

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

ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS APLICADA A  
ARQUITETURAS DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE EFLUENTES DE UM  
ATERRO SANITÁRIO

por

Bruno Moraes Rosa

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

Porto Alegre, junho de 2018

ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS APLICADA A  
ARQUITETURAS DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE EFLUENTES DE UM  
ATERRO SANITÁRIO

por

Bruno Moraes Rosa

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

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

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

M Eng. Tiago Haubert Andriotty

Porto Alegre, 27, junho de 2018.

Dedico esse trabalho aos meus Pais,  
que não me ensinaram oque é desistir,  
e a minha namorada, pela paciência e  
companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o apoio que me deram. A minha mãe por todos os conselhos e motivação para encarar os desafios. Ao meu pai por me mostrar que o impossível é questão de vontade e que não existe plano B.

Agradeço ao professor Paulo Smith Schneider pela paciência e disponibilidade para me ajudar neste trabalho.

Agradeço especialmente a professora Leticia Jenisch Rodrigues pelo por todo o ensinamento em Transcal e a quem devo o gosto pela área térmica.

Agradeço ao meu amigo Rafael Ferreira pelo apoio, parceria, conselhos, ombro amigo... Tua amizade me ajudou a passar por esses anos difíceis de UFRGS.

Agradeço aos Eng. Lucas Geusti, Tiago Coser e em especial ao Manuel Suarez pelas oportunidades, ensinamentos e pela amizade. Serei eternamente grato.

ROSA, B.M. **Análise hierárquica de processos aplicada a arquiteturas de integração energética de efluentes de um aterro sanitário**. 2018. Nº 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

Este trabalho propõe 5 arquiteturas para integração energética de efluentes do aterro sanitário de Guajuviras, RS, tendo como exigência comum o completo abatimento do chorume. As arquiteturas propostas utilizam motogeradores de eletricidade alimentados por biogás de aterro e utilizam os gases de combustão para evaporar o chorume, mas também podem consumir gás natural e usar filtros de osmose Reversa. Os combustores a gás natural ajudam a evaporação quando a demanda de chorume é muito alta e os gases de combustão não realizam todo o abatimento do chorume. A viabilidade financeira das arquiteturas é realizada para selecionar as alternativas viáveis. Indicadores técnicos financeiros são propostos e comparados por meio de uma análise hierárquica de processos para escolha da melhor arquitetura. A análise revela que a arquitetura que consome biogás em um motogerador e evaporadores de chorume alimentados por gases de combustão é a melhor proposta entre as apresentadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efluentes de aterro sanitário, Análise Hierárquica de Processos, Combustão de Biogás, Valorização de Resíduos.

ROSA, B.M. **Analytic Hierarchy Process applied to architectures of energetic integration of effluents from a sanitary landfill.** 2018. Nº 20 pages. Monograph (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

#### ABSTRACT

This work proposes 5 architectures for the energetic integration of effluents from the landfill of Guajuviras, Rio Grande do Sul, Brazil, with a common requirement for the complete reduction of slurry. The proposed architectures use electricity generators powered by landfill biogas and use the flue gases to evaporate slurry, but they can also consume natural gas and use Reverse Osmosis filters. Natural gas combustors help evaporation when the demand for slurry is very high and the flue gases do not perform all the slurry abatement. The financial viability of the architectures is performed to select viable alternatives. Financial technical indicators are proposed and compared through a hierarchical analysis of processes to choose the best architecture. The analysis reveals that the architecture that consumes biogas in a motor generator and slurry evaporators fueled by combustion gases is the best proposal among those presented.

**KEYWORDS:** Landfill Effluents, Analytic Hierarchy Process, Biogas Combustion, Waste Valorization.

## ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	1
3. Revisão Bibliográfica .....	1
4. Fundamentação teórica .....	2
4.1 Efluentes de um aterro sanitário.....	2
4.2 Evaporação do Efluente líquido .....	2
4.3 Tópicos sobre termodinâmica e combustão .....	3
4.3.1 Rendimento térmico .....	3
4.3.2 Estequiometria da combustão .....	3
4.3.3 Razão de equivalência e de excesso de ar .....	3
4.3.4 Balanço de Energia.....	4
5. Metodologia .....	4
5.1 Estudo de Caso .....	4
5.2 Arquitetura 1: Sistema Motor-Combustor-Evaporador.....	5
5.3 Arquitetura 2: Sistema Purificador-Motor-Combustor-Evaporador.....	6
5.4 Arquitetura 3: Sistema Motor-Evaporador-Osmose Reversa.....	6
5.5 Arquitetura 4: Sistema Combustor-Evaporador .....	7
5.6 Arquitetura 5: Sistema Purificador –Motor-Evaporador-Osmose reversa .....	7
5.7 Análise Financeira .....	7
5.8 Indicadores .....	8
5.9 Análise Hierárquica de Processos (AHP) .....	9
6. Resultados.....	11
6.1 Indicadores de Desempenho .....	11
6.2 Análise Hierárquica de Processos.....	12
7. Conclusão.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
ANEXO I- Balanço de energia no evaporador.....	16
ANEXO II- Modelagem do Spray-Dryer.....	16
ANEXO III- Informações Complementares AHP.....	17
APÊNDICE A- Custo Total de Equipamentos .....	17
APÊNDICE B- Custo de Purificação do Biogás.....	18
APÊNDICE C- Avaliação segundo AHP das Arquiteturas .....	18

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, a crescente urbanização e pressões econômicas vêm sendo acompanhados por alterações no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população. Como decorrência direta desses processos, vem ocorrendo um aumento na produção de resíduos sólidos, tanto em quantidade como em diversidade, principalmente nos grandes centros urbanos [Gouveia et al.2012]. Além do acréscimo na quantidade, os resíduos produzidos atualmente passaram a abrigar em sua composição elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e à saúde humana.

O problema do volume de resíduos sólidos no Brasil pode ser percebido ao se constatar que o país produziu no ano de 2015 perto de 220 mil toneladas diárias de resíduos, sendo que 17,4% foram descarregados a céu aberto (lixão), 24,1% encerrados em aterros que recebem algum tipo de controle (cobertura periódica) e 58,7% dispostos em aterros sanitários [ABRELPE 2015].

Observa-se que a quantidade de rejeitos sólidos produzidos no país justifica a proibição de seu lançamento em aterros do tipo lixões ou aterros de cobertura periódica, como determina o Art. 47 da Lei nº 12.305/10. Além disso, os aterros sanitários são uma forma de valorização destes rejeitos, pois, é recebido um valor pela sua deposição e ainda é possível utilizar o potencial energético do biogás para gerar energia ou outras aplicações que gerem lucro.

O biogás é composto por gases de efeito estufa e necessita de tratamento adequado, sendo que sua combustão em tochas (flaire) é o usual devido simplicidade do processo, o nível baixo de investimento e a possibilidade de captação de créditos de carbono. Com investimentos de capital mais elevado, é possível usá-lo em geradores para produção de energia elétrica.

Outra questão ambiental importante vem da produção de chorume, o qual se descartado de forma inadequada no solo, esse efluente ocasiona graves danos ao meio ambiente e à saúde pública. Com baixa biodegradabilidade, alta carga de materiais na composição e compostos orgânicos tóxicos, este líquido residual, se não devidamente tratado, é capaz de atingir e contaminar o lençol freático. Hoje o modelo mais utilizado para o tratamento do chorume é feito em lagoas de aeração, que entretanto é um processo lento que gera resíduos úmidos e precisa de grandes áreas

Por outro lado, observa-se que aterros sanitários apresentam oportunidade para integração energética de seus efluentes [Rehman,2003]. Patino (2017) apresentou algumas sistemas de integração energética de efluentes de aterros, acompanhado de parâmetros de observação e análise.

Neste sentido, há a necessidade de investigação da viabilidade técnico-financeira de alternativas de integração energética de efluentes de aterros sanitários.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor e classificar arquiteturas de integração energética do biogás e do efluente líquido produzidos em aterros sanitários capazes de abater completamente o efluente líquido.

Objetivos secundários: Utilizar uma análise hierárquica de processos para avaliar a melhor proposta de integração energética.

Avaliar a viabilidade de fornecer tratamento de efluentes líquidos a empresas ou outros aterros.

Avaliar a viabilidade técnico-financeira de incluir um sistema de osmose reversa na integração energética dos efluentes de um aterro.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura apresenta diversos trabalhos sobre integração energética dos efluentes de aterros sanitários. Rehman (2003) utilizou um evaporador piloto para abater

chorume produzido no aterro sanitário de Ottawa, Canadá, alimentado por metano em um queimador, e concluiu que o biogás possui energia suficiente para evaporar o chorume. Pagliuso e Regattieri (2008) também verificaram que há mais energia disponível no biogás do que a necessária para incinerar o chorume, a partir de balanços energéticos e de espécies.

Ainda nesse sentido, os resultados de Tavares (2011) mostram que a evaporação forçada tem faixas de eficiência que variam de acordo com cada poluente, e tem eficiência inversamente proporcional à quantidade de elementos poluentes que são transferidos para a fase gasosa.

A utilização de biogás para realizar cogeração foi a alternativa utilizada por Messineo et al., 2012, para diminuição de custos na operação de aterros. Patiño (2017) propôs sistemas para integração dos efluentes do aterro sanitário de Guajuviras na cidade de Canoas, empregando uma análise hierárquica de processos para comparar os indicadores de avaliação. A conclusão do autor é que o sistema de utilizando apenas um motor de cogeração e um evaporador seria a melhor opção segundo análise hierárquica de processos com viés financeiro.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Efluentes de um aterro sanitário

Localidades que têm como intuito servir para a deposição ou descarte de resíduos sólidos urbanos, os aterros sanitários são a evolução da antiga prática de aterramento, buscando acomodar detritos no solo no menor espaço possível e causar o mínimo impacto ao meio e à saúde pública. Consiste em camadas alternadas de resíduo e terra para evitar o mau cheiro e a proliferação de animais transmissores de doenças. Os principais efluentes de aterros sanitários são o biogás e o chorume.

O biogás é um gás resultante da decomposição anaeróbica de dejetos animais, resíduos vegetais e de lixo industrial ou residencial em condições adequadas de umidade (Martins e Assis, 2007). É a transformação de compostos de estruturas complexas em compostos mais simples, na ausência de oxigênio através da ação microbiológica produzindo principalmente metano e dióxido de carbono (Amigun e Von Blottnitz, 2010). Sua composição depende muito da fonte geradora, em geral a composição do biogás é 50% CO<sub>2</sub> e 50% CH<sub>4</sub> [Okamura, 2013]

O chorume é uma fração líquida, escura, ácida e de odor desagradável, resultante da decomposição anaeróbia dos resíduos [Gouveia et al. 2012]. Somado a isso ocorre a percolação devido a entrada de água da chuva que entra pela face superior do aterro, provocando a lavagem do material aterrado, aumentando assim o volume do percolado. Esse líquido pode infiltrar-se no solo e contaminar águas superficiais e subterrâneas.

### 4.2 Evaporação do Efluente líquido

A evaporação do chorume pode ocorrer de duas formas, evaporação natural e evaporação forçada. A primeira acontece por meio da energia solar. Já a segunda ocorre por queima de um combustível. Essa queima fornece energia ao chorume até que sua temperatura de vaporização seja atingida.

A evaporação forçada pode reduzir em até 97% o volume do chorume, resultando em resíduos sólidos ou semi sólidos que podem ser retornados ao aterro sanitário, e resíduos gasosos que podem ser lançados na atmosfera ou tratados de acordo com a legislação ambiental [Tavares, 2011].

## 4.3 Tópicos sobre termodinâmica e combustão

### 4.3.1 Rendimento térmico

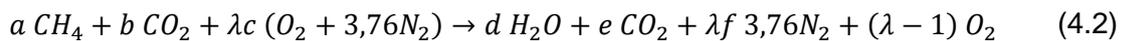
O rendimento térmico  $\eta$ , Eq. (4.1), é a medida adimensional de uma máquina térmica. Ele é medido através da razão da energia convertida,  $Q_{Rec}$ , pela energia total entregue ao sistema [Moran e Shapiro, 2000]. A energia total entregue por um motor gerador de combustão interna é escrita como o produto entre a vazão mássica,  $\dot{m}_{comb}$ , e o poder calorífico inferior,  $PCI_{comb}$ , do combustível. A energia recebida é a convertida em eletricidade ou calor pelos gases de escape, corrente de arrefecimento e outros.

$$\eta = \frac{Q_{Rec}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}} \quad (4.1)$$

### 4.3.2 Estequiometria da combustão

Reações de combustão são reações químicas que envolvem a oxidação completa de um combustível. O conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão, é fundamental para o projeto e controle de equipamentos de combustão. A estequiometria química nos fornece os principais dados necessários aos cálculos de combustão.

A combustão completa do biogás é descrita através da Eq. (4.2).



onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$  são os números de mols e  $\lambda$  é o excesso de ar. Para calcular a quantidade de mols dos produtos na estequiometria da combustão foi utilizado o método algébrico representado nas Equações (4.3), (4.3), (4.5), e (4.6).

$$a + b = e \quad (4.3)$$

$$4a = 2d \quad (4.4)$$

$$2b + 2\lambda c = d + 2e + 2(\lambda - 1) \quad (4.5)$$

$$7,52c\lambda = 7,52\lambda f \quad (4.6)$$

### 4.3.3 Razão de equivalência e de excesso de ar

Qualquer combustível convencional requer uma quantidade específica de oxigênio (e, portanto de ar, uma vez que este é o agente comum de fornecimento) para atingir teoricamente uma reação completa. Menos do que essa quantidade vai produzir combustão incompleta e, portanto perda de calor potencial. A razão de equivalência ( $\phi$ ) compara a razão de oxidante-combustível com o valor de razão estequiométrica, Eq. (4.7).

$$\phi = \frac{(A/C)_{esteq}}{(A/C)} \quad (4.7)$$

onde  $(A/C)$  é a razão de oxidante-combustível da mistura e  $(A/C)_{esteq}$  é a razão estequiométrica. De posse da razão de equivalência define-se a razão de excesso de ar  $\lambda$ , Eq. (4.8).

$$\lambda = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad (4.8)$$

As grandezas  $\lambda$  e  $\phi$  são adimensionais.

#### 4.3.4 Balanço de Energia

O balanço de energia para volumes de controle enuncia que o aumento ou decréscimo da taxa de energia no seu interior é igual a diferença entre as taxas de transferência de energia entrando ou saindo ao longo da fronteira. Os mecanismos de transferências são calor, trabalho e energia que acompanha a massa entrando ou saindo [Moran e Shapiro, 2000]. O balanço de energia é baseado na primeira lei da termodinâmica descrito por Moran e Shapiro (2000) na Eq. (4.9).

$$\dot{Q} - \dot{W}_{VC} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (4.9)$$

onde  $\dot{Q}$  é a taxa líquida de transferência de calor pela fronteira (kW),  $\dot{W}_{VC}$  é a potência transferida pela fronteira (kW),  $\dot{m}$  é a vazão mássica que atravessa o volume de controle (kg/s),  $h_e$  e  $h_s$  são as entalpias específicas de entrada e saídas do volume de controle (kJ/kg), respectivamente.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Estudo de Caso

Os dados de produção de biogás e geração de chorume são referentes ao aterro sanitário de Guajuviras, na cidade de Canoas-RS. Este recebeu resíduos dos 300 mil habitantes até 2012 e hoje se encontra encerrado para novas deposições. A Figura 5.1 mostra as previsões calculadas de produção de biogás e chorume, assim como suas expectativas de incertezas [Thomazoni et al., 2013; Amado et al., 2016].

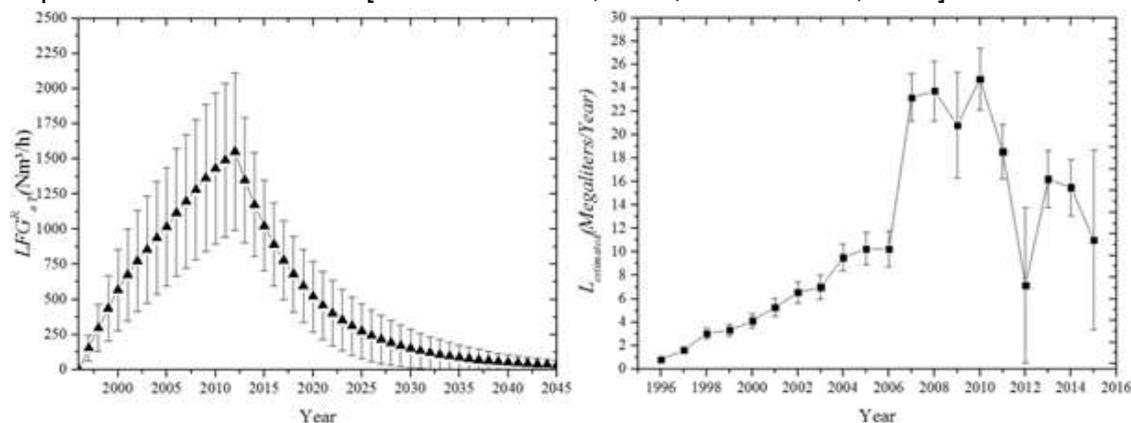


Figura 5.1 Estimativa de produção anualizada, acompanhada das suas incertezas combinadas, de (esquerda) gás de aterro  $LFG_a$  ( $m^3N/h$ ), e (direita) de efluente líquido  $L_{estimated}$ , (MI/ano) [Amado et al., 2016].

A estimativa de produção de biogás compreende o período de 1996 até 2045, enquanto que aquela de produção de chorume refere-se ao período de 1996 até 2015, pois necessitam de dados climatológicos reais. Os valores de vazão de chorume da Fig. 5.1 já levam em conta a eficiência de captação, estimada em 70% [Patiño, 2017].

As hipóteses de modelagem utilizadas nas arquiteturas foram:

- Efluentes do aterro encontram-se a temperatura ambiente (25 °C);
- O biogás produzido no aterro é composto de 50% metano (CH<sub>4</sub>) e 50% gás carbônico (CO<sub>2</sub>), seu poder calorífico inferior (PCI) é calculado como 11000 kJ/kg;
- Os sistemas operam em condição de regime permanente (RP) e as vazões de efluentes instantâneas são consideradas iguais ao valor médio de cada ano.

- Processo de evaporação em regime quase-estacionário, isto é, a cada instante o processo pode ser descrito como em regime estacionário.
- A gota de chorume é composta somente por um componente, no caso, água pura [Rehman, 2003].
- Temperatura da gota é uniforme e igual à temperatura de ebulição da água a pressão atmosférica. Desprezada fase transiente de aquecimento da gota [Rehman, 2003].
- Todas as propriedades termo físicas da fase gasosa, como condutividade, massa específica, calor específico, etc, são constantes. Para o cálculo do calor específico e condutividade térmica foram utilizados valores médios da temperatura do meio ( $T_{inf}$ ) e a temperatura da gota ( $T_s$ ) devido à grande variação das propriedades na interface líquido-gás.
- Troca de calor por radiação desprezada

## 5.2 Arquitetura 1: Sistema Motor-Combustor-Evaporador

A Arquitetura 1 (Fig. 5.2) é formada por um motogerador, um combustor auxiliar, um misturador e um evaporador do tipo Spray Dryer.

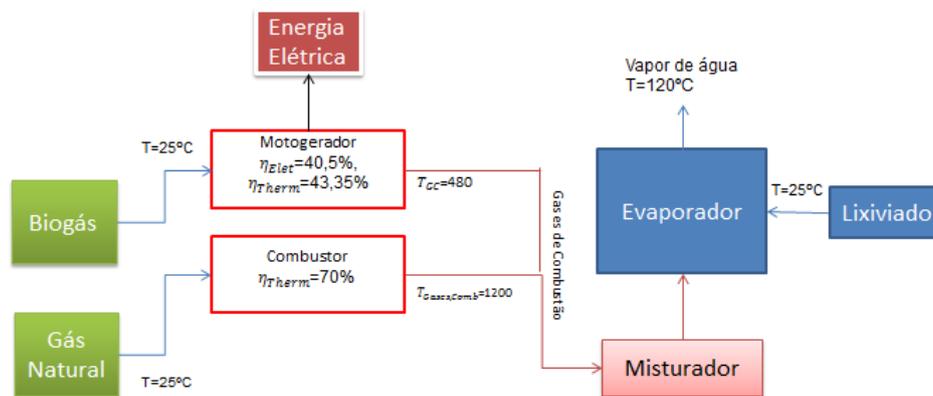


Figura 5.2- Representação da Arquitetura 1: Sistema Motor-Combustor-Evaporador

O volume de biogás apresentado na Fig. 5.1 produzido pelo aterro foi usado como dado de alimentação do motogerador de energia elétrica, cuja produção foi estimada pela Eq. (4.1). A estimativa da vazão dos gases de combustão foi obtida pelas reações de estequiometria, Eq. (4.3), devido a falta de informações técnicas, como temperatura dos gases de combustão e potência elétrica gerada de motores a biogás. Contudo, no catálogo do motor utilizado, [GE,2018], é fornecido o rendimento térmico ( $\eta_{Therm}$ ), 40,5%, e o rendimento elétrico ( $\eta_{el}$ ), 43,3%. A energia térmica se divide em duas correntes de igual valor energético, a corrente de arrefecimento do motor e a corrente dos gases de combustão. Assim, foi calculado que os gases de combustão são exauridos a uma temperatura de 480°C. Após o cálculo da vazão mássica dos gases de combustão,  $\dot{m}_{GC}$ , e a temperatura dos gases de combustão,  $T_{GC}$ , pode-se utilizar o balanço de energia, Eq. (I) do Anexo I, para calcular o volume de chorume evaporado com os gases de combustão.

Nos períodos em que o biogás produzido no aterro não forneceu energia suficiente para produzir energia e evaporar o chorume, um combustor adicional a gás natural foi introduzido, também modelado por meio de um balanço estequiométrico. O rendimento deste combustor foi assumido como 70% (Colorado et.al, 2009).

### 5.3 Arquitetura 2: Sistema Purificador-Motor-Combustor-Evaporador

Esta opção (Fig. 5.3) considera os mesmos equipamentos da Arquitetura 1 com a inclusão de um purificador de biogás para o aumento do seu poder calorífico.

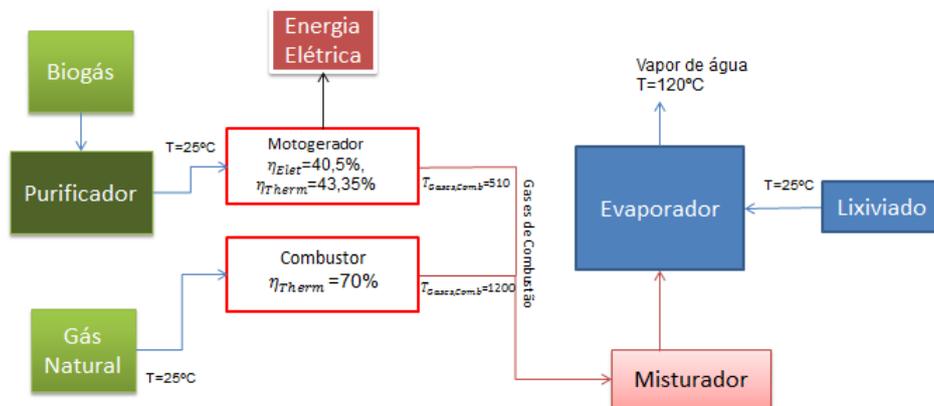


Figura 5.3-Representação esquemática da Arquitetura 2: Sistema Purificador-Motor-Combustor-Evaporador

Com a utilização do purificador foi possível concentrar o biogás com 73% de volume de metano, aumentando assim seu PCI para 18.000 kJ/kg [Okamura et al., 2013]. Dessa forma foi possível aumentar a energia elétrica produzida e a temperatura dos gases de combustão, 510°C, e conseqüentemente o aumento do chorume evaporado sem a necessidade de compra de combustível adicional. Entretanto, há custos adicionais para a compra de equipamentos e insumos para purificação do combustível.

### 5.4 Arquitetura 3: Sistema Motor-Evaporador-Osmose Reversa

Ainda baseada na Arquitetura 1, a arquitetura 3 utiliza um equipamento de osmose reversa como mostra a Fig. 5.4. Os gases de combustão do moto gerador serão utilizados para evaporar o chorume em um evaporador, tal como na Arquitetura 1, e o excedente deste processo será feito por um equipamento de osmose reversa. Este consegue recuperar até 99% da água do chorume [Grupo Hera, 2018].

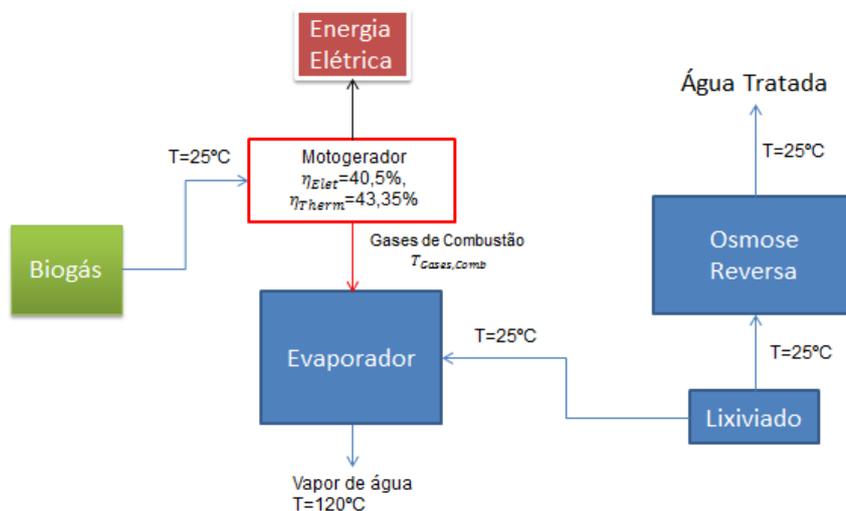


Figura 5.4-Representação esquemática da Arquitetura 3: Sistema Motor-Evaporador-Osmose Reversa

## 5.5 Arquitetura 4: Sistema Combustor-Evaporador

Esta arquitetura (Fig. 5.5.) propõe a evaporação completa do chorume através da queima do biogás em um combustor com rendimento de combustão de 70%, [Colorado et. al, 2009]. Este combustor foi calculado empregando-se balanços estequiométricos, sendo o  $c_p$  dos gases de combustão e  $\dot{m}_{GC}$  calculados levando em consideração as frações molares dos produtos da combustão. O balanço de energia é feito através da Eq. (I) do Anexo I.

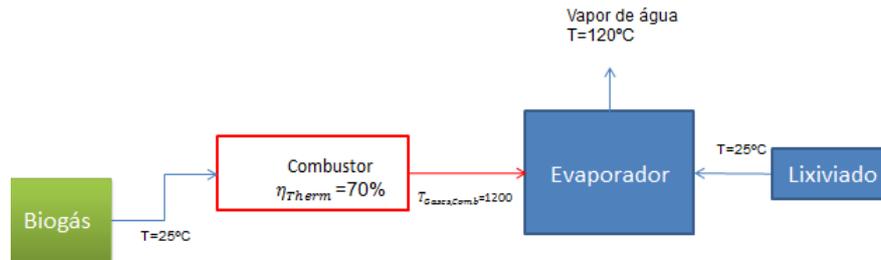


Figura 5.5-Esquema Representativo da Arquitetura 4: Sistema Combustor-Evaporador

Nesta arquitetura não há geração de energia elétrica, o que permitiu realizar a evaporação completa do chorume do aterro estudado e ainda há um excedente de energia. Para viabilizar essa arquitetura se considera a venda de tratamento de efluentes a outros aterros ou empresas que gerem efluentes líquidos com alta concentração de água.

## 5.6 Arquitetura 5: Sistema Purificador –Motor-Evaporador-Osmose reversa

Esta arquitetura (Fig. 5.6) é similar à Arquitetura 3, porém utiliza um purificador para a retirada de em torno de 20% do CO<sub>2</sub>, aumentando a concentração de metano no biogás e, conseqüentemente, aumentando seu PCI. O objetivo foi investigar o impacto dos custos e desempenho do purificador e osmose reversa.

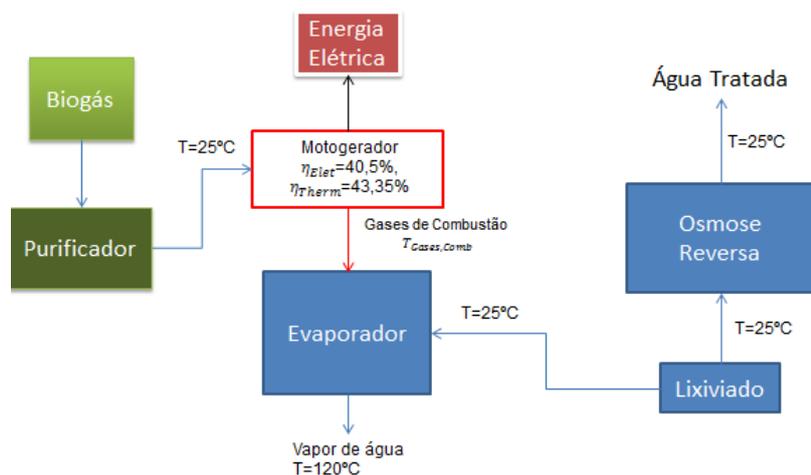


Figura 5.6-Esquema Representativo da arquitetura 5: Sistema Purificador –Motor-Evaporador-Osmose reversa

Os balanços de massa e energia de todas as alternativas foram calculadas com o auxílio do programa Engineering Equation Solver EES (fchart.com)

## 5.7 Análise Financeira

Towler e Sinnott (2013) usaram a Eq. (5.1) para a estimativa preliminar dos custos dos equipamentos ( $C_e$ ). Fontes (2009) propôs a Eq. (5.2) para o cálculo de custo de

aquisição do motogerador a gás. Na Eq. (5.1),  $C_e$  é o custo do equipamento em dólares americanos referentes ao ano de 2010, os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $n$  são parâmetros tabelados para cada tipo de equipamento.  $S$  é o parâmetro que depende da dimensão de capacidade de cada equipamento. Na Eq. (5.2)  $Y$  é o custo do equipamento, em dólares americanos, por kW gerado e a variável  $X$  é a energia gerada em kW.

$$C_e = a + bS^n \quad (5.1)$$

$$Y = 1098X^{-0,1197} \quad (5.2)$$

A Tabela (5.1) mostra os parâmetros usados na Eq. (5.1) para o cálculo dos custos de compra dos equipamentos, e os custos de instalação, de contingências, operação e manutenção, depreciação dos equipamentos e impostos são calculados em função do CTE, Tabela (5.2).

Tabela 5.1- Parâmetros e dimensões utilizadas no cálculo dos custos de aquisição de equipamentos. [Towler e Sinnott, 2013]

Equipamentos	Parâmetros			
	$a$	$b$	$n$	$S$
Combustor	8000	109000	0,8	MW
Spray Dryer	190000	180	0,9	kg/h
Misturador	61500	32500	0,8	m <sup>3</sup>

Tabela 5.2-Metodologia utilizado no cálculo das despesas.

Despesas	
Custos de Instalação*	50% Custo Total dos Equipamentos
Custos de Contingências*	20% Custo Total dos Equipamentos
Custos de operação e Manutenção*	20% Custo Total dos Equipamentos
Depreciação dos equipamentos*	5% Custo Total dos Equipamentos
Impostos*	25% Lucros
Compra de Gás Natural	0,557 US\$/m <sup>3</sup>

\* Parâmetros de cálculo indicado por Towler e Sinnott (2013)

O valor de aquisição do equipamento de Osmose Reversa é de US\$ 178.0000 , informado pela Permutation Soluções, acrescido de uma manutenção e trocas de filtros semestral de 30% do valor de aquisição. Segundo Okamura (2013), o custo anual de purificação de 396 m<sup>3</sup>/h de biogás, é de R\$ 787.000 no primeiro ano e R\$ 687.000 nos demais anos.

As receitas das arquiteturas propostas são a venda de energia elétrica e a evaporação do chorume. Segundo a Portaria Nº 65 de 27 de fevereiro de 2018 o valor de referência da geração de energia elétrica com biogás é de R\$ 530,00/MWh. Amado (2016) utilizou US\$ 15,00 como valor do m<sup>3</sup> de chorume tratado. Utilizou-se neste trabalho a taxa de cambio para o dólar americano de 3,51 reais.

## 5.8 Indicadores

Patiño (2017) propôs indicadores de desempenho para avaliação das arquiteturas através de uma análise hierárquica, baseado nos seguintes indicadores:

- *Eficiência de sistema,  $\eta$  (%)*: Calculada como toda energia transferida para o chorume ( $Q_{LIX, tratado}$ ), somada à energia elétrica produzida ( $E_{elétrica}$ ), deste valor divide-se pela energia total fornecida pelo combustível, conforme Eq. (5.3).

$$\eta = \frac{E_{elétrica} + Q_{LIX, tratado}}{m_{Biogás, consumido} \cdot PCI_{Biogás}} \quad (5.3)$$

- Energia elétrica produzida por chorume evaporado, PEL (W/m<sup>3</sup>): Quociente entre a energia elétrica total produzida e o volume total de chorume tratado  $Vol_{Chorume, Tratado}$ , conforme Eq. (5.4):

$$PEL = \frac{Energia\ Gerada}{Vol_{Chorume, Tratado}} \quad (5.4)$$

- Valor presente líquido, VPL (US\$): é o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa mínima de atratividade (Ochoa, 2010). É determinado pela Eq. (5.5):

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

na qual TMA corresponde à taxa mínima de atratividade e F é a subtração entre o as receitas e despesas, chamado também de fluxo de caixa. Para este trabalho adotou 20% devido às elevadas incertezas e as altas variações do dólar nos últimos anos.

- Payback: 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.
- Investimento específico, IES (US\$/m<sup>3</sup>): é o valor dos investimento inicial, representado pelo valor de compra e instalação dos equipamentos, dividido pelo volume de chorume tratado em todo período estudado, Eq. (5.6):

$$IES = \frac{Investimeto}{Volume_{Chorume, Tratado}} \quad (5.6)$$

Além dos indicadores apresentados por Patiño (2017), propõe-se um indicador que avalia a quantidade de gases de combustão por volume de chorume tratado em todo período. Esse indicador,  $Gera_{GC}$ , é apresentado na Eq. (5.7) em kg/m<sup>3</sup>.

$$Gera_{GC} = \frac{Massa_{GasesCombustão}}{Vol_{Chorume, Tratado}} \quad (5.7)$$

## 5.9 Análise Hierárquica de Processos (AHP)

De posse dos valores dos indicadores apresentados para cada arquitetura, avalia-se através de uma Análise Hierárquica de Processos (AHP), Saaty (1987), o sistema com melhor desempenho. A idéia básica do AHP é que um problema decisório pode ser estruturado de maneira hierárquica, onde o topo da hierarquia contém a sua descrição geral e nos níveis mais abaixo estão os critérios que são levados em consideração para a abordagem. Esses critérios poderão ser subdivididos em subcritérios e assim sucessivamente. No último nível da estrutura hierárquica serão encontradas as alternativas consideradas na análise. O significado do posicionamento das alternativas na base é que cada uma dessas alternativas passará a ser analisada individualmente, somente sob a óptica desses critérios nas últimas ramificações da estrutura. Assim, será como se um problema decisório complexo fosse subdividido em problemas menores que serão abordados separadamente, para depois serem agregados e assim chegar na solução final

para o problema complexo maior .A Figura 5.7 apresenta a estruturação hierárquica para avaliar as arquiteturas apresentadas. 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. No presente estudo de caso, as alternativas são as arquiteturas e os critérios são os indicadores.

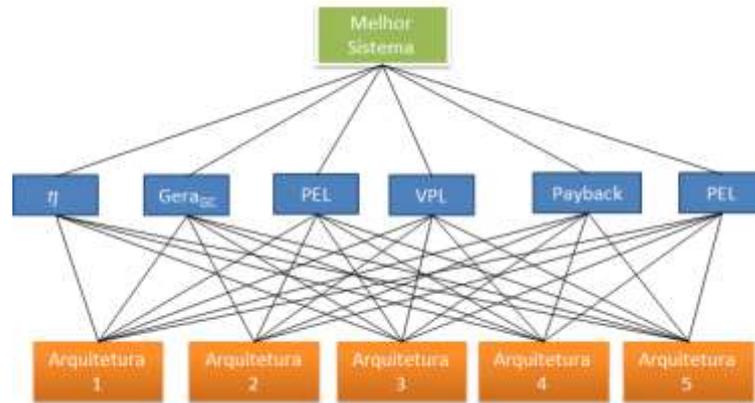


Figura 5.7- Estrutura lógica da AHP para as arquiteturas propostas

Para fazer a AHP primeiramente deve-se disponibilizar uma tabela de julgamento que permita o avaliador julgar par a par os critérios. No apêndice C as tabelas de julgamentos utilizadas pelos julgadores são disponibilizadas. Para a quantificação da importância de cada indicador um sobre o outro se utiliza a Tabela III do anexo III. Após o avaliador preencher a tabela de julgamento pode-se montar a matriz  $A$  a partir da equação Eq. (5.8).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{2n} \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

onde, número na linha  $i$  e na coluna  $j$  dá a importância de um indicador sobre o outro. Os elementos  $a_{ij}$  indicam o julgamento do par de indicadores, a Tabela C.4 do apêndice C mostra a montagem da tabela a partir do julgamento do avaliador 2.

Saaty (1987) define as seguintes regras para cada elemento  $a_{ij}$  da matriz:

- $a_{ij} \rightarrow$  Positiva
- $a_{ij} = 1/a_{ji}$

Em seguida devem-se normalizar os valores  $a_{ij}$  da matriz de julgamentos através da Eq. (5.9).

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (5.9)$$

A matriz normalizada  $B$  de ordem  $n$  é dada pela Eq. (5.10):

$$B = \begin{bmatrix} b_{1j} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A Prioridade Media Local ( $PML$ ) é peso relativo calculado para cada um dos nós de julgamento. São calculados com as médias das linhas da matriz normalizada  $B$ , como mostram as Equações (5.11) e (5.12)

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ij}}{n} \quad (5.11)$$

$$PML = [P_k] \quad (5.12)$$

Com isso, faz-se transposta da matriz dos indicadores,  $Sp$  Eq.(5.13). A matriz dos indicadores é apresentada no capítulo 6, Tabela 6.1. Para efeito de cálculo, neste capítulo será chamada de  $Ti$ . Em seguida deve-se normalizar a matriz transposta Eq.(5.14)

$$Sp = Ti^t \quad (5.15)$$

$$Sp_{ij} = \frac{Sp_{ij}}{\sum_{i=1}^n Sp_{ij}} \quad (5.14)$$

Para obter os resultados peso de cada arquitetura,  $PG$ , utiliza-se a multiplicação da matriz  $Sp_{ij}^*$  pela a matriz  $PML$  como mostra a Eq.(5.16)

$$PG = Sp_{ij}^* PML \quad (5.16)$$

Para o calculo da consistência logica (RC) obtida através da AHP, Saaty (1987) determina a Eq. (5.15).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (5.17)$$

onde  $IR$  é o Índice de Consistência Randômico obtido para uma matriz recíproca de ordem  $m$ . O índice de consistência  $IC$  e apresentado no Anexo III, Eq.(III.1). Saaty (1987) recomenda valores inferiores a 0,1 para  $RC$  para decisões consistentes.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Indicadores de Desempenho

A Tabela 6.1 mostra os resultados dos indicadores apresentados na seção 5.8 para cada arquitetura apresentada. Os indicadores são referentes a todo o período estudado.

Tabela 6.1-Indicadores avaliados em todo o período estudado.

Indicadores	Arquitetura 1	Arquitetura 2	Arquitetura 3	Arquitetura 4	Arquitetura 5
$\eta$ (%)	59±5,1	70±5,3	58±5,1	74±6,7	63±5,2
$Gera_{GC}$ (kg/m3)	2941±179	2675±168	2341±120	820±74	2220±120
$PEL$ (W/m3)	132±35	161±48	132±35	0	161±48
$VPL$ (US\$)	1.260.000±810.000	560.000±450.000	1.530.000±930.000	473.607±314.000	667.000±450.000
$Payback$ (Ano)	9±2	9±2	9±2	6±2	13±2
$IES$ (US\$/m <sup>3</sup> )	16,71±2,65	14,67±2,24	15,82±2,53	2,161±0,38	16,3±2,80

Nota-se que a Arquitetura 4 tem o maior  $\eta$ , pois nessa opção não há geração de energia elétrica e, conseqüentemente, sobra energia para a evaporação de mais chorume do que o aterro estudado gera. Para manter viável financeiramente esse sistema considerou-se a venda de tratamento de efluentes para outros produtores de resíduos líquidos orgânicos. A Arquitetura 2 também apresenta um  $\eta$  alto devido a purificação do biogás, pois, aumenta o seu  $PCI_{Biogas}$  e a temperatura dos gases de combustão, o que eleva a quantidade de calor disponível para a evaporação.

O indicador  $Gera_{GC}$  também sofre uma elevada queda pelo aumento do volume de efluente líquido evaporado na Arquitetura 4. Além disso, a arquitetura 5 e 3, as quais contam com equipamento de osmose reversa para tratar parte do chorume excedente,

tem valores mais baixos que as arquiteturas que utilizam somente evaporação no processo.

Nas arquiteturas, 4 e 5, onde o purificador de biogás é utilizado, há um significativo aumento na *PEL* devido o aumento do  $PCI_{Biogas}$ . Porém, devido ao alto custo da purificação, Apêndice B, nota-se uma diminuição no *VPL* destas arquiteturas.

O melhor resultado para o indicador *VPL* é obtido na Arquitetura 3, devido a utilização de osmose reversa no processo, que evitou a compra de combustível adicional para a evaporação, mesmo com um elevado custo de manutenção.

Devido ao baixo custo total de equipamentos, Apêndice A, o Payback da Arquitetura 4 tem o menor valor. Na Arquitetura 5 o valor aumenta significativamente em relação as outras propostas pelo alto custo do equipamento de Osmose Reversa e da purificação de biogás.

O *IES* tem seu valor fortemente ligado ao investimento inicial, assim como o Payback, por isso tem seu menor valor na arquitetura 4. A Arquitetura 1 requer a maior capacidade do evaporador (kg/h). Além da alta capacidade, o evaporador do tipo Spray-Dryer tem um custo elevado, causando um alto impacto no investimento inicial e por sua vez aumenta o Investimento *IES*.

## 6.2 Análise Hierárquica de Processos

Foram selecionados 3 avaliadores para submeter a AHP, todos com experiência na área de cogeração, tratamento de efluentes e tomada de decisões, e suas ponderações estão no Apêndice C. Obtiveram-se os pesos de cada indicador na tomada de decisão da melhor arquitetura, mostrados na Fig. 6.1.

Nota-se que o indicador *PEL* tem maior importância na decisão final em relação aos outros indicadores para o avaliador 1. Já para o Avaliador 2, o *VPL* tem maior relevância em sua decisão com grande diferença para os outros indicadores, enquanto que há influencia do indicador *PB* em relação ao outros indicadores para o avaliador 3, em torno de 2 vezes superior. Ainda, percebe-se que os avaliadores divergem na importância dos indicadores mostrando a individualidade da análise.

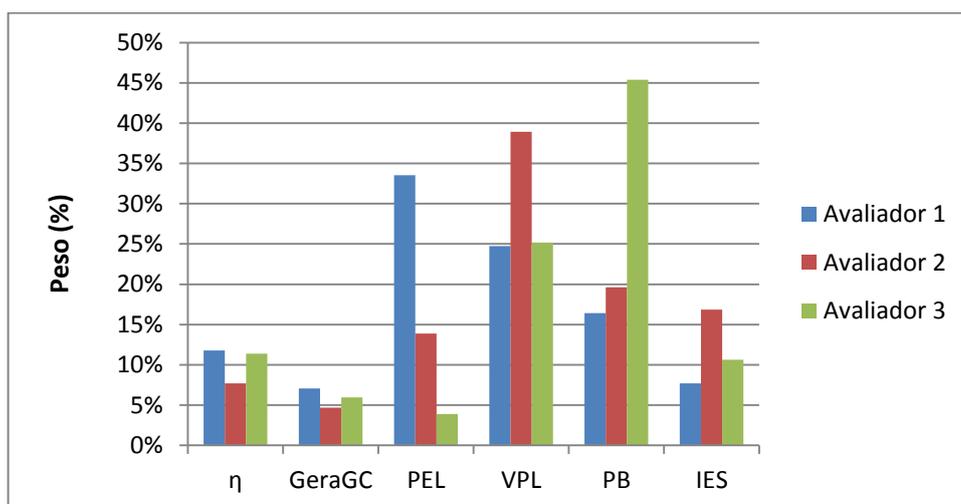


Figura 6.1-Contribuição de cada indicador para análise global segundo avaliadores.

Pode-se montar a matriz de decisões, Eq. (5.13), e seu resultado é apresentado na Fig. 6.2.

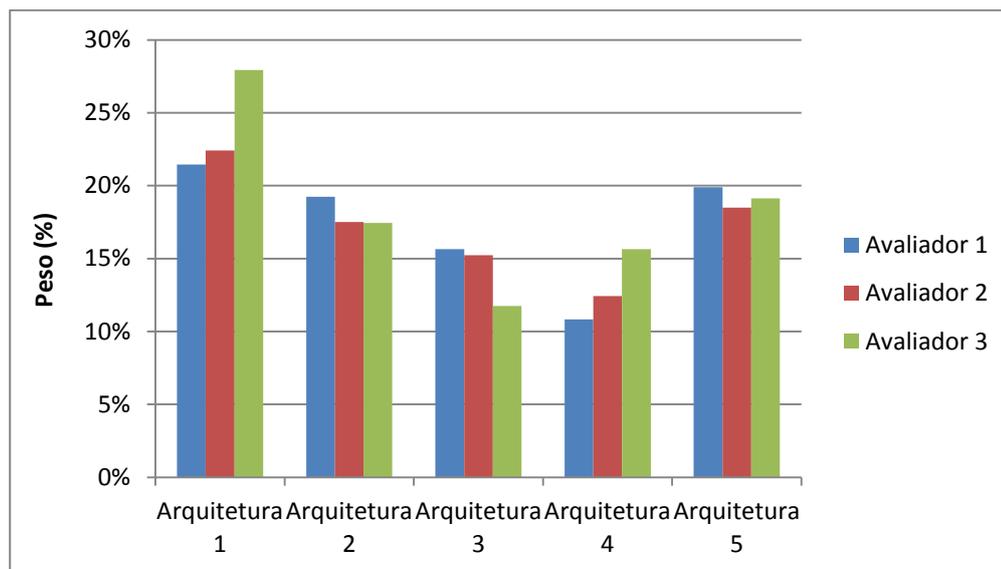


Figura 6.2- Peso das arquiteturas apresentadas segundo AHP.

A decisão de todos os avaliadores coincidiu na arquitetura 1, embora haja divergência nos pesos de cada um. Percebe-se que para o avaliador 1 as Arquiteturas 1,2 e 5 obtiveram em torno de 2% de diferença em suas avaliações. Já para o avaliador 3 a arquitetura 1 obteve 9% de diferença em relação a Arquitetura 5.

A qualidade do processo foi verificada com a *RC*, Eq. (5.15) e seus valores são apresentados na Tabela 6.2. Segundo Saaty (1987) os valores de *RC* devem ser inferiores a 0,1 para a avaliação ser considerada consistente.

Tabela 6.2-Consistência Logica das Avaliações

	Avaliador 1	Avaliador 2	Avaliador 3
RC	0,088	0,054	0,001

Nota-se que todos os avaliadores atingiram o valor de consistência, dando validade a análise proposta.

## 7. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram propostas 5 arquiteturas para integração energética de efluentes do aterro sanitário de Guajuviras, Canoas-RS, tendo por base os dados de 18 anos de geração de chorume e biogás. Uma análise financeira preliminar foi realizada para obter os custos e receitas e, com isso, foram propostos indicadores para avaliar a viabilidade técnico-financeira destas arquiteturas. De posse destes indicadores uma AHP foi realizada através de avaliadores, todos com experiência na área de gestão de resíduos e tomada de decisões, para selecionar a melhor arquitetura.

Os indicadores mostram a viabilidade de sistemas de integração energética, pois, é possível gerar energia elétrica com o biogás, abater todo chorume produzido no aterro e obter um retorno financeiro positivo após alguns anos de operação. O tempo de retorno depende da arquitetura proposta. Além disso, na arquitetura 4 há um saldo energético que permite a venda de tratamento de efluentes líquidos outros geradores em potencial, esta arquitetura tem um baixo *IES* devido a simplicidade dos equipamentos usados, porém, há um baixo retorno do investimento, *VPL*.

O equipamento de osmose reversa obteve os melhores resultados, para as arquiteturas propostas, quando utilizada no sistema da Arquitetura 3, mostrando sua viabilidade técnico-financeira. É perceptível que o uso de osmose reversa no processo diminui o  $Gera_{GC}$  e mais importante, segundo os avaliadores, aumenta o  $VPL$ , pois, não há custos adicionais devido a compra de gás natural para abater o chorume excedente.

A AHP realizada pelos avaliadores apontou a unanimidade de escolha da Arquitetura 1. O índice de consistência de todos os avaliadores indicaram que modelo proposto é consistente e mostram que os indicadores propostos são suficientes pra descrever e avaliar o modelo.

Como sugestão de trabalhos futuros sugere-se a metodologia realizada nesse trabalho em aterros de cidades com menor número de habitantes.

## 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/panorama2015.pdf> Acessado em abril de 2018

Amado, E. A. **Alternativas conceituais para integração energética de efluentes em aterros sanitários**. 2016. 23 páginas. Monografia– Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

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

Amigun, B.; Von Blottnitz, H. “**Capacity-cost and location-cost analyses for biogas plants in Africa**”. Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 1, p. 63-73, 11// 2010.

Colorado, A.F.; Herreira, B.A.; Amell, A.A., “**Performance of a Flameless combustion furnace using biogas and natural gas**”. Bioresource Technology, Medelin, n. 101, p. 2443-2449, nov. 2009

Fontes, Francisco de A. O. “**Uma Análise Técnico-Econômica Da Cogeração Com Termoacumulação Aplicada Ao Setor Terciário.**” 9º Congresso Ibero Americano de Ingeniería Mecánica, 2009, Las Palmas de Gran Canaria.

Grupo Hera, “**Tratamento de chorume osmose reversa**” [http://www.ablp.org.br/pdf/Juan-Forniele-151123V1.0\\_Tratamento-de-Chorume.pdf](http://www.ablp.org.br/pdf/Juan-Forniele-151123V1.0_Tratamento-de-Chorume.pdf) acessado em abril/2018

Handscorn, Christopher . “**Spray Dryer Modelling.**” 2005. 40 p. Report ( research of Chemical Engineering)- University of Cambridge, King's College, Londres, 2005.

Gouveia, Nelson. “**Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social.**” Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p.1503-1507, jun. 2012.

Martins, D. S.; Assis, E. G. “**Estudo da viabilidade econômica da implantação de um biodigestor em uma granja de perus**”. Xvii encontro nacional de engenharia de produção. Foz do Iguaçu, PR: ENERGEP 2007.

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.

Okamura, Layssa Aline. "**Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos.**" 2013. 109f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciência e Tecnologia Ambiental)–Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

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

Patiño, Andrés F. L., "**Eliminação do efluente líquido de aterros sanitários a partir de integração energética.**" 2017. 134 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

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

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

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

Tavares, Bernardo F. D, "**Tratamento de chorume: análise dos efluentes da evaporação forçada**". 2011. 60 p. Monografia (Engenharia Ambiental)- Escola Politécnica , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Thomazoni, A.L.; Schneider, P.; Saffer, M.; "**Prediction of Landfill Gas and Leachate Generation for Energetic Recovery** "; 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), 2013.

## ANEXO I- Balanço de energia no evaporador

A vazão de chorume  $\dot{m}_c$  (kg/s) com temperatura inicial  $T_1$  (K), e calor específico  $C_{pa}$  (kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), entra no evaporador onde é envolvido por gases em contracorrente, com  $\dot{m}_g$ ,  $T_2$  e  $C_{pg}$ . O material evaporado do chorume,  $\dot{m}_{va}$  (kgs<sup>-1</sup>), misturado aos gases de combustão deixam o evaporador pela abertura superior. O concentrado,  $\dot{m}_s$  (kg s<sup>-1</sup>), é retirado na parte inferior [Schroeder, 2013]. A Figura I.1 apresenta um diagrama com os fluxos de entrada e saída do evaporador.

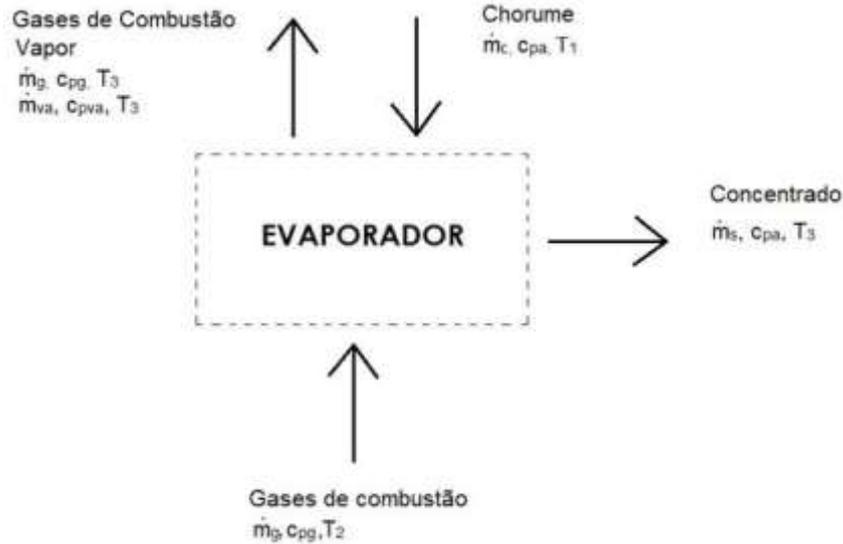


Figura I.1- Volume de controle no evaporador [Schroeder, 2013].

A Eq. (I) mostra o balanço de energia:

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

## ANEXO II- Modelagem do Spray-Dryer

A modelagem da evaporação de uma gota em fluxo contracorrente com gases proposta por Rehman, (2003), considera uma gota esférica à temperatura  $T_s$  (°C) em um meio infinito e em repouso, com temperatura  $T_\infty$  (°C). O meio fornece energia para evaporar a gota, que difunde da superfície para o meio, diminuindo a massa e o raio  $r_s$  (m) ao longo do tempo até sua completa evaporação ( $r_s = 0$ ). A taxa de evaporação instantânea  $\dot{m}$  (kg s<sup>-1</sup>) é dada pela Eq. (II.1).

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

onde  $k_g$  (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) é a condutividade térmica do gás,  $r_s$ (m) o raio instantâneo da gota,  $c_{pg}$  o calor específico do gás (kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), e  $h$  o calor de vaporização (kJ kg<sup>-1</sup>). O primeiro termo entre colchetes é conhecido como número de transferência de Spalding  $B$ , dado pela Eq. (II.2).

$$B = \frac{cpg(T_{\infty} - T_s)}{h} \quad (II.2)$$

Escrevendo a massa como sendo o volume multiplicado pela massa específica ( $\rho g$ ), e substituindo em (II.2), obtém-se:

$$\frac{dD^2}{dt} = -\frac{8kg}{\rho g cpg} \ln(B + 1) \quad (II.3)$$

A Eq. (II.4) é expressa em função do diâmetro  $D$  (m), indicando a relação linear entre o tempo e o quadrado do diâmetro da gota. Integrando e considerando o lado direito da Eq. como  $-K$ , definido como a constante de evaporação, obtém-se a Eq. seguinte, conhecida como lei do  $D^2$ :

$$D^2(t) = D_o^2 - Kt \quad (II.4)$$

Considerando o comprimento  $L$  da coluna do evaporador e a velocidade da gota, é possível calcular o percentual evaporado,  $E_v$ , com as relações entre os diâmetros, Eq. (II.5).

$$E_v = 1 - \left(\frac{D}{D_o}\right)^2 \quad (II.5)$$

#### ANEXO III- Informações Complementares AHP

Tabela III.1-Escala Fundamental para julgamentos comparativos. [Saaty,1987]

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

Para o índice de consistência ( $IC$ ), Eq. (III.2), primeiro deve-se calcular  $\lambda_{max}$ , que é o maior auto valor da matriz  $A$ . Para o cálculo do Índice de consistência deve-se utilizar a Eq.(III.1) considerando  $m$  a ordem da matriz  $A$ .

$$IC = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (III.1)$$

O  $IR$  é o índice de consistência obtido por Saaty (1987), a Tabela III.2 mostra o esses valores.

Tabela III.2- Índices de Consistência Randômicos ( $IR$ )

Ordem da matriz (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valores de $IR$	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

#### APÊNDICE A- Custo Total de Equipamentos

Resolvendo a Eq. (5.1) e (5.2), pôde-se chegar aos custos de cada equipamento referenciados pelo dólar em 2010. Para corrigir estes valores para os dias atuais aplicou-se a inflação acumulada do dólar americano entre 2010 e 2016 (+14,54%).

Tabela A.1- Tabela com os custos de aquisição dos equipamentos utilizados segundo cada Arquitetura.

	Arquitetura 1	Arquitetura 2	Arquitetura 3	Arquitetura 4	Arquitetura 5
Combustor (US\$)	\$23.200,00	\$18.000,00	-	\$80.000,00	-
Motor (US\$)	\$1.034.000,00	\$1.135.000,00	\$1.134.000,00	\$713.000,00	\$1.350.000,00
Spray (US\$)	\$368.000,00	\$368.000,00	\$249.000,00	-	\$320.000,00
Misturador (US\$)	\$320.000,00	\$12.000,00	-	-	-
Osiose Reversa (US\$)	-	-	\$230.000,00	-	\$180.000,00
Total (US\$)	\$1.745.200,00	\$1.533.000,00	\$1.613.000,00	\$793.000,00	\$1.688.000,00

#### APÊNDICE B- Custo de Purificação do Biogás

Utilizando a metodologia proposta por Okamura (2013), o custo de purificação do biogás é mostrado na Tabela B.1.

Tabela B.1-Custos de purificação de biogás a cada ano.

Ano	Custo (US\$)
1997	\$153.849,00
1998	\$179.490,00
1999	\$205.132,00
2000	\$230.773,00
2001	\$256.414,00
2002	\$282.056,00
2003	\$307.697,00
2004	\$333.339,00
2005	\$358.980,00
2006	\$384.622,00
2007	\$410.263,00
2008	\$436.110,00
2009	\$461.546,00
2010	\$487.393,00
2011	\$512.829,00
2012	\$538.676,00
2013	\$564.112,00
2014	\$589.958,00
2015	\$615.395,00

#### APÊNDICE C- Avaliação segundo AHP das Arquiteturas

As Tabelas a seguir mostram o julgamento par a par dos indicadores para a seleção da melhor arquitetura, segundo cada avaliador.

Tabela C.1 - Matriz de julgamento do Avaliador 1.

Julgamento de Prioridades				
<b>E</b>	1	→	1	<b>GGC</b>

<b>E</b>	0,5	→	2	<b>PEL</b>
<b>E</b>	0,5	→	2	<b>VPL</b>
<b>E</b>	2	→	0,5	<b>PB</b>
<b>E</b>	0,333333	→	3	<b>IES</b>
<b>GGC</b>	0,2	→	5	<b>PEL</b>
<b>GGC</b>	0,333333	→	3	<b>VPL</b>
<b>GGC</b>	0,5	→	2	<b>PB</b>
<b>GGC</b>	0,333	→	3,003003	<b>IES</b>
<b>PEL</b>	4	→	0,25	<b>VPL</b>
<b>PEL</b>	1	→	1	<b>PB</b>
<b>PEL</b>	3	→	0,333333	<b>IES</b>
<b>VPL</b>	4	→	0,25	<b>PB</b>
<b>VPL</b>	2	→	0,5	<b>IES</b>
<b>PB</b>	3	→	0,333333	<b>IES</b>

Tabela C.2- Matriz de julgamento do Avaliador 2.

<b>Julgamento de Prioridades</b>				
<b>E</b>	3	→	0,333333	<b>GGC</b>
<b>E</b>	0,2	→	5	<b>PEL</b>
<b>E</b>	0,333333	→	3	<b>VPL</b>
<b>E</b>	0,333333	→	3	<b>PB</b>
<b>E</b>	0,2	→	5	<b>IES</b>
<b>GGC</b>	0,5	→	2	<b>PEL</b>
<b>GGC</b>	0,2	→	5	<b>VPL</b>
<b>GGC</b>	0,2	→	5	<b>PB</b>
<b>GGC</b>	0,2	→	5	<b>IES</b>
<b>PEL</b>	0,333333	→	3	<b>VPL</b>
<b>PEL</b>	0,333333	→	3	<b>PB</b>
<b>PEL</b>	0,2	→	5	<b>IES</b>
<b>VPL</b>	3	→	0,333333	<b>PB</b>
<b>VPL</b>	3	→	0,333333	<b>IES</b>
<b>PB</b>	0,333333	→	3	<b>IES</b>

Tabela C.3- Matriz de julgamento do Avaliador 3.

<b>Julgamento de Prioridades</b>				
<b>E</b>	3	→	0,333333	<b>GGC</b>
<b>E</b>	4	→	0,25	<b>PEL</b>
<b>E</b>	0,333333	→	3	<b>VPL</b>
<b>E</b>	0,2	→	5	<b>PB</b>
<b>E</b>	0,5	→	2	<b>IES</b>
<b>GGC</b>	2	→	0,5	<b>PEL</b>
<b>GGC</b>	0,25	→	4	<b>VPL</b>
<b>GGC</b>	0,166667	→	6	<b>PB</b>
<b>GGC</b>	0,333333	→	3	<b>IES</b>
<b>PEL</b>	0,2	→	5	<b>VPL</b>
<b>PEL</b>	0,142857	→	7	<b>PB</b>
<b>PEL</b>	0,2	→	5	<b>IES</b>
<b>VPL</b>	0,333333	→	3,000003	<b>PB</b>
<b>VPL</b>	2	→	0,5	<b>IES</b>
<b>PB</b>	4	→	0,25	<b>IES</b>

Tabela C.4- Matriz A com julgamentos do avaliador 1

	<b>Eficiência(1)</b>	<b>Gera_GC (2)</b>	<b>PEL (3)</b>	<b>VPL (4)</b>	<b>Payback (5)</b>	<b>IES(6)</b>
<b>E (1)</b>	1,00	3,00	0,20	0,33	0,33	0,20
<b>Gera_GC (2)</b>	0,33	1,00	0,50	0,20	0,20	0,20
<b>PEL (3)</b>	5,00	2,00	1,00	0,33	0,33	0,20
<b>E (1)</b>	1,00	3,00	0,20	0,33	0,33	0,20
<b>Gera_GC (2)</b>	0,33	1,00	0,50	0,20	0,20	0,20
<b>PEL (3)</b>	5,00	2,00	1,00	0,33	0,33	0,20