Combustor	20
2.4.2	Evaporador	22
2.4.3	Trocador de calor.....	23
2.4.4	Motor de combustão interna para cogeração.....	24
2.4.5	Incinerador.....	25
2.5	Evaporação de lixiviado	26
2.6	Cogeração	27
2.7	Estimativa de custos de equipamentos	30
2.8	Análise hierárquica de processos AHP	32
2.8.1	Mensuração dos pesos dos indicadores	34
3	MODELOS DE GERAÇÃO DE EFLUENTES	38
3.1	Modelo IPCC para estimativa de geração de biogás em aterros sanitários	38
3.2	Modelo do balanço hídrico para estimativa de geração de lixiviado em aterros	40
3.3	Estimativa de geração de efluentes para o aterro de Guajuviras	45
3.3.1	Geração de biogás	48
3.3.2	Geração de Lixiviado	51
3.3.3	Análise de incerteza na estimativa de geração de efluentes de aterro	54
3.3.3.1	Estudo de sensibilidade	54
3.4	Balanco energético dos efluentes do aterro	60
3.5	Conclusões parciais	63
4	PROPOSTAS DE INTEGRAÇÃO ENERGETICA DE EFLUENTES DE ATERRO	64
4.1	Dados de entrada e hipóteses de modelamento	64
4.2	Sistema Combustor - Evaporador (CE).....	65
4.3	Sistema Incinerador - Evaporador (IE)	66
4.4	Sistema Motor de combustão interna - Evaporador (ME)	68
4.5	Sistema Combustor - Motor de combustão interna - Evaporador (CME).....	69
4.6	Sistema Incinerador - Motor de combustão interna - Evaporador (IME)	70

4.7	Conclusões Parciais	74
5	INDICADORES DE DESEMPENHO.....	75
5.1	Indicadores técnico-ambientais das propostas de integração energética.....	75
5.2	Indicadores financeiros das propostas de integração energética	77
5.3	Estudo de análise hierárquica das propostas de integração energética	83
5.4	Conclusões Parciais	88
6	CONCLUSÕES	90
6.1	Trabalhos futuros.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	ANEXO I	99
	APÊNDICE A	100
	APÊNDICE B.....	101
	APÊNDICE C	102
	APÊNDICE D	103
	APÊNDICE E.....	106
	APÊNDICE F.....	108
	APÊNDICE G.....	110
	APÊNDICE H.....	112
	APÊNDICE I.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Fases de degradação de resíduos e geração de gases em função do tempo [Adaptado de Qian et al., 2002]	11
Figura 2.2 Esquema de formação de líquidos [Adaptado de Lanza, 2012].....	16
Figura 2.3 Volume de controle do combustor	21
Figura 2.4 Volume de controle do evaporador	22
Figura 2.5 Volume de controle do trocador de calor	23
Figura 2.6 Volume de controle do motor de cogeração	24
Figura 2.7 Volume de controle do Incinerador.....	25
Figura 2.8 Divisão energética de um motor de combustão para cogeração[Adaptado de Amado, 2016].....	28
Figura 3.1 Formação de lixiviados e componentes principais do balanço hídrico [Adaptado de Renou et al., 2008].....	41
Figura 3.2 Vazão anual de lixiviado – L_{est} estimado pelo WBM em função do percolado anual. $PERCa$ e da área do aterro[Adaptado de Fenn et al., 1975]	44
Figura 3.3 Localização do município de Canoas [Adaptado de Thomazoni, 2014]	46
Figura 3.4 Conjunto dreno e queimador do sistema passivo de alívio de biogás no aterro de Guajuviras: (a) detalhe interno da extremidade do dreno; (b) dreno e queimador de biogás montados; (c) detalhe do protetor de queimador do dreno [Thomazoni, 2014]	48
Figura 3.5 Vazão volumétrica de biogás recuperado no ano T LFG_{aT}^R em Nm^3/h	51
Figura 3.6 Volume de lixiviado gerado anualmente (megalitros/ano)	53
Figura 3.7 Vazão volumétrica de biogás recuperado no ano T LFG_{aT}^R com incerteza de propagação combinada.....	58
Figura 3.8 Volume de lixiviado gerado anualmente LFL com incerteza de propagação combinada	59
Figura 3.9 Comparação do potencial energético dos efluentes de aterro e suas incertezas	62
Figura 3.10 Projeção do lixiviado na comparação do potencial energético dos efluentes de aterro e suas incertezas	63
Figura 4.1 Curvas resultantes da estimativa de geração de efluente gasoso (a) e líquido (b) no aterro de Guajuviras.	64

Figura 4.2 Proposta de integração energética Combustor-Evaporador CE [Adaptado de Amado et al, 2017]	66
Figura 4.3 Proposta de integração energética Combustor-Evaporador IC [Adaptado de Amado et al, 2017]	67
Figura 4.4 Proposta de integração energética Motor de combustão interna-Evaporador ME [Adaptado de Amado et al, 2017]	68
Figura 4.5 Proposta de integração energética Combustor-Motor-Evaporador CME [Adaptado de Amado et al, 2017]	69
Figura 4.6 Proposta de integração energética Combustor-Motor-Evaporador IME [Adaptado de Amado et al, 2017]	71
Figura 5.1 Indicadores financeiros (a) PB, (b) VPL, (c) TIR e (d) IE das propostas de integração energética.....	82
Figura 5.2 Estrutura hierárquica para avaliação dos sistemas de integração energética.	83
Figura 5.3 Pesos dos indicadores técnico ambiental e financeiro avaliados nos cenários ambiental (a) e financeiro (b)	87
Figura 5.4 Pesos das propostas de integração energética avaliadas nos cenários ambiental (a) e financeiro (b).....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Resumo das fases da geração de gás em aterros sanitarios [Adaptado de Tarazona, 2010].....	12
Tabela 2.2	Composição media do biogás de aterro [Adaptado de Thomazoni 2014, apud Tchobanoglous e Kreith, 2002].....	13
Tabela 2.3	Faixa dos valores característicos do lixiviado de aterros sanitários jovens e maduros [Adaptado de: Tchobanoglous & Kreith, 2002; Souto e Povinelli, 2007]	15
Tabela 2.4	Tipos de evaporadores e suas descrições [Adaptado de Rehman, 2003]	27
Tabela 2.5	Parâmetros dos gases de exaustão dos motogeradores [Adpatado de Gewald et al., 2012].....	29
Tabela 2.6	Cálculo do capital fixo de investimento para uma planta química[Adaptado de Boutros, 2009].....	32
Tabela 2.7	Escala de julgamento de importância do método AHP [Saaty, 1980].....	35
Tabela 3.1	Histórico de armazenamento de resíduos para o aterro de Guajuviras SMMA, 2013 ^a ,[Adaptado de Thomazoni, 2014]	47
Tabela 3.2	Composição gravimétrica adotada para o aterro de Guajuviras com base nos dados de PMPA, 2013 [Adaptado de Thomazoni, 2014].....	47
Tabela 3.3	Valores de BF e C_m coletados na literatura	49
Tabela 3.4	Valores de MCF e DOC_f utilizados nos cálculos	49
Tabela 3.5	Constante da taxa de reação k com base nos dados de IPCC, 2006	50
Tabela 3.6	Coefficientes para determinar C' (Castilhos, 2003).....	52
Tabela 3.7	Propriedades de umidade do solo (Castilhos, 2003).....	52
Tabela 3.8	Variação na geração anual de LFG em função de entradas com 10% de desvio para o ano 2012 LFG = 1552,14 Gg/Ano	55
Tabela 3.9	Incertezas individuais dos dados de entrada.....	56
Tabela 3.10	Incerteza combinada na geração de LFG para o ano 2012 LFG = 1552,14 Gg/Ano.....	57
Tabela 3.11	Variação na geração anual de LFL em função de entradas com 10% de desvio para o ano 2007 LFG = 23,17 ML/Ano	59
Tabela 4.1	Métricas das propostas para integração energética de efluentes de aterros sanitários.....	72

Tabela 4.2 Dimensionamento e custos em US\$ dos equipamentos usados nas propostas de integração energética de efluentes de aterros sanitários.....	73
Tabela 5.1 Resultados dos indicadores técnico-ambientais para os cinco sistemas propostos	76
Tabela 5.2 Parâmetros e valores da análise financeira associada às despesas das propostas de integração energética. [ERSE, 2016; Soares, 2014].....	80
Tabela 5.3 Parâmetros e valores da análise financeira associada às receitas das propostas de integração energética. [ANNEL, 2016; CRVR, 2016].....	80
Tabela 5.4 Parâmetros usados para modelar os fluxos de caixa.....	81
Tabela 5.5 Escala de valoração dos indicadores técnico-ambientais para os viés ambiental e financeiro.....	85
Tabela 5.6 Matriz de julgamento baseada na comparação par a par dos indicadores técnicos ambientais e financeiros	86
Tabela 5.7 Matriz de julgamento normatizada	86
Tabela 5.8 Valores encontrados para os vetores B e C	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANNEL	Agencia nacional de energia elétrica
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
CE	Sistema Combustor - Evaporador
CME	Sistema Combustor - Motor de combustão interna - Evaporador
CRVR	Companhia rio-grandense de valorização de resíduos
CSLL	Contribuição social sobre o lucro líquido
CTE	Custo total dos equipamentos
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
ERSE	Entidade reguladora dos serviços energéticos
EUA	Estados Unidos da América
GC	Gases de combustão
GE	General Electric
GEE	Gases de efeito estufa
GIS	Geographic Information System
HELP	Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
IE	Sistema Incinerador - Evaporador
INiG	Poland National Institution of Oil and Gas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IME	Sistema Incinerador - Motor de combustão interna - Evaporador
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Imposto de renda
LFG	Landfill gas
LFL	Landfill leachate
MBH	Método do Balanço Hídrico
MHHE	Calculadora de custos de equipamentos
MCI	Motor de combustão interna
ME	Sistema Motor de combustão interna - Evaporador
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MODUELO 2	Modelo de biodegradação de RSU da universidade de Cantabria
O&M	Operação e manutenção
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PB	Payback
PMPA	Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos de Porto Alegre
PCI	Poder calorífico inferior

PCS	Poder calorífico superior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROSAB	Programa Nacional de Pesquisa em Saneamento Básico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEL	Sistema de Evaporação de Lixiviado
SMMA	Secretaria Municipal de Preservação Ambiental do Município de Canoas
SST	Sólidos Suspensos Totais
TIR	Taxa interan de retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
UK	Unided Kingdom
UNEP	United National Environment Programme
UNINDO	United Nations Industrial Development Organization
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VPL	Valor presente líquido
WBM	Water Budget Method

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de transferência de calor, Matriz, m ² , Adimensional
$*A$	Matriz normalizada, Adimensional
a	Vetores da matriz de decisão, Numero de moles de biogás, Adimensional, kmol
A/C	Razão de oxidante-combustível da mistura, Adimensional
BF	Fração biodegradável, Adimensional
B	Constante de relação do tipo de equipamento, Adimensional
b	Numero de moles de lixiviado a ser evaporado, Adimensional
C	Coefficientes de relação entre pressões de operação, Adimensional
C	Coefficiente empírico que considera o tipo de solo de cobertura, Adimensional
C'	Coefficiente empírico produto de C e α , Adimensional
CH_{4gT}	Massa de metano gerada durante o ano T , Gg de metano
C_{BM}	Custo do equipamento, US\$
C_m	Potencial de geração de metano estequiométrico, Nm ³ CH ₄ /t RSU
C_p	Custo do equipamento construído em aço carbono, US\$
$DDOCmi$	Carbono orgânico degradável decomponível, Gg de carbono orgânico
$DDOCm(0)$	Valor de $DDOCm$ no tempo inicial, Gg de carbono orgânico
$DDOCm_a$	$DDOCm$ não decomposto nos anos anteriores a $T-1$, Gg de carbono orgânico
$DDOCm_{decT}$	$DDOCm$ que é decomposto durante o ano T , Gg de carbono orgânico
$DDOCm_{T-1}$	$DDOCm$ disposto durante o ano anterior a T , Gg de carbono orgânico
DOC	Fração de carbono orgânico degradável, Gg de carbono orgânico
$DOC_i^{BF-C_m}$	Carbono orgânico degradável obtido a partir de BF e C_m , Gg de carbono orgânico/Gg de RSU
DOC_f	Fração de DOC que irá degradar sob condição anaeróbia, Adimensional
e	Espessura da camada de cobertura, m
FC	Capacidade de campo, mm H ₂ O
FC'	Capacidade de campo específica, mmH ₂ O/m
F_{CH_4}	Fração volumétrica de metano no biogás, Adimensional

F_{BM}	Fator de custo do módulo, Adimensional
F_M	Fator de relação do material de fabricação do equipamento, Adimensional
F_P	Fator de pressão de operação, Adimensional
H	Entalpia, kJ/kg
HL	Perda de calor, Adimensional
h_s	Entalpia específica de saída no volume de controle, kJ/kg
h_e	Entalpia específica de entrada no volume de controle, kJ/kg
$h_{f,i}^{\circ}$	Entalpia de formação, kJ/kmol
$\bar{h}_{s,i}$	Entalpia sensível, kJ/kmol
IC	Índice de consistência, Adimensional
IR	Índice de Consistência Randômico, Adimensional
K	Constante de relação entre matérias de equipamentos, Adimensional
k	Constante da taxa de reação, Ano ⁻¹
L_{est}	Volume de lixiviado anual estimado, 10 ⁶ litros por ano
LFG_{aT}	Vazão volumétrica média anual de biogás produzido no ano T , Nm ³ /h
LFG_{aT}^R	Vazão volumétrica média anual de biogás coletado no ano T , Nm ³ /h
m	Tamanho da matriz de julgamento, Adimensional
\dot{m}	Vazão mássica, kg - kmol
\dot{m}_{LFG}	Vazão mássica de biogás, kg/s
\dot{m}_{Comb}	Vazão mássica de combustível, kg/s
$\dot{m}_{LFG,comb}$	Vazão mássica de biogás no combustor, kg/s
$\dot{m}_{LFG,inc}$	Vazão mássica de biogás no incinerador, kg/s
$\dot{m}_{LFG,mot}$	Vazão mássica de biogás no motor, kg/s
\dot{m}_n	Vazão mássica do fluido que não troca de fase, kg/s
\dot{m}_{vp}^{TC}	Vazão mássica média anual evaporada de lixiviado pelo trocador de calor, kg/s
n	Número de mols, kmol
MCF	Fator de correção do metano, Adimensional
MM	Massa molar, kg/kmol
MO	Modelo de previsão de efluentes, Adimensional

MW_{CH_4}	Massa molar do CH ₄ , kg/kmol
MW_{CO_2}	Massa molar do CO ₂ , kg/kmol
MW_{Ratio}	Razão das massas molares de CH ₄ e C, kg CH ₄ /kg C
NTU	Número de transferência unitária de calor, Adimensional
P	Precipitação, mmH ₂ O/mês
P_{Ele}	Potência elétrica gerada, kW
P_e	Pesos dos indicadores, Adimensional
p	Pressão, kPa
PEB	Energia elétrica produzida por LFG consumido, MJ/kg
PCI	Poder calorífico inferior, kJ/kg
PCS	Poder calorífico superior, kJ/kg
PEL	Energia elétrica produzida por lixiviado evaporado, MJ/m ³
$PERC$	Percolação da água em direção a massa de RSU, mmH ₂ O/mês
$PERC_a$	Quantidade de percolado anual, mmH ₂ O/ano
PET	Evapotranspiração potencial, mmH ₂ O/mês
\dot{Q}	Taxa líquida de transferência de energia por calor, kW
\dot{Q}_{Evap}	Calor entregue ao lixiviado no evaporador, kW
\dot{Q}_{Ent}	Calor entregue pela reação de combustão, kW
\dot{Q}_T	Calor fornecido ao lixiviado no trocador de calor, kW
\dot{q}_{Comb}	Taxa térmica de combustão, kW
\dot{q}_{Evap}	Taxa térmica de evaporação, kW
R	Escoamento superficial, mmH ₂ O/mês
RB	Desvio relativo – Razão de biogás, Adimensional
RC	Razão de consistência, Adimensional
S	Capacidade do equipamento, m ² -m ³ -kW
t	Tempo, Anos
$t_{1/2}$	Valor de meia-vida, Anos
T_{cr}	Temperatura de troca de fase do fluido que será evaporado/condensado, °C
T	Temperatura, °C

U	Coeficiente global de transferência de calor, kW/(m ² °C)
u	Incerteza
\dot{V}_{LFG}	Volume de biogás gerado num ano T, Nm ³ /s
\dot{W}_{VC}	Taxa líquida de trabalho transferido pela fronteira, kW
w	Conteúdo de umidade do RSU, Adimensional
W	Massa de resíduo sólido urbano, Gg de RSU
$W_a max$	Máximo valor de água disponível, mmH ₂ O
WB	Balanço de água no solo de cobertura, mmH ₂ O/mês
WP	Ponto de murcha, mm H ₂ O
WP'	Ponto de murcha específico, mm H ₂ O/m
W_s	Conteúdo de umidade do solo de cobertura, mmH ₂ O/mês
W'_a	Água higroscópica específica, mmH ₂ O/m
$W'_a max$	Máximo valor de água disponível específico, mmH ₂ O/m
X_i	Fração mássica, Adimensional
Y_i	Fração molar, Adimensional
z	Número de componentes do RSU armazenado, Adimensional

Simbolos Gregos

α	Coeficiente empírico que considera a declividade do aterro sanitário e a estação do mês, Adimensional
Δh_{year}	Horas em um ano, h
ΔT_{ML}	Diferença de temperatura média logarítmica, °C
∂	Derivada parcial, Adimensional
η_c	Eficiência do sistema de extração, Adimensional
η	Eficiência de sistema, Adimensional
ϕ	A razão de equivalência oxidante combustível, Adimensional
λ	Razão de excesso de ar, Adimensional
λ_{max}	Maior autovalor da matriz de julgamentos, Adimensional
ρ_{CH_4}	Massa específica do metano na CNTP, kg/Nm ³
ρ_{CNTP}	Massa específica do biogás nas CNTP, kg/Nm ³

ρ_{CO_2}	Massa específica do CO ₂ na CNTP, kg/Nm ³
ρ_{H_2O}	Massa específica da água, kg/m ³
σ	Desvio padrão, Adimensional
$\Sigma NEG(WB)$	Parâmetro auxiliar no balanço hídrico, Adimensional

Subscritos

<i>(l)</i>	Lixiviado Líquido
<i>(v)</i>	Lixiviado vaporizado
<i>c</i>	Fluido frio
<i>Esteq</i>	Estequiométrica
<i>GC</i>	Gases de combustão
<i>GCE</i>	Gases de combustão na saída do evaporador
<i>i</i>	Componente/material específico/espécie
<i>in</i>	Entrada
<i>LE</i>	Lixiviado no evaporador
<i>LFG</i>	Biogás
<i>LFG, CO</i>	Biogás consumido
<i>LFG, PR</i>	Biogás produzido
<i>LFL, TR</i>	Lixiviado tratado
<i>max</i>	Valor máximo
<i>min</i>	Valor mínimo
<i>n</i>	Mês analisado
<i>n</i>	Fluido que não troca de fase
<i>out</i>	Saída
<i>PR</i>	Produzido
<i>prod</i>	Produtos
<i>reag</i>	Reagentes

<i>ref</i>	Referencia
<i>SE</i>	Saída do evaporador
<i>T</i>	Ano analisado, Trocador
<i>TR</i>	Tratado
<i>VC</i>	Volume de controle

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Nas últimas décadas o mundo inteiro tem experimentado um aumento populacional acelerado, na mesma medida e junto a ele o aumento da produção e consumo de diferentes produtos para diferentes propósitos. Como consequência da combinação desses dois fatores, cresce a preocupação sobre os potenciais riscos associados à destinação final de resíduos sólidos, permitindo dessa forma estabelecer resoluções políticas e tecnologias regulamentadoras em relação ao gerenciamento e gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU). Elas visam atenuar o impacto ambiental e diminuir os riscos na saúde da população, e também permitem estudar a possibilidade de usar os resíduos sólidos gerados por meio de sua valorização energética.

Com base no dito anteriormente surge a pergunta sobre o que fazer com os resíduos sólidos gerados. Em um país com dimensões continentais como o Brasil, e tendo em conta que é o terceiro país que mais gera Resíduo Sólido Urbano (RSU), com 215.297 toneladas por dia [ABRELPE, 2015], o emprego de aterros sanitários é amplamente usado. Sua popularidade deve-se às vantagens econômicas de instalação e operação [El-Fadel, et al., 2002; Renou et al., 2008], mesmo respeitando as restrições legais. A legislação sobre gestão e tratamento de resíduos sólidos no Brasil seguem a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) [MMA, 2013a], que estabelece os objetivos e as diretrizes de caráter obrigatório para a gestão integrada e gerenciamento de RSU, tanto para geradores como para o poder público.

Apesar de que o aterro sanitário seja uma saída sustentável para disposição final de resíduos, ele tem desvantagens ligadas aos potenciais riscos para a saúde e o meio ambiente. O efluente gasoso, ou biogás de aterro, é constituído principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com traços de outros gases, e o efluente líquido, lixiviado, se forma devido à interação entre a matéria orgânica presente nos RSU e a chuva incidente que os percola. A liberação para atmosfera do metano pode ser até 21 vezes mais contaminante que o CO_2 , e a solução comum consiste em queimar o biogás sem nenhuma recuperação energética [Metcalf et al., 2015]. Por sua vez o lixiviado pode gerar contaminação do lençol freático e das águas superficiais e também produzir custos de transporte por ser levado a uma planta de tratamento de efluentes.

Diante deste cenário, a valorização energética do biogás como fonte energética para mitigar a concentração do lixiviado apresenta-se como uma possível solução devido à mitigação de impactos ambientais e diminuição nos custos de tratamento.

1.2 Revisão Bibliográfica

Esta revisão bibliográfica iniciou-se por identificar modelos de previsão de geração de efluentes gasosos e líquidos de aterro sanitário. Posteriormente, foram pesquisadas alternativas para a integração energética de efluentes, objetivando a evaporação do lixiviado e a possível cogeração a partir do poder calorífico do biogás. Na sequência, modelos para estimativa de custos de equipamentos envolvidos nas alternativas de integração energética foram pesquisadas. Finalmente procurou-se na literatura estudos sobre análise hierárquica de processos com o intuito de avaliar as propostas de integração energéticas descritas no presente trabalho.

Um dos primeiros trabalhos encontrados sobre geração de gás de aterro sanitário foi publicado por Farquhar e Rovers, 1973, que estudaram de forma experimental diferentes fatores como conteúdo de umidade, pH, temperatura e alcalinidade na influência de geração de biogás. Eles concluíram que a geração de biogás de aterro é um processo semelhante ao da digestão anaeróbia, e que pode até superá-la, dependendo do caso de aplicação.

Posteriormente, Stegmann, 1983, desenvolveu um trabalho experimental no qual modificou as técnicas usadas na operação de aterros sanitários com o objetivo de aumentar a geração de biogás e analisar a composição do lixiviado ao longo do tempo. Dentre as modificações propostas, ressaltam-se as práticas de recirculação de lixiviado, adição de matérias inertes nos resíduos, diminuição de altura dos maciços, entre outras.

Diversos trabalhos foram realizados no aterro de Motain View por [Findikakis et al., 1988; El-Fadel et al., 1989; El-Fadel et al., 1996a; El-Fadel et al., 1996b] tanto de forma experimental como de forma teórica (modelo matemático), com o intuito de estudar a geração e recuperação do biogás produzido pelo aterro sanitário. Foram encontrados resultados satisfatórios ao comparar os valores de biogás produzido pelo modelo com o biogás realmente coletado em experimentos.

Onk e Boom, 1995 realizaram um estudo com três modelos de previsão de biogás para 22 aterros na Holanda. Os autores concluíram que o modelo de ordem zero não consegue

descrever a taxa de geração de biogás, objetivo alcançado pelo modelo de primeira ordem, e melhorado com o de segunda ordem. Esse último aumentam sua complexidade porém com baixo ganho na precisão dos resultados.

Entre os modelos de primeira ordem destacam-se na literatura os modelos da USEPA, 2005 e do IPCC, 2006, que descrevem a geração na forma de decaimento exponencial com base em parâmetros empíricos.

Vários trabalhos compararam resultados experimentais com aqueles encontrados pelos modelos de primeira ordem [Ensinas, 2003; Borba, 2006; Machado et al., 2009; Tarazona., 2010; Amini et al., 2012]. Destaca-se em todos os trabalhos a relevância na escolha dos parâmetros adequados para a estimativa de biogás, uma vez que esses parâmetros são exclusivos e dependentes de cada lugar (local do aterro).

Thomazoni, 2014, estimou a quantidade de biogás gerado no aterro de Guajuviras, Canoas, RS, aplicando o modelo de primeira ordem do IPCC, 2006. O autor aponta a importância da escolha dos parâmetros utilizados nos modelos para a estimativa do potencial de biogás gerado pelo aterro, e destaca o carbono orgânico degradável (*DOC*) na estimativa de geração de biogás.

Para a estimativa de geração do lixiviado em aterros sanitários, o Método do Balanço Hídrico - MBH foi estudado e aplicado por diversos pesquisadores, iniciando pelo seus criadores Fenn et al., 1975, e posteriormente por Qasim e Chiang, 1994; Senior, 1995, Tchobanoglous e Kreith, 2002. O método baseia-se em um balanço da quantidade de água que incide na área do aterro, a massa de água percolada nos resíduos depositados, e a água que sai por evapotranspiração.

Modelos como o método suíço e modelo racional foram estudados e comparados com estudos experimentais por Gomes, 2005. O autor concluiu que o desvio em relação aos dados experimentais variou de 13% a 34% em função do método utilizado.

Autores como Schroeder et al., 1994 e Lobo et al., 2007a desenvolveram o software HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) e o MODUELO 2.0, respectivamente, para estimar a quantidade de lixiviado gerada em aterros sanitários. O primeiro apresentou um modelo quase bidimensional, tendo como informações de entrada dados climatológicos e propriedades hidrológicas dos materiais que compõem o aterro. Uma nova versão com correções sobre o modelo proposto foi feita por Berger, 2002. O modelo proposto por Lobo, 2007a, reproduz o histórico operacional do aterro sanitário, seus processos hidrológicos e de

biodegradação, permitindo a estimativa da geração dos efluentes do aterro sanitário (lixiviado e biogás), bem como sua caracterização através de simulação dinâmica. Nesse trabalho também foi realizada uma validação experimental. Posteriormente, também foram desenvolvidos outros trabalhos com a utilização dessa ferramenta [Lobo et al., 2007b].

A respeito da integração e recuperação energética dos efluentes de aterro sanitário Rehman, 2003, estudou a possibilidade de aproveitar o calor liberado na combustão do biogás para evaporar o lixiviado num evaporador do tipo spray-dry num aterro em Ottawa, Canada. O autor concluiu que a energia liberada pelo biogás depois da sua queima conseguia evaporar o lixiviado nas condições propostas. Diversos estudos comprovaram a mesma hipótese em diferentes aterros como os trabalhos desenvolvidos por Birchler, 1994. O autor aplicou o método de Monte Carlo para validar essa hipótese com dados de aterros de Alemanha e da Holanda. De igual forma, Silva e Segato, 2002 estudaram a possibilidade de evaporação do efluente líquido por meio do efluente gasoso gerado no aterro no aterro de Bauru, SP, Brasil. Eles constataram que com eficiências de captação de biogás de 70 poderia ser evaporado o lixiviado entre o quarto e o decimo segundo ano de operação do aterro e nos demais anos seria inviável para tratamento do volume médio anual de chorume gerado.

Em contraposição aos autores anteriores, Amado et al., 2016 determinaram que existe energia suficiente no biogás para evaporar o lixiviado produzido no aterro no período compreendido entre os anos de análise, e ainda indicaram que o excesso de energia seria suficiente para que sistemas envolvendo cogeração fossem testados, tendo como caso de aplicação o aterro de Guajuviras, Canoas, RS, Brasil.

Posteriormente Amado et al, 2017 propuseram sistemas de eliminação térmica do efluente líquido de aterros a partir de integração energética com o biogás produzido no mesmo local. Eles indicaram que existe viabilidade técnica e financeira de todos os sistemas destacando-se aqueles que incluem cogeração.

Estudos que envolvem processos de cogeração com gás de aterro foram realizados por diversos autores. Destacam-se Hao et al., 2008, que avaliaram a utilização de cogeração com um motor de combustão interna - MCI para a cidade de Hong Kong. Foi proposta uma comparação entre os seguintes sistemas: liberação direta na atmosfera do biogás, sua queima em tochas (*flaires*), utilização de parte do biogás em MCI e o restante queimado em tochas, todo biogás utilizado em MCI e uso do MCI com o sistema de cogeração. O cenário em que foi utilizada a cogeração mostrou-se o mais indicado a ser implementado, baseando-se em

indicadores econômico e ambiental, como a emissão de gases de efeito estufa - GEE. O payback para o cenário de cogeração foi de um ano. Posteriormente, Gewald et al., 2012, estudaram a possibilidade de aumentar a geração de eletricidade numa planta de cogeração em Ano Liosia, na Grécia por meio de ciclos água/vapor e ciclo Rankine orgânico, aproveitando os gases de exaustão de 15 MCI que usam gás de aterro como combustível. Além disso, os autores apresentaram uma análise financeira desenvolvida por companhias externas para avaliar cada processo. O estudo concluiu que a proposta dos autores tem viabilidade à medida que a geração excedente de energia elétrica se incrementa nos dois cenários em 36% e 37% para os ciclos água/vapor e Rankine orgânico respectivamente. A análise financeira revelou custos similares de investimento para os dois sistemas, e os autores aconselharam fazer um estudo financeiro mais detalhado.

Amini e Reinhart, 2011, apresentaram uma avaliação do potencial energético do biogás para um período de 25 anos, aplicado ao estado da Flórida EUA. O estudo foi baseado na previsão de cenários de mudança de diretrizes políticas sobre a coleta e disposição final dos resíduos sólidos, identificando as dificuldades para uma previsão em longo prazo devido às incertezas associadas à modelagem da geração de biogás de aterro sanitário.

Posteriormente, Amini et al., 2012, abordaram e discutiram as incertezas referentes ao modelo de decaimento de primeira ordem apresentado por USEPA, 2005, onde os autores concluíram que são necessários estudos mais detalhados sobre a determinação dos parâmetros utilizados no modelo de decaimento de primeira ordem, sugerindo inclusive a adição de novos parâmetros ou o uso de modelos de ordem superior.

Messineo et al., 2012 propuseram um estudo localizado na Sicília, Itália, onde os gases de exaustão e o líquido de arrefecimento de 11 motores de cogeração com biogás de aterro como combustível foi aproveitado para evaporar lixiviado gerado no local. O estudo planteou dois cenários, primeiro uma evaporação ao vácuo seguido de uma osmose reversa e um segundo cenário onde os processos anteriormente descritos mudavam de ordem, ou seja, primeiro o lixiviado era submetido à osmose reversa e depois a um processo de evaporação ao vácuo. Os autores ainda fizeram uma avaliação econômica baseada em custos de investimento, operação e manutenção, consumo de energia, entre os dois cenários e concluíram que para um aterro de porte meio é possível usar o biogás de aterro como fonte de energia para evaporar o efluente líquido por meio de cogeração, apresentado como principal vantagem redução de 50% dos custos de tratamento do lixiviado.

Carolino e Ferreira, 2013, realizaram uma análise energética e exergética sobre o processo de valorização do biogás gerado pelo aterro sanitário em Vila Nova de Gaia, Portugal. Os autores concluíram que ambas as eficiências estão longe de seus limites termodinâmicos, identificando os possíveis pontos de atuação para melhorá-las.

No caso específico do Brasil Barros et al., 2013 estudaram a geração de energia elétrica em aterros sanitários locais. Os autores dividiram o estudo em duas partes, na primeira foi estimado a população necessária para fazer os projetos de geração de energia através de usinas de biogás sustentáveis e na segunda parte foram calculados os custos associados à coleta e geração de resíduos sólidos no país. As conclusões apresentadas pelos autores indicam que existe viabilidade financeira para geração de energia elétrica em aterros que recebem resíduos de pelo menos 200 mil habitantes.

São encontrados na literatura diversos estudos sobre estimativa de custos de compra de equipamentos para plantas químicas. Autores como Bejan et al., 1996, Turton et al., 2008; Towler e Sinot, 2008 apresentam métodos similares para atualizar custos de equipamentos, baseados em coeficientes que relacionam o tipo de equipamento, seu tamanho, o tipo de material de fabricação, entre outros.

Com o intuito de estabelecer critérios de escolha sobre soluções para integração e mitigação de efluentes de aterro, a literatura apresenta a análise hierárquica de processos como uma ferramenta útil para tal fim. Saaty, 1980, desenvolveu o método de AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que busca tratar a complexidade do processo de tomada de decisão através da decomposição do problema em uma hierarquia de critérios, qualitativos e quantitativos, mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente.

Ahmad e Tahar., 2013 estudaram o potencial de geração de energia elétrica na Malásia a partir de fontes alternativas de energia: hídrica, solar, eólica, biomassa (incluindo biogás e resíduos sólidos urbanos), seguido de uma análise hierárquica com indicadores técnicos, econômicos, sociais e ambientais para determinar a melhor opção de geração de energia. O estudo concluiu que todas as fontes de energia poderiam suprir as necessidades energéticas da Malásia, sendo a energia solar a mais favorável seguida da biomassa, em terceiro lugar a energia hídrica e por último a energia eólica. O modelo de análise hierárquico ainda mostrou que cada recurso energético está inclinado para um critério particular (Solar-econômico, Biomassa-social, hídrico-técnico, eólico-ambiental).

O trabalho de Yap e Nixon., 2015, propôs uma análise multicritério e de hierarquia de processos para determinar a melhor alternativa tecnológica de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos em países com índices de desenvolvimento socioeconômicos diferentes como Índia e UK. As tecnologias comparadas foram incineração de resíduos, incineração de combustível derivados, gasificação, digestão anaeróbia e recuperação de biogás de aterro. O estudo avaliou critérios qualitativos e quantitativos de cada um dos processos. Finalmente, os autores concluíram que a melhor alternativa tecnológica de recuperação energética para Índia e UK foram a digestão anaeróbia e a gaseificação respectivamente.

Autores como Zelenovic´ et al., 2011; Chabuk et al., 2016 usaram o GIS (*Geographic Information System*) junto com a análise hierárquica de processos para estudar a viabilidade de implementar um aterro sanitário na região de Srem na Serbia e Al-Hillah Qadhaa no Irak respectivamente. Profundidade de águas subterrâneas, estradas, rios, terra para agricultura, dutos de gás, inclinação do terreno, centros urbanos, vilarejos entre outros foram consideradas mediante o uso do sistema de informação geográfica. Os resultados mostraram que 82,65% da área de Srem não era apta para implementação de aterros sanitários. Para o aterro de Al-Hillah Qadhaa no Irak, foram identificadas duas possíveis áreas para implementação de aterro sanitário uma de 9.153 km² e outra de 8.204 km².

Observa-se de forma geral que a estimativa de efluentes de aterro depende em grande medida das condições locais. A mitigação do impacto ambiental dos efluentes do aterro sanitário através de sua integração energética depende das tecnologias disponíveis e de suas restrições.

1.3 Formulação do problema

Tomando como base os estudos achados na literatura concernentes a integração energética de efluentes de aterro apresenta-se a seguinte questão: é possível eliminar o efluente líquido de aterro sanitários utilizando-se a energia do biogás do mesmo local de forma a atingir a viabilidade técnica-ambiental e financeira?

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo principal a formulação de propostas de sistemas de eliminação do efluente líquido de um aterro sanitário por meio de integração energética com seu efluente gasoso que sejam técnica e financeiramente viáveis.

Os objetivos específicos são:

- Verificar a disponibilidade de biogás com fins de evaporar o lixiviado do aterro através de balanços de massa e energia, calculados por modelos de previsão associados à avaliação de suas incertezas;
- Avaliar o desempenho das propostas de sistemas de mitigação dos efluentes por meio de indicadores técnico-ambientais e financeiros;
- Ordenar os sistemas propostos de mitigação de efluentes usando elementos da análise hierárquica de processos.

1.5 Organização do texto

No segundo capítulo uma revisão sobre formação e características dos efluentes líquidos e gasosos presentes nos aterros sanitários é apresentada, posteriormente é feita uma revisão de conceitos sobre estequiometria na combustão, balanços de massa e energia em equipamentos de queima e evaporação de lixiviado. Depois é descrita a metodologia de estimativa de custos de esses equipamentos e por último são abordados conceitos sobre análise hierárquica de processos.

No terceiro capítulo são apresentados os modelos de estimativa de efluentes gasoso e líquido em aterros sanitários, assim como sua aplicação a um caso de estudo (aterro de Guajuviras). Também são abordados conceitos sobre estimativa e propagação de incerteza de ditas estimativas. No final do capítulo são abordadas questões em relação aos balanços de massa e energia das estimativas de geração de LFG e do LFL visando sua integração energética.

No quarto capítulo são expostos diferentes arranjos técnicos usando equipamentos de queima de biogás e evaporação de lixiviado como propostas de sistemas para eliminação térmica do efluente líquido por meio de integração energética com o efluente gasoso.

No quinto capítulo são apresentados e analisados os resultados das propostas de integração energética dos efluentes por meio de indicadores técnico-ambientais e financeiros.

De igual forma são organizadas e comparadas as propostas através da análise hierárquica de processos com viés financeiro e ambiental.

No Capítulo 6 apresenta-se o fechamento do trabalho com as conclusões finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Este capítulo aborda as principais características dos efluentes gerados nos aterros sanitários, também inclui um aparte sobre as reações geradas na combustão de gases, seguida de uma revisão sobre equipamentos de queima e evaporação do efluente gasoso e do efluente líquido respectivamente. Depois apresenta metodologia para determinar custos desses equipamentos e finalmente este capítulo apresenta conceitos sobre o método de análise hierárquica de processos

2.1 Efluente gasoso - Biogás

De forma geral, o biogás é formado a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica. Sua geração se possibilita graças a uma grande variedade de resíduos de origem orgânico, como resíduos domésticos, agrícolas, lodos de esgoto, entre outros. O biogás está composto aproximadamente por 55% de metano, 40% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis [Tchobanoglous e Kreith, 2002]. Estas percentagens são variáveis e são dependentes do tipo do resíduo, do tratamento e, de acordo com a eficiência do processo, o biogás pode alcançar valores entre 40% e 80% de metano [Barlaz et al., 1987]

2.1.1 Formação do biogás de aterro

Dois processos ocorrem para que aconteça a decomposição da matéria orgânica em um aterro sanitário. O primeiro processo se efetua quando os resíduos são depositados no solo, iniciando-se a decomposição aeróbia. Com a posterior cobertura desses resíduos, a concentração de oxigênio diminui e inicia-se fase de decomposição anaeróbica. A taxa de geração do biogás a partir da decomposição de resíduos é variável ao longo do tempo. Diversos autores [Tchobanoglous et al 1994; Kjeldsen et al., 2002; Qian et al., 2002], descrevem essa taxa por meio de fases, conforme mostrado na Figura 2.1.

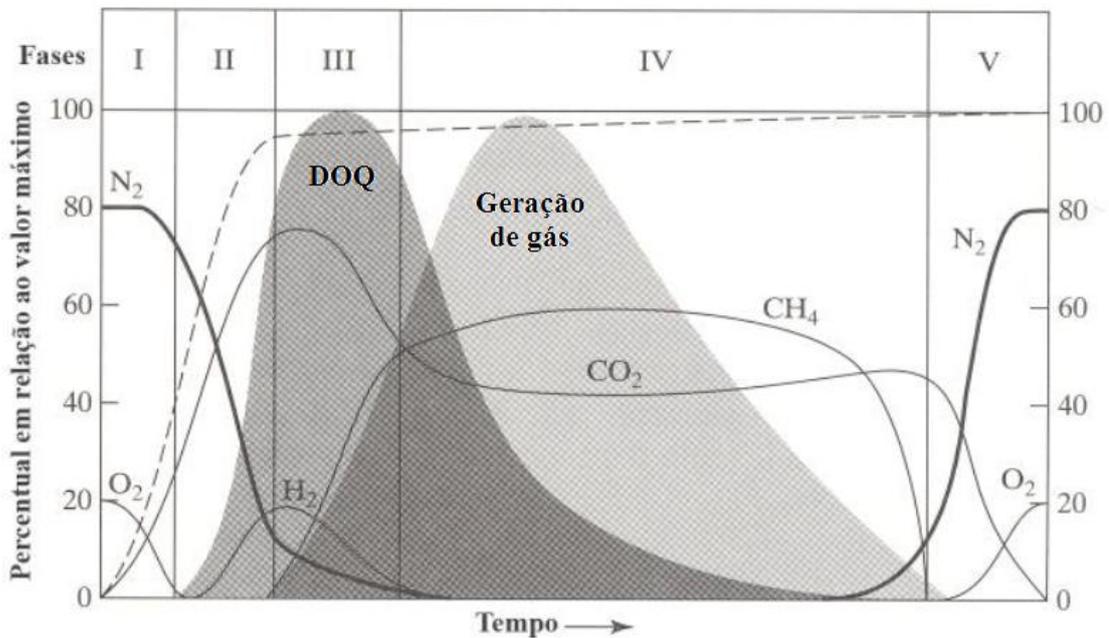


Figura 2.1 Fases de degradação de resíduos e geração de gases em função do tempo
[Adaptado de Qian et al., 2002]

Segundo Borba, 2006 a primeira fase considera o período em que os resíduos são depositados no solo e tem início a decomposição aeróbia, que se estende até que seja realizada a cobertura dos mesmos, diminuindo a presença de oxigênio. Depois que todo o O_2 tenha se esgotado, a decomposição entra em uma fase de transição, em que as bactérias formadoras de ácidos começam a hidrolisar e fermentar os componentes orgânicos complexos dos resíduos. Em seguida, a decomposição entra em uma fase anaeróbia, durante a qual as bactérias que formam o CH_4 prosperam em um ambiente deficiente de O_2 . Na fase seguinte (ácida), que antecede a formação do metano, as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas, gerando compostos com baixa massa molecular, como o ácido acético e concentrações reduzidas de outros ácidos mais complexos. A fase quatro é onde predominam os microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem o ácido acético e hidrogênio, produzido na fase anterior, em metano e dióxido de carbono. Após a degradação de grande parte da matéria orgânica e conversão em metano e dióxido de carbono, tem início a maturação, última fase. Como a umidade continua através da massa de resíduos sólidos, porções que até então não haviam degradado acabam reagindo e a taxa de geração do biogás diminui, visto que a maior parte dos nutrientes foi consumida nas fases anteriores. A

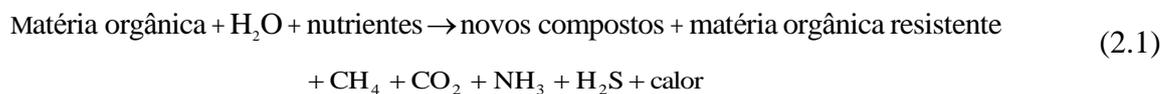
duração de cada fase de geração de biogás depende da distribuição dos componentes orgânicos no solo, da quantidade de nutrientes disponível, da umidade dos resíduos e do seu grau de compactação. Na Tabela 3.2 se apresenta um resumo e uma descrição das fases do processo.

Tabela 2.1 Resumo das fases da geração de gás em aterros sanitarios [Adaptado de Tarazona, 2010]

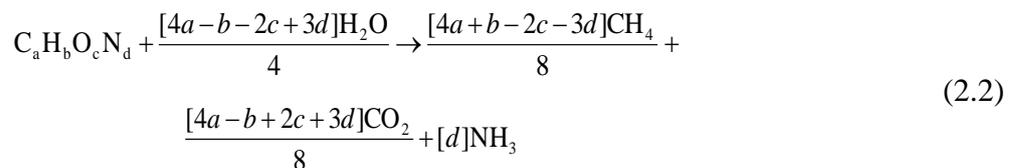
Fase	Nome	Atividade primaria
I	Aeróbia	Diminuição de O ₂ no gás do aterro. (varias horas a 1 semana)
II	Transição	Formação de ácidos graxos livres, estando na sua máxima geração e começando a geração de CH ₄ . (1 a 6 meses)
III	Acida	As concentrações de CH ₄ e CO ₂ se estabilizam e não tem presença de N ₂ no aterro. (3 meses a 3 anos)
IV	Metanogênica	As concentrações de CH ₄ e CO ₂ começam a reduzir-se e um pouco de N ₂ (ar) retorna ao sistema. (8 a 40 anos)
V	Maturação	Gás é primordialmente ar e toda a decomposição anaeróbia é completada. (1 a mais de 40 anos)

2.1.2 Composição do biogás de aterro

A reação química geral de decomposição anaeróbia da matéria orgânica dos RSU é apresentada nas equações 2.1 e 2.2.



ou



Pode-se observar que a reação requer a presença de água, sendo assim, são dependentes das condições hidrológicas no local dos aterros, podendo afetar a velocidade e a taxa de geração o gás [Tchobanoglous et al., 1994].

Segundo UNEP, 2005, a geração de biogás a partir da degradação dos resíduos sólidos, ou biogaseificação, é definida como um processo biológico em que os microrganismos em condições anaeróbias decompõem a matéria orgânica para gerar gases, sendo o CH₄ o principal gás gerado e secundariamente o CO₂ e outros gases. Na Tabela 2.2 apresenta-se a composição média da mistura gasosa gerada em aterros sanitários.

Tabela 2.2 Composição média do biogás de aterro [Adaptado de Thomazoni 2014, apud Tchobanoglous e Kreith, 2002]

Componente	Porcentual de volume molar
Metano (CH ₄)	45 – 60 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	40 – 60 %
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,2 %
Nitrogênio (N ₂)	2,0 – 5,0 %
Oxigênio (O ₂)	0,1 – 1,5 %
Hidrogênio (H ₂)	0 – 0,2 %
Amônia (NH ₃)	0 – 1,0 %
Sulfetos, dissulfetos, metacaptanos, etc.	0,1 – 1,0 %
Outros gases	0,1 – 1,0 %

Segundo IPCC, 2001, o CH₄ gerado por aterros sanitários contribui com 3 a 4% das emissões de GEE antropogênicas. Além disso, tem o seu potencial de aquecimento global PAG igual a 25 vezes o do CO₂, apresentando também risco devido a sua explosividade [Penteado et al., 2012].

2.2 Efluente líquido – Lixiviado

Tchobanoglous e Kreith, 2002, definem lixiviado como o líquido que percola entre a massa de resíduos e, devido ao contato com essa massa, apresenta componentes dissolvidos ou suspensos. Para os autores, o lixiviado é resultante de infiltrações de fontes externas ao aterro sanitário, como a precipitação e o escoamento superficial não controlado, e também do líquido resultante de reações de decomposição da matéria orgânica disposta no aterro, caso existir.

Os lixiviados caracterizam-se como um líquido escuro, malcheiroso e de elevado potencial poluidor, de composição bastante heterogênea, constituído de ácidos orgânicos, de substâncias solubilizadas e carregadas por meio das águas de chuva, que incidem sobre a massa de resíduos e, ainda, de substâncias formadas a partir de reações químicas que ocorrem entre os constituintes dos resíduos, tendo composição e quantidades variáveis [El-Fadel et al., 2002]

Para El-Fadel et al., 2002, a geração de lixiviado é uma consequência da prática de disposição de RSU em aterros sanitários. Qasim e Chiang, 1994, afirmam que o projeto e planejamento efetivo de um aterro sanitário passam pela compreensão dos fenômenos que ocorrem na massa de RSU depositada e que a geração do lixiviado em aterros sanitários é função da interação de diversos fatores que acarretam na variabilidade da sua quantidade e qualidade.

O tratamento do lixiviado pode ser efetuado dentro ou fora da planta por meio de processos físico-químicos ou biológicos, causando custos relevantes na operação do aterro sanitário.

2.2.1 Composição do lixiviado

Segundo Rehman, 2003, El-Fadel et al., 2002 a composição do lixiviado depende da precipitação, temperatura do meio, idade do aterro, compactação, permeabilidade e composição do resíduo, e apresenta alto valor de Demanda bioquímica de Oxigênio (DBO). Pode-se acrescentar também que os lixiviados são compostos pela umidade derivada da precipitação pluviométrica que adentra aos amontoados de resíduos dispostos no solo [Castilhos Jr, et al., 2003]

A caracterização do lixiviado gerado por aterros sanitários é usualmente representada pelos parâmetros de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio

(DBO), razão DBO/DQO, pH, sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio amoníaco (NH₃-N), nitrogênio total de Kjeldahl e metais pesados [Renou et al., 2008].

Segundo Kjeldsen et al.; 2002, a quantidade do líquido lixiviado gerado em um aterro depende de fatores como:

- Meteorológicas locais: umidade, precipitação, evaporação, temperatura entre outros;
- Geologia e geomorfologia: Escoamento superficial e/ou infiltração subterrânea, grau de compactação e capacidade dos solos em reter umidade;
- Condições de operação do aterro: Conformação e cobertura das células, grau de compactação dos resíduos, tipo de equipamento, recirculação de percolato;
- Idade e natureza dos resíduos sólidos: Tipo, umidade, nível de matéria orgânica, características;
- Topografia (área e perfil do aterro): qualidade e quantidade de recicláveis e hábitos populacionais.

Na Tabela 2.3 apresenta-se as faixas de variação de alguns parâmetros dos líquidos lixiviados coletadas de diversos aterros sanitários.

Tabela 2.3 Faixa dos valores característicos do lixiviado de aterros sanitários jovens e maduros [Adaptado de: Tchobanoglous & Kreith, 2002; Souto e Povinelli, 2007]

	Aterro Sanitário "jovem" (menos que 2 anos)	Aterro sanitário maduro (acima de 10 anos)
Constituinte	Faixa (mg/L)	Faixa (mg/L)
DBO ₅	2.000 - 30.000	100 - 200
COT (Carbono orgânico total)	1.500 - 20.000	80 - 160
DQO	3.000 - 60.000	100 - 500
Sólidos suspensos totais	200 - 2.000	100 - 400
Nitrogênio orgânico	10 - 3000	80 - 180
Nitrogênio amoníaco	10 - 1200	20 - 80
Nitrato	5 - 40	5 - 10
Fósforo total	5-100	5-10
pH (*adimensional)	4,5 - 7,5 *	6,6 - 7,5 *
Ferro total	50 - 1.200	20 - 200

A principal característica do líquido lixiviado é a variabilidade de sua composição em decorrência da disposição progressiva da matéria orgânica biodegradável. Por essa razão, o

elevado potencial poluidor do líquido lixiviado novo vai se reduzindo paulatinamente até atingir níveis que dispensam seu tratamento.

A análise do volume de lixiviado gerado pode ser abordada através da avaliação do ciclo da água no aterro sanitário, ilustrado a seguir.



Figura 2.2 Esquema de formação de líquidos [Adaptado de Lanza, 2012]

Os fatores apresentados na Figura 2.2 são detalhados a seguir.

- Precipitação: considera a água que incide sobre a superfície do aterro sanitário, incluindo neve e granizo. Informações sobre precipitação variam geograficamente e sazonalmente, portanto, é fundamental a obtenção de dados confiáveis.
- Evaporação: é a combinação da evaporação da água armazenada no solo e do fenômeno de transpiração da camada vegetal sobre a superfície do aterro, se houver camada. A quantidade de água perdida para atmosfera depende das características do solo e da vegetação utilizados para cobertura do aterro sanitário [Fenn et al., 1975].
- Escoamento superficial: parcela da precipitação incidente que acaba escoando sobre a superfície do aterro em direção ao sistema de coleta de água superficial ou à área fora do aterro, o que impossibilita a sua infiltração na massa de resíduos. A

quantidade de água que irá escoar superficialmente depende de fatores como a intensidade e duração do fenômeno de precipitação [Qasim e Chiang, 1994].

- Resíduo sólido compactado: o grau de compactação dos resíduos, resultado das ações de operação do aterro sanitário, pode ser apresentado com unidades de kg/m^3 . Para RSU menos compactados há uma maior geração de lixiviado [Renou et al., 2008]. A compactação também irá influenciar na capacidade de absorção de umidade do maciço de RSU.
- Cobertura de solo: a capacidade de retenção de umidade do solo de cobertura, propriedade do material de revestimento, é determinante para estimativa do volume de lixiviado produzido, uma vez que o potencial de evapotranspiração do solo, assim como o de infiltração, são funções dessa propriedade. Qasim e Chiang, 1994, afirmam que quanto maior a capacidade de retenção de umidade de um solo, maior o potencial de perda de umidade por evapotranspiração.
- Percolação: é definida como a fração da água que realmente irá atingir a massa de resíduos. A mesma dependerá das decisões realizadas durante a concepção do projeto (materiais da camada de cobertura, modo de instalação, condições operacionais). Pode-se identificar e classificar a infiltração conforme a sua origem (e. g., resultante da precipitação ou de infiltrações subterrâneas).

2.3 Balanço de energia e estequiometria na combustão

Moran e Shapiro, 2002 descrevem a primeira lei da termodinâmica para um sistema aberto operando em regime permanente sem variações de energia cinética e potencial como segue:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{VC} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (2.3)$$

na qual \dot{Q} é a taxa líquida de transferência de calor pela fronteira (kW), \dot{W}_{VC} é a taxa líquida de trabalho transferido pela fronteira (kW), \dot{m} é a vazão mássica que atravessa o volume de controle (kg/s), h_e e h_s são a entalpia específica de entrada e saída do volume de controle (kJ/kg), respectivamente.

O biogás de aterro é uma mistura de espécies gasosas, principalmente metano e dióxido de carbono, sendo representado por frações molares X_i e mássicas Y_i , de cada espécie i , como segue

$$X_i \equiv \frac{n_i}{n} \quad (2.4)$$

$$Y_i \equiv \frac{m_i}{m} \quad (2.5)$$

na qual n_i e m_i são, o número de mols e a massa da espécie i presente na mistura respectivamente, de forma similar n e m representam o número de mols e massa total da mistura. As propriedades termodinâmicas específicas das misturas são ponderadas por meio dessas frações.

Pode-se aplicar também a equação de dos gases ideais como:

$$pV = nRT \quad (2.6)$$

na qual p é a pressão em kPa, V é o volume em m^3 , n o número de mols em kmol, R a constante universal dos gases em kJ/(kmol K) e T a temperatura em K.

Por outro lado, os processos de combustão são efetuados a partir da relação existente entre o combustível e o oxidante. A quantidade de ar necessária para queimar uma quantidade específica de combustível é conhecida como razão estequiométrica ar-combustível. Turns, 2000 descreve a razão de equivalência ϕ como a relação entre a razão estequiométrica e a razão de oxidante-combustível de uma situação qualquer da seguinte forma

$$\phi = \frac{(A/C)_{Esteq}}{(A/C)} \quad (2.7)$$

na qual A/C_{Esteq} é a razão estequiométrica e A/C é a razão de ar-combustível da mistura.

A razão de excesso de ar λ , é comumente usada e se expressa da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{1-\phi}{\phi} \quad (2.8)$$

Na qual ϕ e λ representam grandezas adimensionais que podem ser expressadas em porcentagem.

Processos que envolvem reações químicas devem considerar a quantidade de energia requerida e resultante da reação. A entalpia de reação denomina esta energia, sendo descrita como a variação de energia entre a entalpia dos produtos e dos reagentes [Turns, 2000].

A primeira lei da termodinâmica para uma reação de combustão pode ser escrita em base molar como segue:

$$\dot{Q} = H_{prod} - H_{reag} = \dot{n}_{prod} \bar{h}_{prod} - \dot{n}_{reag} \bar{h}_{reag} \quad (2.9)$$

na qual \dot{n}_{prod} e \dot{n}_{reag} são as vazões molares de produtos e reagentes em kmol/s respetivamente, \bar{h}_{prod} e \bar{h}_{reag} são as entalpias em base molar dos produtos e dos reagentes (kJ/kmol). Ambas as entalpias podem ser divididas em duas partes da seguinte forma

$$\bar{h}_i(T) = h_{f,i}^{\circ}(T_{ref}) + \Delta h_{s,i}(T) \quad (2.10)$$

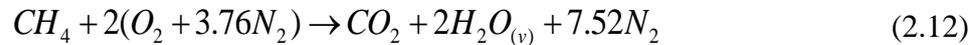
na qual $\bar{h}_{f,i}^{\circ}$ é a entalpia de formação dada em kJ/kmol e que quantifica a energia das ligações químicas em um estado de referência, T_{ref} (°C), $\bar{h}_{s,i}$ indica a variação de entalpia sensível entre as temperaturas T e T_{ref} e esta dada em kJ/kmol. O estado de referência geralmente é de 25 °C (298,15 K) e 101,325 kPa.

O poder calorífico PC de um combustível qualquer é determinado pela liberação de energia deste ao ser queimado. Assim o poder calorífico é o calor máximo liberado por unidade de massa ou mol de combustível (kJ/kg ou kJ/kmol) e se dá quando ambos os reativos e reagentes estão a mesma temperatura, é expressado da seguinte forma:

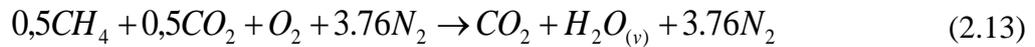
$$PC_{Comb} = \frac{\dot{Q}_{Max}}{\dot{m}_{Comb}} = \frac{(H_{prod} - H_{reag})}{\dot{m}_{Comb}} \quad (2.11)$$

na qual \dot{Q}_{Max} é o calor liberado pela reação de combustão (kJ), \dot{m}_{Comb} é a massa de combustível (kg ou kmol) H_{prod} e H_{reag} são as entalpias dos produtos e reagentes (kJ/kg ou kJ/kmol). Quando se considera que a água dos produtos de uma combustão é condensada permitindo assim uma maior liberação de energia usa-se o poder calorífico superior (PCS). Como a descarga dos processos de combustão normalmente ficam em valores acima de 100 °C o vapor d'água não é condensado e portanto usa-se o poder calorífico inferior (PCI).

O balanço estequiométrico para a combustão do metano é dado por:



Neste estudo considera-se que o metano presente no biogás está diluído em gás carbônico, aproximadamente em partes iguais, pode-se considerar o CO₂ presente nos reagentes como um meio inerte. Assim a reação estequiométrica da combustão completa do biogás é dada por:



2.4 Modelagem termodinâmica de equipamentos

Os equipamentos apresentados a seguir foram modelados a partir da identificação de balanços de massa e energia sobre seus volumes de controle, em regime permanente, e tomando-se o ar e os gases de combustão como gases ideais.

2.4.1 Combustor

O combustor é modelado para o volume de controle a seguir:

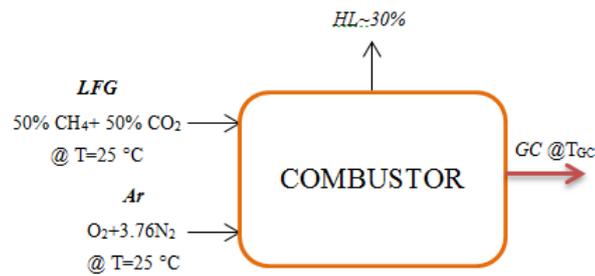


Figura 2.3 Volume de controle do combustor

As entradas são constituídas pelo biogás, ou *Landfil Gas* - *LFG* e o oxidante *Ar*, tomado como sendo ar atmosférico seco, ambos a temperatura e pressão ambiente. O modelo admite uma transferência de calor para o ambiente prescrita *HL*, e com isso calcula a temperatura dos gases de combustão T_{GC} .

Os balanços de massa e energia para o combustor são calculados pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_{LFG} + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_{GC} \quad (2.14)$$

$$(1 - HL) \dot{m}_{LFG} PCI_{LFG} = \dot{m}_{GC} (h_{GC} - h_{Ar}) \quad (2.15)$$

nas quais \dot{m}_{LFG} , \dot{m}_{ar} e \dot{m}_{GC} são as vazões mássicas de *LFG*, ar e dos gases de combustão (kg/s), *HL* é a perda de calor no combustor, PCI_{LFG} é o poder calorífico inferior (kJ/kg) do *LFG*, h_{GC} e h_{Ar} são as entalpias dos gases de combustão e do ar (kJ/kg).

2.4.2 Evaporador

O evaporador é modelado para o volume de controle a seguir:

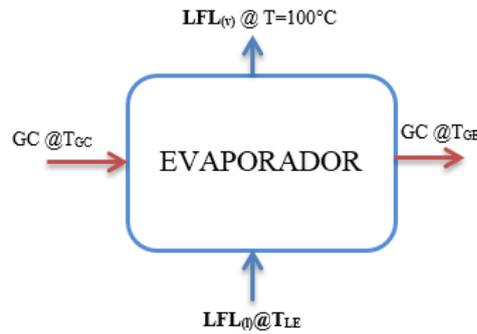


Figura 2.4 Volume de controle do evaporador

As entradas referem-se a os gases de combustão provenientes do equipamento de queima de LFG GC a T_{GC} e ao lixiviado, ou Landfil Leachate na fase líquida, saturado, $LFL_{(l)}$ a T_{LE} . Para as saídas se tem lixiviado vaporizado $LFL_{(v)}$ a $100^{\circ}C$ e os gases de combustão saindo do evaporador GC a T_{GE}

Os balanços de massa e energia para o combustor são calculados pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_{GC} + \dot{m}_{LFL_{(l)}} = \dot{m}_{GCE} + \dot{m}_{LFL_{(v)}} \quad (2.16)$$

$$\dot{Q}_{Evp} = \dot{m}_{LFL_{(l)}} (h_{LFL_{(v)}} - h_{LFL_{(l)}}) \quad (2.17)$$

$$\dot{Q}_{Evp} = \dot{m}_{GC} (h_{GCE} - h_{GC}) \quad (2.18)$$

nas quais $\dot{m}_{LFL_{(l)}}$ e $\dot{m}_{LFL_{(v)}}$ são as vazões mássicas de LFL na entrada e na saída do evaporador (kg/s), \dot{m}_{GC} é a vazão mássica dos gases de combustão saindo do evaporador (kg/s), \dot{Q}_{Evp} é o calor entregue ao LFL no evaporador (kW), $h_{LFL_{(v)}}$ é a entalpia do LFL vaporizado a $100^{\circ}C$ (kJ/kg), h_{LFL} é a entalpia do LFL como líquido saturado (kJ/kg) e h_{GCE} é a entalpia dos gases de combustão na saída do evaporador (kJ/kg).

2.4.3 Trocador de calor

Os parâmetros de entrada e saída junto com volume de controle para o trocador de calor são apresentados a seguir

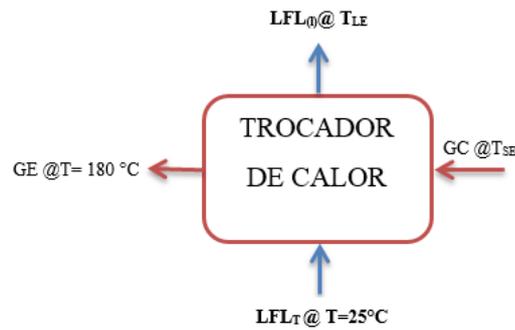


Figura 2.5 Volume de controle do trocador de calor

As entradas no volume de controle referem-se a os gases de combustão provenientes do evaporador GC a T_{SE} e ao LFL_T a pressão e temperatura ambiente. As saídas são os gases de exaustão GE a 180°C e lixiviado líquido saturado LFL_(l) a T_{LE}.

Os balanços de massa e energia para o combustor são calculados pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_{GCE} + \dot{m}_{LFL_T} = \dot{m}_{GE} + \dot{m}_{LFL(l)} \quad (2.19)$$

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_{LFL_T} (h_{LFL(l)} - h_{LFL_T}) \quad (2.20)$$

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_{GC} (h_{GCE} - h_{GC}) \quad (2.21)$$

nas quais \dot{m}_{GE} e \dot{m}_{LFL_T} são as vazões mássicas dos gases de exaustão e do lixiviado na saída na entrada e do trocador de calor (kg/s) respectivamente, \dot{Q}_T é o calor fornecido ao lixiviado no trocador de calor, h_{LFL_T} e h_{GCE} são as entalpias do LFL_T e dos gases de combustão a 180°C

2.4.4 Motor de combustão interna para cogeração

O motor MCI é modelado com o volume de controle a seguir:

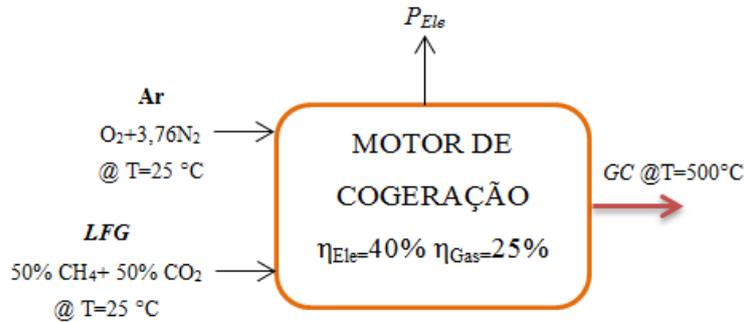


Figura 2.6 Volume de controle do motor de cogeração

As entradas são constituídas pelo combustível *LFG* e o oxidante *Ar*, tomado como sendo ar atmosférico seco, ambos a temperatura e pressão ambiente. O modelo admite uma conversão de 40% da energia primária para geração elétrica e 25% para térmica na corrente de gases de combustão, a temperatura de 500°C.

Os balanços de massa e energia para o MCI são calculados pelas equações:

$$\dot{m}_{LFG} + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_{GC} \quad (2.22)$$

$$\dot{Q}_{Ent} = \dot{m}_{LFG} PCI_{LFG} \quad (2.23)$$

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{Q}_{Ent} \eta_{GC} \quad (2.24)$$

$$P_{Ele} = \dot{Q}_{Ent} \eta_{Ele} \quad (2.25)$$

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_{GC} (h_{GC} - h_{Ar}) \quad (2.26)$$

nas quais \dot{Q}_{Ent} , é o calor entregue pela reação de combustão (kW), \dot{Q}_{GC} é o calor contido nos gases de combustão (kW), η_{GC} e η_{Ele} são as eficiências térmica para os gases de combustão e eficiência de conversão elétrica (%), P_{Ele} é a potência elétrica gerada (kW)

2.4.5 Incinerador

Os parâmetros de entrada e saída junto com volume de controle para o incinerador são apresentados a seguir

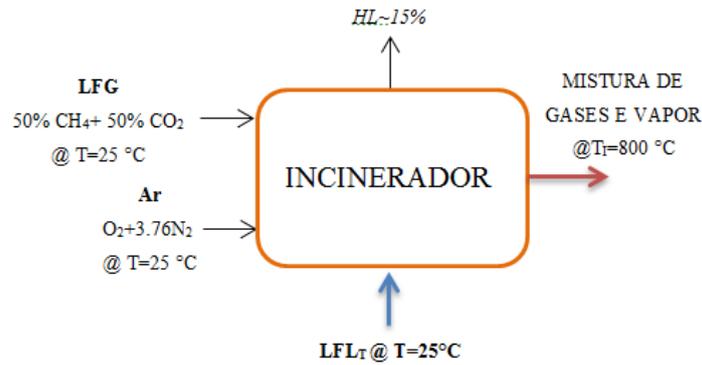


Figura 2.7 Volume de controle do Incinerador

As entradas são constituídas pelo combustível LFG e o oxidante Ar , tomado como sendo ar atmosférico seco, ambos a temperatura e pressão ambiente. O modelo admite uma transferência de calor para o ambiente prescrita HL , e com uma temperatura prescrita de saída T_i .

Os balanços de massa para o incinerador são dados por:



onde os índices a , b e c são o número de mols de LFG , de LFL , e Ar presente nos reagentes. Os índices d , e , f e g são o número de mols de CO_2 , $H_2O(LFL)$, N_2 e O_2 presentes nos produtos da reação de combustão.

O balanço de energia é calculado pelas seguintes equações:

$$H_{reag} = a(0.5CH_4)_R(h_{CH_4})_R + b(0.5CO_2)_R(h_{CO_2})_R + c(H_2O)_R(h_{H_2O})_R \quad (2.28)$$

$$H_{prod} = d(CO_2)_P(h_{CO_2})_P + e(H_2O)_P(h_{H_2O})_P + f(N_2)_P(h_{N_2})_P + g(O_2)_P(h_{O_2})_P \quad (2.29)$$

$$Perdas = aPCI_{LFG,n}HL \quad (2.30)$$

$$H_{reag} - H_{prod} = Perdas \quad (2.31)$$

nas quais H_{reag} e H_{prod} são as entalpias dos reagentes e dos produtos (kJ/kmol), h_{CH_4} , h_{CO_2} , h_{H_2O} , h_{N_2} e h_{O_2} são as entalpias do metano, dióxido de carbono e lixiviado (H_2O), nitrogênio e oxigênio nos reagentes e nos produtos dados todos em (kJ/kmol), $PCI_{LFG,n}$ é o poder calorífico (kJ/kmol) do *LFG*.

2.5 Evaporação de lixiviado

Segundo Birchler, 1994, o tratamento por evaporação permite uma elevada redução de volume do efluente. O processo de evaporação pode ser realizado de forma natural, por meio da energia solar, ou então de forma forçada, utilizando a queima de um combustível, preferencialmente o biogás.

Basicamente a concentração do lixiviado é obtida através da evaporação de seus componentes voláteis (e.g., água, compostos orgânicos voláteis, entre outros), podendo ser reduzido de 95 a 97% de seu volume original, de acordo com INiG, 2010. O concentrado após a evaporação pode ser retornado ao aterro e os gases podem ser liberados para a atmosfera ou tratados segundo a legislação [Tavares, 2011].

Segundo USEPA, 2013, o sistema de evaporação de lixiviado (SEL) é empregado em aterros sanitários quando se deseja a redução do volume do efluente coletado que deve ser submetido a tratamento. Tal alternativa torna-se atrativa para aterros sanitários onde o encaminhamento do volume gerado para estações de tratamento não está disponível ou apresenta custos elevados.

Tradicionalmente o tratamento de lixiviado é realizado através de processos biológicos, no entanto, devido a exigências cada vez mais rígidas de normas regulamentadoras, a evaporação de lixiviado apresenta-se como uma tecnologia alternativa que pode tratar o lixiviado efetivamente através de uma principal operação unitária [Birchler et al., 1994].

O princípio de funcionamento de um SEL consiste na utilização direta do biogás coletado no aterro como fonte energética para evaporar a água e queimar os compostos orgânicos voláteis contidos no lixiviado, permitindo o uso integrado e mitigação dos riscos potenciais dos subprodutos do aterro sanitário [Birchler et al., 1994; INiG, 2010].

Rehman, 2003, classificou os diversos tipos de SEL conforme:

Tabela 2.4 Tipos de evaporadores e suas descrições [Adaptado de Rehman, 2003]

Tipo do evaporador	Descrição
Evaporadores de filme	O líquido escoia na forma de uma fina camada sob uma superfície aquecida sendo então vaporizado.
Evaporadores de ebulição	Baseia-se no fenômeno de ebulição nucleada sobre uma superfície sólida aquecida.
Evaporadores de <i>flash</i>	O líquido é submetido a uma queda de pressão até atingir o valor de sua pressão de saturação, ocorrendo então sua vaporização.
Evaporadores de contato direto	Gases aquecidos são bombeados em um recipiente contendo o líquido que deve ser vaporizado. O calor é transferido de um fluido para o outro através da interface líquido/vapor.

2.6 Cogeração

A cogeração de energia se traduz na produção simultânea de duas ou mais utilidades, calor de processo e energia eletromecânica, a partir de uma mesma fonte energética. Usualmente os sistemas de cogeração são mais eficientes que os convencionais pois produzem eletricidade a nível local e recuperam a energia térmica rejeitada dos dispositivos de geração (ex. turbinas de vapor, turbinas a gás, motores alternativos). Isto pode resultar no benefício econômico da redução de custos de combustíveis, quando comparada à produção das utilidades em separado, e também em benefícios ambientais como a redução de emissões de poluentes decorrentes da queima de combustíveis.

No caso de motogeradores, simultaneamente à geração de eletricidade, produzem-se duas outras correntes térmicas residuais com alguma disponibilidade energética: os gases de exaustão e a água aquecida no sistema de arrefecimento do MCI.

Geradores convencionais de energia possuem eficiências térmicas em média de 35-40%, enquanto praticamente todo o restante da energia é liberada em forma de calor. A Figura 2.5 ilustra a divisão energética das correntes de um típico motogerador.

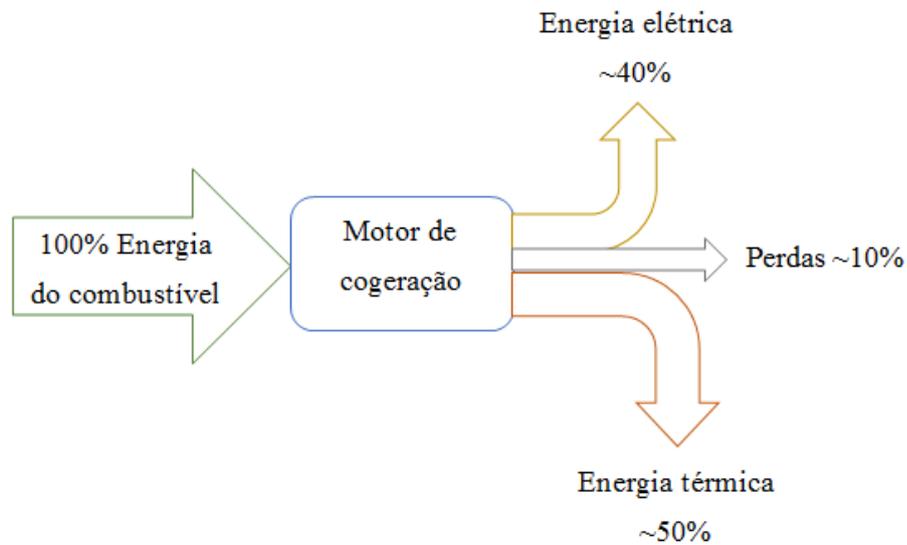


Figura 2.8 Divisão energética de um motor de combustão para cogeração [Adaptado de Amado, 2016]

Em um motor de cogeração a energia térmica produzida é dividida em duas parcelas, uma faz referência a energia que está contida nos gases de exaustão do motor, esses gases estão em torno de 500 °C, a outra é aquela que vai para o circuito de arrefecimento do motor na qual a temperatura do líquido de arrefecimento está entorno de 80 °C. Ambas as parcelas possuem valores energéticos similares porém é mais comum o uso da energia contida nos gases de exaustão devido a sua temperatura.

Os gases de exaustão possuem o maior potencial de aproveitamento devido a sua maior temperatura, entre 400 e 500 °C [Hao et al., 2008]. Para avaliar seu potencial de aproveitamento, é necessário conhecer sua composição volumétrica, temperatura e pressão. Os valores obtidos por Gewald et al., 2012, são apresentados a seguir.

Tabela 2.5 Parâmetros dos gases de exaustão dos motogeradores [Adpatado de Gewald et al., 2012]

Motogerador	Composição volumétrica (%)				Temperatura (°C)	Vazão mássica dos gases de exaustão \dot{m}_{GE} (kg/s)
	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂		
Deutz	7,73%	12,48%	6,75%	73,04%	443,1	1,775
Jenbacher	6,86%	11,08%	8,35%	73,71%	479	3,433

A recuperação da energia das correntes residuais é feita por trocadores de calor (seção 2.4.3)

Como o calor trocado é o mesmo, desconsiderando-se as perdas para o ambiente, pode-se modelar então com o auxílio da diferença de temperatura média logarítmica ΔT_{ML} ,

$$\dot{q} = UA(\Delta T_{ML}) = UA \frac{(T_{c;in} - T_{h;out}) - (T_{c;out} - T_{h;in})}{\ln[(T_{c;in} - T_{h;out}) / (T_{c;out} - T_{h;in})]} \quad (2.32)$$

Na qual U é coeficiente global de transferência de calor, em kW/(m² °C) e A é a área de transferência de calor, em m².

Para a troca de calor latente Stoecker, 1989, reescreve a Equação (2.33) considerando um processo de evaporação sem superaquecimento,

$$\dot{q} = UA \frac{(T_{n;in} - T_{cr}) - (T_{n;out} - T_{cr})}{\ln[(T_{n;in} - T_{cr}) / (T_{n;out} - T_{cr})]} \quad (2.33)$$

na qual T_{cr} é a temperatura de troca de fase do fluido que será evaporado/condensado, em °C, T_n é a temperatura do fluido que não troca de fase, em °C. Os subíndices *in* e *out* representam a entrada e saída do fluido [Incropera et al., 2011].

2.7 Estimativa de custos de equipamentos

Autores como Towler e Sinnott.; 2008; Turton et al 2008; Bejan et al 1996; Peters et al 1994 apresentam metodologias similares para determinar custos de equipamentos para plantas químicas. O custo de um equipamento depende principalmente de sua capacidade, material, temperatura e pressão de operação.

As variáveis mencionadas acima relacionam-se com índice adimensional CEPCI, que atualiza o custo para implantação de uma planta de processos físico-químicos ano após ano. Criado em 1963, ele tem sido usado por engenheiros, técnicos e gestores para estimar e avaliar o potencial econômico da implantação de uma unidade energética ou de processamento nas indústrias [Turton et al, 2008].

Para calcular o custo dos equipamentos foi usado neste trabalho a metodologia de Turton et al., 2008. Em primeiro lugar foram calculados os custos de investimento dos equipamentos usando a equação 2.34

$$C_{BM} = C_P^{\circ} F_{BM} \quad (2.34)$$

na qual C_P° é o custo do equipamento construído em aço carbono e que opera em condições de temperatura ambiente e pressão atmosférica, é obtido a partir dos parâmetros de capacidade ou tamanho do equipamento e dependendo do tipo de dispositivo (Combustor, evaporador, bomba, etc). F_{BM} é o fator de custo do módulo, parâmetro que leva em consideração o material no qual foi fabricado o equipamento, C_{BM} é o custo de investimento do equipamento como tal.

A Equação 2.35 mostra o procedimento para calcular C_P° de qualquer equipamento x

$$C_P^{\circ}(x) = EXP\{k_1 + k_2 \ln(S) + k_3 [\ln(S)]^2\} \quad (2.35)$$

na qual K_1 , K_2 e K_3 são constantes obtidas através de correlações entre o tipo de equipamento e sua capacidade ou tamanho. S é a capacidade do tipo de equipamento (área, volume, potencia).

F_{BM} pode-se calcular a partir da Equação 2.36 para componentes que operam em função da pressão

$$F_{BM} = B_1 + B_2 \cdot F_M \cdot F_P \quad (2.36)$$

Onde os coeficientes B1 e B2 relacionam o tipo de equipamento, F_M material em que está construído e F_P o fator de pressão de operação.

O cálculo de F_P pode-se realizar usando a equação a seguir:

$$F_P(x) = EXP\{C_1 + C_2 \ln(P) + C_3 [\ln(P)]^2\} \quad (2.37)$$

na qual C_1 , C_2 e C_3 são coeficientes relacionados ao tipo de equipamento em função da pressão de operação. Para os demais componentes (combustor, evaporador, caldeira etc) as constantes C 's são nulas. p é a pressão de operação do equipamento.

Os valores de todas as constantes são referidas ao índice CEPCI do ano 2001, por tanto a estimativa de custos dos equipamentos achados devem ser atualizados para um ano específico de interesse mediante a seguinte relação

$$Custo_{\text{Estimado ano de interesse}} = Custo_{\text{Estimado, 2001}} \frac{CEPCI_{\text{ano de interesse}}}{CEPCI_{\text{Estimado, 2001}}} \quad (2.38)$$

Peters e Timmerhaus, 2011 disponibilizam na web uma ferramenta¹ para cálculo de custos de equipamento baseada na metodologia apresentada anteriormente. Essa ferramenta foi usada no presente trabalho, os valores dos equipamentos são apresentados no capítulo 4.

O capital fixo de investimento pode ser dividido em custos diretos e custos indiretos. O método desenvolvido por Lang., 1947, estima o custo de plantas químicas denominado método fatorial, após uma análise minuciosa o autor conclui que pode-se expressar o custo total de investimento numa planta química em função do custo dos equipamentos, a esse termino de proporcionalidade denomina-se “fator de Lang”. Na Tabela 2.6 apresenta-se o custo total de uma planta química em função do custo total de aquisição dos equipamentos.

¹ Peters e Timmerhaus, 2011- <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>

Tabela 2.6 Cálculo do capital fixo de investimento para uma planta química[Adaptado de Boutros, 2009]

Custos		%
Custos diretos	Aquisição de equipamentos	100
	Instalação de equipamentos	50
	Operação e manutenção (O&M)	15
	Instalação mecânica e elétrica	10
Custos indiretos	Engenharia e pesquisa	10
	Construção	12
	Contingencias	8

Na tabela acima os custos estão divididos em custos diretos e indiretos sendo todos eles relativos ao preço de compra ou aquisição dos equipamentos, assim, por exemplo, os custos de operação e manutenção são calculados como o 15% do preço de aquisição de todos os equipamentos.

2.8 Análise hierárquica de processos AHP

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), criado por Saaty, 1980, procura tratar a complexidade de um processo de tomada de decisão a partir de uma análise de critérios qualitativos e quantitativos catalogados em níveis hierárquicos independentes. Assim segundo Marins et al., 2009, o método divide-se em três fases

- a) Construção de hierarquias: Para uma melhor compreensão do problema, este é estruturado em três níveis hierárquicos ligados entre si de cima para baixo da forma que se apresenta na Figura 2.9

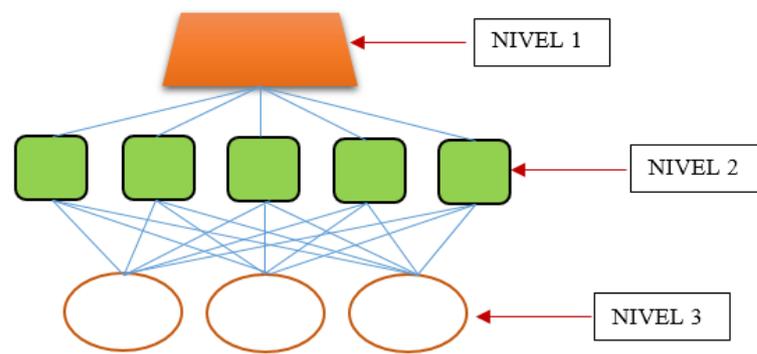


Figura 2.9 Estrutura de análise hierárquica AHP [Saaty, 1980]

- Nível 1: Objetivo.
- Nível 2: Critérios.
- Nível 3: Alternativas.

Na figura 2.9 cada alternativa está ligada a cada critério pelo seu grau de cumprimento, e cada critério está relacionado com o objetivo pelo seu grau de importância

De acordo com Bornia e Wernke.; 2001 a ordenação hierárquica possibilita ao decisor ter uma “visualização do sistema como um todo e seus componentes, bem como as interações destes componentes e os impactos que os mesmos exercem sobre o sistema”.

- b) Definição de prioridades: A metodologia AHP pode transformar dados empíricos em modelos matemáticos, esses valores matemáticos são processados e comparados entre si com o intuito de medir a contribuição (peso) de cada fator de análise. Assim, se distribui a importância de cada variável da hierarquia de nível m , sobre a hierarquia $m+1$, onde o grau de importância é obtido por meio de uma comparação binária entre as variáveis, dentro de um dado nível hierárquico

A matriz utilizada nas comparações binárias está entre as variáveis de cada nível hierárquico, as quais recebem a análise de especialistas para avaliar seu grau de importância. A partir disso, normaliza-se a Matriz A, utilizando-se vetores de prioridade relativa e composta, representando assim, os pesos de cada variável na hierarquia de critérios, subcritérios e alternativas sob avaliação (Saaty, 2012).

- c) Consistência lógica: Com o fim de determinar a importância de cada critério, e para que exista coerência no julgamento de prioridades, a metodologia da AHP sugere calcular a Razão de Consistência (RC) dos julgamentos da seguinte forma:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2.39)$$

onde IR é o Índice de Consistência Randômico obtido para uma matriz recíproca de ordem m , com elementos não-negativos e gerada randomicamente. O Índice de Consistência (IC) é dado por:

$$IC = \frac{\lambda_{Max} - m}{m - 1} \quad (2.40)$$

onde λ_{Max} é o maior autovalor da matriz de julgamentos [Marins et al., 2009]. Segundo Saaty, 2012, se $RC \leq 0,10$ a condição de consistência está certa.

A aplicação destas etapas consiste em priorizar a importância relativa de n elementos na toma de decisão em relação a um objetivo, através de avaliações parciais destes elementos, dois a dois, facilitando a análise pelos decisores. Através do índice de consistência, verifica-se se os valores atribuídos a cada par de critérios estão coerentes.

2.8.1 Mensuração dos pesos dos indicadores

A determinação de pesos é realizada por meio da comparação par a par, utilizando-se da escala de julgamento expressa na Tabela 2.7, que atribui valores que representam a intensidade de importância de cada critério e alternativa em relação ao outro

Tabela 2.7 Escala de julgamento de importância do método AHP [Saaty, 1980]

Intensidade de Importância	Definição
1	Importância Igual
3	Importância fraca de uma sobre a outra
5	Importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes

A seguir está descrito o modelo matemático utilizado para mensuração dos pesos dos indicadores.

Para uma matriz de ordem m , o número de elementos necessários na matriz de julgamento é de $m(m-1)/2$, e os elementos são definidos e expressos genericamente na Equação 2.41 (Saaty, 2012).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{2n} \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Onde,

$a_{ij} \rightarrow$ Positiva

$a_{ij} = a_{ji} = 1$

$a_{ij} = 1/a_{ji} \rightarrow$ Recíproca

$a_{ij} = a_{ji} \times a_{jk} \rightarrow$ Consistência

Após a definição da matriz de julgamento, é necessário normalizar os valores a_{ij} da matriz. O cálculo é expresso pela seguinte expressão

$$*a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2.42)$$

A matriz normalizada $*A$ é de ordem n é representada a seguir

$$*A = \begin{bmatrix} *a_{11} & \dots & *a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Para realizar o cálculo do peso de cada alternativa p_e , é utilizada como base a Equação 2.44, a partir dos dados da matriz normalizada $*A$. Os valores de p_e encontrados são representados na matriz da Equação 2.45:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^n *a_{ij}}{n} \quad (2.44)$$

$$p_e = \begin{bmatrix} p_i \\ p_l \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Segundo Saaty 2012, para se obter a consistência de uma matriz recíproca, seu autovalor máximo (λ_{max}) precisa ser igual a m . O autovetor mostra a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. Para encontrar o λ_{max} , primeiramente, é calculada a soma ponderada da matriz de julgamento, baseado na soma do valor das linhas da matriz recíproca A pelo valor de p_e correspondente, expresso por b assim:

$$b_i = \sum_{j=1}^n *a_{1j} \cdot p_j \quad (2.46)$$

Após o cálculo dos valores de b , dividem-se os resultados pelos vetores da matriz p_e , como segue

$$c_i = \frac{b_i}{p_i} \quad (2.47)$$

Através do cálculo da média dos resultados de cada linha é estimado λ_{max}

$$\lambda_{Max} = \frac{\sum_{j=1}^n c_i}{n} \quad (2.48)$$

Assim, é possível calcular o valor do índice de consistência (*IC*) através da Equação 2.40, considerando *m* a ordem da matriz de julgamento.

3 MODELOS DE GERAÇÃO DE EFLUENTES

Este capítulo apresenta os modelos de estimativa de geração dos efluentes gasoso e líquido de aterros sanitários, em seguida esses modelos são aplicados a um caso de estudo (aterro de Guajuviras). Posteriormente faz um estudo de análise de incerteza sobre ditas estimativas e por último é apresentado um balanço de massa e energia das correntes dos efluentes com o fim de determinar a viabilidade de integração energética entre os mesmos.

3.1 Modelo IPCC para estimativa de geração de biogás em aterros sanitários

Os modelos mais simples para determinar a geração de metano apresentados na literatura são de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem, todos eles baseados em dados empíricos. Diversos estudos [Maciel 2009; Oonk e Boom, 1994] demonstram que os modelos de ordem zero são incapazes de reproduzir a geração de biogás e que o modelo de segunda ordem apresentava resultados mais precisos do que o modelo de primeira ordem, porém seu uso se restringe devido à complexidade dos dados de entrada exigidos.

Entre os modelos de primeira ordem mais utilizados o modelo do painel intergovernamental para mudanças climáticas IPCC, 2006 permite calcular a geração de biogás de aterro com base no comportamento da fase metanogênica. No presente trabalho, adotou-se a vazão volumétrica média anual de biogás produzido LFG_a (Nm³/h) para representar o volume de biogás gerado. A seguir é apresentada a formulação para o cálculo do LFG_a (Nm³/h).

Um fator importante no modelo do IPCC., 2006 é o carbono orgânico degradável DOC dado em Gg de carbono orgânico/Gg resíduos sólidos totais, podendo-se calcular da seguinte forma.

$$DOC = \frac{\rho_{CH_4}}{F_{CH_4} MW DOC_f MCF} \left(\frac{BF}{(1+w)} \frac{C_m}{10^3} \right) \quad (3.1)$$

na qual ρ_{CH_4} é a massa específica do CH₄ (kg/m³) a temperatura e pressão atmosférica (0°C e 101,325 kPa), F_{CH_4} é a fração volumétrica de metano (adimensional), MW é a razão molecular de CH₄ em C, MCF é o fator de correção do metano (adimensional), DOC_f é fração do carbono

orgânico degradável que é decomposta, BF é a fração biodegradável nos resíduos sólidos (adimensional), C_m é o potencial de geração de metano estequiométrico (Nm^3 de CH_4 / t de RSU) e w é o conteúdo de umidade do RSU, adimensional.

A metodologia do IPCC permite calcular o carbono orgânico degradável decomponível $DDOC_m$ (Gg de carbono orgânico) como:

$$(DDOC_m)_i = (W FR_i) DOC_i DOC_f MCF \quad (3.2)$$

na qual W é a massa total de RSU (Gg de RSU), FR_i é a fração mássica do componente/material i na massa total de resíduos sólidos (adimensional) e DOC_i é o carbono orgânico degradável para o componente/material i (Gg de carbono orgânico/Gg de resíduo sólido).

A equação 3.3 expressa a taxa de carbono orgânico degradável decomponível em Gg de carbono orgânico por segundo como:

$$\frac{d[DDOC_m]}{dt} = -k(DDOC_m) \quad (3.3)$$

na qual k é a constante de taxa de reação dado em ano^{-1} e t na unidade de ano. Seu conceito é intimamente relacionado com o valor de meia-vida $t_{1/2}$, com unidade de ano, o qual é definido como o tempo necessário para que metade de determinada massa de $DDOC_m$, que esteja sob condições de degradação anaeróbia, seja consumida. Seu cálculo depende da densidade de resíduos, pH, profundidade, composição, condições climáticas [Amini et al., 2012; Machado et al., 2009; Penteado et al., 2012] e pode ser estimado como um valor global ou para componentes específicos de resíduos. Sua solução leva à expressão do carbono orgânico degradável decomponível $DDOC_m(t)$ em função do tempo t como:

$$DDOC_m(t) = DDOC_m(0) (e^{-kt}) \quad (3.4)$$

no qual $DDOC_m(0)$ é o valor inicial de $DDOC_m$. Para avaliar a geração de LFG a Equação 3.4 pode ser escrita para calcular o $DDOC_{m_{decT}}$ que é a quantidade de $DDOC_m$ ao final do ano T :

$$(DDOCm_{decT}) = [(DDOCm_{(T-1)}) + (DDOCm_a)] [1 - e^{-k_i}] \quad (3.5)$$

na qual $DDOCm_{(T-1)}$ é a quantidade de $DDOCm$ disposta no ano anterior ao ano T e $DDOCm_a$ é a quantidade de $DDOCm$ que não foi decomposta nos anos anteriores a $T-1$.

Assim, a massa de metano gerada CH_{4gT} (Gg) no ano T , é determinada por:

$$CH_{4gT} = F_{CH_4} MW_{Ratio} \sum_{i=1}^z (DDOCm_{decT})_i \quad (3.6)$$

na qual z é o número de componentes nos resíduos

Finalmente a taxa volumétrica anual média de biogás de aterro LFG gerado LFG_{aT} (Nm³/h) no ano T , é dada por:

$$LFG_{aT} = \left(\frac{CH_{4gT} 10^6}{\Delta h_{year}} \right) \left[\frac{1}{\rho_{CH_4}} + \left(\frac{MW_{CO_2}}{MW_{CH_4}} \frac{1}{\rho_{CO_2}} \right) \left(\frac{1 - F_{CH_4}}{F_{CH_4}} \right) \right] \quad (3.7)$$

na qual ρ_{CH_4} e ρ_{CO_2} são as massas específicas de CH_4 e CO_2 em kg/m³ na CNTP (0°C e 101,325 kPa), MW_{CO_2} e MW_{CH_4} são as massas molares de CH_4 e CO_2 em kg/kmol e Δh_{year} é o total de horas em um ano (8.760 h). A equação (3.8) descreve a taxa volumétrica anual média de LFG recuperado no ano T LFG_{aT}^R (Nm³/h) onde η_c é a eficiência de extração do sistema.

$$LFG_{aT}^R = \eta_c LFG_{aT} \quad (3.8)$$

3.2 Modelo do balanço hídrico para estimativa de geração de lixiviado em aterros

O método do balanço hídrico é utilizado em aterros sanitários para determinação dos volumes de líquidos lixiviados gerados, foi proposto por Fenn et al.,1975. Esse é conhecido sob a denominação de “Teoria de Thornthwaite”. O balanço hídrico é baseado na relação existente entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e o armazenamento da água

no solo. A precipitação representa a recarga de água no sistema, enquanto a evapotranspiração representa a combinação entre a evaporação das plantas e a da superfície do solo, estando incluída a transpiração das plantas. Esse processo de evapotranspiração é praticamente o transporte da água de volta para a atmosfera, sendo o inverso do processo da precipitação. O escoamento superficial representa o fluxo superficial da água na área de interesse. A capacidade de armazenamento representa a capacidade de água que pode ficar retida no solo e nos resíduos sólidos nos casos dos aterros sanitários [Fenn et al., 1975]. Os componentes principais do balanço hídrico para uma célula de aterro podem ser vistos na Figura 3.1.

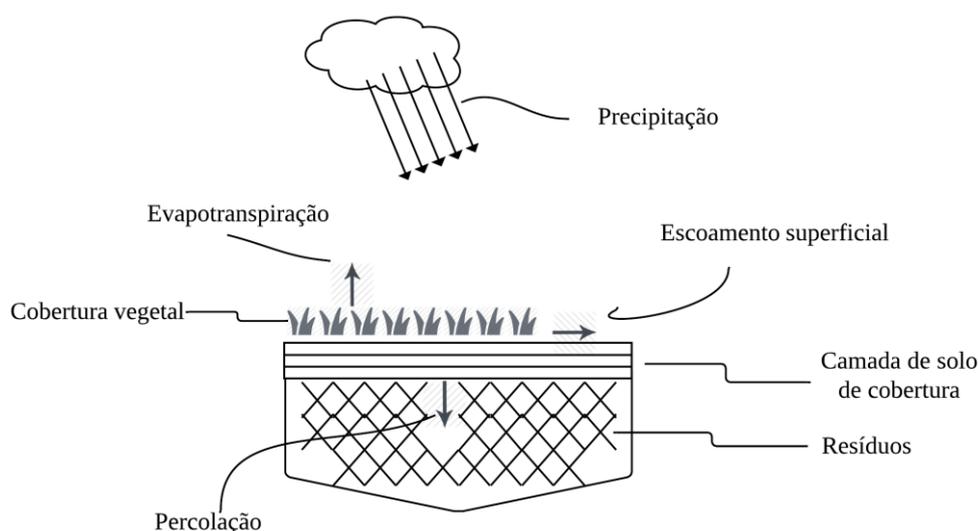


Figura 3.1 Formação de lixiviados e componentes principais do balanço hídrico [Adaptado de Renou et al., 2008]

De forma geral o balanço hídrico em aterros sanitários pode ser descrito pela Equação 3.9

$$\text{Água que entra no solo} = \text{Água que sai} + \text{Água retida} \quad (3.9)$$

A água presente em um aterro se dá através da infiltração da água gerada pela precipitação ou através da umidade presente nos resíduos sólidos depositados. Uma parte da precipitação pode escoar pela superfície, e outra pode evaporar do material do resíduo ou ser

removida pela transpiração da cobertura vegetal. Uma pequena parte ainda pode ser consumida por processos biológicos, o restante deve ser acumulado ou ser eliminado pela drenagem

Matematicamente, o balanço hídrico se expressa da seguinte forma

$$WB = P - PET - R \quad (3.10)$$

na qual P é a precipitação local, PET é o potencial de evapotranspiração, ambos baseados em dados meteorológicos, R é o escoamento superficial estimado por correlações empíricas, todos os dados estão em mm de H_2O acumulado por mês. O valor de R é obtido através de:

$$R = P C' \quad (3.11)$$

na qual C' é um coeficiente empírico adimensional determinado pelo produto dos coeficientes α e C , sendo que o coeficiente α é definido pelo conhecimento da declividade da camada de revestimento em conjunto com a estação do mês e C pelo tipo de solo utilizado na cobertura.

WB pode assumir valor negativo, positivo ou nulo. Para determinar se haverá ou não percolação da água em direção à massa de RSU $PERC$, em mm H_2O /mês, o valor de WB obtido é analisado da seguinte forma:

a) $WB = 0$

A infiltração e a evapotranspiração potencial tem os mesmos valores, indicando que toda água que se infiltrou na camada de cobertura foi retirada através da evapotranspiração, não havendo mudança no conteúdo de umidade do solo do aterro W_s e, portanto, não ocorrendo nem percolação, nem consumo de umidade do solo.

b) $WB < 0$

Neste caso, há uma redução no conteúdo de umidade devido à utilização de toda água que se infiltrou e de parte da umidade retida no solo de revestimento do aterro sanitário na evapotranspiração. Assim, ao fim do mês, o solo de cobertura tem um novo valor de W_s que é inferior ao do início do mês. Esse novo valor de W_s é determinado com o auxílio de tabelas de

retenção de umidade do solo [Fenn et al 1975], em conjunto com o parâmetro auxiliar adimensional $\Sigma NEG(WB)$

$$\Sigma NEG(WB) = WB_{n-1} + WB_n \quad (3.12)$$

onde WB_n é o valor de WB para o mês n em análise e o valor de WB_{n-1} é o valor de WB para o mês anterior ao mês n .

c) $WB > 0$

Valores de WB positivos indicam que a infiltração na camada de cobertura foi superior à demanda exigida pela evapotranspiração potencial. Porém, não necessariamente ocorre a percolação, podendo ocorrer uma das seguintes situações:

Percolação direta: O valor de W_s no início do mês é igual a água higroscópica específica $W_a \max$. Portanto, todo o valor de WB percola em direção à massa de resíduos, uma vez que o solo de cobertura se encontra saturado.

$$PERC = WB \quad (3.13)$$

Recarga do conteúdo de umidade, sem percolação. No início do mês o valor de W_s está abaixo do valor de $W_a \max$. No entanto, WB não é suficiente para suprir a diferença entre $W_a \max$ e W_s , havendo somente a recarga do conteúdo de umidade no solo de revestimento

$$PERC = 0 \quad (3.14)$$

Recarga do conteúdo de umidade, com percolação. Situação semelhante a anterior, porém, WB é suficiente para que W_s alcance ao fim do mês o valor de $W_a \max$. A quantidade excedente percola em direção ao interior da massa de resíduos, sendo expressa pela seguinte equação

$$PERC = WB - (W_a \max - W_s) \quad (3.15)$$

Segundo Fenn et al., 1975, o volume de lixiviado gerado pelo aterro sanitário será influenciado pelo valor de sua área superficial, que está em contato com a atmosfera, em conjunto com o valor de $PERC_a$, que é a quantidade de percolado anual, em mm H₂O por ano, definida por:

$$PERC_a = \sum_{n=1}^{12} PERC \quad (3.16)$$

Conhecendo ambos os parâmetros é calculada a vazão de lixiviado anual estimado L_{est} , em 10⁶ L/ano, com o auxílio da Figura 3.2.

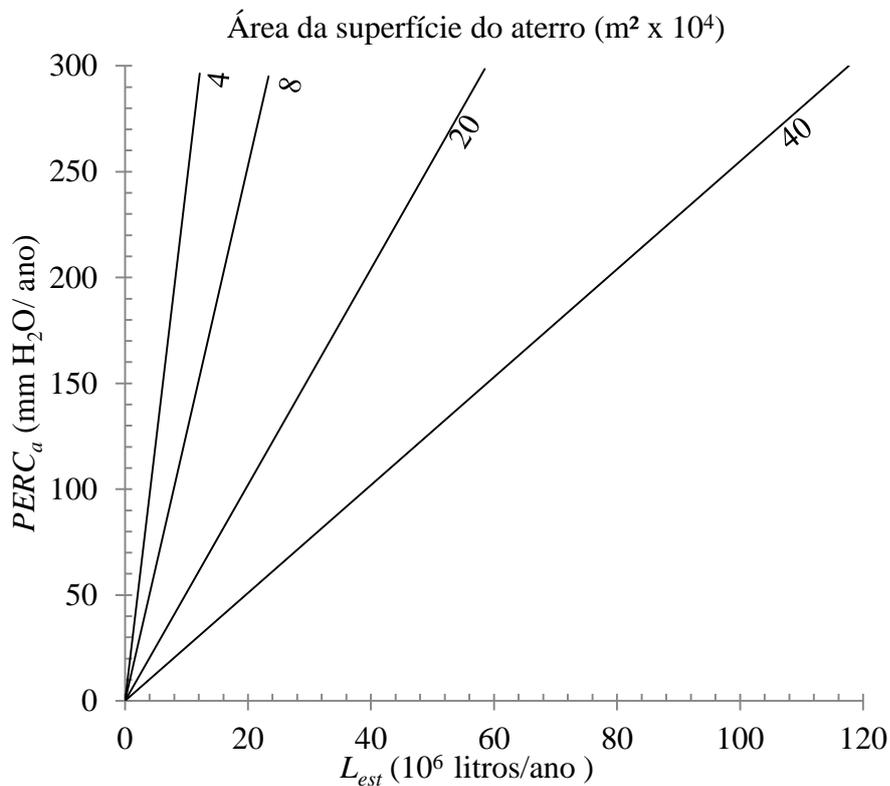


Figura 3.2 Vazão anual de lixiviado – L_{est} estimado pelo WBM em função do percolado anual. $PERC_a$ e da área do aterro [Adaptado de Fenn et al., 1975]

Como consideração final, Fenn et al., 1975, definem que para a aplicação do balanço hídrico é recomendado que se atendam as premissas apresentadas a seguir:

- O solo de cobertura precisa ter uma espessura de 0.6 m, com uma inclinação de 2 a 4% na maior parte da área coberta;
- Considera-se que o RSU, a camada de solo de cobertura e a vegetação são colocados instantaneamente, por toda a superfície do aterro, no período em que se inicia o cálculo do WBM. Ou seja, a geração de lixiviado antes do aterro estar coberto não é considerada;
- O uso final da área do aterro sanitário deverá ser na forma de uma área verde.
- O solo é coberto com grama, a qual tem suas raízes apenas no solo de cobertura, não atingindo a massa de RSU;
- As únicas fontes de umidade no aterro sanitário são a precipitação incidente sobre sua área e o conteúdo de umidade do solo de cobertura;
- As propriedades hidráulicas do solo de cobertura e da massa de RSU são constantes e uniformes em todas as direções;
- A área da superfície horizontal do aterro é muito maior que a sua profundidade, portanto, todo fluxo de água é vertical e para baixo.

3.3 Estimativa de geração de efluentes para o aterro de Guajuviras

O aterro de Guajuviras está localizado no município de Canoas, região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Tem uma área de aproximadamente 13 hectares. Começou a operar no ano de 1983 como um vazadouro a céu aberto (lixão), operou sem planejamento para a disposição dos resíduos que ali chegavam até o ano de 1996.

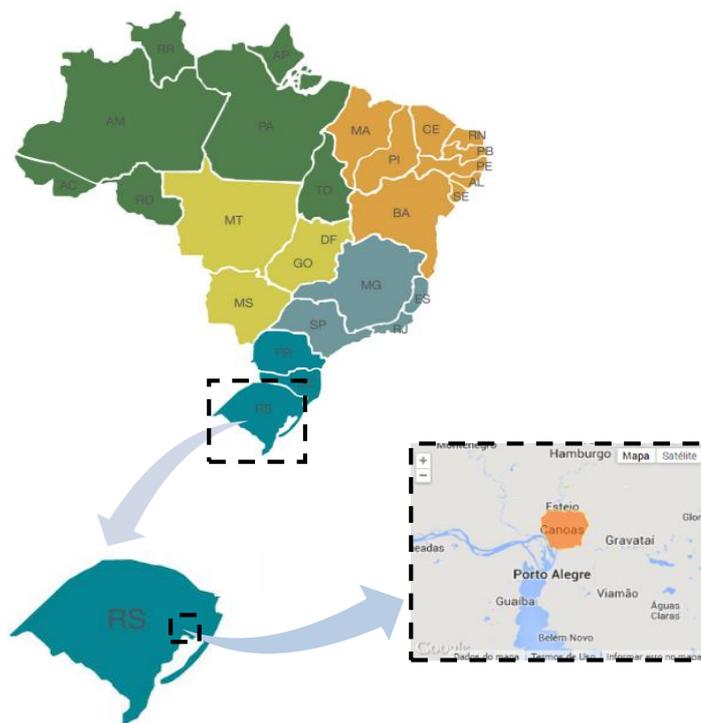


Figura 3.3 Localização do município de Canoas [Adaptado de Thomazoni, 2014]

No ano de 1996 estabeleceram-se medidas com o intuito de melhorar e regulamentar o armazenamento de resíduos no aterro. Assim foram construídos sistemas para a coleta e armazenamento de lixiviado, impermeabilização para as novas células, drenagem pluvial e de biogás.

O aterro de Guajuviras é administrado pela Secretaria Municipal de Preservação Ambiental do Município de Canoas (SMMA), sendo suas atividades de operação realizadas por empresa privada contratada. Segundo dados de SMMA, 2013a, os resíduos sólidos recebidos pelo aterro sanitário são divididos em três categorias: resíduo oriundo de coleta convencional em residências (conhecidos como RSD), resíduo de varrição de logradouros e vias públicas e resíduo comercial de terceiros.

Atualmente, o aterro opera como um ponto de transbordo de resíduos para a sua destinação final, uma vez que em sua licença de operação foi encerrada no início do ano 2012.

Na tabela seguinte é apresentado o histórico de armazenamento de RSU no aterro Guajuviras.

Tabela 3.1 Histórico de armazenamento de resíduos para o aterro de Guajuviras SMMA, 2013^a, [Adaptado de Thomazoni, 2014]

Ano	RSU (toneladas)	Ano	RSU (toneladas)
1996	48 896,03	2005	74 372,59
1997	51 732,87	2006	72 576,69
1998	56 913,31	2007	75 952,07
1999	60 146,37	2008	79 993,90
2000	58 231,67	2009	78 278,46
2001	59 916,16	2010	78 066,87
2002	58 087,28	2011	81 594,67
2003	61 782,26	2012	7.100,45*
2004	64 471,73		

* valor referente ao depositado no mês de janeiro

Não há dados sobre a composição gravimétrica dos resíduos depositados em Guajuviras. No entanto, o município de Porto Alegre em seu plano municipal de gestão de resíduos sólidos [PMPA, 2013] desenvolveu um estudo de caracterização do RSU produzido pela cidade. Devido à proximidade dos municípios, a composição gravimétrica declarada em PMPA, 2013, foi adotada no presente trabalho como similar à de Guajuviras, sendo apresentada a seguir:

Tabela 3.2 Composição gravimétrica adotada para o aterro de Guajuviras com base nos dados de PMPA, 2013 [Adaptado de Thomazoni, 2014]

% Composição em base úmida					
Papel/papelão	Matéria orgânica	Madeira	Têxteis	Rejeitos	Inertes
11,62%	57,27%	0,45%	3,86%	10,61%	16,19%

O sistema de impermeabilização do aterro sanitário de Guajuviras é baseado em barreira mineral. Após 1996, quando as obras de recuperação do até então lixão de Guajuviras foram iniciadas, a impermeabilização de base foi realizada com argila totalizando um metro de espessura. As camadas de cobertura realizadas periodicamente nas frentes de trabalho, assim

como a camada de cobertura final, possuem 0,6 metros de espessura, com inclinação final do terreno do aterro sanitário de entre 1% em sua seção longitudinal e 2% na seção transversal.

Apesar da área licenciada do aterro de Guajuviras ser de aproximadamente 13 ha [SMMA, 2013a], o armazenamento do aterro ocorre em uma área de aproximadamente 8,1 ha, sendo classificado como um aterro de área, onde são dispostas sucessivas camadas de RSU formando um “monte”.

Atualmente, o aterro de Guajuviras conta com um sistema passivo de alívio de biogás, composta por 35 drenos verticais com queimadores no seu topo, para evitar possíveis danos decorrentes do aumento da pressão do gás em seu interior, ou então da emissão descontrolada de biogás para a atmosfera.

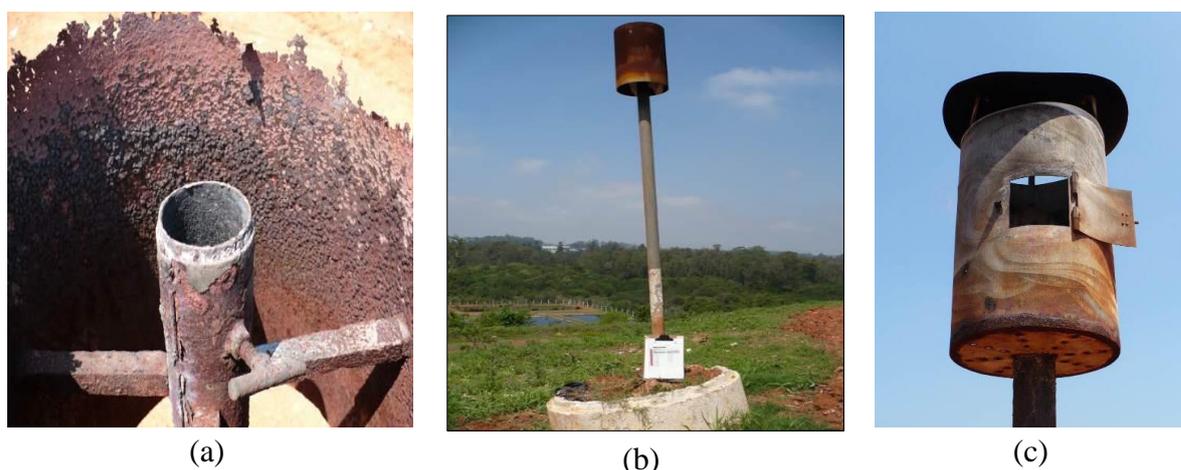


Figura 3.4 Conjunto dreno e queimador do sistema passivo de alívio de biogás no aterro de Guajuviras: (a) detalhe interno da extremidade do dreno; (b) dreno e queimador de biogás montados; (c) detalhe do protetor de queimador do dreno [Thomazoni, 2014]

3.3.1 Geração de biogás

Os dados de entrada para a estimativa de geração de LFG são relativos às equações (3.1) a (3.8) apresentadas na seção 3.1. Para equação (3.1) tem-se valores de BF e C_m encontrados na literatura e que são apresentados na tabela 3.4

Tabela 3.3 Valores de BF e C_m coletados na literatura

	Autor	Papel	Papelão	Resto alimentar	Madeira	Têxtil
BF (adimensional)	Tchobanoglous et al. (1993)	0,44	0,38	0,58	0,61	0,4
	Barlaz et al. (1997)	0,19-0,56	0,39	0,7	0,14	-
	Harries et al. (2001)	0,3-0,4	0,44	-	0,3-0,33	0,17-0,25
	Lobo (2003)	0,4	0,64	0,64	0,17	0,32
	Media	0,3913	0,4625	0,6400	0,03100	0,3088
C_m (Nm ³ de CH ₄ / t de RSU)	Cho et al. (2012)	-	410	643	487	509
	Tchobanoglous et al. (1993)	418,51	438,7	505,01	484,72	573,87
	Media	418,51	424,35	574,01	485,86	541,43

Para os valores de C_m e BF apresentados na Tabela 3.4 foram calculadas as medias individuais e as medias totais dos autores. Estes valores médios foram utilizados para calcular o $DOC_i^{BF-C_m}$ médio, equação (3.3). Na equação (3.4) tem-se dados de entrada referentes a os RSU depositados no aterro, esses dados foram apresentados na tabela 3.2.

O valor do fator de correção de metano MCF e da fração de carbono orgânico degradável que é decomposta DOC_f utilizados nos cálculos de LFG_{aT} são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 3.4 Valores de MCF e DOC_f utilizados nos cálculos

Parâmetro	Valor	Modo de obtenção
MCF	1	Valor para aterro com boas condições de operação. Recomendado pelo IPCC, 2006.
DOC_f	0,5	Recomendado por IPCC, 2006.

Os valores de MCF e DOC_f foram obtidos considerando constantes nas simulações, uma vez que o modelo apresentado por IPCC, 2006, supõe que as condições de operação, gerenciamento e de degradação anaeróbia do aterro sanitário não se alteram com o tempo e são as mesmas para cada componente específico do RSU.

Para a fração mássica de cada componente i , FR_i foi utilizada a composição gravimétrica assumida para o aterro de Guajuviras, Tabela 3.3, considerando que permanece constante para o período de análise.

A fração volumétrica de metano no biogás produzido F_{CH_4} foi tomada como igual a 0,5, valor representativo encontrado em diversos aterros sanitários [Bove e Lunghi, 2006; Campani et al., 2009; Gewald et al., 2012; Carolino e Ferreira, 2013]

Segundo IPCC, 2006, o modo de determinação de k depende da zona climática a qual o aterro sanitário faz parte, no presente trabalho a variável k foi estimada em função da precipitação anual acumulada e da temperatura média anual. Dados climatológicos foram tomados de estações meteorológicas perto de Porto Alegre, devido a falta de dados disponíveis, a precipitação anual acumulada foi superior a 1.000 mm e a temperatura média anual foi de cerca de 20 ° C. Os valores limites da taxa de constante de reação $k_{i\ max}$ e $k_{i\ min}$ foram tomados do IPCC, 2006 referentes a uma zona climática úmida e são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 Constante da taxa de reação k com base nos dados de IPCC, 2006

k (anos ⁻¹)	Papel/papelão	Resíduo alimentar	Madeira	Têxtil
$k_{i\ max}$	0.07	0.20	0.04	0.07
$k_{i\ min}$	0.05	0.10	0.02	0.05
<i>Media</i>	0.060	0.15	0.030	0.06
<i>Dispersão</i>	0.010	0.085	0.010	0.010

Valores médios de k foram usados para resolver a equação 3.4 e calcular o $DDOC_m$ e seguindo o modelo apresentado na seção 3.1 consegue-se estimar o $LFG_{a\ T}^R$ médio para o aterro de Guajuviras. Os resultados são apresentados na Figura 3.5.

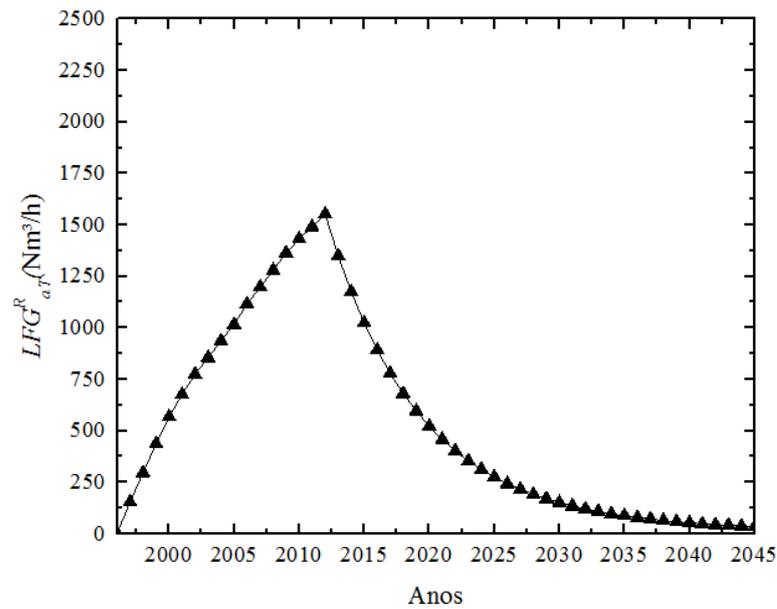


Figura 3.5 Vazão volumétrica de biogás recuperado no ano T LFG_a^R em Nm^3/h

A Figura 3.5 apresenta um aumento na geração de biogás no aterro até o ano de 2012, ano no qual cessou a deposição de RSU e ocorreu o pico de geração máxima, a partir deste ano a geração de biogás decresce gradativamente até o ano de 2045. A forma em pico é característica na geração de biogás ao aplicar o modelo IPCC, 2006.

3.3.2 Geração de Lixiviado

A geração do efluente líquido foi estimada a partir da aplicação do modelo de balanço hídrico apresentado na seção 3.2. e representada na forma do volume anual de lixiviado estimado – L_{est} , em Litros/ano. Os dados de entrada na Equação 3.10 referentes à precipitação P no local foram tomadas de registros históricos do INMET, 2015 para o período compreendido entre os anos 1996 à 2015. Por sua vez e tendo em conta a não disponibilidade de dados históricos de evapotranspiração PET , procedeu-se a calcular esses por meio do software ETo calculator, programa disponibilizado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação que permite por meio de aplicação do método de Penman-Monteith, 1973 calcular o potencial de evapotranspiração de solos. Para calcular o PET são solicitados dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, insolação e velocidade do vento

medida a dois metros de altura, dados esses obtidos da Estação Meteorológica de Porto Alegre para período 1996 à 2015. Ambos os dados de P e PET são apresentados no ANEXO F.

O cálculo do balanço hídrico foi realizado ano a ano considerando o valor do conteúdo de umidade W_s no início do primeiro mês igual ao máximo valor de água disponível $W_a max$.

O escoamento superficial R foi obtido a traves da equação 3.11. Na tabela a seguir são apresentados os coeficientes α e C que foram utilizados para determinar o valor de C' e posteriormente o valor de R .

Tabela 3.6 Coeficientes para determinar C' (Castilhos, 2003)

Tipo de solo da camada de revestimento	Declividade da camada de revestimento (%)	Coeficiente (α)	
		Estação seca ($P < PET$)	Estação úmida ($P > PET$)
Arenoso	0 a 2	0,17	0,34
$C = 0,3$	2 a 7	0,34	0,5
Argiloso	0 a 2	0,33	0,43
$C = 0,4$	2 a 7	0,45	0,55

Para o caso de estudo tem-se um solo argiloso com uma declividade da camada de revestimento entre 0-2%. A diferença em magnitude dos valores mensais de P e PET indica a estação do mês e por tanto o coeficiente α utilizado.

Segundo Fenn et al., 1975, para o cálculo do balanço hídrico na camada de cobertura é de interesse apenas o valor de W_a , água disponível específica uma vez que a fração de W_h água higroscópica específica não pode ser retirada do solo pela evapotranspiração, não sendo utilizada no balanço hídrico. Na Tabela 3.8, são apresentadas as propriedades da umidade do solo para alguns tipos de materiais.

Tabela 3.7 Propriedades de umidade do solo (Castilhos, 2003)

Propriedade (mm H ₂ O/m)	Tipo de solo		
	Arenoso	Siltoso	Argiloso
FC	200	300	375
WP	50	100	125
$W_a max^1 = FC - WP$	150	200	250

* $W_a max$ é definido como o máximo valor de água disponível específico para determinado tipo de solo

Onde FC é a capacidade de campo, WP é o ponto de murcha específico, WP é água disponível específica e W_a é água higroscópica específica que para o caso de estudo é 250 mm H_2O/m e permite calcular a quantidade de percolado quando existe recarga do conteúdo de umidade com percolação (Equação 3.15). Para o cálculo do balanço hídrico anual foi adotada a seguinte hipótese para o mês de janeiro.

$$W_a \max = W_{s(\text{inicio do mês})} \quad (3.177)$$

Com auxílio da Figura 3.2 e tendo em conta que os resíduos depositados no aterro ocupam aproximadamente uma área igual a 8,1 ha foi possível calcular a vazão de lixiviado anual gerado no aterro L_{est} [Megalitros/ano]. Resultados são apresentados na Figura 3.7.

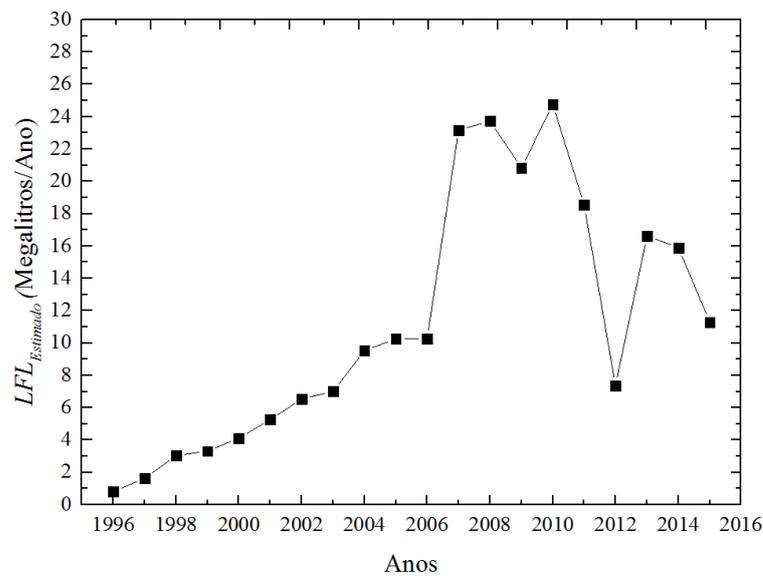


Figura 3.6 Volume de lixiviado gerado anualmente (megalitros/ano)

Pode-se observar uma geração anual crescente de efluente líquido (LFL) desde a abertura do aterro até o ano 2011. Observa-se um incremento considerável dessa geração entre os anos 2006 e 2007, provavelmente devido a um aumento da precipitação no local. O ano de 2012 também chama a atenção devido a grande queda na geração de efluente líquido em relação ao ano anterior: de 18,55 megalitros para 7,35 megalitros. Este dado curioso pode ser

relacionado ao fenômeno climático *La Niña* que causou a maior seca registrada no estado em um período de 60 anos.

3.3.3 Análise de incerteza na estimativa de geração de efluentes de aterro

Para determinar as incertezas na estimativa do biogás e de lixiviado é preciso saber que o modelo aplicado leva em conta as incertezas dos dados de entrada apresentados nas seções anteriores. Para determinar quais variáveis são relevantes para a propagação da incerteza fez-se um estudo da sensibilidade dos parâmetros envolvidos na determinação do LFG e do LFL. Com isso a incerteza propagada da geração de ambos efluentes leva em conta apenas estes parâmetros mais sensíveis a pequenas variações [Cabral, 2004]

3.3.3.1 Estudo de sensibilidade

Para decidir quais das variáveis de entrada tem uma repercussão maior na estimativa de geração de biogás e de lixiviado foi feito um estudo de sensibilidade onde cada uma dessas variáveis foi acrescentada e diminuída num 10% de seu valor médio. O desvio máximo e mínimo em função da sensibilidade foi calculado para cada um dos modelos de previsão de efluentes MO apresentados nas seções 3.1 e 3.2 a partir das seguintes relações

$$RB_{iMin} = \frac{MO_{Medio} - MO_{i(-10\%)}}{MO_{Medio}} \quad RB_{iMax} = \frac{MO_{Medio} + MO_{i(+10\%)}}{MO_{Medio}} \quad (3.18)$$

Os resultados da variação da geração de LFG em função das entradas que sofreram alteração de +/-10% são apresentados na tabela 3.9

Tabela 3.8 Variação na geração anual de LFG em função de entradas com 10% de desvio para o ano 2012 LFG = 1552,14 Gg/Ano

Variável de entrada	Geração de LFG (Gg/Ano)		% de variação na geração final de LFG	
	-10%	10%	Min	Max
<i>BF</i>	1 396,96	1 676,71	-10,00	8,03
<i>Cm</i>	1 396,96	1 676,71	-10,00	8,03
<i>w</i>	1 510,285	1 607,9	-2,70	3,59
<i>Fr</i>	1 396,96	1 707,37	-10,00	10,00
<i>k</i>	1 493,55	1638,56	-3,77	5,57
<i>MCF</i>	1 552,14	1 552,14	0,00	0,00
<i>DOC_f</i>	1 552,14	1 552,14	0,00	0,00
<i>FCH₄</i>	1 552,14	1 552,67	-0,03	0,03

A avaliação mostrou que a geração de LFG é mais sensível às variações de *BF*, *Cm* e *Fr* em primeiro lugar, seguida de *k* respectivamente. Este estudo exploratório permite então desconsiderar a influência de *w*, *MCF*, *DOC_f* e *FCH₄* na composição das incertezas combinadas devido a que esses parâmetros especialmente *MCF* e *DOC_f* são anulados quando a estimação do *DOC* (equação 3.1) é substituída na estimativa de *DDOCm* (Equação 3.3)

A incerteza *uMO* associada à a vazão volumétrica anual média de LFG recuperado ao longo do ano T, $LFGRaT$ na Equação 3.8, e ao volume de lixiviado gerado anualmente *L_{est}* na Figura 3.3 foi calculada usando a metodologia de Kline e McClintock [Cabral, 2003] e através da seguinte expressão.

$$u^2MO = \sum_{i=n}^n \left[\frac{\partial MO}{\partial x_i} \right]^2 u_i^2 + 2 \sum_{i=n}^n \sum_{j \neq n}^n \frac{\partial MO}{\partial x_i} \frac{\partial MO}{\partial x_j} u_i u_j \quad (3.19)$$

na qual x_i representa os parâmetros mais sensíveis, identificados anteriormente e u_i sua respectiva incerteza. O número de variáveis i para o modelo de previsão de biogás foi limitado quatro (n=4) como resultado da análise de sensibilidade, e um número de variáveis i igual a dois (n=2)

para o modelo de previsão de lixiviado. O subíndice j refere-se ao produto das incertezas cruzadas.

Os valores médios de cada um dos parâmetros usados no cálculo de estimativa de LFG são apresentados na tabela seguinte, seguidos de sua dispersão, que foram assumidos como sendo a incerteza do parâmetro u_i

Tabela 3.9 Incertezas individuais dos dados de entrada

RSU	k		BF		Cm		Fr	
	Média	Dispersão	Média	Dispersão	Média	Dispersão	Média	Dispersão
Papel/papelão	0,060	0,010	0,426	0,091	422,403	14,740	0,116	0,035
Restos alimentares	0,150	0,085	0,640	0,060	574,005	97,574	0,573	0,172
Madeira	0,030	0,010	0,308	0,215	485,860	1,612	0,004	0,001
Têxtil	0,060	0,010	0,060	0,010	0,060	0,010	0,039	0,012

Tendo em conta que o valor de Fr é um valor exato e por tanto não tem dispersão (Tabela 3.3) adotou-se uma dispersão de 30% baseado no (IPCC 2006), e a ela associou-se um desvio padrão unitário (1σ), ao igual que para as demais variáveis de entrada.

Após determinar as variáveis mais sensíveis na geração de LFG foi feito um estudo com o produto da sensibilidade (derivada da geração de biogás em relação a derivada dos parâmetros de entrada) vezes a incerteza individual de essas variáveis de entrada, ou seja, determinar o valor do primer termo da equação 3.18, isto com o fim de ver quais de estes dados de entrada tem uma repercussão maior na estimativa da incerteza combinada. Os resultados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 3.10 Incerteza combinada na geração de LFG para o ano 2012 LFG = 1552,14 Gg/Ano

RSU	x_i	$\left[\frac{\partial LFG}{\partial x_i}\right]^2$	ux_i^2	$\left[\frac{\partial LFG}{\partial x_i}\right]^2 u_i^2$
Papel/Papelão	<i>BF</i>	5,78E+01	8,37E-03	7,00E+00
	<i>C_m</i>	8,54E-04	2,17E+02	1,86E-01
	<i>Fr</i>	1,13E+04	1,22E-03	1,37E+01
	<i>k</i>	3,98E+04	1,00E-04	3,98E+00
Resto alimentar	<i>BF</i>	1,01E+05	3,60E-03	3,65E+02
	<i>C_m</i>	1,26E-01	9,52E+03	1,20E+03
	<i>Fr</i>	1,26E+05	2,95E-02	3,72E+03
	<i>k</i>	1,59E+06	7,23E-03	1,15E+04
Madeira	<i>BF</i>	3,91E-01	4,62E-02	1,81E-02
	<i>C_m</i>	1,58E-07	2,17E+02	3,43E-05
	<i>Fr</i>	1,84E+03	1,82E-06	3,35E-03
	<i>k</i>	4,02E+01	1,00E-04	4,02E-03
Têxtil	<i>BF</i>	1,27E+02	9,10E-03	1,16E+00
	<i>C_m</i>	4,17E-05	2,10E+03	8,78E-02
	<i>Fr</i>	8,21E+03	1,34E-04	1,10E+00
	<i>k</i>	3,20E+03	1,00E-04	3,20E-01

A coluna da direita da tabela revelou que as variáveis de entrada que mais alteram o produto da sensibilidade vezes a incerteza foram a fração mássica do papel/papelão e da matéria orgânica na massa total de resíduos sólidos, seguido da fração biodegradável dos resíduos de madeira e têxtil respetivamente.

Determinou-se então o valor médio anual da vazão volumétrica LFG_{aT}^R para o cenário estudado levando em conta a propagação das incertezas combinadas segundo o encadeamento na solução das equações (3.1) a (3.8) da seção 3.1. Na Figura 3.8 são apresentados os resultados obtidos junto com a incerteza de LFG_{aT}^R em função do tempo de decomposição do RSU

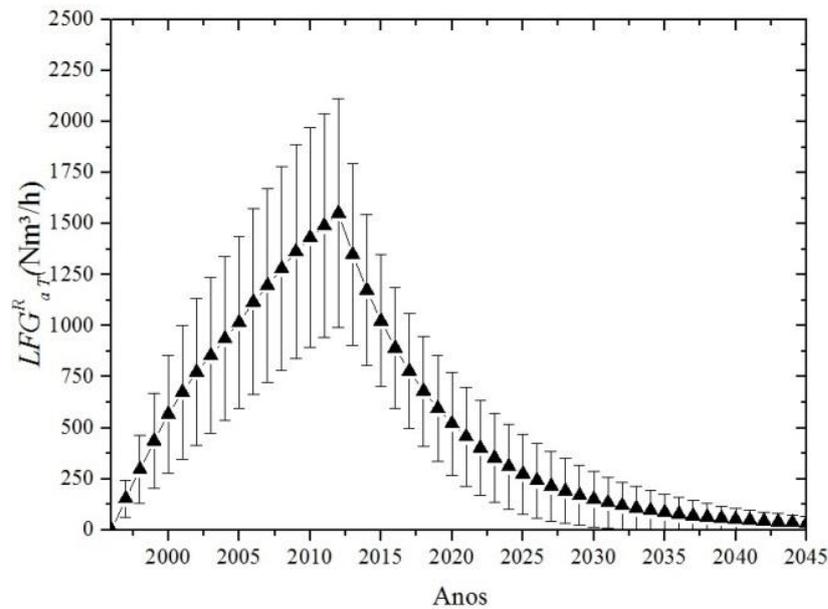


Figura 3.7 Vazão volumétrica de biogás recuperado no ano T LFG_{aT}^R com incerteza de propagação combinada

Na Figura 3.7 a incerteza vai aumentando com o tempo até a geração máxima de LFG_{aT}^R no ano 2012 onde a incerteza tem seu valor máximo. Para os anos seguintes observa-se uma diminuição da geração de LFG_{aT}^R e da incerteza propagada. Esta diminuição ocorre devido ao fato de que no ano 2012 a disposição de RSU no aterro de Guajuviras foi encerrado, anulando de esta forma os dados de entrada BF , C_m e Fr (equação (3.2)) e suas respectivas incertezas para os anos subsequentes. Assim o dado de entrada k foi predominante na determinação da incerteza dos anos seguintes 2013-2045.

Um procedimento similar foi efetuado para estimar a sensibilidade das variáveis de entrada na geração de lixiviado. Resultados são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 3.11 Variação na geração anual de LFL em função de entradas com 10% de desvio para o ano 2007 LFG = 23,17 ML/Ano

Variável de entrada	Geração de LFL (ML/Ano)		% de variação na geração final de LFL	
	-10%	10%	Max	Min
<i>P</i>	22,61	31,93	4,71	-34,57
<i>PET</i>	26,72	22,20	-12,62	6,41

A avaliação mostrou que a geração de LFL é mais sensível às variações da precipitação *P* seguida da evapotranspiração *PET*.

A incerteza u_{MO} associada a geração LFL (ML/ ano) foi calculada com o auxílio da equação 3.18. As variáveis de entrada *P* e *PET* encontram-se no apêndice B.1 (3) e a sua dispersão u_{xi} foi assumido +/-10% do seu valor. Associou-se um desvio padrão unitário (1σ). Os resultados são apresentados na figura a seguir.

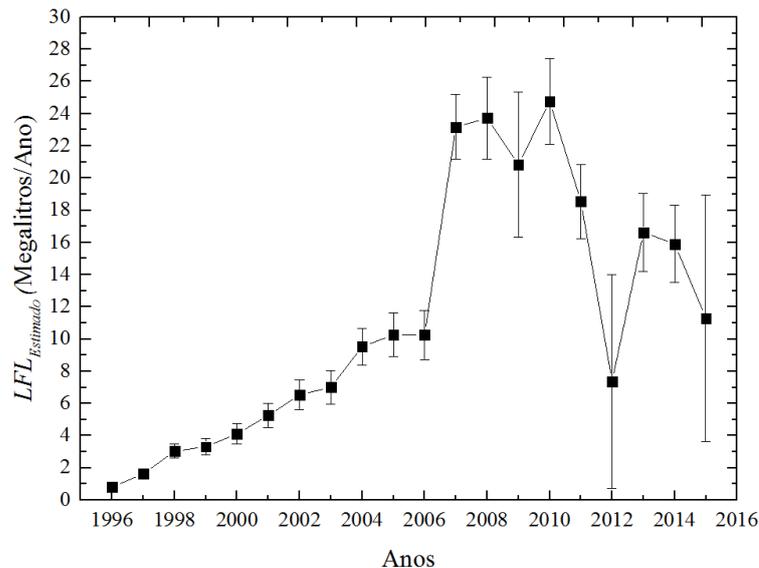


Figura 3.8 Volume de lixiviado gerado anualmente LFL com incerteza de propagação combinada

As derivadas do *MO* para a estimativa de LFL em relação as variáveis de entrada *P* e *PET* vezes sua incerteza (Equação 3.18) permitiu de identificar o impacto individual destes parâmetros na incerteza total. Os mais representativos na determinação das incertezas para o ano 2007, foram precipitação *P* para os meses de junho, julho e agosto, pois é nesses meses que o produto da derivada vezes incerteza apresenta mais sensibilidade.

3.4 Balanço energético dos efluentes do aterro

Segundo Rehman, 2003, uma primeira análise do processo de evaporação deve ser feita mediante um balanço de energia que permita determinar a quantidade de energia que a água precisa para ser evaporada por ser esta o componente principal do lixiviado.

Partindo da anterior simplificação se faz necessário um balanço de massa e energia, considerando a energia necessária para evaporação da água. Com o fim de determinar a taxa térmica requerida para acontecer à evaporação de uma quantidade de água específica tem-se a seguinte equação

$$\dot{q}_{Evap} = \dot{m}_{H_2O} (h_o - h_i) \quad (3.20)$$

na qual \dot{q}_{Evap} é taxa térmica de evaporação em kW, \dot{m}_{H_2O} é a vazão mássica de lixiviado anual a ser evaporado em kg/s, h_o e h_i são as entalpias na saída e na entrada no processo de evaporação em kJ/kg.

De forma similar para determinar a quantidade de energia necessária que deve ser fornecida pelo combustível em forma de taxa térmica de combustão \dot{q}_{Comb} em kW para evaporar certo volume de lixiviado usa-se a expressão

$$\dot{q}_{Comb} = \dot{m}_{LFG} PCI_{LFG} \quad (3.21)$$

na qual \dot{m}_{LFG} é a vazão mássica anual em kg/s de combustível e PCI_{LFG} é o seu poder calorífico inferior em kJ/kg

A partir dos resultados obtidos após aplicar o modelo do IPPC é possível calcular a vazão mássica anual de combustível \dot{m}_{LFG} mediante o seguinte equacionamento.

Inicialmente é preciso calcular o volume de biogás gerado \dot{V}_{LFG} em Nm³/s por ano usando a expressão

$$\dot{V}_{LFG} = \frac{LFG_i}{3600} \quad (3.22)$$

na qual LFG_i é o volume de LFG no ano.

Considerando o comportamento do metano como um gás ideal, é possível calcular a quantidade de mols n_{LFG} (kmols/s) contida no volume de biogás gerado em um ano mediante a equação:

$$n_{LFG} = \frac{PV_{LFG}}{RT} \quad (3.23)$$

na qual P é a pressão atmosférica em Pa, V_{LFG} é o volume de biogás gerado em um ano T em Nm^3/h , R é a constante universal dos gases e T é a temperatura em K.

A partir do número de moles de biogás calcula-se a vazão mássica de LFG \dot{m}_{LFG} anual em kg/s usando a relação

$$\dot{m}_{LFG} = n_{LFG} MM_{LFG} \quad (3.24)$$

na qual MM_{LFG} é a massa molar do biogás em kg/kmol

Fazendo as substituições correspondentes nas equações (3.19) e (3.20) consegue-se achar os valores de q_{evap} e q_{comb} , que correspondem a energia necessária para evaporar o lixiviado e a energia disponível no biogás respectivamente. Na figura 3.9 apresenta-se os resultados anuais do balanço de energia.

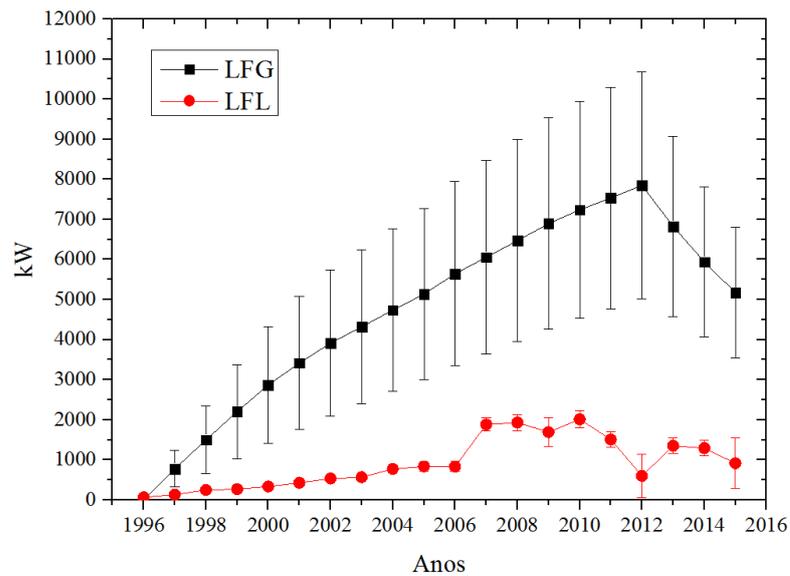


Figura 3.9 Comparação do potencial energético dos efluentes de aterro e suas incertezas

Os resultados apresentados na Figura 3.9 indicam que existe uma quantidade de energia suficiente no biogás para evaporar o lixiviado, inclusive no limite inferior considerando as incertezas, permitindo assim a exploração da integração energética entre as duas correntes.

Tendo em conta que a geração de lixiviado continua por aproximadamente 30 anos após o encerramento do aterro foi feita uma projeção da geração do lixiviado junto com sua incerteza no tempo com o intuito de determinar até que ano haveria disponibilidade do biogás para evaporar esse efluente. A projeção foi calculada como o valor médio dos dados dos últimos quatro anos (2012-2015). Resultados são apresentados na Figura 3.10.

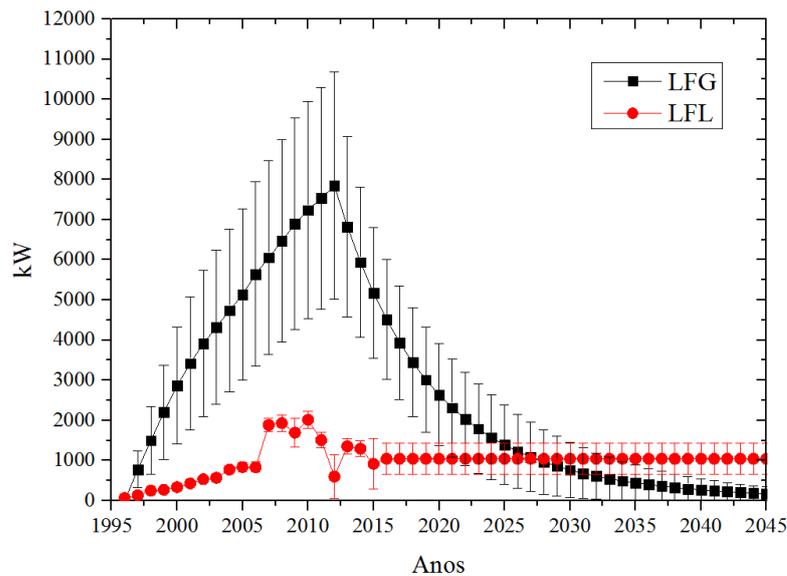


Figura 3.10 Projeção do lixiviado na comparação do potencial energético dos efluentes de aterro e suas incertezas

Os resultados indicam que existiria energia suficiente para evaporar o lixiviado aproximadamente até o ano 2026.

3.5 Conclusões parciais

- As estimativas de geração de biogás (LFG) e efluente líquido (LFL) para o aterro de Guajuviras foram estimadas utilizando os modelos do IPCC e balanço hídrico modificado WBM, respectivamente. As variáveis de entrada mais sensíveis para o modelo IPCC foram a fração mássica Fr da matéria orgânica e do papelão seguido da fração biodegradável BF de madeira e têxtil. Para o WBM a variável mais sensível foi a precipitação P . As incertezas combinadas na geração foram de aproximadamente 50% do valor calculado, considerando-se uma confiabilidade de 68%.
- Com base nas estimativas de geração de efluentes e suas incertezas combinadas, foi proposto um balanço de energia entre os efluentes. Os resultados indicaram que aproximadamente 30% da energia de biogás liberada pela combustão seria suficiente para evaporar o lixiviado durante o período de análise (1996 - 2015) e que ainda existiria energia no biogás para evaporar o lixiviado até o ano 2026 aproximadamente.

4 PROPOSTAS DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE EFLUENTES DE ATERRO

No presente capítulo são descritas as diferentes propostas de sistemas para mitigação de efluentes de aterro por meio de sua integração energética. As propostas foram elaboradas por Amado et al, 2016 e Amado et al, 2017, a partir de diversos arranjos de equipamentos que utilizam a queima de biogás para promover a evaporação de lixiviado e eventualmente aproveitamento de excedentes. Os sistemas foram simulados com os dados de geração de efluentes do aterro de Guajuviras apresentados no Capítulo 3 desse trabalho. Os resultados são resumidos pelas métricas LFG Produzido, LFG Consumido, Energia Elétrica Gerada, Volume de LFL tratado e Consumo Energético, e servirão para a análise apresentada no Capítulo 5.

4.1 Dados de entrada e hipóteses de modelamento

A Figura 5.1 apresenta as curvas de geração de biogás e lixiviado calculadas pelos modelos apresentados no Capítulo 3, em conjunto com as estimativas de incertezas desses dados. Essas gerações anuais serviram como dados de entrada para simular cada uma das propostas de integração energética.

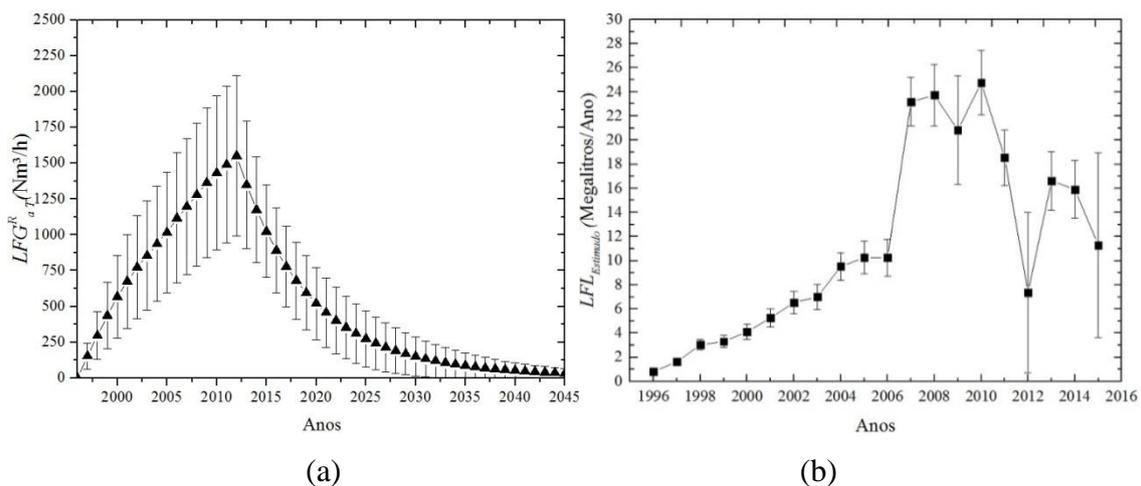


Figura 4.1 Curvas resultantes da estimativa de geração de efluente gasoso (a) e líquido (b) no aterro de Guajuviras.

Os resultados para a geração de biogás são referentes ao período de 1996 e 2045 enquanto os dados de geração de lixiviado referem-se aos anos entre 1996 e 2015, pois foram baseados em dados climatológicos. Para os cálculos, o lixiviado gerado no primeiro ano de operação foi somado àquele gerado no ano seguinte, pois a geração de biogás no primeiro ano de funcionamento do aterro é nula. Por motivos de simplificação, esta análise optou por trabalhar apenas com os valores médios anuais.

Os sistemas propostos têm como premissa básica eliminar o 100% do efluente líquido, mesmo que, para isso, seja necessário usar uma fonte de calor externa, combustível extra (gás natural) ou dependendo do caso sobrasse o combustível base (biogás). As hipóteses usadas para o modelamento de todos os sistemas são:

- Os efluentes de aterro, gasoso e líquido encontram-se a temperatura ambiente (25°C);
- Todo o processo ocorre a pressão constante e igual a à pressão atmosférica (101,325 kPa);
- O efluente líquido é considerado água e sai do processo como vapor.
- O efluente gasoso é considerado gás ideal e é composto por 50% de metano CH₄ e 50% de gás carbônico CO₂ com um poder calorífico inferior (PCI) igual à 13,362 MJ/kg;
- O ar usado na combustão é considerado como seco;
- Produtos da combustão são modelados como gás ideal e como ar;
- Os processos acontecem em regime permanente (RP) e as vazões de efluentes instantâneas são consideradas iguais ao valor médio de cada ano.

4.2 Sistema Combustor - Evaporador (CE)

O sistema proposto é baseado no aproveitamento do calor fornecido por uma reação de combustão entre o biogás gerado no aterro junto com ar atmosférico num combustor para depois evaporar o efluente líquido, que primeiro passa por um trocador de calor. As duas correntes, calor dos gases de exaustão e lixiviado trocam energia num evaporador conforme se mostra na Figura 4.2.

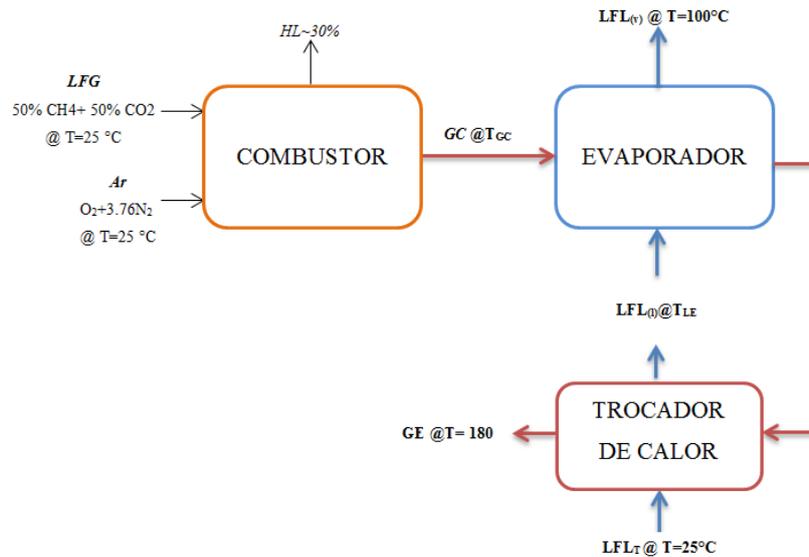


Figura 4.2 Proposta de integração energética Combustor-Evaporador CE [Adaptado de Amado et al, 2017]

A reação de combustão é tomada como estequiométrica, sem excesso de ar. Os gases quentes preaquecem o efluente líquido até sua temperatura de saturação (~100 °C) após serem resfriados no evaporador. O objetivo deste arranjo é apenas o tratamento dos efluentes, sem geração de energia elétrica. Neste sistema considerou-se que os gases são exaustos do sistema a temperatura de 180 °C, e as perdas de energia para o exterior nos trocadores de calor são desprezíveis. Segundo Unindo, 1994 a perda de calor em um combustor pode ser estimada como sendo o 30% da energia liberada pelo biogás. As equações foram resolvidas visando calcular a vazão mássica de biogás \dot{m}_{LFG} necessária para realizar a evaporação completa de efluente líquido produzido pelo aterro em cada ano.

4.3 Sistema Incinerador - Evaporador (IE)

Este sistema baseia-se num processo de destruição térmica dos efluentes, com ambos os efluentes, biogás e lixiviado, incinerados em um reator de leito fluidizado. Esse reator trabalha com 20% de excesso de ar. A Figura 4.3 apresenta o esquema do IE:

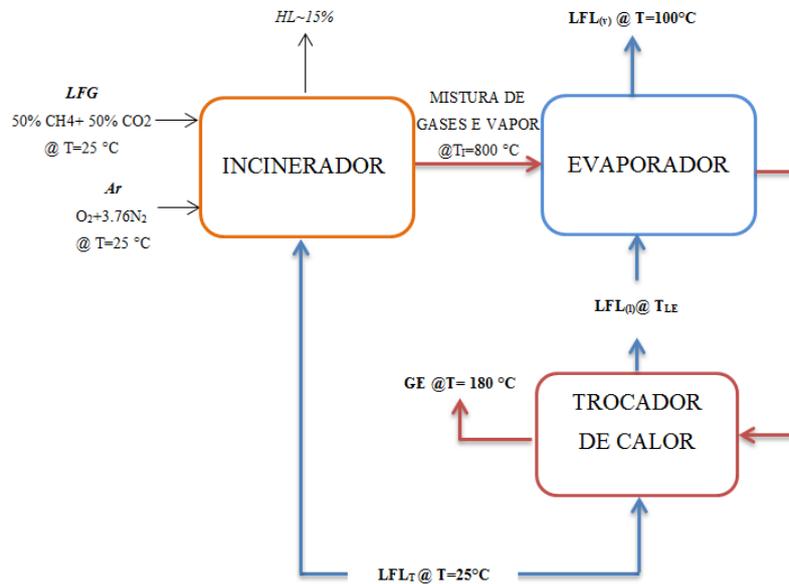


Figura 4.3 Proposta de integração energética Combustor-Evaporador IC [Adaptado de Amado et al, 2017]

Para esta proposta a perda de calor foi estimada em 15 % da energia entregue pelo biogás (valor baseado em processos em reatores de Leito Fluidizado [Lin et al., 1990 e Madhiyanon et al., 2005]). Na saída do incinerador encontra-se uma mistura de vapor e gases produtos da combustão a uma temperatura de 800°C. Para esta modelagem de combustão, considerou-se queima completa obedecendo a reação da Equação 2.27 da seção 2.4 sendo a é o número de mols do biogás necessário para realizar o tratamento e b é o número de mols de lixiviado (água) a ser tratado. O lixiviado (H_2O), CO_2 presente no biogás e o N_2 presente no ar são tratados como espécies inertes nesta reação.

O incinerador foi resolvido desacoplado do resto do sistema, o que resultou na determinação da vazão molar de biogás necessária para incinerar 1 kmol de lixiviado. Com esta relação, podem-se resolver as equações restantes do sistema para calcular a vazão mássica de biogás (\dot{m}_{LFG}) necessária para abater completamente o efluente líquido, e qual seria a parcela de lixiviado abatida no evaporador e no incinerador ($\dot{m}_{LFL,evap}$ e $\dot{m}_{LFL,inc}$).

4.4 Sistema Motor de combustão interna - Evaporador (ME)

A proposta é baseada num sistema que usa um motor de cogeração alimentado a biogás gerado no aterro como combustível, visando a geração simultânea de energia elétrica e eliminação do lixiviado, variável no tempo em função da quantidade de biogás produzido. A Figura 4.4 esquematiza o sistema proposto.

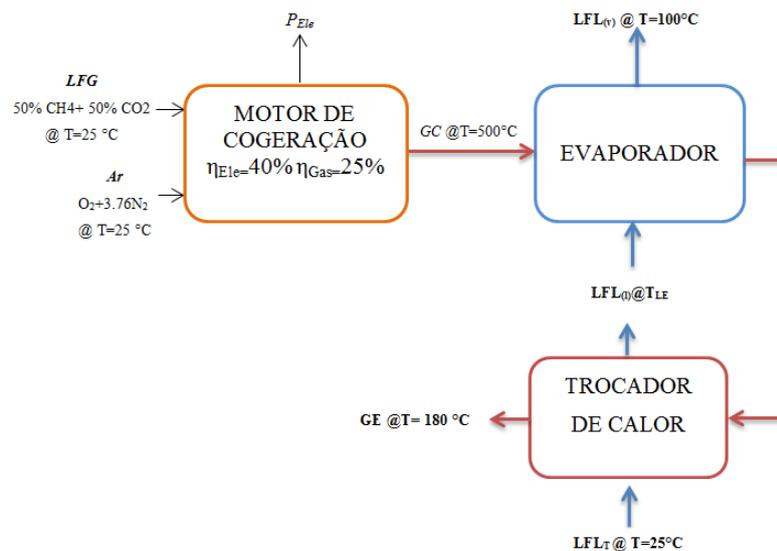


Figura 4.4 Proposta de integração energética Motor de combustão interna-Evaporador ME
[Adaptado de Amado et al, 2017]

Neste sistema os gases de exaustão passam por um conjunto formado por um evaporador e um trocador de calor. Para o sistema proposto considerou-se que os gases de exaustão do motor estão a uma temperatura de 500°C, com eficiência de conversão em energia elétrica de 40%, e conversão em energia térmica dos gases quentes de 25%. A parcela restante é referente ao circuito de arrefecimento do motor e às perdas inerentes ao sistema. Valores de eficiência e temperatura de saída dos gases são baseados no catálogo do motor Jenbacher [GE,2016], os gases são modelados apenas como sendo ar, e a hipótese de gás ideal é aplicada. As perdas de calor nos trocadores de calor para o exterior são desprezadas. Após passar pelo evapor e trocador de calor os gases são exaustos do sistema a 180°C.

Para esta proposta foi calculada a vazão mássica de biogás (\dot{m}_{LFG}) necessária para realizar a evaporação de todo lixiviado produzido no aterro. Os resultados obtidos mostraram que para este caso \dot{m}_{LFG} , em alguns anos, é maior do que a vazão total produzida no aterro.

Calculou-se então a energia extra que deveria ser fornecida para atender a demanda do sistema (\dot{Q}_{ext}), e conseqüentemente a quantidade de gás natural necessária para suprir esta energia por ano (V_{GN}).

4.5 Sistema Combustor - Motor de combustão interna - Evaporador (CME)

Esta proposta é um arranjo que considera os equipamentos usados nos sistemas CE e ME. O objetivo principal desta proposta é a eliminação de todo o efluente líquido utilizando só o biogás produzido no aterro, sendo neste caso a geração de energia elétrica um produto secundário, como apresentado na Figura 4.5.

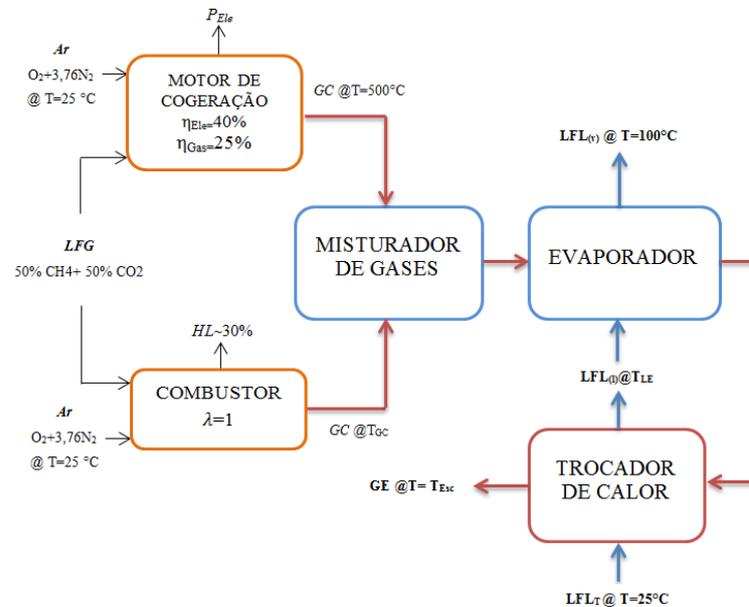


Figura 4.5 Proposta de integração energética Combustor-Motor-Evaporador CME [Adaptado de Amado et al, 2017]

A modelagem deste sistema segue as mesmas usadas nos sistemas CE e ME, porém a vazão mássica de biogás é dividida em duas correntes, com uma fração destinada ao motor de cogeração $\dot{m}_{LFG,mot}$ e outra ao combustor $\dot{m}_{LFG,comb}$. Os gases produtos da combustão de ambas correntes são levados a um misturador de gases, que posteriormente trocam calor com a corrente de lixiviado em primeiro lugar no evaporador e depois no trocador de calor pré-aquecedor. A quantidade de efluente gasoso em cada uma das correntes é determinada pela

necessidade de energia térmica para a evaporação completa de efluente líquido em determinado ano, visando sempre a maior produção de energia elétrica desde que seja respeitada a condição de eliminação total dos efluentes.

Em anos em que há excesso de energia produzida, a vazão mássica de biogás no combustor seria negativa, neste caso $\dot{m}_{LFG,comb}$ teve seu valor corrigido para zero, enquanto $\dot{m}_{LFG,mot}$ foi igualado à vazão mássica total de biogás produzida no aterro naquele ano. Para fechar o sistema de equações, foi preciso deixar livre a temperatura de saída dos gases (T_{Esc}), que nestes casos especiais seria acima de 180 °C.

4.6 Sistema Incinerador - Motor de combustão interna - Evaporador (IME)

A última proposta de integração energética dos efluentes foi pensada como um arranjo que mistura os equipamentos dos sistemas IE e ME e visa a eliminação de todo o efluente líquido por meio da utilização do biogás gerado no local, e a produção de eletricidade como um produto secundário, semelhante à proposta anterior. Nesta nova proposta, o lixiviado é dividido em duas correntes, uma parcela vai para o incinerador e a outra para o trocador de calor, de igual forma a vazão mássica do biogás é dividida em duas parcelas, a primeira vai para o motor de cogeração e a segunda vai para o incinerador. A quantidade de biogás e lixiviado em cada uma das correntes é determinada pela necessidade de energia térmica para a mitigação completa dos efluentes em dado ano, visando sempre a maior produção de energia elétrica desde que a condição primária seja respeitada. A Figura 4.6 apresenta um esquema do sistema IME.

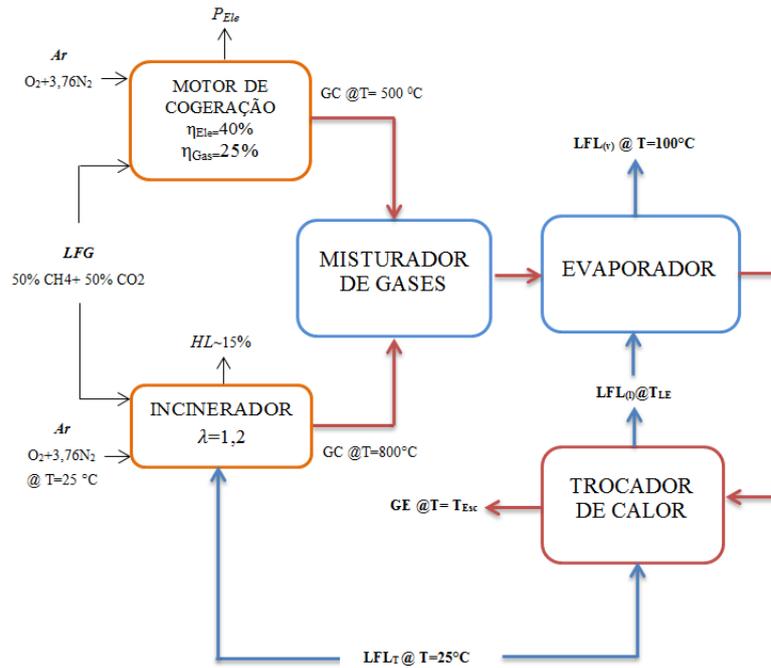


Figura 4.6 Proposta de integração energética Combustor-Motor-Evaporador IME [Adaptado de Amado et al, 2017]

O IME, assim como o IE, resolve o incinerador de maneira desacoplada do resto do sistema. O restante das equações são resolvidas para determinar a parcela de vazão mássica de biogás destinada ao motor ($\dot{m}_{LFG,mot}$) e ao incinerador ($\dot{m}_{LFG,inc}$). Neste arranjo a vazão de efluente líquido produzida no aterro se divide em duas correntes: aquela a ser evaporada ($\dot{m}_{LIX,evap}$) e aquela a ser incinerada ($\dot{m}_{LIX,inc}$). Esta segunda parcela possui relação direta com $\dot{m}_{LFG,inc}$, visto que o incinerador é resolvido desacopladamente. Semelhantemente ao caso do CME, no IME também há anos com excesso de energia e as vazões que iriam para o incinerador resultariam em valores negativos. Neste caso foi adotado o mesmo procedimento: zerar as vazões no incinerador, fazendo todo o biogás nesses anos ser queimado no motor e o efluente líquido abatido no evaporador. Com isso, a temperatura de saída dos gases (T_{esc}) fica livre, resultando em valores acima de 180 °C.

As cinco propostas foram implementadas e simuladas no software *Engineering Equation Solver (EES-32)*. Os resultados para cada sistema são apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 Métricas das propostas para integração energética de efluentes de aterros sanitários

Item	Subproduto	Propostas				
		CE	IE	ME	MCE	IME
1	LFG Produzido (t)	2,01E+05	2,01E+05	2,01E+05	2,01E+05	2,01E+05
2	LFG Consumido (t)	6,78E+04	6,62E+04	2,52E+05	1,82E+05 (Motor)	1,78E+05 (Motor)
					1,87E+04 (Combustor)	2,27E+04 (Incinerador)
3	Energia Elétrica Gerada (MJ)	0	0	42 650	29 954	30 139
4	Consumo Energético (MJ/m ³ LFL)	4 039	3 955	15 013	11987	11 987

A primeira linha da Tabela 4.1 apresenta a vazão mássica de biogás gerado pelo aterro sanitário durante os 20 anos de estudo, sendo essa geração dependente das características do aterro e não das propostas de mitigação de efluentes.

A segunda linha apresenta a quantidade de LFG consumido por cada uma das propostas, onde pode-se perceber que os sistemas CE e IE usam aproximadamente um terço do LFG produzido pelo aterro. Para os sistemas que incluem cogeração, o biogás consumido é igual ao biogás produzido, indicando as respectivas parcelas que vão para os equipamentos como motor, combustor e reator de leito fluidizado. Somente a proposta ME indica uma vazão mássica de biogás consumido superior à vazão mássica produzida, visto que ele não foi suficiente para fornecer a energia necessária para abater o LFL em alguns anos.

A mesma relação se observa na terceira linha, que indica a produção de energia elétrica. Entre todas as propostas que incluem cogeração, aquela que inclui só motores consegue atingir uma produção mais elevada em comparação às propostas que incluem combustor e reator de leito fluidizado respetivamente.

A última linha indica a relação entre a energia fornecida pelo biogás consumido por cada uma das propostas dividido pelo efluente líquido evaporado, neste sentido o maior consumo energético foi atingido pelo sistema ME, seguido dos sistemas MCE, IME, CE e IE.

O modelamento conceitual das propostas permitiu passar para o dimensionamento e custos dos sistemas, seguindo o equacionamento apresentado na seção 2.4. Os custos dos equipamentos foram estimados usando a calculadora de custos MHHE, 2011 baseada no livro de [Peters e Timmerhaus, 2011], e atualizados usando o CEPCI, 2016. A Tabela 4.2 apresenta esses resultados.

Tabela 4.2 Dimensionamento e custos em US\$ dos equipamentos usados nas propostas de integração energética de efluentes de aterros sanitários.

Dimensionamento e custos de equipamentos	Propostas				
	CE	IE	ME	MCE	IME
Potencia Motor de cogeração (kW)	-	-	4 715	2 828	2 828
Custo (US\$)	-	-	2 410 723	1 607 148	1 607 148
Capacidade do reator de leito fluidizado (m ³)	-	10,91	-	-	6,79
Custo (US\$)*	-	214 334	-	-	163 064
Área Combustor (m ²)	3,17	3,10	-	2,05	1,93
Custo (US\$)*	214 976	285 272	-	199 379	194 914
Área Evaporador (m ²)	1,54	2,34	6,31	3,61	3,70
Custo (US\$)*	106 398	211 170	388 327	264 409	264 409
Área Trocador de calor (m ²)	41,16	44,75	88,10	64,94	61,54
Custo (US\$)*	16 144	22 907	38 307	30 006	28 954
Custo total (US\$)*	337 518	733 683	2 837 358	2 100 943	2 258 490

* (Peters e Timmerhaus, 2011) <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>

O custo do MCI foi estimado a partir de um memorial de compra do ano 2007, e corrigido para o ano de 2016 através do CEPCI.

O incinerador foi pensado como um reator de leito fluidizado, e seus custos foram estimados como o de um combustor somado a um reator misturador. Seu volume foi estimado como o produto entre a vazão volumétrica total máxima e o tempo de residência ideal para o processo (10 segundos). Os resultados mostraram que o sistema de cogeração puro ME conseguiu atingir a maior produção de energia elétrica, acompanhado dos maiores custos e dimensões dos equipamentos. Os sistemas de cogeração com combustor e reator de leito fluidizado apresentaram resultados similares no que respeita da potência do motor e dimensões nos trocadores de calor e evaporadores. Diferenças em relação aos custos se dão entre os

sistemas de cogeração devido a quantidade de motores de combustão interna requerido em cada um. Para a proposta EM foram necessários três motores e para as propostas CME e IME dois motores respectivamente. Para todas as propostas foram necessárias apenas uma unidade de equipamentos como reator de leito fluidizado, combustor, evaporador e trocador de calor.

4.7 Conclusões Parciais

- Foram desenvolvidas cinco propostas conceituais para mitigação de efluentes de aterro por meio de arranjo técnico de equipamentos de queima de biogás e evaporação de lixiviado. As propostas CE e IE resultaram no consumo de cerca 30% do efluente gasoso. As outras propostas usaram o excedente desse efluente para a produção de energia elétrica, destacando-se a opção ME=42 650 MJ seguidos de IME= 30 139 MJ CME=29 954 MJ.
- A proposta ME demandou combustível extra (gás natural) para atingir a potência nominal do motor e evaporar todo o efluente líquido no período de estudo. Este sistema demonstrou precisar de equipamentos como motor, trocador de calor e evaporador com maiores dimensões em comparação com outras propostas
- A diferença entre os custos totais das propostas CE=US\$ 337 518, IE= US\$ 733 683, ME=US\$ 2 837 358, CME=US\$ 2 100 943 e IME= US\$2 258 490 se deve principalmente ao tipo, dimensões e quantidade de máquinas necessárias para realizar o processo de queima do efluente gasoso, incineração e evaporação do efluente líquido.

5 INDICADORES DE DESEMPENHO

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos a partir da modelagem das diferentes propostas de integração energética de efluentes de aterro sanitário descritas no Capítulo 4. O estudo está dividido em duas partes: primeiro são apresentados e discutidos indicadores de caráter técnico-ambiental e em segundo lugar os indicadores financeiros. Posteriormente esses indicadores são comparados e avaliados por meio de um estudo de análise hierárquica.

5.1 Indicadores técnico-ambientais das propostas de integração energética.

Os indicadores referem-se à mitigação dos impactos sobre o meio ambiente dos efluentes gerados no aterro sanitário e a o uso do biogás como combustível para produção de energia térmica e elétrica.

Os indicadores escolhidos para avaliar o desempenho técnico-ambiental são:

- *Eficiência de sistema, η (%)*: Quociente entre toda energia transferida para o lixiviado tratado $Q_{LFL,TR}$ em MWh somada à energia elétrica produzida, $E_{Ele,produzida}$ em MWh, e a energia total fornecida pelo combustível em MWh num período de tempo t , conforme Equação (5.1).

$$\eta = \frac{Q_{LFL,TR} + E_{Ele,produzida}}{(\dot{m}_{LFG,CO} PCI_{LFG})_t} \quad (5.1)$$

na qual $\dot{m}_{LFG,CO}$ é a vazão mássica de biogás consumido em kg/s e PCI_{LFG} é o poder calorífico do biogás em kJ/kg

- *Razão de biogás, RB (%)*: Quociente entre o biogás consumido pelo sistema proposto $\dot{m}_{LFG,CO}$ em kg/s e aquele gerado pelo aterro $\dot{m}_{LFG,PR}$ em kg/s, conforme a Equação (5.2)

$$RB = \frac{\dot{m}_{LFG,CO}}{\dot{m}_{LFG,PR}} 100 \quad (5.2)$$

- *Energia elétrica produzida por LFG consumido, PEB (MJ/kg)*: Quociente entre a energia elétrica total produzida $E_{Ele,produzida}$ em MWh e a massa de biogás consumida $\dot{m}_{LFG,CO}$ em kg/s no sistema proposto, conforme Equação (5.3)

$$PEB = \frac{E_{Ele,produzida}}{\dot{m}_{LFG,CO}} \quad (5.3)$$

- *Energia elétrica produzida por lixiviado evaporado, PEL (MJ/m³)*: Quociente entre a energia elétrica total produzida em MWh e o volume total de lixiviado tratado $V_{LFL,TR}$ em m³ no sistema proposto, conforme Equação (5.4)

$$PEL = \frac{E_{Ele,produzida}}{V_{LFL,TR}} \quad (5.4)$$

A partir dos resultados das Tabelas 4.1 e 4.2 do Capítulo 4 foi possível calcular cada um dos indicadores para cada uma das propostas, os resultados são apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 Resultados dos indicadores técnico-ambientais para os cinco sistemas propostos

Item	Indicador	Propostas				
		CE	IE	ME	MCE	IME
1	η (%)	63,5	64,8	57,1	56,6	56,8
2	<i>RB</i> (%)	33,69	32,99	125,20	100,00	100,00
3	<i>PEB</i> (MJ/kg)	0	0	5,345	4,701	4,739
4	<i>PEL</i> (MJ/m ³)	0	0	6 005	4 218	4 251

A primeira linha da tabela apresenta os valores de Eficiência de sistema η para os cinco arranjos propostos, considerando como produto tanto a eliminação térmica do efluente líquido como a energia elétrica produzida. Os resultados mostram que as propostas desenhadas unicamente para a evaporação do lixiviado (CE e IE) apresentam maiores eficiências, 63,5% e 64,8% respectivamente. As outras propostas ao incluir motor de cogeração acabam perdendo

aproximadamente 35% de energia no circuito de arrefecimento que não está sendo aproveitada, o restante 65% está na produção elétrica e nos gases de exaustão conforme apresentado na seção anterior.

Na segunda linha o indicador razão de biogás *RB* para as duas primeiras propostas expressa a possibilidade de evaporar todo o efluente líquido usando apenas um terço do volume disponível no efluente gasoso, salientando que o volume restante deve ser queimado para redução de metano, ou pode ser queimado para qualquer outro uso lucrativo.

Já a terceira proposta baseada em um motor em regime de cogeração permite alcançar a maior produção de energia elétrica por massa de biogás usado (*PEB*) e por volume de lixiviado evaporado (*PEL*) em comparação com os outros sistemas propostos. Entretanto, nesse sistema o volume de biogás produzido não é suficiente para suprir a necessidade de eliminação do efluente líquido em todos os anos de estudo, pois só um quarto da energia entregue para o motor é utilizada para o processo. Tendo em conta o anterior, uma alternativa viável para conseguir evaporar o lixiviado em todos os anos seria providenciar uma fonte extra de energia, para este caso específico poderia ser a compra de outro combustível gasoso como o gás natural por exemplo. Do ponto de vista técnico e ambiental, a proposta tem dois fatores a analisar: o consumo excedente de combustível não renovável, como o gás natural e as melhoras na infraestrutura do aterro; o uso do gás natural favorece as condições de queima no motor, diminuindo períodos e custos de manutenção por se tratar de um combustível isento de siloxanos, que são os grandes provocadores de estragos nos motores de combustão interna.

As modelagens para os sistemas que incluem cogeração, acompanhada por equipamentos como combustor de biogás e incinerador de leito fluidizado (CME) e (IME), foram concebidas visando a completa eliminação de ambos efluentes, que pode ser alcançado pela dosagem correta dos efluentes entre as duas correntes propostas em ambos os sistemas visto no Capítulo 4. Evidencia-se desta forma um ganho ambiental, ao mitigar o impacto ambiental dos efluentes, e ainda ter uma produção de energia elétrica, como mostram os indicadores *PEB* e *PEL* na terceira e quarta linha da Tabela 5.1.

5.2 Indicadores financeiros das propostas de integração energética

A metodologia de análise financeira usada neste trabalho envolve a diferença entre os recebimentos e gastos do investimento ao longo de um período de tempo. Um fluxo de caixa

para um projeto hipotético de 20 anos permitiu calcular a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e tempo de retorno do investimento (Payback descontado).

Para Gitman (2003), a projeção de fluxos de caixa relativos aos anos de implantação e andamento de projetos tem sido muito utilizada como ferramenta de análise de projeto. O fluxo de caixa deve conter o maior nível de detalhes possível para ter uma eficácia no processo de tomada de decisão, seja desde a projeção inflacionária até o detalhamento do custo operacional do empreendimento.

Assim a finalidade desta análise é fornecer os elementos para uma melhor compreensão de comparação desde o ponto de vista financeiro entre alternativas de integração energética de afluentes de aterro.

Os indicadores usados na análise financeira do presente trabalho são definidos:

- *Tempo de retorno do capital investido (Payback-PB)*: É o período de tempo necessário para recuperar o investimento, avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando-se o valor do dinheiro no tempo. (Hirschfeld, 2007). Sendo a forma mais correta de calcular o tempo de recuperação da capital quando o valor presente líquido (VPL) troca de sinal negativo para positivo (Ochoa, 2010).
- *Valor Presente Líquido (VPL)*: É um método fundamentado no conceito do valor da soma de todos os investimentos e receitas referenciados a uma única data pela taxa de juros (Ochoa, 2010). É determinado pela equação (5.5)

$$VPL = \sum_{j=1}^N F(j)(1+i)^{-j} \quad (5.5)$$

na qual o termo i corresponde à taxa de atratividade usada por quem faz a análise do investimento. Para a decisão da viabilidade de um projeto a partir do VPL é realizada da seguinte maneira:

- $VPL > 0$, o capital investido, será recuperado e ainda com resultado de caixa superior ao previsto com a taxa mínima atrativa (TMA);

-VPL<0, o capital investido, não será recuperado, portanto o projeto não será economicamente viável.

- *Taxa interna de retorno (TIR)*: Representa uma taxa equivalente de juros que, aplicada às contribuições do fluxo de caixa e referenciada à data de início do projeto, torna o valor presente líquido zero. O critério de viabilidade econômica é que a taxa interna de retorno seja superior à taxa de atratividade para o usuário ou investidor (Hirschfeld, 2007), a TIR é dada pela equação (5.5)

Para a avaliação de o investimento através desse parâmetro, compara-se com a TMA, sendo:

- TIR > TMA ; o investimento é atrativo do ponto de vista financeiro;
- TIR = TMA ; o investimento é indiferente;
- TIR < TMA; o investimento não é atrativo do ponto de vista financeiro.

- *Investimento específico (IES)*: Representa o custo de compra e instalação dos equipamentos de cada uma das propostas em US\$ dividida entre o volume total de lixiviado tratado em m³. É determinado pela equação (5.6)

$$IES = \frac{\text{Investimento}_{\text{inicial}}}{V_{LFL,TR}} \quad (5.6)$$

Para a modelagem de fluxo de caixa as receitas e as despesas foram estimadas. Os custos de instalação, contingências, operação e manutenção foram parametrizados em função dos custos totais de equipamentos de cada sistema apresentados no Capítulo 4 e foram atendidos como despesas. Estes parâmetros podem ser conferidos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Parâmetros e valores da análise financeira associada às despesas das propostas de integração energética. [ERSE, 2016; Soares, 2014]

Despesas			
Parâmetro	Valor	Unidade	Referencia
Custo total dos Equipamentos (CTE)	100%	US\$	Tabela 4.2
Custos de instalação	50%	US\$	CTE
Custos de contingencias	20%	US\$	CTE
Operação e manutenção	5%	US\$	CTE primeiros 5 anos
	15%	US\$	CTE anos posteriores
Depreciação de equipamentos	10%	US\$	CTE 20 anos
Depreciação de outros	5%	US\$	CTE 20 anos
Seguros	1%	US\$	CTE
Juros sobre financiamento	7,5%	US\$	Financiamento
Imposto de renda	25%	US\$	Lucro antes de IR
Contribuição social sobre o lucro líquido CSLL	9%	US\$	Lucro antes de IR
Compra de gás natural	0,4762	US\$/Nm ³	Empresa fornecedora de combustível

Da mesma forma a Tabela 5.3 apresenta os valores considerados nesta simulação para determinar as receitas obtidas pelas propostas de integração energética. Os sistemas propostos foram comparados com uma situação padrão, em que todo o efluente líquido seria destinado ao tratamento em uma planta exterior.

Tabela 5.3 Parâmetros e valores da análise financeira associada às receitas das propostas de integração energética. [ANNEL, 2016; CRVR, 2016]

Receitas			
Parâmetro	Valor	Unidade	Referencia
Energia efetivamente vendida	80%	-	Tabela 4.1
Venda de Energia Elétrica	74,6	US\$/MWh	Distribuidora
Custo evitado pelo Tratamento Efluente Líquido	15,87	US\$/m ³	Empresa tratamento de efluente

A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros usados para a elaboração dos fluxos de caixa das cinco propostas de integração energética.

Tabela 5.4 Parâmetros usados para modelar os fluxos de caixa

Parâmetro	Valor
Período do projeto	20 anos
Carência do projeto	2 anos
Período do financiamento	14 anos
Juros do financiamento	7,5% a.a
Correção O&M	5% a.a
Correção tratamento de efluentes	5% a.a
TMA	13% (selic)* + 3% (risco)
Correção venda de energia	9,81% a.a *
Correção compra de Gás natural	9,81% a.a *

* Referente a dezembro 2016

A Figura 5.1 apresenta os resultados financeiros dos indicadores apresentados na Seção 5.1 para os cinco sistemas propostos no Capítulo 4, para o período de 20 anos de operação.

A Figura 5.1(a) mostra que os melhores resultados para o indicador PB foram atingidos pelas propostas CME e IME com um tempo de 7 e 8 anos cada uma, seguida da proposta ME, 10 anos, a proposta CE, 13 anos e finalmente a proposta IE, que superou o limite de tempo do projeto. Do ponto de vista financeiro, a proposta que apresenta um payback menor tem mais possibilidades de ser executada.

A Figura 5.1(b) traz o indicador VPL, que revelou que quatro das cinco propostas possuem retorno financeiro, sendo que a proposta IE teria um retorno negativo de US\$198.903. Isso deve-se possivelmente ao fato de possuir um investimento inicial e custos de O&M maiores que a proposta CE.

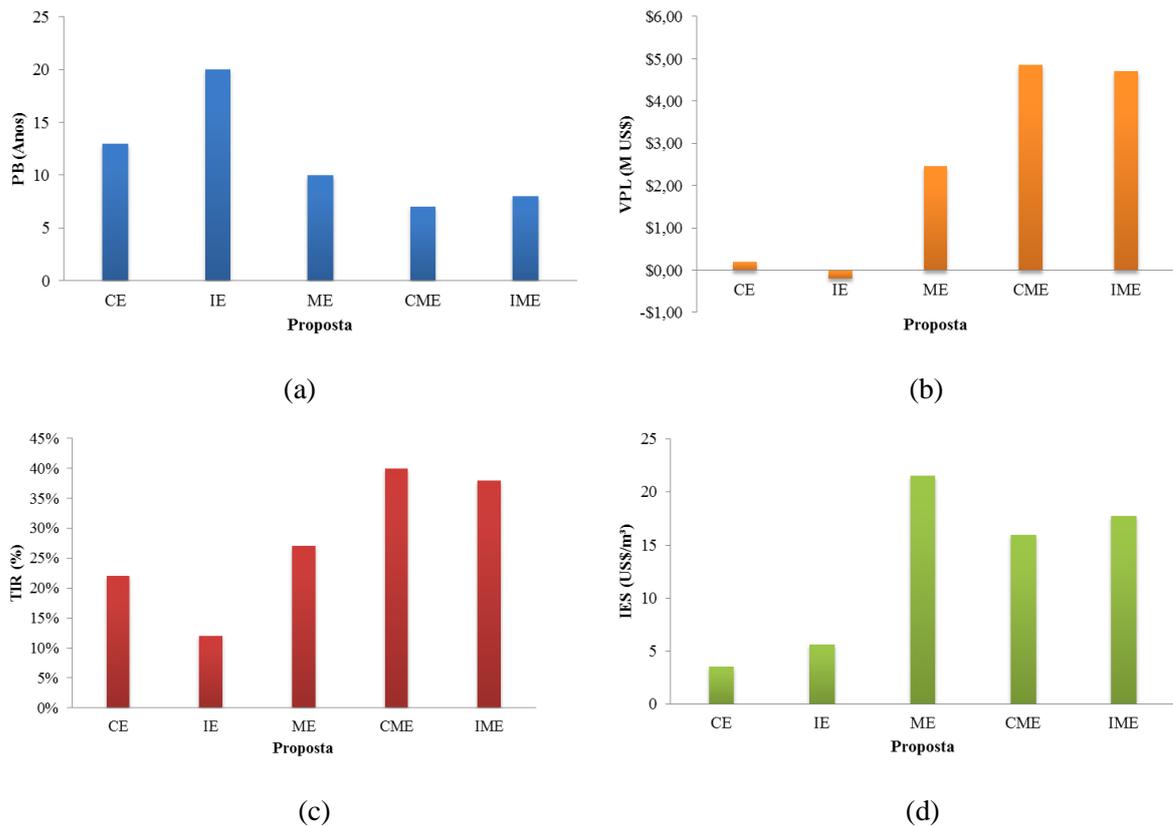


Figura 5.1 Indicadores financeiros (a) PB, (b) VPL, (c) TIR e (d) IE das propostas de integração energética.

Os maiores valores de VPL foram alcançados pelos sistemas que possuem geração de energia elétrica para comercialização, sendo esses valores de $VPL=US\ \$4.870.006$ para a proposta CME e $VPL=US\ \$4.716.041$ para a proposta IME. Embora os sistemas CE ($VPL=US\ \$203.182$) e ME ($VPL=US\ \$2.461.979$) apresentem retornos positivos, ainda continuam sendo valores baixos, já que no primeiro sistema não existe geração de energia elétrica e no segundo sistema há compra de combustível extra como foi dito na Seção 5.1.

Um comportamento similar se percebe na Figura 5.1(c), na qual o indicador de taxa interna de retorno TIR é maior para as propostas que possuem cogeração CME (TIR=40%) e IME (TIR=38%), seguidas de das propostas ME, CE e IE com valores de TIR igual a 27%, 22% e 12% respectivamente.

A Figura 5.1(d) mostra que os sistemas CE e IE apresentaram os menores custos de investimento específico, $IES=3,46\ US\ \$/m^3$ e $IES=5,57\ US\ \$/m^3$ respectivamente, devido ao fato

de serem mais simples e com investimentos iniciais menores em comparação com os outros sistemas (Tabela 4.2).

O maior investimento específico foi atingido pela proposta ME, $IES=21,54 \text{ US\$/m}^3$ valor que se justifica pelo uso de três motores de cogeração, incrementando assim seu investimento inicial.

Os valores de investimento específico foram calculados para a proposta CME, $IES=15,95 \text{ US\$/m}^3$, e a proposta e IME, $IES=17,74 \text{ US\$/m}^3$. De forma geral, os sistemas de integração energética de efluentes com melhores resultados financeiros (VPL, TIR e Payback) foram aqueles que baseados em cogeração.

5.3 Estudo de análise hierárquica das propostas de integração energética

Após identificar e calcular valores para os indicadores técnico-ambientais e financeiros foi feito um estudo usando elementos de análise multicritério. A Figura 5.2 apresenta a estruturação hierárquica adotada para avaliar as propostas de integração energética, nela os sistemas ou alternativas estão ligadas a cada um dos indicadores pelo seu grau de cumprimento e ao mesmo tempo cada indicador está conectado ao objetivo pelo seu nível de importância.

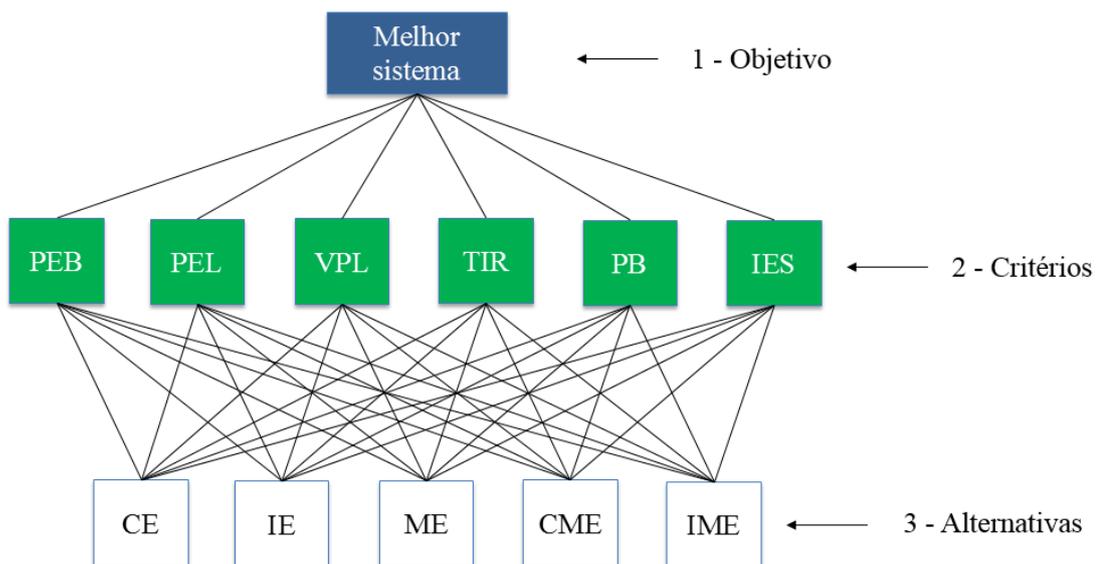


Figura 5.2 Estrutura hierárquica para avaliação dos sistemas de integração energética.

Posteriormente foi feita uma análise da contribuição (peso) de aqueles indicadores que fossem mais representativos numa toma de decisão e comparação entre as diferentes propostas. Nesta etapa foram utilizados os conceitos, o roteiro de cálculo do julgamento de prioridades da AHP, apresentados no subcapítulo 2.8.

Foram criados dois cenários de análise hierárquica de processos. O primeiro seguindo uma abordagem ambiental, para o qual foram atribuídos valores de peso maior na matriz de julgamento para indicadores de PEB e PEL, seguido dos indicadores financeiros IES, VPL, TIR e PB respectivamente.

O segundo cenário tem mais peso no aspecto financeiro, e foi desenvolvido dando neste caso peso maior na matriz de julgamento para os indicadores IES, TIR, VPL e PB, seguido de PEB e PEL.

Estabeleceu-se a intensidade de importância de cada indicador em relação aos outros, tendo como base a Tabela 2.7, apresentada no subcapítulo 2.7. A intensidade de importância para a comparação para à par entre os indicadores técnico ambientais e financeiros são apresentados na Tabela 5.5

Tabela 5.5 Escala de valoração dos indicadores técnico-ambientais para os viés ambiental e financeiro

Viés Ambiental					Viés Financeiro				
PEB	2	→	0,50	PEL	PEB	2	→	0,50	PEL
PEB	5	→	0,33	IES	PEB	0,20	←	5	IES
PEB	4	→	0,25	PB	PEB	0,25	←	4	PB
PEB	4	→	0,25	TIR	PEB	0,20	←	5	TIR
PEB	4	→	0,25	VPL	PEB	0,20	←	5	VPL
PEL	4	→	0,25	IES	PEL	0,20	←	5	IES
PEL	4	→	0,25	PB	PEL	0,25	←	4	PB
PEL	5	→	0,20	TIR	PEL	0,20	←	5	TIR
PEL	5	→	0,20	VPL	PEL	0,20	←	5	VPL
IES	2	→	0,50	PB	IES	3	→	0,33	PB
IES	2	→	0,50	TIR	IES	2	→	0,50	TIR
IES	2	→	0,50	VPL	IES	2	→	0,50	VPL
PB	0,5	←	2	TIR	PB	0,5	←	2	TIR
PB	0,5	←	2	VPL	PB	0,5	←	2	VPL
TIR	1	=	1	VPL	TIR	1	=	1	VPL

A matriz de julgamento que foi construída com base na Equação 2.41 é apresentada a seguir na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Matriz de julgamento baseada na comparação par a par dos indicadores técnicos ambientais e financeiros

Viés Ambiental							Viés Financeiro						
	PEB	PEL	IES	PB	TIR	VPL		PEB	PEL	IES	PB	TIR	VPL
PEB	1	2	5	4	4	4	PEB	1	2	0,20	0,25	0,20	0,20
PEL	0,50	1	4	4	5	5	PEL	0,50	1	0,20	0,25	0,20	0,20
IES	0,20	0,25	1	2	2	2	IES	5	5	1	3	2	2
PB	0,25	0,25	0,50	1	0,50	0,50	PB	4	4	0,33	1	0,50	0,50
TIR	0,25	0,20	0,50	2	1	1	TIR	5	5	0,50	2	1	1
VPL	0,25	0,20	0,50	2	1	1	VPL	5	5	0,50	2	1	1

Utilizaram-se as equações 2.42 e 2.43 para normalizar a matriz de julgamento, cujos resultados são apresentados na próxima tabela.

Tabela 5.7 Matriz de julgamento normalizada

Viés Ambiental							Viés Financeiro						
	PEB	PEL	IES	PB	TIR	VPL		PEB	PEL	IES	PB	TIR	VPL
PEB	0,408	0,513	0,435	0,267	0,296	0,296	PEB	0,049	0,091	0,073	0,029	0,041	0,041
PEL	0,204	0,256	0,348	0,267	0,370	0,370	PEL	0,024	0,045	0,073	0,029	0,041	0,041
IES	0,082	0,064	0,087	0,133	0,148	0,148	IES	0,244	0,227	0,366	0,353	0,408	0,408
PB	0,102	0,064	0,043	0,067	0,037	0,037	PB	0,195	0,182	0,122	0,118	0,102	0,102
TIR	0,102	0,051	0,043	0,133	0,074	0,074	TIR	0,244	0,227	0,183	0,235	0,204	0,204
VPL	0,102	0,051	0,043	0,133	0,074	0,074	VPL	0,244	0,227	0,183	0,235	0,204	0,204

Por meio da Equação 2.44 obtiveram-se os pesos que cada indicador na comparação e avaliação dos cenários ambiental e financeiro. Os resultados são apresentados na Figura 5.2.

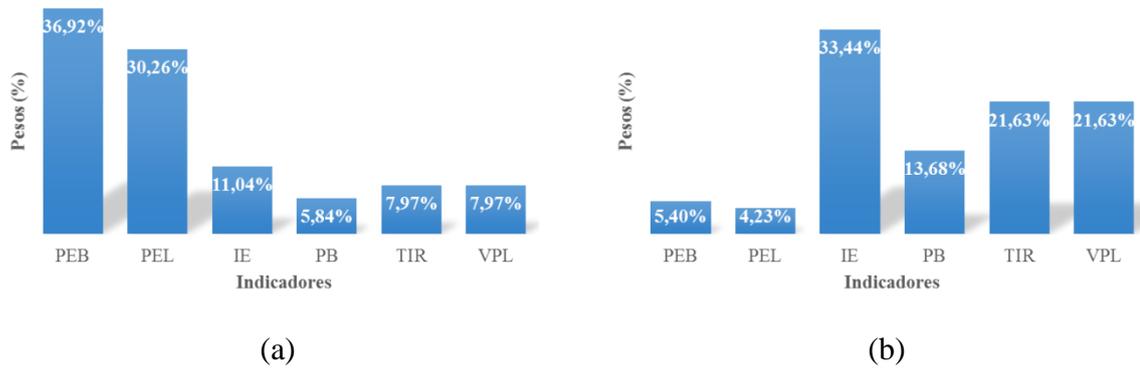


Figura 5.3 Pesos dos indicadores técnico ambiental e financeiro avaliados nos cenários ambiental (a) e financeiro (b)

O cenário com viés ambiental foi proposto em base ao uso de biogás de aterro como uma fonte de energia alternativa para geração de energia elétrica, além de mitigar impactos ambientais, sendo usado como fonte térmica para a evaporação do efluente líquido. Segundo essas considerações, os indicadores *PEB* e *PEL* revelaram melhores resultados tendo ordens de grandeza em torno de 3 vezes superiores se comparados com os indicadores financeiros. Por outro lado, o cenário com viés financeiro revelou que o indicador *IES* teve uma importância relevante sobre os demais indicadores, tanto financeiros como ambientais.

Para cálculo do máximo autovalor λ_{max} , foram utilizadas as equações 2.46 e 2.47, sendo que os valores de *b* e *c* são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Valores encontrados para os vetores B e C

Viés Ambiental			Viés Financeiro		
	b	c		b	c
PEB	2,398	6,495	PEB	0,326	6,043
PEL	1,959	6,475	PEL	0,257	6,067
IES	0,696	6,301	IES	2,091	6,254
PB	0,361	6,186	PB	0,850	6,213
TIR	0,484	6,075	TIR	1,355	6,265
VPL	0,484	6,075	VPL	1,355	6,265

O valor de λ_{max} encontrado através da Equação 2.48 foi de 6.268 e 6.185 para os cenários sugeridos. A qualidade do processo foi verificada pelas razões de consistência através da Equação 2.39, iguais a 0,088 e 0,033 para o viés ambiental e financeiro, respectivamente.

Posteriormente, foi criada uma matriz de decisão com base nos resultados da Figura 5.2, estabelecendo uma comparação par a par com as propostas de integração energética propostas no Capítulo 4. Os resultados são apresentados na Figura 5.3.



Figura 5.4 Pesos das propostas de integração energética avaliadas nos cenários ambiental (a) e financeiro (b)

Os resultados indicam que todas as propostas que tem o uso do efluente gasoso de aterro como fonte para evaporação do efluente líquido e produção de energia elétrica por meio de cogeração tem pesos similares, com uma diferença máxima em torno de 3 pontos percentuais ao serem avaliados no cenário de viés ambiental. Por outro lado, o cenário de viés financeiro apresentou uma pequena diferença entre as propostas CME, IME e CE. De forma geral os resultados apresentados ao se implementar o metodologia AHP são similares aos resultados alcançados nas seções 5.2 e 5.3.

5.4 Conclusões Parciais

- Foram calculados indicadores técnico-ambientais e financeiros para as propostas de integração energética de aterros sanitários. Os indicadores técnicos mostraram que a eficiência dos sistemas que incluem motor de cogeração está na faixa de 57% por outra

parte os sistemas puramente térmicos (CE e IE) obtiveram eficiências de 63,46% e 64,81% respectivamente, esses sistemas também precisam só de um terço do efluente gasoso recuperado para abater o efluente líquido. As demais propostas conseguiram abater 100% do efluente líquido com a queima do efluente gasoso e ainda produzir energia elétrica evidenciado nos indicadores PEL (ME= 6 005 MJ/m³, MCE=4 218 MJ/m³ e IME=4 521 MJ/m³) e PEB (ME= 5,345 MJ/kg, MCE=4,701 MJ/kg e IME=4,739 MJ/kg)

- Os fluxos de caixa para cada uma das propostas de integração energética foram elaborados para um projeto financeiro hipotético. As propostas SME e IME obtiveram os melhores resultados atingindo valores de payback entre 7 e 8 anos, VPL na média de US \$4.790.00 e TIR de 38% a 40%, porém com os maiores investimentos específicos (IES) entre os cinco sistemas, aproximando-se de 15,85 US\$/m³. As propostas CE e IE obtiveram os resultados menos favoráveis devido aos baixos valores de VPL, sendo negativo para a proposta IE (VPL = US\$198.903). Os tempos de retorno do investimento foram de, 13 e mais de 20 anos respectivamente.
- Foi aplicada a metodologia de análise hierárquica usando os seis indicadores calculados: PEB, PEL, IE, PB, TIR e VPL; e as cinco propostas de integração energética: CE, IE, ME, CME e IME, para dois pontos de vista, ambiental e financeiro. Os resultados revelaram que os indicadores PEB e PEL para o viés ambiental tem uma relevância percentual de aproximadamente 67% contra 33% dos indicadores financeiros. Por outro lado, o viés financeiro manifestou que os indicadores IES, TIR, VPL e PB possuem uma importância aproximada de 94%, destacando-se o IE (33,44%) contra 6% dos indicadores ambientais PEB e PEL. As propostas de integração energética baseadas em cogeração tiveram 3 pontos percentuais de diferença entre elas e uma importância relativa de 88,36% contra 11,64% ao serem comparadas com as propostas CE e IE num cenário com viés ambiental. Para o cenário com viés financeiro os sistemas CE, CME e IME apresentaram pouca diferença entre si, estando todos na faixa dos 22%.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo indicou que é possível técnica e financeiramente eliminar o efluente líquido com base na integração energética com o efluente gasoso de aterros sanitários, a partir de um estudo particularizado no aterro de Guajuviras, RS.

As gerações de biogás (LFG) e efluente líquido (LFL) para o aterro de Guajuviras foram estimadas utilizando os modelos do IPCC e balanço hídrico modificado respectivamente. Foram calculadas as sensibilidades dos parâmetros de entrada de cada modelo e as incertezas combinadas na geração foram de aproximadamente 50% do valor calculado, considerando-se uma confiabilidade de 68%. Com base nas estimativas de geração de efluentes e suas incertezas combinadas, foi proposto um balanço de energia entre os efluentes, os resultados encontrados mostraram que há energia suficiente na queima do biogás para a evaporação completa do efluente líquido gerado durante o período de análise.

Foram apresentadas cinco propostas conceituais para mitigação de efluentes de aterro por meio de arranjo técnico de equipamentos de queima de biogás e evaporação de lixiviado. As propostas com objetivo exclusivo de eliminar o efluente líquido resultaram no consumo de cerca de um terço do efluente gasoso. As outras propostas usaram o excedente desse efluente gasoso para a geração de energia elétrica, destacando-se a opção ME.

A proposta de integração energética de efluentes do aterro só com motor de cogeração teve que consumir combustível extra (gás natural) para atingir a potência nominal do motor e conseguir alcançar a premissa inicial de evaporar todo o efluente líquido no período de estudo. Este mesmo sistema demonstrou precisar de equipamentos como motor, trocador de calor e evaporador com maiores dimensões e maiores custos em comparação com os mesmos equipamentos nas outras propostas. A diferença entre os custos finais das propostas se deve principalmente ao tipo, dimensões e quantidade de máquinas necessárias para realizar o processo de queima do efluente gasoso, incineração e evaporação do efluente líquido.

Foram calculados indicadores técnico-ambientais e financeiros para as propostas de integração energética de aterros sanitários. Os indicadores técnicos mostraram que os sistemas em que há apenas a utilização da energia térmica (CE e IE) tiveram maiores eficiências energéticas precisando só de um terço do efluente gasoso recuperado para abater o efluente líquido. As demais propostas (ME, CME e IME) conseguiram abater todo o efluente líquido

com a queima do efluente gasoso e ainda produzir energia elétrica, evidenciado nos indicadores *PEB* e *PE*.

Foram realizados fluxos de caixa para cada uma das propostas de integração energética. Os indicadores financeiros revelaram que as propostas CE, ME, CME e IME possuem retorno financeiro. A proposta baseada em incineração (IE) não apresentou viabilidade financeira.

Foram usados elementos da Análise de Hierarquia de Processos - AHP com o intuito identificar o melhor sistema de integração energética, com base nos pontos de vista ambiental e financeiro, destacando-se os sistemas SME, SCME e SIME. A técnica apresenta-se como uma metodologia de apoio no momento de comparar e determinar a melhor escolha de acordo a um determinado viés.

6.1 Trabalhos futuros

Sugere-se para estudos futuros:

- Aumentar o número de indicadores na análise hierárquica de processos, incluído indicadores ambientais, técnicos, financeiros.
- Refinar a modelagem dos equipamentos usados em cada sistema para obter estimativas de custos diretos e indiretos mais realistas.
- Realizar os cálculos para as propostas de integração energética levando em conta a propagação das incertezas procedentes das estimativas de geração dos efluentes líquido e gasoso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil”. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**, http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm, 2015. Acessado em outubro de 2016

Ahmad, S; Tahar, R.M. “Selection of renewable energy sources for sustainable development”. **Renewable Energy**. Vol. 63, p 458 – 466, 2013 of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia

Amado, E. Patino, A.; Schneider, P.; Indrusiak, M.; Saffer, M.; “**Potential energetic integration of municipal landfill effluents.**”; 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), 2016

Amado, E.; Patino, A ;Schneider, P.; Saffer, M.; Zanardo, R. “**Conceptual alternatives for energetic integration of landfill effluents.**” proceedings of ecos 2017 - the 30th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems July 2-July 6, 2017, San Diego, California, USA

Amini, H.R., Reinhart, D.R. “Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential”. **Waste Management**, Vol. 31, p. 2020 – 2026, 2011.

Amini, H.R., Reinhart, D.R., Mackie, K.R. “Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties”. **Waste Management**, Vol. 32, p. 305 – 316, 2012.

ANNEEL. Agência nacional de energia elétrica. **Primeiro leilão de geração de 2016 comercializa energia de 29 empreendimentos.** http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/primeiro-leilao-de-geracao-de-2016-comercializa-energia-de-29-empreendimentos/656877?inheritRedirect=false. Acessado outubro 2016

Barlaz, M.A., Milke, M.W., Ham, R.K. “Gas Production Parameters in Sanitary Landfill Simulators”. **Waste Management and Research**, Vol. 5, p. 27 – 39, 1987.

Barros, R. M.; Filho, G. L. T.; da Silva, T. R.; “**The electric energy potential of landfill biogas in Brazil**”; Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, National Reference Center for Small Hydro Power, 2013

Birchler, D.R., Milke, M.W., Marks, A.L., Luthy, R.G. “Landfill Leachate Treatment by Evaporation”. **Journal of Environment Engineering**, Vol. 120, p. 1109 – 1131, 1994.

Berger, K. “Potential and Limitations of Applying HELP Model for Surface Covers”. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, Vol. 6, pp. 192-203, 2002.

Bejan, A; Tsatsaronis, G; Moran, M. **Thermal design and optimization**. John Wiley and sons INC. 3rd edition 1996

Borba, S.M.P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado**, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

Bornia, A. C.; Wernke, R. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças**. FIPECAPI – FEA – USP. v.14, n. 25, p. 6071, jan. /abr. 2001.

Bove, R., Lunghi, P. “Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies”. **Energy Conversion & Management**, Vol. 47, p. 1391-1401, 2006.

Cabral, P., 2004. **Error and uncertainty in measurements**. Physics Department. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Available at <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>> acessado outubro de 2015

Campani, D.B., Schneider, P.S., Xavier, F.M. **Determinação do Poder Calorífico do Biogás Gerado em Aterros Sanitários**”. 3º Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos de AIDIS, Buenos Aires, Argentina, 2009.

Carolino, C.G., Ferreira, J.P.M. “First and second law analyses to an energetic valorization process of biogas”. **Renewable Energy**, Vol. 59, p. 58-64, 2013.

Castilhos, A.B.J. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para município de pequeno porte**. PROSAB. Programa Nacional de Pesquisa em Saneamento Básico, Florianópolis, SC, 2003.

Chabuk, A; Ansari, N; Husain. H; Knutsson, S; Pusch, R. “Landfill site selection using geographic information system and analytical hierarchy process: A case study Al-Hillah Qadhaa, Babylon, Iraq. **Waste Management & Research**. Vol 34 p 427 – 437. 2016

Cho, H.S., Moon, H.S, Kim, J.Y. “Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills”. **Bioresource Technology**, Vol. 109, p. 86-92, 2006.

El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O. “A Numerical Model for Methane Production in Sanitary Landfills”. **Waste Management and Research**, Vol. 7, p. 31 – 42, 1989.

El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O. “Numerical Modeling of Generation and Transport of Gas and Heat in Landfills I. Model Formulation”. **Waste Management and Research**, Vol. 14, p. 483 – 504, 1996a.

El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O. “Numerical Modeling of Generation and Transport of Gas and Heat in Landfills II. Model Application”. **Waste Management and Research**, Vol. 14, p. 537 – 551, 1996b.

El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O. “Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling”. **Journal of Environmental Management**. Vol. 50, p. 1-25, 1997.

El-Fadel, M., Bou-Zeid, E., Chahine, W., Alayli, B. “Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content”. **Waste Management**, Vol. 22, p. 269-282, 2002.

Ensinas, A. V. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas/SP, 2003.

ERSE, Entidade reguladora dos serviços energéticos. “**Tarifas e preços do gás natural para 2016-2017.**”

<http://www.erse.pt/pt/gasnatural/tarifaspreços/2016a2017/Documents/tarifas%202016-2017.pdf> . Acessado outubro 2016.

Farquhar, G.J., Rovers, F.A. “Gas Production During Refuse Decomposition”. **Water, Air and Soil Pollution**, p. 483-495, 1973.

Fenn, D. G., Hanley, K.I., Degeare, T. V. **Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites**. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 530/SW-168, p. 1–10, 1975.

Findikakis, A.N., Papeis, C., Halvadakis, C.P., Leckie, J.O. “Modelling Gas Production in Sanitary Landfills”. **Waste Management and Research**, Vol. 6, p. 115 – 123, 1988.

SOARES, Flavio R. Soares **Curso de especialização em utilizaçõess do gas natural**. 20 jun. 2014, 13 dec. 2014. 77 p. Notas de Aula

GE; “**Jenbacher Type-a Fact Sheet**”; powergen.gepower.com/products/reciprocating-engines/jenbacher-type-4.html. Acessado em agosto de 2016.

Gewald, D., Konstantinos, S., Karellas, S., Spliethoff, H. “Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 16, p. 1779-1789, 2012.

Gomes, T.L. **Avaliação quali-quantitativa do percolado gerado no aterro controlado de Santa Maria – RS**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

Hao, X., Yang, H., Zhang, G. “Trigeneration: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Honk Kong”. **Energy Policy**, Vol. 36, p. 3662-3673, 2008.

Harries, C.R., Cross, C.J., Smith, R. “Development of a biochemical methane potential (BMP) test and application to testing of municipal solid waste samples”. **In: Proc. Sardinia**

2001. Eight International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, p. 579–588, 2001.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Lavine, A., Bergman, T.L. **Fundamental of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, 7th Edition, 2011.

INiG. **Landfill Gas Energy Technologies**. Instytut Nafty I Gazu – Instituto de óleo e gás, Cracóvia, Polônia, 2010.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados climatológicos do município de Porto Alegre**, setembro, 2015. <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Intergovernmental Panel on Climate Change**. Vol. 5, Waste, IGES, Japan, 2006.

Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H. “Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review”. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Vol. 32, p. 297-336, 2002.

Lobo, A.G.C. **Modulo 2: A tool to be used to evaluate municipal solid waste landfills contamination**. Tese de doutorado, Universidade de Cantabria, Espanha, 2003.

Lobo, A.G.C., Monzón, I.T. “MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills”. **Environemntal Modelling & Software**, Vol. 22, p. 59-72, 2007a.

Lobo, A.G.C., Monzón, I.T. “Application of simulation models to the diagnosis of MSW landfills: An example”. **Waste Management**, Vol. 27, p. 691-703, 2007b.

Machado, S.L., Carvalho, M. F., Gourc, J. P., Vilar, O.M., Nascimento, J. C. F. “Methane generation potential in tropical landfills: simplified methods and field results”. **Waste Management**, Vol. 29, p. 153 – 161, 2009.

Maciel, F.J. **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

Marins, C. S.; Souza, D. O.; Barros, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. **XLI SBPO**, v. 1, 2009.

Messineo, A.; Freni, G.; Volpe, R.; “**Collection of Thermal Energy Available from a Biogas Plant for Leachate Treatment in an Urban Landfill: A Sicilian Case Study**”; Faculty of Engineering and Architecture, University of Enna Kore, 2012

Metcalf, L.; Edy, Harrison P.; “**Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.**”; McGraw-Hill, New York, 5nd edition, 2015

Moran, M. J.; Shapiro, H.N; "**Fundamentals of engineering thermodynamics**"; Wiley, 4th edition, 2000.

MMA. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**” Ministério do Meio Ambiente. Junho, 2013a <www.mma.gov.br/política-de-resíduos-sólidos>.

MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**” Ministério do Meio Ambiente. Junho, 2013b <<http://www.sinir.gov.br/web/guest/plano-nacional-de-residuos-solidos>>.

Oonk, H., Boom, T. “Validation of landfill gas formation models”. **Climate Change Research: Evaluation and Policy Implications**, p; 597 – 602, 1995.

Penteado, R., Cavalli, M., Magnano, E., Chiampo, F. “Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results”. **Energy Policy**, Vol. 42, p. 551-556, 2012.

Peters, M; Timmerhaus, K.D. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill, Inc. New York. 4th Ed. 1994

PMPA. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Porto Alegre**. Prefeitura Municipal de Porto Alegre, Novembro, 2013.

Qasim, S.R., Chiang, W. **Sanitary landfill leachate: Generation, control, and treatment**. Technomic Pub. Co., Lancaster, 1994.

Qian, X., Koerner, R. M., Gray, D. H., “**Geotechnical Aspects of Landfill Desig and Construction**”. 1 ed. United States of America, Prentice Hall, 2002.

Rehman, A. **Landfill Leachate Treatment Using Evaporation Technology**. Tese de doutorado, Carleton University, Civil and Environmental Engineering Department, 2003.

Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. “Landfill leachate treatment: Review and opportunity”. **Journal of Hazardous Materials**, Vol.150, p. 468-493, 2008.

Saaty, R.W. **The analytic hierarchy process—what it is and how it is used**. Mathematical Modelling, Vol 9, Issues 3–5, 1987

Schroeder P.R., Dozier T.S., Zappi P.A., McEnroe B.M., Sjostrom J.W., Peyton R.L. **The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model**. Engineering documentation for version 3. EPA/600/R-94/168b, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1994.

Senior, E. **Microbiology of Landfill Sites**. CRC Press, Boca Raton, 2nd Edition, 1995.

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, 2002

SMMA Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Canoas relatório, **Relatório Técnico e Fotográfico Bimestral de Monitoramento do Aterro de Guajuviras**. Janeiro-Fevereiro, 2013^a.

SMMA. Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Canoas relatório, **Desenhos Técnicos do Aterro de Guajuviras**, 2013b.

Stegmann, R. “New Aspects on Enhancing Biological Processes in Sanitary Landfill”. **Waste Management and Research**, Vol. 1, p. 201 – 211, 1983.

Stoecker, W.F. **Design of Thermal Systems**. McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 1989.

Tarazona C.F.; “ **Estimativa de produção de gás em aterros de resíduos sólidos urbanos**” **Dissertação de mestrado – UFRJ**, 2010

Tavares, B. F.D.; “**Tratamento de Chorume: Análise dos Efluentes da Evaporação Forçada**”; Projeto de graduação – UFRJ, 2011

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. **Integrated Solid Waste Management**. McGraw-Hill, New York, USA, 1993.

Tchobanoglous, G., Kreith, F. **Handbook of Solid Waste Management**. McGraw-Hill, New York, 2nd edition, 2002.

The ETo Calculator. Reference Manual Version 3.2 September, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations Land and Water Division. (accessed in Janeiro, 2016)

Thomazoni L.A.; “**Análise de aproveitamento energético em aterro sanitário baseada em cenários de geração de efluentes**” **Dissertação de mestrado – UFGRS**, 2014

Towler G; Sinnott R.; "**Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**"; 2nd ed. Boston: Elsevier; 2013.

Turns, S. R.; "**An introduction to combustion, concepts and applications**"; McGraw-Hill, New York, 2nd edition, 2000

Turton, R; Bailie, R; Whiting, W. **Analysis, Synthesis, and design of chemical Process**. Pretince Hall, 3rd edition, 2008

United National Environment Programme, UNEP, **Solid Waste Management**. U.S.A, UNEP, 2005.

UNIDO; **Output of a seminar on energy conservation in ceramic industry**"; United Nations Industrial Development Organization and Ministry of International Trade and Industry of Japan, 1994.

USEPA. **Landfill gas emissions model (LandGem) version 3.02 User's Guide**. United States Environmental Protection Agency, EPA-600/R05/047, Maio, 2005.

USEPA. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010**. United States Environmental Protection Agency, EPA-530-F-11-005, Dezembro, 2011.

USEPA. **LFG Energy Project Development Handbook**. United States Environmental Protection Agency, Novembro, 2013. <<http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>>.

Yap, H.Y; Nixon, JD. "A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**. Vol 46 p 265-277. 2015
Lanza, V.C. **Avaliação da ocorrência de contaminação por lixiviados no depósito de resíduos sólidos urbanos do município de bugre, minas gerais**. Dissertação de mestrado. Engenharia civil. Universidade Federal de Visoça, 2012.

Zanardo, R.P. **Modelo de diagnóstico energético com base em um sistema de avaliação de desempenho**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de santa Maria, 2016

Zelenovic', T; Srdjevic'. Z; Bajc'etic'. R; Miloradov. V. "GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia" **Environmental Management**. Vol 49 p 445 - 458. 2011

APÊNDICE A- FLUXOGRAMA PARA ESTIMAR A GERAÇÃO DE BIOGAS (LFG) e LIXIVIADO (LFL) APLICANDO OS MODELO DE DECAIMENTO DE PRIMEIRA ORDEM DO IPCC, 2006 E O MODELO DE BALANÇO HIDRICO MBH.

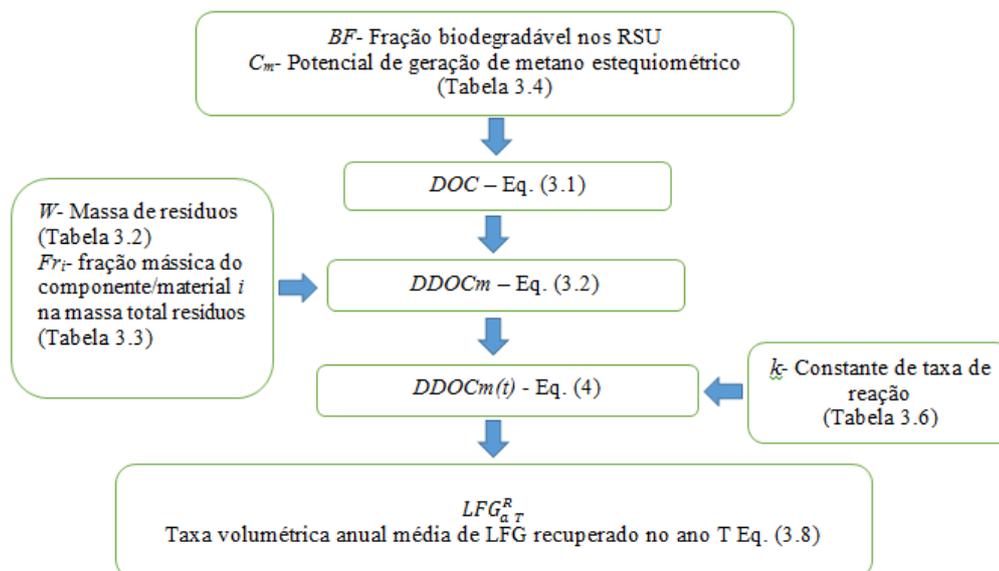


Figura A.1 Fluxograma para estimar a geração de biogas (LFG) e lixiviado (lfl) aplicando o modelo de decaimento de primeira ordem do IPCC, 2006

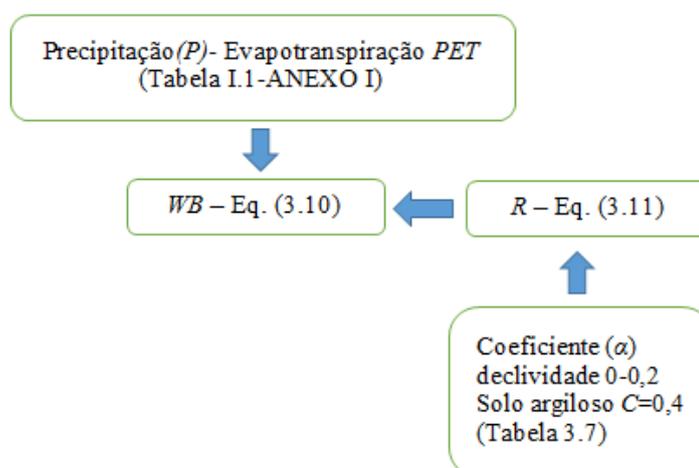
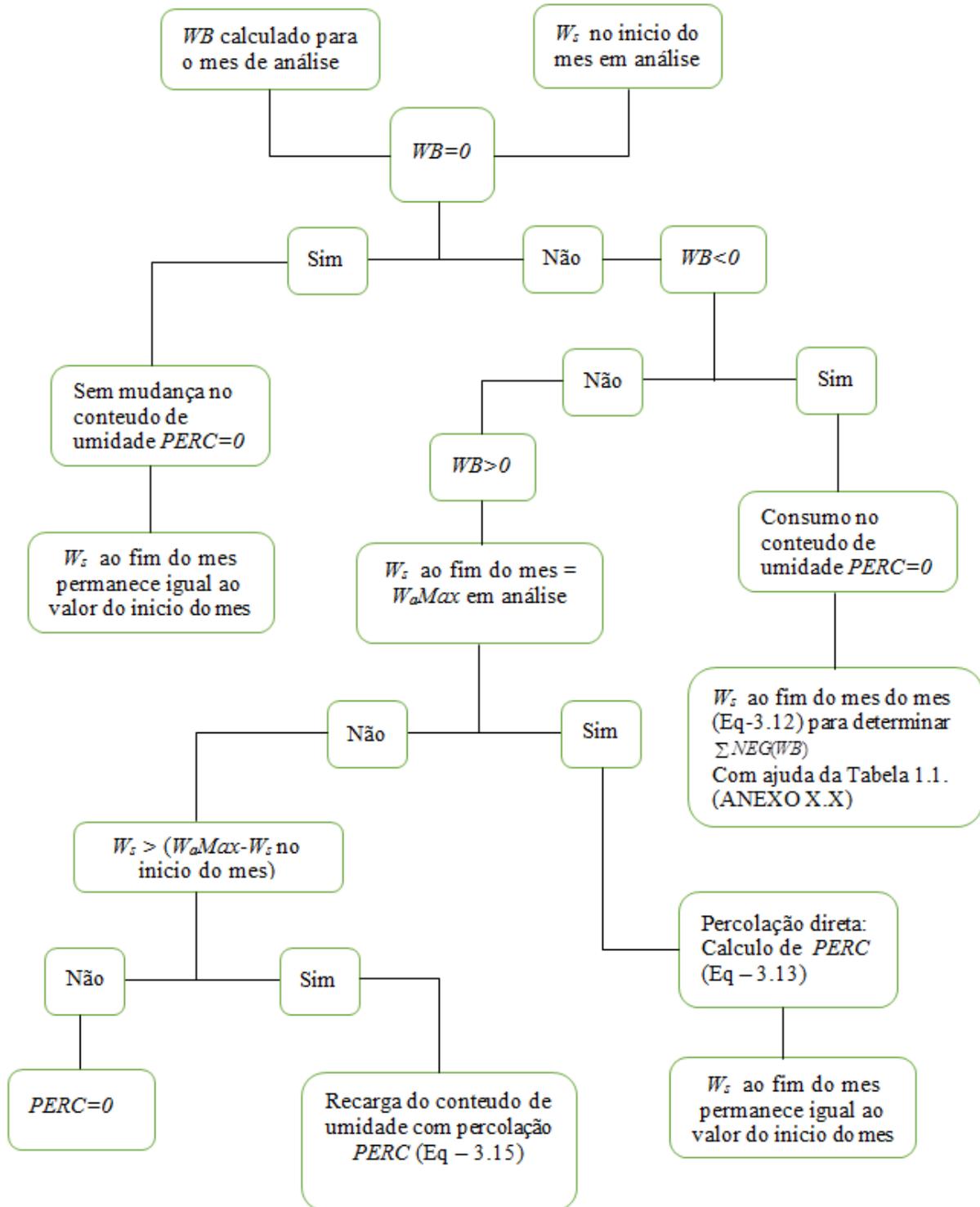


Figura A.2 Fluxograma para estimar a geração de lixiviado (LFL) aplicando o modelo de de balanço hidrico MBH

APÊNDICE B – Fluxograma para obtenção de variação de W_s e PERC



APÊNDICE C – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E LIXIVIADO

Tabela C.1 - Resultados da estimativa do LFG aplicando o modelo de decaimento da primeira ordem do IPCC, 2006 (a), - Resultados da estimativa do LFL (L_{est}) aplicando o modelo do balanço hídrico.

Ano	LFG_{aT}^R (Nm ³ /h)	$uLFG$ (Nm ³ /h)	Ano	LFG_{aT}^R (Nm ³ /h)	$uLFG$ (Nm ³ /h)
1996	0	0	2021	457,31	241,71
1997	153,86	90,72	2022	401,66	231,14
1998	296,17	165,62	2023	353,29	219,8
1999	435,82	232,33	2024	311,22	207,83
2000	567,21	288,89	2025	274,61	195,51
2001	675,22	327,95	2026	242,69	183,05
2002	774,2	360,08	2027	214,83	170,66
2003	854,7	380,52	2028	190,54	158,55
2004	936,6	402,01	2029	169,33	146,79
2005	1015,7	422,52	2030	150,78	135,52
2006	1116,5	455	2031	134,47	124,81
2007	1197,7	476,28	2032	120,19	114,66
2008	1279,6	497,98	2033	107,66	105,07
2009	1363,6	521,08	2034	96,6	96,18
2010	1431,5	535,64	2035	86,87	87,92
2011	1490,3	546,21	2036	78,33	80,22
2012	1551,9	559,93	2037	70,7	73,08
2013	1349,6	445,69	2038	63,987	66,528
2014	1174,6	369,81	2039	58,023	60,508
2015	1023,4	322,91	2040	52,724	54,985
2016	891,8	295,54	2041	47,999	49,931
2017	778,4	279,51	2042	43,785	45,318
2018	680,4	268,87	2043	40,019	41,111
2019	595,21	260,05	2044	36,645	37,275
2020	521,36	251,23	2045	33,614	33,796

(a)

Ano	$PERCa$ (mm/Ano)	L_{est} (M/Ano)	$u_{L_{est}}$ (M/Ano)
1996	222,2	0,82	0,13
1997	213	1,62	0,24
1998	256,1	3,04	0,45
1999	201,8	3,31	0,49
2000	198	4,12	0,64
2001	207,8	5,26	0,76
2002	220	6,53	0,91
2003	203,8	7,00	1,03
2004	242,8	9,52	1,15
2005	229	10,27	1,38
2006	203,8	10,25	1,51
2007	413,7	23,18	2,03
2008	382,4	23,73	2,55
2009	306,5	20,83	4,52
2010	335,3	24,76	2,66
2011	231,9	18,55	2,29
2012	91,93	7,35	6,64
2013	207,8	16,62	2,44
2014	198,8	15,90	2,40
2015	141,1	11,29	7,68

(b)

**APÊNDICE D – DADOS DE PRECIPITAÇÃO (P) E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO (PET)**

1996												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	179	87	88	74	10	158	25	156	155	186	94	111
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	129	129	114	90	54	36	42	60	81	105	141	150

1997												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	102	126	49	63	64	172	103	185	53	266	121	197
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	165	117	123	87	57	42	42	63	81	90	117	150

1998												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	134	128	148	102	154	49	273	146	138	44	47	134
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	126	111	108	72	51	36	42	48	69	111	153	150

1999												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	100	80	53	162	110	152	168	72	108	116	108	65
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	159	129	132	72	54	36	42	66	87	108	144	153

2000												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	41	108	107	141	129	231	123	94	240	141	141	72
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	153	135	108	78	54	45	45	63	84	99	135	150

2001												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	73	83	129	139	122	135	186	131	52	130	135	50
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	150	135	108	75	51	39	45	60	84	108	135	138

2002												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	73	83	152	139	140	181	186	154	167	177	114	137
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	147	138	111	72	48	36	42	60	81	99	135	135

2003												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	130	109	108	89	46	167	159	58	57	190	137	185
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	165	132	114	45	60	36	42	63	81	117	135	141

2004												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	58	87	27	65	186	102	141	75	193	76	115	34
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	153	38	120	87	48	39	42	57	57	123	126	159

2005												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	29	41	141	146	154	35	38	155	164	271	79	56
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	174	138	117	66	48	39	45	60	66	99	144	162

2006												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	174	89	82	17	172	68	67	84	100	39	118	136
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	150	132	120	78	48	39	48	60	87	120	165	165

2007												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	89	168	109	39	135	236	179	149	175	70	132	89
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	159	141	105	81	48	36	39	54	81	102	138	162

2008												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H2O)	105	72	75	125	221	125	138	122	157	220	22	121
Evapotranspiração PET (mm/H2O)	165	138	120	75	51	33	42	60	84	102	144	162

2009												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	170	111	73	31	106	57	57	265	294	125	288	144
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	147	138	114	93	57	42	45	69	72	114	111	147

2010												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	174	111	103	72	120	205	170	96	181	58	79	93
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	144	150	108	78	48	45	48	54	78	114	147	165

2011												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	136	120	83	173	50	110	226	182	53	124	14	52
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	156	132	123	81	54	45	42	66	96	126	168	165

2012												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	166	140	123	77	36	32	145	94	274	121	26	196
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	186	171	144	87	69	51	54	78	96	117	174	174

2013												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	106	113	78	109	65	101	116	247	135	132	185	172
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	186	147	108	93	54	39	48	54	84	120	159	177

2014												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	78	148	126	84	71	229	253	129	154	185	102	172
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	174	156	114	93	51	39	48	69	81	117	147	150

2015												
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitação P (mm/H ₂ O)	160	95	53	73	136	170	309	109	184	307	124	100
Evapotranspiração PET (mm/H ₂ O)	150	138	123	87	54	42	39	78	78	90	117	132

APÊNDICE E -FLUXO DE CAIXA PARA PPROPOSTA DE INTEGRAÇÃO ENERGETICA COMBUSTOR EVAPORADOR CE

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$0,00	\$48.322,58	\$63.386,91	\$72.463,62	\$94.626,07	\$126.928,50	\$165.491,89	\$186.239,17	\$265.919,37	\$301.000,18
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
O&M	\$11.973,07	\$12.571,72	\$13.200,31	\$13.860,32	\$14.553,34	\$45.843,02	\$48.135,17	\$50.541,93	\$53.069,03	\$55.722,48
Depreciação Maquina e outros	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86	\$50.172,86
Seguros	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17
Lucro Operacional	-\$66.707,10	-\$18.983,17	-\$4.547,42	\$3.869,27	\$25.338,70	\$26.351,45	\$62.622,70	\$80.963,21	\$158.116,32	\$190.543,68
Juros	\$46.523,92	\$46.523,92	\$43.200,79	\$39.877,65	\$36.554,51	\$33.231,37	\$29.908,24	\$26.585,10	\$23.261,96	\$19.938,82
Lucro antes do IR	-\$113.231,02	-\$65.507,10	-\$47.748,21	-\$36.008,38	-\$11.215,81	-\$6.879,92	\$32.714,46	\$54.378,11	\$134.854,36	\$170.604,85
Imposto de renda	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$8.178,62	\$13.594,53	\$33.713,59	\$42.651,21
CSLL	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$2.944,30	\$4.894,03	\$12.136,89	\$15.354,44
Lucro Líquido	-\$113.231,02	-\$65.507,10	-\$47.748,21	-\$36.008,38	-\$11.215,81	-\$6.879,92	\$21.591,54	\$35.889,55	\$89.003,88	\$112.599,20
Amortização	\$0,00	\$0,00	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50
FC Incremental	-\$218.137,90	-\$233.472,14	-\$275.355,99	-\$305.500,01	-\$310.851,46	-\$311.867,02	-\$284.411,12	-\$242.657,20	-\$147.788,96	-\$29.325,40
FC Incremental desconta do	-\$188.049,92	-\$199.445,76	-\$226.278,96	-\$242.927,24	-\$245.475,13	-\$245.891,96	-\$236.177,25	-\$223.441,24	-\$198.495,36	-\$171.641,61

Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$315.588,40	\$749.270,77	\$805.504,06	\$742.355,55	\$926.574,13	\$728.940,41	\$303.399,05	\$720.137,49	\$723.395,09	\$539.107,64
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
O&M	\$58.508,60	\$61.434,03	\$64.505,73	\$67.731,02	\$71.117,57	\$74.673,45	\$78.407,12	\$82.327,48	\$86.443,85	\$90.766,04
Depreciação Máquina e outros	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17
Seguros	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17
Lucro Operacional	\$247.957,46	\$678.714,40	\$731.875,99	\$665.502,20	\$846.334,22	\$645.144,62	\$215.869,59	\$628.687,67	\$627.828,90	\$439.219,26
Juros	\$16.615,69	\$13.292,55	\$9.969,41	\$6.646,27	\$3.323,14	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Lucro antes do IR	\$231.341,77	\$665.421,85	\$721.906,58	\$658.855,92	\$843.011,09	\$645.144,62	\$215.869,59	\$628.687,67	\$627.828,90	\$439.219,26
Imposto de renda	\$57.835,44	\$166.355,46	\$180.476,64	\$164.713,98	\$210.752,77	\$161.286,16	\$53.967,40	\$157.171,92	\$156.957,22	\$109.804,81
CSLL	\$20.820,76	\$59.887,97	\$64.971,59	\$59.297,03	\$75.871,00	\$58.063,02	\$19.428,26	\$56.581,89	\$56.504,60	\$39.529,73
Lucro Líquido	\$152.685,57	\$439.178,42	\$476.458,34	\$434.844,91	\$556.387,32	\$425.795,45	\$142.473,93	\$414.933,86	\$414.367,07	\$289.884,71
Amortização	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
FC Incremental	\$83.612,84	\$483.043,93	\$919.754,94	\$1.314.852,52	\$1.831.492,51	\$2.217.540,63	\$2.364.575,73	\$2.784.070,76	\$3.202.999,00	\$3.497.444,88
FC Incremental descontado	-\$149.571,57	-\$82.282,27	-\$18.860,22	\$30.604,15	\$86.363,56	\$122.281,69	\$134.074,98	\$163.080,66	\$188.051,77	\$203.182,00

VLP	\$203.182,00
TIR	22%
PAYBACK	13 ANOS

APÊNDICE F -FLUXO DE CAIXA PARA PPROPOSTA DE INTEGRAÇÃO ENERGETICA INCINERADOR EVAPORADOR IE

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$0,00	\$48.322,58	\$63.386,91	\$72.463,62	\$94.626,07	\$126.928,50	\$165.491,89	\$186.239,17	\$265.919,37	\$301.000,18
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
O&M	\$11.973,07	\$12.571,72	\$13.200,31	\$13.860,32	\$14.553,34	\$45.843,02	\$48.135,17	\$50.541,93	\$53.069,03	\$55.722,48
Depreciação Maquina e outros	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17	\$80.705,17
Seguros	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17	\$4.561,17
Lucro Operacional	-\$66.707,10	-\$18.983,17	-\$4.547,42	\$3.869,27	\$25.338,70	\$26.351,45	\$62.622,70	\$80.963,21	\$158.116,32	\$190.543,68
Juros	\$46.523,92	\$46.523,92	\$43.200,79	\$39.877,65	\$36.554,51	\$33.231,37	\$29.908,24	\$26.585,10	\$23.261,96	\$19.938,82
Lucro antes do IR	-\$113.231,02	-\$65.507,10	-\$47.748,21	-\$36.008,38	-\$11.215,81	-\$6.879,92	\$32.714,46	\$54.378,11	\$134.854,36	\$170.604,85
Imposto de renda	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$8.178,62	\$13.594,53	\$33.713,59	\$42.651,21
CSLL	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$2.944,30	\$4.894,03	\$12.136,89	\$15.354,44
Lucro Líquido	-\$113.231,02	-\$65.507,10	-\$47.748,21	-\$36.008,38	-\$11.215,81	-\$6.879,92	\$21.591,54	\$35.889,55	\$89.003,88	\$112.599,20
Amortização	\$0,00	\$0,00	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50	\$44.308,50
FC Incremental	-\$218.137,90	-\$233.472,14	-\$275.355,99	-\$305.500,01	-\$310.851,46	-\$311.867,02	-\$284.411,12	-\$242.657,20	-\$147.788,96	-\$29.325,40
FC Incremental descontado	-\$188.049,92	-\$199.445,76	-\$226.278,96	-\$242.927,24	-\$245.475,13	-\$245.891,96	-\$236.177,25	-\$223.441,24	-\$198.495,36	-\$171.641,61

Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$315.588,40	\$749.270,77	\$805.504,06	\$742.355,55	\$926.574,13	\$728.940,41	\$303.399,05	\$720.137,49	\$723.395,09	\$539.107,64
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
O&M	\$94.113,56	\$98.819,24	\$103.760,20	\$108.948,21	\$114.395,62	\$120.115,40	\$126.121,17	\$132.427,23	\$139.048,60	\$146.001,03
Depreciação Máquina e outros	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83
Seguros	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83	\$7.336,83
Lucro Operacional	\$206.801,17	\$635.777,86	\$687.070,19	\$618.733,67	\$797.504,84	\$594.151,34	\$162.604,21	\$573.036,59	\$569.672,82	\$378.432,95
Juros	\$26.727,04	\$21.381,63	\$16.036,22	\$10.690,81	\$5.345,41	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Lucro antes do IR	\$180.074,13	\$614.396,23	\$671.033,97	\$608.042,86	\$792.159,43	\$594.151,34	\$162.604,21	\$573.036,59	\$569.672,82	\$378.432,95
Imposto de renda	\$45.018,53	\$153.599,06	\$167.758,49	\$152.010,71	\$198.039,86	\$148.537,83	\$40.651,05	\$143.259,15	\$142.418,21	\$94.608,24
CSLL	\$16.206,67	\$55.295,66	\$60.393,06	\$54.723,86	\$71.294,35	\$53.473,62	\$14.634,38	\$51.573,29	\$51.270,55	\$34.058,97
Lucro Líquido	\$152.685,57	\$439.178,42	\$476.458,34	\$434.844,91	\$556.387,32	\$425.795,45	\$142.473,93	\$414.933,86	\$414.367,07	\$289.884,71
Amortização	\$71.272,10	\$71.272,10	\$71.272,10	\$71.272,10	\$71.272,10	\$71.272,10	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
FC Incremental	-\$633.268,32	-\$291.702,07	\$87.245,09	\$424.618,11	\$883.508,08	\$1.211.712,70	\$1.326.368,31	\$1.711.909,29	\$2.095.230,18	\$2.352.332,76
FC Incremental descontado	-\$505.692,43	-\$448.151,21	-\$393.118,01	-\$350.880,48	-\$301.353,85	-\$270.817,52	-\$261.621,30	-\$234.963,35	-\$212.114,69	-\$198.903,36

VLP	-\$198.903,36
TIR	12%
PAYBACK	> 20 ANOS

APÊNDICE G - FLUXO DE CAIXA PARA PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA MOTOR EVAPORADOR ME.

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor evitado para tratamento do lixivia do	\$0,00	\$48.322,58	\$63.386,91	\$72.463,62	\$94.626,07	\$126.928,50	\$165.491,89	\$186.239,17	\$265.919,37	\$301.000,18
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$365.394,94	\$501.303,28	\$599.292,27	\$818.524,03	\$1.148.115,96	\$1.565.519,81	\$1.842.272,99	\$2.751.252,24	\$3.256.779,26
Combustível extra consumido	\$0,00	\$253.123,62	\$60.058,70	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$283.710,43	\$303.762,24
O&M	\$74.480,65	\$78.204,69	\$82.114,92	\$86.220,67	\$90.531,70	\$285.174,86	\$299.433,60	\$314.405,28	\$330.125,55	\$346.631,82
Depreciação Máquina e outros	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41	\$312.109,41
Seguros	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58
Lucro Operacional	-\$414.963,65	-\$258.093,79	\$82.033,58	\$245.052,23	\$482.135,41	\$649.386,60	\$1.091.095,10	\$1.373.623,88	\$2.062.852,64	\$2.566.902,38
Juros	\$289.410,54	\$289.410,54	\$268.738,36	\$248.066,18	\$227.394,00	\$206.721,82	\$186.049,64	\$165.377,45	\$144.705,27	\$124.033,09
Lucro antes do IR	-\$704.374,19	-\$547.504,33	-\$186.704,78	-\$3.013,95	\$254.741,41	\$442.664,79	\$905.045,47	\$1.208.246,42	\$1.918.147,37	\$2.442.869,29
Imposto de renda	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$63.685,35	\$110.666,20	\$226.261,37	\$302.061,61	\$479.536,84	\$610.717,32
CSLL	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$22.926,73	\$39.839,83	\$81.454,09	\$108.742,18	\$172.633,26	\$219.858,24
Lucro Líquido	-\$704.374,19	-\$547.504,33	-\$186.704,78	-\$3.013,95	\$168.129,33	\$292.158,76	\$597.330,01	\$797.442,64	\$1.265.977,27	\$1.612.293,73
Amortização	\$0,00	\$0,00	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09
FC Incremental	-\$1.356.966,60	-\$1.592.361,52	-\$1.742.585,98	-\$1.709.119,61	-\$1.504.509,96	-\$1.175.870,88	-\$542.060,55	\$291.862,41	\$1.594.320,00	\$3.243.094,05
FC Incremental descontado	-\$1.169.798,79	-\$1.344.735,56	-\$1.440.978,01	-\$1.422.494,84	-\$1.325.077,52	-\$1.190.190,15	-\$965.929,34	-\$711.561,61	-\$369.076,51	\$4.673,54

Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$315.588,40	\$749.270,77	\$805.504,06	\$742.355,55	\$926.574,13	\$728.940,41	\$303.399,05	\$720.137,49	\$723.395,09	\$539.107,64
Venda de Energia Elétrica	\$3.571.257,30	\$8.866.878,81	\$9.968.894,02	\$9.608.489,55	\$12.542.087,52	\$10.318.763,22	\$4.491.844,89	\$11.149.577,38	\$11.713.104,47	\$9.129.079,27
Combustível extra consumido	\$0,00	\$7.851.853,23	\$8.451.735,11	\$6.287.255,39	\$9.815.281,86	\$4.180.155,65	\$0,00	\$4.357.851,62	\$6.016.923,97	\$2.118.031,16
O&M	\$363.963,42	\$382.161,59	\$401.269,67	\$421.333,15	\$442.399,81	\$464.519,80	\$487.745,79	\$512.133,08	\$537.739,73	\$564.626,72
Depreciação Máquina e outros	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58
Seguros	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58	\$28.373,58
Lucro Operacional	\$3.466.135,12	\$1.325.387,60	\$1.864.646,14	\$3.585.509,39	\$3.154.232,83	\$6.346.281,02	\$4.250.750,99	\$6.942.983,01	\$5.825.088,69	\$6.928.781,88
Juros	\$103.360,91	\$82.688,73	\$62.016,55	\$41.344,36	\$20.672,18	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Lucro antes do IR	\$3.362.774,21	\$1.242.698,87	\$1.802.629,60	\$3.544.165,03	\$3.133.560,64	\$6.346.281,02	\$4.250.750,99	\$6.942.983,01	\$5.825.088,69	\$6.928.781,88
Imposto de renda	\$840.693,55	\$310.674,72	\$450.657,40	\$886.041,26	\$783.390,16	\$1.586.570,25	\$1.062.687,75	\$1.735.745,75	\$1.456.272,17	\$1.732.195,47
CSLL	\$302.649,68	\$111.842,90	\$162.236,66	\$318.974,85	\$282.020,46	\$571.165,29	\$382.567,59	\$624.868,47	\$524.257,98	\$623.590,37
Lucro Líquido	\$2.219.430,98	\$820.181,25	\$1.189.735,53	\$2.339.148,92	\$2.068.150,03	\$4.188.545,47	\$2.805.495,65	\$4.582.368,79	\$3.844.558,53	\$4.572.996,04
Amortização	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$275.629,09	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
FC Incremental	\$5.215.269,52	\$5.788.195,27	\$6.730.675,29	\$8.822.568,71	\$10.643.463,22	\$14.584.753,19	\$17.418.622,42	\$22.029.364,79	\$25.902.296,91	\$30.503.666,53
FC Incremental descontado	\$390.069,95	\$486.586,65	\$623.459,81	\$885.355,11	\$1.081.878,82	\$1.448.578,52	\$1.675.875,67	\$1.994.682,09	\$2.225.536,45	\$2.461.979,93

VLP	-\$2 416.979,93
TIR	27%
PAYBACK	10 ANOS

APÊNDICE H - FLUXO DE CAIXA PARA PPROPOSTA DE INTEGRAÇÃO ENERGETICA COMBUSTOR MOTOR EVAPORADOR CME

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$0,00	\$48.322,58	\$63.386,91	\$72.463,62	\$94.626,07	\$126.928,50	\$165.491,89	\$186.239,17	\$265.919,37	\$301.000,18
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$167.765,03	\$454.383,27	\$754.620,15	\$1.078.422,09	\$1.409.705,38	\$1.774.926,03	\$2.151.710,50	\$2.529.572,60	\$3.019.438,50
O&M	\$55.149,77	\$57.907,26	\$60.802,62	\$63.842,75	\$67.034,89	\$211.159,91	\$221.717,90	\$232.803,80	\$244.443,99	\$256.666,19
Depreciação Máquina e outros	\$265.244,14	\$268.001,63	\$270.896,99	\$273.937,12	\$277.129,26	\$421.254,28	\$431.812,27	\$442.898,17	\$454.538,36	\$466.760,56
Seguros	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44
Lucro Operacional	-\$307.263,01	-\$93.932,89	\$204.854,32	\$511.127,77	\$853.900,03	\$1.073.360,72	\$1.466.586,78	\$1.853.032,63	\$2.298.934,74	\$2.811.659,25
Juros	\$214.296,25	\$214.296,25	\$198.989,38	\$183.682,50	\$168.375,63	\$153.068,75	\$137.761,88	\$122.455,00	\$107.148,13	\$91.841,25
Lucro antes do IR	-\$521.559,27	-\$308.229,15	\$5.864,94	\$327.445,27	\$685.524,40	\$920.291,97	\$1.328.824,90	\$1.730.577,62	\$2.191.786,61	\$2.719.817,99
Imposto de renda	\$0,00	\$0,00	\$1.466,24	\$81.861,32	\$171.381,10	\$230.072,99	\$332.206,23	\$432.644,41	\$547.946,65	\$679.954,50
CSLL	\$0,00	\$0,00	\$527,84	\$29.470,07	\$61.697,20	\$82.826,28	\$119.594,24	\$155.751,99	\$197.260,80	\$244.783,62
Lucro Líquido	-\$521.559,27	-\$308.229,15	\$3.870,86	\$216.113,88	\$452.446,10	\$607.392,70	\$877.024,44	\$1.142.181,23	\$1.446.579,16	\$1.795.079,88
Amortização	\$0,00	\$0,00	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67
FC Incremental	-\$1.004.776,31	-\$1.081.901,66	-\$1.051.018,66	-\$807.892,65	-\$328.434,42	\$305.970,42	\$1.210.006,99	\$2.379.200,35	\$3.852.791,65	\$5.674.883,66
FC Incremental descontado	-\$866.186,48	-\$923.503,17	-\$903.717,74	-\$769.441,41	-\$541.165,11	-\$280.778,56	\$39.096,28	\$395.730,02	\$783.215,24	\$1.196.253,62

Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$315.588,40	\$749.270,77	\$805.504,06	\$742.355,55	\$926.574,13	\$728.940,41	\$303.399,05	\$720.137,49	\$723.395,09	\$539.107,64
Venda de Energia Elétrica	\$3.721.826,07	\$2.734.409,12	\$3.367.536,12	\$4.697.784,88	\$4.875.943,38	\$7.053.450,00	\$9.070.099,58	\$7.745.721,69	\$7.013.734,55	\$7.474.888,17
O&M	\$269.499,50	\$282.974,47	\$297.123,20	\$311.979,36	\$327.578,33	\$343.957,24	\$361.155,10	\$379.212,86	\$398.173,50	\$418.082,18
Depreciação Máquina e outros	\$269.499,50	\$282.974,47	\$297.123,20	\$311.979,36	\$327.578,33	\$343.957,24	\$361.155,10	\$379.212,86	\$398.173,50	\$418.082,18
Seguros	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44	\$21.009,44
Lucro Operacional	\$3.725.896,10	\$3.158.686,54	\$3.833.898,10	\$5.086.142,20	\$5.432.920,32	\$7.396.414,29	\$8.970.324,65	\$8.044.627,45	\$7.296.937,26	\$7.553.894,76
Juros	\$76.534,38	\$61.227,50	\$45.920,63	\$30.613,75	\$15.306,88	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Lucro antes do IR	\$3.649.361,72	\$3.097.459,04	\$3.787.977,48	\$5.055.528,45	\$5.417.613,44	\$7.396.414,29	\$8.970.324,65	\$8.044.627,45	\$7.296.937,26	\$7.553.894,76
Imposto de renda	\$912.340,43	\$774.364,76	\$946.994,37	\$1.263.882,11	\$1.354.403,36	\$1.849.103,57	\$2.242.581,16	\$2.011.156,86	\$1.824.234,32	\$1.888.473,69
CSLL	\$328.442,55	\$278.771,31	\$340.917,97	\$454.997,56	\$487.585,21	\$665.677,29	\$807.329,22	\$724.016,47	\$656.724,35	\$679.850,53
Lucro Líquido	\$2.408.578,73	\$2.044.322,96	\$2.500.065,13	\$3.336.648,78	\$3.575.624,87	\$4.881.633,43	\$5.920.414,27	\$5.309.454,12	\$4.815.978,59	\$4.985.570,54
Amortização	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$204.091,67	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
FC Incremental	\$7.900.380,16	\$9.761.620,89	\$12.078.603,79	\$15.232.170,33	\$18.624.712,96	\$23.323.264,16	\$29.264.687,87	\$34.595.151,42	\$39.432.139,45	\$44.438.719,43
FC Incremental descontado	\$1.631.153,25	\$1.944.703,16	\$2.281.190,68	\$2.676.002,51	\$3.042.149,50	\$3.479.305,19	\$3.955.851,06	\$4.324.422,07	\$4.612.741,04	\$4.870.006,44

VLP	-\$4 870.006,44
TIR	40%
PAYBACK	7 ANOS

APÊNDICE I - FLUXO DE CAIXA PARA PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA SISTEMA INCINERADOR MOTOR EVAPORADOR IME

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$0,00	\$48.322,58	\$63.386,91	\$72.463,62	\$94.626,07	\$126.928,50	\$165.491,89	\$186.239,17	\$265.919,37	\$301.000,18
Venda de Energia Elétrica	\$0,00	\$170.823,48	\$455.074,72	\$754.620,15	\$1.078.422,09	\$1.409.705,38	\$1.774.926,03	\$2.151.710,50	\$2.533.036,34	\$3.023.242,03
O&M	\$59.285,39	\$62.249,66	\$65.362,14	\$68.630,24	\$72.061,76	\$226.994,53	\$238.344,26	\$250.261,47	\$262.774,55	\$275.913,28
Depreciação Máquina e outros	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00	\$248.434,00
Seguros	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91
Lucro Operacional	-\$330.304,29	-\$114.122,50	\$182.080,59	\$487.434,62	\$829.967,49	\$1.038.620,43	\$1.431.054,76	\$1.816.669,29	\$2.265.162,26	\$2.777.310,03
Juros	\$230.366,07	\$230.366,07	\$213.911,35	\$197.456,63	\$181.001,91	\$164.547,19	\$148.092,47	\$131.637,75	\$115.183,04	\$98.728,32
Lucro antes do IR	-\$560.670,36	-\$344.488,57	-\$31.830,76	\$289.977,99	\$648.965,58	\$874.073,24	\$1.282.962,29	\$1.685.031,53	\$2.149.979,23	\$2.678.581,72
Imposto de renda	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$72.494,50	\$162.241,40	\$218.518,31	\$320.740,57	\$421.257,88	\$537.494,81	\$669.645,43
CSLL	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$26.098,02	\$58.406,90	\$78.666,59	\$115.466,61	\$151.652,84	\$193.498,13	\$241.072,35
Lucro Líquido	-\$560.670,36	-\$344.488,57	-\$31.830,76	\$191.385,47	\$428.317,28	\$576.888,34	\$846.755,11	\$1.112.120,81	\$1.418.986,29	\$1.767.863,93
Amortização	\$0,00	\$0,00	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26
FC Incremental	-\$1.080.123,27	-\$1.176.177,84	-\$1.178.970,86	-\$958.547,65	-\$501.192,62	\$104.733,46	\$980.526,30	\$2.121.684,86	\$3.569.708,88	\$5.366.610,56
FC Incremental desconta do	-\$931.140,75	-\$1.002.524,94	-\$1.004.314,31	-\$882.576,53	-\$664.823,85	-\$416.126,19	-\$106.244,82	\$241.837,59	\$622.599,83	\$1.029.927,97

Ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor evitado para tratamento do lixiviado	\$315.588,40	\$749.270,77	\$805.504,06	\$742.355,55	\$926.574,13	\$728.940,41	\$303.399,05	\$720.137,49	\$723.395,09	\$539.107,64
Venda de Energia Elétrica	\$3.023.242,03	\$3.721.826,07	\$2.830.494,11	\$3.471.032,52	\$4.774.657,22	\$4.996.187,10	\$7.104.798,74	\$9.070.099,58	\$7.799.195,92	\$7.087.465,74
O&M	\$275.913,28	\$289.708,94	\$304.194,39	\$319.404,11	\$335.374,31	\$352.143,03	\$369.750,18	\$388.237,69	\$407.649,57	\$428.032,05
Depreciação Máquina e outros	\$248.434,00	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91
Seguros	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91	\$22.584,91
Lucro Operacional	\$2.777.310,03	\$3.702.535,71	\$3.230.400,67	\$3.911.962,65	\$5.136.468,64	\$5.525.448,39	\$7.418.819,16	\$8.940.091,12	\$8.066.514,02	\$7.337.658,96
Juros	\$98.728,32	\$82.273,60	\$65.818,88	\$49.364,16	\$32.909,44	\$16.454,72	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Lucro antes do IR	\$2.678.581,72	\$3.620.262,12	\$3.164.581,79	\$3.862.598,49	\$5.103.559,20	\$5.508.993,67	\$7.418.819,16	\$8.940.091,12	\$8.066.514,02	\$7.337.658,96
Imposto de renda	\$669.645,43	\$905.065,53	\$791.145,45	\$965.649,62	\$1.275.889,80	\$1.377.248,42	\$1.854.704,79	\$2.235.022,78	\$2.016.628,50	\$1.834.414,74
CSLL	\$241.072,35	\$325.823,59	\$284.812,36	\$347.633,86	\$459.320,33	\$495.809,43	\$667.693,72	\$804.608,20	\$725.986,26	\$660.389,31
Lucro Líquido	\$1.767.863,93	\$2.389.373,00	\$2.088.623,98	\$2.549.315,00	\$3.368.349,07	\$3.635.935,82	\$4.896.420,64	\$5.900.460,14	\$5.323.899,25	\$4.842.854,91
Amortização	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$219.396,26	\$0,00	\$0,00	\$0,00
FC Incremental	\$5.366.610,56	\$7.559.172,21	\$9.450.984,84	\$11.803.488,50	\$14.975.026,22	\$18.414.150,69	\$23.113.759,99	\$29.036.805,04	\$34.383.289,20	\$39.248.729,02
FC Incremental descontado	\$1.029.927,97	\$1.458.391,57	\$1.777.091,71	\$2.118.737,79	\$2.515.799,52	\$2.886.973,96	\$3.324.228,10	\$3.799.299,86	\$4.168.978,60	\$4.458.993,50

VLP	\$4.458.993,50
TIR	38%
PAYBACK	8 ANOS