

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E USO EM CÉLULA A  
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO**

**Luzia Bouzán Oliveira Costa**

**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear – Materiais**

**Orientador:  
Prof. Dr. José Octávio Armani Paschoal**

**São Paulo  
2012**

À minha filha, Cristina, e meu marido, Fernando,  
que foram sempre pacientes e carinhosos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e se esforçaram e sacrificaram para me proporcionar uma educação digna.

Agradeço ao meu marido e minha filha, a quem dedico este trabalho, que estiveram sempre ao meu lado me incentivando.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Paschoal, por ter me proporcionado a oportunidade de poder desenvolver este trabalho, por ter tido paciência nas horas difíceis e por ter me ensinado tanto.

Agradeço à minha amiga, Dra. Sandra Harumi Fukurozaki, pelas orientações, ensinamentos e paciência que teve comigo em todo este tempo. Tenho certeza que este trabalho nem mesmo teria iniciado se não fosse por sua persistência e por acreditar em mim.

Agradeço à SABESP, representada pela técnica Sara Freitas, que me acompanhou na visita à ETE Suzano, possibilitando a coleta de alguns dados de pesquisa de campo.

Agradeço aos professores da USP, que me ofereceram o embasamento teórico necessário para a elaboração e conclusão deste trabalho: professores da Faculdade de Saúde Pública: Wanderley da Silva Paganini e Wanda Maria Risso Günther; professores da Escola Politécnica: Sidney Seckler Ferreira Filho, Roque Passos Piveli e Gil Anderi da Silva e finalmente, os professores do IPEN: Martha Marques Ferreira Vieira, Afonso Rodrigues de Aquino, Fatima Maria Sequeira de Carvalho, Vanderlei Sérgio Bergamaschi e Wagner dos Santos Oliveira.

Agradeço a todos os professores que participaram da minha jornada, desde a minha alfabetização até a conclusão desta dissertação, pois contribuíram de alguma maneira, para minha formação acadêmica e pessoal.

Finalmente, agradeço especialmente a Deus, que atendeu às minhas orações e me encaminhou e orientou nesta caminhada.

*“Nunca é tarde demais para ser aquilo que sempre se desejou ser”*

**George Eliot**

# **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS VIA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO E USO EM CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO**

**LUZIA BOUZÁN OLIVEIRA COSTA**

## **RESUMO**

A busca pelo uso de energia renovável, bem como a mitigação dos impactos antropogênicos, desempenha importante papel no desenvolvimento da sociedade contemporânea. O uso de energia de origem renovável é uma possível solução para os problemas relacionados aos impactos ambientais, em especial, às alterações climáticas. Uma importante fonte de energia renovável é a biomassa oriunda de resíduos orgânicos que, após a digestão anaeróbia, resulta em um gás rico em metano, conhecido como biogás. Sob o ponto de vista de qualidade ambiental, o aproveitamento energético dos resíduos produzidos a partir do tratamento das águas residuárias domésticas pode minimizar os impactos ambientais à medida que permite a diminuição da carga orgânica descartada na água e no solo. Adicionalmente, também é possível mitigar os efeitos negativos de emissões de metano na atmosfera quando o biogás é utilizado na produção de energia por meio das células a combustível (CaC) do tipo óxido sólido (SOFC). Neste sentido, o presente trabalho objetivou avaliar o ciclo de vida da ETE, da unidade geradora de biogás, sua purificação e uso em CaC's, identificando o potencial de mitigação dos gases do efeito estufa e de aproveitamento energético do biogás. Dentre os principais resultados obtidos, a etapa construtiva, é a principal contribuinte da demanda acumulada de energia, participando com 55% da CED, enquanto a etapa de tratamento do esgoto, fase líquida, destaca-se na produção de emissões atmosféricas, cerca de 23.500 Kg CO<sub>2</sub> eq por dia. O potencial de emissões dos gases de efeito estufa podem ser evitados, durante todo o ciclo, em cerca de 3.000 kg CO<sub>2</sub> eq por dia. A energia total que pode ser aproveitada com o biogás gerado na ETE e usado em CaC, do tipo SOFC, é de cerca de 14.000 kWh/dia, o que pode suprir em 100% a demanda de eletricidade da fase de tratamento. Os resultados apresentados lançam um desafio e geram oportunidades para pesquisadores e planejadores de sistemas energéticos desenvolverem estratégias ambientalmente saudáveis para a utilização dos recursos renováveis.

# **LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOGAS PRODUCED IN A WASTEWATER TREATMENT PLANT (WWTP) AND ITS USE IN A SOLID OXIDE FUEL CELL (SOFC)**

**LUZIA BOUZÁN OLIVEIRA COSTA**

## **ABSTRACT**

The search for renewable energy use and mitigation of anthropogenic impacts play an important role in the development of contemporary society. The use of energy from renewable sources is a possible solution to the problems related to environmental impacts, in particular, climate change. An important renewable energy source is biomass deriving from organic waste, after the anaerobic digestion, resulting in a gas rich in methane, known as biogas. From the point of view environmental quality, energy recovery of waste generated from the treatment of domestic wastewater can minimize environmental impacts as it allows the reduction of organic load dropped in water and soil. Additionally, it is also possible to mitigate the negative effects of methane emissions in the atmosphere when the biogas is used in the production of energy through solid oxide fuel cells (SOFC). In this sense, this study aimed at assessing the life cycle of a Wastewater Treatment Plant (WWTP), the biogas-generating unit, its purification and fuel cell's use by identifying the potential mitigation of greenhouse gases and energy use of biogas. Among the main results obtained, the constructive phase is the main contributor to the cumulative energy demand, accounting for 55% of the CED, while in the step of sewage treating it's particularly important the production of atmospheric emissions, about 23,500 kg CO<sub>2</sub>eq per day. The potential for emissions of greenhouse gases can be avoided throughout the cycle, at around 3,000 kg CO<sub>2</sub>eq per day. The total energy that can be produced with the biogas generated in WWTP and burned in the SOFC is approximately 14,000 kWh/day, which can provide 100% of the power demand of the treatment phase. The results presented launch challenges and generate opportunities for researchers and energy systems planners to develop strategies for environmentally healthy use of renewable resources.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas.....	11
Lista de Abreviaturas .....	13
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 OBJETIVOS .....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA .....	18
3.1 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	18
3.1.1 Histórico .....	18
3.1.2 Funcionamento das Células a Combustível (CaC's).....	19
3.1.3 Tipos de CaC's.....	21
3.1.3.1 Célula a Combustível Alcalina (AFC) .....	22
3.1.3.2 Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC).....	22
3.1.3.3 Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC) .....	23
3.1.3.4 Célula a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons (PEM).....	24
3.1.3.5 Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC).....	25
3.1.3.5.1 Eletrólitos e Materiais das SOFC'S .....	25
3.1.3.5.2 Configurações da Célula SOFC .....	26
3.1.4 Hidrogênio.....	28
3.1.4.1 Produção de Hidrogênio.....	29
3.1.4.1.1 Processos Eletrolíticos ou Eletrólise .....	30
3.1.4.1.2 Processos Térmicos.....	31
3.1.4.1.3 Processos Biológicos .....	33
3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO .....	35
3.2.1 Níveis de Tratamento de Esgoto .....	35
3.2.2 Principais Tecnologias para Tratamento de Esgoto.....	41
3.2.3 Tratamento de Esgoto – Sistema de Lodos Ativado Convencional com Digestão Anaeróbia do Resíduo.....	49
3.3 BIOGÁS .....	52
3.3.1 Formação do Biogás .....	54
3.3.2 Composição e Características do Biogás.....	56
3.3.3 Purificação do Biogás.....	60
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	63
3.4.1 Conceito .....	64
3.4.2 Usos.....	66
3.4.3 Fases da ACV .....	67
3.4.3.1 Definição do objetivo e escopo .....	68
3.4.3.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	69

3.4.3.3	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) .....	70
3.4.3.4	Interpretação .....	73
4	METODOLOGIA.....	74
4.1	MODELAGEM E ANÁLISE DO INVENTÁRIO .....	75
4.1.1	Etapa de Construção e Instalação .....	77
4.1.2	Etapa de Tratamento do Esgoto .....	78
4.1.3	Etapa de Produção do Combustível.....	79
4.1.4	Etapa de produção de energia .....	81
4.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS .....	82
4.2.1	Demanda Acumulada de Energia .....	83
4.2.2	CML 2001.....	84
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	89
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA .....	89
5.2	OBJETIVO, ESCOPO, FUNÇÃO E UNIDADE FUNCIONAL .....	97
5.3	ELABORAÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO .....	98
5.3.1	Etapa de Construção e Instalação .....	99
5.3.2	Etapa de Tratamento.....	101
5.3.3	Etapa de Produção do Biogás, Purificação e Enriquecimento para Uso na SOFC .....	105
5.3.4	Etapa de Produção de Energia na Célula a Combustível do Tipo SOFC .....	108
5.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS .....	109
5.4.1	Demanda Acumulada de Energia (CED).....	110
5.4.1.1	Etapa de Construção e Instalação .....	110
5.4.1.2	Etapa de Tratamento.....	111
5.4.1.3	Etapa de Produção do Biogás/Metano (96%) .....	113
5.4.1.4	Etapa de Produção de energia na SOFC.....	115
5.4.2	Potencial Aquecimento Global .....	119
5.4.2.1	Etapa de Construção e Instalação .....	119
5.4.2.2	Etapa de Tratamento.....	121
5.4.2.3	Etapa de Produção do Biogás/Metano (96%) .....	123
5.4.2.4	Etapa de Produção de energia na SOFC.....	124
6	CONCLUSÕES .....	127
7	REFERÊNCIAS.....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 -	Princípio de funcionamento de uma Célula a Combustível (CaC)	20
Figura 3.2 -	Forma de uma Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC) Tubular	26
Figura 3.3 -	Forma de uma Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC) Planar	27
Figura 3.4 -	Molécula de hidrogênio	28
Figura 3.5 -	Separação de Oxigênio e Hidrogênio da Água por Eletrólise.	31
Figura 3.6 -	Processo de Gaseificação	33
Figura 3.7 -	Gradeamento da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí	37
Figura 3.8 -	Decantadores Primários da Estação de Tratamento de Esgoto de Arrudas	38
Figura 3.9 -	Decantador Secundário da Estação de Tratamento de Esgoto Caiçara	39
Figura 3.10 -	Digestores Anaeróbios da Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas	39
Figura 3.11 -	Sistema de Tratamento tipo “Wetland” Estação de Tratamento de Esgoto Ponte dos Leites – Araruama RJ	43
Figura 3.12 -	Esquema de manutenção da qualidade da água das terras úmidas: remoção e retenção de nutrientes; redução da carga de sedimento pela sedimentação	43
Figura 3.13	Esquema simplificado de uma lagoa de estabilização	44
Figura 3.14 -	Fluxograma de um sistema de lagoas aeradas facultativas	45
Figura 3.15 -	Fluxograma de um sistema de fossa séptica seguida por filtro anaeróbio	45
Figura 3.16 -	Esquema de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente	46
Figura 3.17 -	Esquema de Funcionamento de um Reator UASB	46
Figura 3.18 -	Esquema de Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente	47
Figura 3.19 -	Esquema de Sistemas por Lodos Ativados	48
Figura 3.20 -	Esquema Típico de uma Estação de Tratamento de Esgoto por Lodos Ativados	49
Figura 3.21 -	Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia	56
Figura 3.22 -	Poder Calorífico Inferior por concentração de Metano	59
Figura 3.23 -	Estágios do Ciclo de Vida de um produto	65
Figura 3.24 -	Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida, onde as formas indicam as etapas do processo, as setas cheias mostram a ordem que ele deve seguir e as setas pontilhadas sugerem possíveis interações entre as fases.	68

Figura 3.25 - Classificação das Categorias de Impacto.....	71
Figura 4.1 - Fluxograma dos planos estudados no escopo da ACV do biogás gerado em ETE para uso em CaC.....	77
Figura 5.1 - Estação de Tratamento de Suzano.....	89
Figura 5.2 – Gradeamento.....	90
Figura 5.3 - Tanque de areia aerado.....	91
Figura 5.4 - Decantador Primário.....	91
Figura 5.5 - Tanque de Aeração.....	92
Figura 5.6 - Decantador secundário.....	93
Figura 5.7 – Efluente clarificado.....	93
Figura 5.8 – Descarte do efluente clarificado.....	94
Figura 5.9 – Biodigestores.....	94
Figura 5.10 – Queimadores.....	95
Figura 5.11 – Filtro Prensa.....	96
Figura 5.12 - Torta de lodo ativado.....	96
Figura 5.13 – Modelo do ciclo de vida da ETE, produção de Metano e sua queima na SOFC (as setas azuis correspondem às entradas (insumos e energia), as setas vermelhas indicam as saídas (emissões e produtos) e as setas pretas mostram o fluxo do sistema).....	97
Figura 5.14 - Contribuições de Demanda Acumulada de Energia na fase de Construção da planta da ETE.....	111
Figura 5.15 - Maiores contribuições na fase do Tratamento do Esgoto.....	112
Figura 5.16 - Demanda Acumulada de Energia – Maiores contribuições - Etapa de Produção do Combustível, fase de Produção do Biogás.....	114
Figura 5.17 - Demanda acumulada de Energia – Maiores contribuições - Etapa Produção Combustível, fase de Produção do Metano a 96%.....	115
Figura 5.18 - Demanda acumulada de Energia – Etapa Produção de Energia em SOFC.....	116
Figura 5.19 - Demanda Acumulada de Energia – Todas as Etapas.....	118
Figura 5.20 – Principais Emissões na Etapa Construtiva.....	120
Figura 5.21 - Potencial de Aquecimento Global (kg CO <sub>2eq</sub> ) – Etapa Tratamento	122
Figura 5.22 - Potencial de Aquecimento Global (Kg CO <sub>2eq</sub> ) – Etapa Produção de Combustível.....	123
Figura 5.23 - Gráfico Geral Comparativo entre Emissões de CO <sub>2eq</sub> Totais das quatro Etapas estudadas por 1 dia.....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Tipos de Células a Combustível e suas principais características	21
Tabela 3.2 -	Poluentes removidos nos principais níveis de Tratamento de Esgoto.....	40
Tabela 3.3 -	Processos, Operações e Sistemas de Tratamento para remoção de poluentes em esgotos domésticos.....	41
Tabela 3.4 –	Características dos Sistemas de Tratamento .....	48
Tabela 3.5 –	Composição do Biogás a partir de diferentes substratos.....	57
Tabela 3.6 -	Equivalência entre o Metano e outros combustíveis.....	58
Tabela 3.7 -	Impurezas do Biogás e suas consequências.....	60
Tabela 3.8 –	Famílias de Métodos de AICV mais citadas em publicações nos últimos dez anos.....	72
Tabela 4.1 –	Classificação da ETE de acordo com classes de tratamento .....	76
Tabela 4.2 –	Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos principais Gases do Efeito Estufa .....	87
Tabela 5.1 –	Volume de esgoto tratado e coletado e comprimento da rede por cidade atendida na ETE Suzano .....	90
Tabela 5.2 –	Comparação de dados do Ecoinvent e ETE Suzano.....	98
Tabela 5.3 -	Inventário da Construção da Estação de Tratamento de Esgoto – fluxos de entrada e saída.....	100
Tabela 5.4 -	Inventário da Construção do Biodigestor – fluxos de entrada e saída.....	101
Tabela 5.5 -	Inventário da Estação de Tratamento de Esgoto – fase líquida – fluxo de entrada .....	102
Tabela 5.6 -	Inventário da Estação de Tratamento de Esgoto – fase líquida – fluxo de saída .....	103
Tabela 5.7 -	Inventário da Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado – fluxos de entrada e saída.....	105
Tabela 5.8 -	Inventário da Produção de Metano (96%) - fluxos de entrada e saída.....	106
Tabela 5.9 -	Inventário da Produção de Metano (96%) a alta pressão – fluxos de entrada e saída.....	107
Tabela 5.10 -	Inventário da Produção de Metano 96% a baixa pressão - fluxos de entrada e saída.....	107
Tabela 5.11 –	Inventário da Produção de Energia na SOFC - fluxos de entrada e saída.....	109

Tabela 5.12 -	Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Construção e Instalação (1 dia de operação) .....	110
Tabela 5.13 -	Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Tratamento (1 dia operação).....	111
Tabela 5.14 -	Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Produção do Combustível (1 dia de operação).....	113
Tabela 5.15 -	Demanda Acumulada de Energia – Etapa Produção de Energia em SOFC.....	116
Tabela 5.16 -	Demanda Acumulada de Energia – Todas as Etapas .....	117
Tabela 5.17 -	Demonstrativo de Consumo de Energia por Etapa durante a Vida Útil da ETE – 1 dia.....	119
Tabela 5.18 –	Principais contribuições das emissões na Construção da ETE .	121
Tabela 5.19 -	Potencial Aquecimento Global – Etapa de Tratamento – Principais contribuintes para emissões .....	122
Tabela 5.20-	Potencial de Aquecimento Global (Kg CO <sub>2eq</sub> ) – Etapa Produção de Combustível – Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado.....	124
Tabela 5.21 -	Potencial de Aquecimento Global (Kg CO <sub>2</sub> eq) – Etapa Produção de Energia em SOFC.....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
BDT@	Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
DBO	Demanda Bioquímica por Oxigênio
CaC	Célula a Combustível
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> – Demanda Acumulada de Energia
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CFC	Clorofluorocarboneto
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CSJ	Companhia de Saneamento de Jundiaí
DCB	Diclorobenzeno
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
PAFC	<i>Phosphoric Carbonate Fuel Cell</i>
PCE	<i>Per-Captia Equivalents</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEM	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
USP	Universidade de São Paulo
YSZ	<i>Yttrium Stabilized Zirconia</i>

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas, principalmente nos dois últimos séculos, apresentaram um crescimento contínuo e exponencial, seguindo o aumento da população que, em 1700, não atingia a marca de 500 milhões, mas que em 1800 já era quase de um bilhão e na virada do século passado era de seis bilhões de pessoas (Ribeiro, 2003).

Atualmente, já tendo ultrapassado a barreira dos sete bilhões de habitantes, o planeta carrega o desafio de continuar satisfazendo às suas crescentes necessidades e, ao mesmo tempo, diminuir os impactos causados pela sua população sobre o meio natural. Uma das principais necessidades do ser humano, e que move o mundo, a economia e todos os setores da sociedade atual, é a energia.

De acordo com Pérez (2004), as crises mundiais causadas pela dependência de combustíveis fósseis, em especial, o petróleo, acarretou na procura por novas fontes de energia, tais como energia solar, eólica, hidráulica e biomassa. Soma-se ainda as crescentes preocupações quanto aos efeitos dos gases do efeito estufa (GEE), principalmente oriundas do uso de combustíveis fósseis.

Dentre as diferentes rotas inovadoras, para redução das emissões dos gases de efeito estufa e geração de eletricidade, está a tecnologia de células a combustível (CaC), na qual, comumente, projeta-se o hidrogênio como um importante vetor energético do futuro. Por meio da CaC, a energia química do hidrogênio pode ser convertida diretamente em eletricidade, com a alta eficiência de conversão e sem as correspondentes emissões atmosféricas dos combustíveis fósseis (CF. Fukurozaki, 2006).

Convencionalmente, o hidrogênio é produzido a partir de combustíveis fósseis por meio de reforma a vapor do gás natural, pelo craqueamento do petróleo ou por métodos de oxidação parcial. Todos estes processos são reações altamente endotérmicas e consomem energia adicional para a realização.

Particularmente, a reforma a vapor do metano ou gás natural, cuja tecnologia é a mais utilizada na produção de hidrogênio, libera 0,5 m<sup>3</sup> de

emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por m<sup>3</sup> de hidrogênio produzido (Purwanto e Akiyama, 2006).

Segundo Holm-Nielsen *et al.* (2009), o atendimento aos objetivos do Tratado de Kyoto, bem como as questões relacionadas à saúde humana e animal, e a segurança alimentar, requerem soluções sustentáveis para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Purwanto e Akiyama (2006) destacam que o uso do biogás, oriundo da digestão anaeróbia, ao invés do gás natural, para a produção do hidrogênio é uma maneira promissora de diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> e mitigar o aquecimento global.

Neste quadro, para que a produção de metano, a partir do biogás e seu uso na CaC, constitua-se em uma alternativa de energia sustentável, torna-se premente que as repercussões ecológicas, sociais e econômicas, não só do uso final desse vetor, como igualmente da sua fonte e o processo de produção, sejam menores ou que apresentem mais vantagens do que as das alternativas existentes nos recursos não renováveis (CF. Fukurozaki, 2006).

É neste sentido que a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, estabelecida pela *International Organization for Standardization (ISO)*, tem se destacado como instrumento apropriado para fornecer as informações ambientais necessárias de apoio à tomada de decisões relacionadas à sustentabilidade, ao avaliar os impactos ambientais de todas as fases de uma atividade industrial, desde a aquisição de matéria prima até sua disposição final (Utigkar e Thiesen, 2005).

De acordo com a Comissão Europeia (2010a, 2010b), a ACV é uma poderosa ferramenta de decisão, que complementa outros métodos, de igual importância, para tornar o consumo e a produção de bens mais sustentável.

## 2 OBJETIVOS

Diante do contexto apresentado acima, o objetivo geral deste trabalho é conduzir um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da Produção de Biogás, via Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), e seu aproveitamento em Células a Combustível (CaC) do tipo óxido sólido (SOFC).

Neste sentido, os objetivos específicos delimitados para o estudado foram:

- Compilar um inventário de energia, contribuições de materiais e emissões ambientais utilizando como estudo de caso a ETE Suzano;
- Avaliar potenciais impactos ambientais associados às contribuições e emissões identificadas acima, em termos de Demanda Acumulada de Energia (CED) e emissões de CO<sub>2</sub> equivalente;
- Interpretar os resultados obtidos nas constatações da análise do inventário e na avaliação dos impactos, identificando o potencial de mitigação dos gases do efeito estufa e de aproveitamento energético do biogás no sistema descrito.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

##### 3.1.1 HISTÓRICO

As CaC's são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química, existente em um combustível, em energia elétrica e calor. (Aldabó, 2004; DOE, 2004; Fukurozaki, 2006).

O desejo de converter energia química diretamente em energia elétrica existe desde 1900; porém, o princípio de funcionamento da célula a combustível (CaC) surgiu em 1839, quando *William Robert Grove* descobriu que a combinação de hidrogênio e oxigênio resultava em água e corrente elétrica (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004).

As primeiras tentativas de construir um dispositivo semelhante à célula a combustível foram realizadas em 1889 e usavam ar e gás industrial gerado de carvão. No entanto, estas tentativas falharam, assim como muitas outras, devido à falta de conhecimento dos materiais e dos eletrodos (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004).

Em 1932, *Francis Bacon* obteve sucesso em seus primeiros experimentos, aperfeiçoando caríssimos catalisadores de platina, usados em células de hidrogênio-oxigênio, usando eletrólitos alcalinos menos corrosivos e eletrodos de níquel mais baratos. Porém, devido à enorme quantidade de desafios técnicos, somente em 1959, *Bacon* demonstrou um sistema de 5 kW capaz de alimentar uma máquina de solda. Neste mesmo ano, *Harry Ihrig* mostrou seu trator de 20HP acionado à célula a combustível (Aldabó, 2004).

No fim da década de 50 do século passado, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) iniciou suas pesquisas em células a combustível do tipo alcalina, após desistir de outras tecnologias, como os reatores nucleares, por serem muito arriscados; as baterias, por serem pesadas e possuírem vida curta; e a energia solar, por ocupar muito espaço. (Aldabó, 2004; Kordesh e Simader, 1996).

Em 1970, *K. Kordesh* desenvolveu um carro para quatro passageiros com a tecnologia da célula a combustível movida a hidrogênio (Kordesh e Simader, 1996), que operou por três anos no tráfego de uma cidade.

Na segunda metade da década de setenta, os Estados Unidos perderam o interesse em continuar o desenvolvimento da tecnologia, porém o Japão passou a desenvolver células a combustível do tipo ácido fosfórico, desenvolvendo plantas de energia estacionária com protótipos de células produzindo de 50 a 100 kW (Kordesh e Simader, 1996).

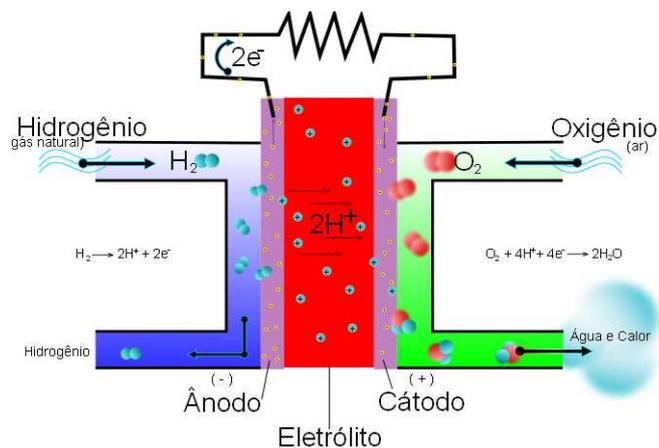
Na década de 80, estudos sobre as células de carbonato fundido e, em 1990, as de óxido sólido e membranas poliméricas foram aprofundados, melhorando a vida de útil e aumentando a produção de energia (Kordesh e Simader, 1996).

No Brasil, no fim da década de 70, algumas universidades começaram a realizar estudos sobre a tecnologia da CaC: Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo e um grupo de eletroquímica de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP) (Wendt *et al*, 2000).

Em 1996, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) de São Paulo iniciou um projeto acadêmico e tecnológico para o desenvolvimento das CaC de membranas poliméricas (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – PEM) e das CaC de óxido sólido (*Solid Oxide Fuel Cell* – SOFC) (Wendt *et al*, 2000).

### **3.1.2 FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL (CaC's)**

A CaC é composta de um ânodo (eletrodo negativo) e um cátodo (eletrodo positivo), que são revestidos por um catalisador que, em contato com um eletrólito, produz corrente elétrica (Figura 3.1) (Aldabó, 2004; DOE, 2004; Fukurozaki, 2006).



**Figura 3.1 - Princípio de funcionamento de uma Célula a Combustível (CaC)**

A reação eletroquímica que ocorre nos eletrodos e produz a corrente elétrica somente acontece quando o ânodo e o cátodo são alimentados constantemente por um combustível (hidrogênio) e por um oxidante (oxigênio), respectivamente. Com o uso de um catalisador, o hidrogênio é separado em prótons e elétrons (íons de hidrogênio) que passam por um eletrólito no centro das CaC's e, com nova aplicação do catalisador, combinam-se com o oxigênio e elétrons no lado do cátodo, produzindo água em forma de vapor (Aldabó, 2004).

Segundo demonstra *Wendt et al* (2000), ocorrem as seguintes reações eletroquímicas na célula a combustível:

- ânodo:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  (1)
- cátodo:  $2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$  (2)

O potencial gerado por uma CaC depende do seu tamanho e, quando em operação, é capaz de fornecer entre 0,5 e 0,7V. Para aumentar o potencial útil em até 110 ou 220V, as células são agrupadas (empilhadas), dispostas e conectadas em série, formando os chamados *stacks* ou módulos (Negro, 2004; DOE, 2011a).

De acordo com o DOE (2011b), as CaC's são classificadas primariamente de acordo com o eletrólito utilizado, o que determina o tipo de reação química, a temperatura operante da célula, o combustível aplicado entre outros fatores.

### 3.1.3 TIPOS DE CaC's

De acordo com o descrito em DOE (2011b), existem vários tipos de células a combustível em desenvolvimento e cada uma delas possuem suas vantagens, desvantagens e aplicações.

Por razões de praticidade, as células a combustível são classificadas pelo eletrólito usado e os nomes e abreviações usados estão descritos a seguir (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004).

- Célula a Combustível Alcalina - *Alkaline Fuel Cell* (AFC)
- Célula a Combustível de Ácido Fosfórico – *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC)
- Célula a Combustível de Carbonato Fundido – *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC)
- Célula a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEM)
- Célula a Combustível de Óxidos Sólidos – *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC)

As principais características das diferentes células a combustível podem ser verificadas na Tabela 3.1 e são descritas na sequência (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004).

**Tabela 3.1** - Tipos de Células a Combustível e suas principais características

TIPO DE CÉLULA COMBUSTÍVEL	ELETRÓLITO	COMBUSTÍVEL	TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO (°C)	RENDIMENTO ELÉTRICO (%)	DIMENSÃO TÍPICA	APLICAÇÕES
AFC	KOH (hidróxido de potássio)	H <sub>2</sub> puro	60 - 90	55 - 60	< 7 kW	Militar; Espacial
PAFC	Ácido fosfórico	H <sub>2</sub>	200	35 - 45	200 kW	Distribuição geral
MCFC	Lítio, Potássio, Carbonato Fundido	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , CO	600 - 650	45 - 55	2 - 3 MW	Eletricidade; Grande distribuição geral
PEM	Membrana polimérica	H <sub>2</sub> puro	70 - 90	35 - 45	5 - 250 kW	Energia portátil; Pequena distribuição geral; Transporte
SOFC	Óxidos de Itria e Zircônio	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , CO	600 - 1000	45 - 55	Tubular: 100-500 kW Planar: 50 - 100 kW	Energia auxiliar; Eletricidade; Grande distribuição geral

### 3.1.3.1 CÉLULA A COMBUSTÍVEL ALCALINA (AFC)

A primeira célula alcalina, desenvolvida e aperfeiçoada depois pela NASA para aplicação espacial, foi construída em 1930, por *Bacon*, e operava a 200°C, usando eletrólito alcalino concentrado (KOH – 45%) e operava sob pressão entre 40 e 55 atmosferas (Aldabó, 2004).

Para *Wendt et al* (2000) e *Kordesh e Simader* (1996), as características principais da AFC são: uso do eletrólito do tipo KOH (OH<sup>-</sup>), a temperatura de operação está entre 60 e 90°C e possui eficiência teórica de 83%.

O emprego deste tipo de CaC tem como vantagens (DOE, 2004, Aldabó, 2004):

- Excelente desempenho com o hidrogênio e oxigênio;
- Flexibilidade no uso de catalisadores (níquel, prata, óxidos metálicos e metais nobres);
- Uso de materiais de baixo custo para confecção.

Já como desvantagens, tem-se (DOE, 2004, Aldabó, 2004):

- Sensibilidade do eletrólito ao CO<sub>2</sub>, havendo a necessidade de usar hidrogênio e oxigênio puros.

### 3.1.3.2 CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

De acordo com Aldabó (2004), a célula do tipo PAFC foi a primeira a ser comercializada, sendo que os maiores fabricantes desta tecnologia se encontram no Japão.

A PAFC usa como eletrólito o ácido fosfórico concentrado a 100% e opera com temperaturas entre 150 e 220°C. Para temperaturas abaixo deste patamar, o ácido fosfórico é um condutor iônico pobre e o monóxido de carbono (CO) contamina o catalisador de platina no ânodo. Além disto, o uso do ácido fosfórico concentrado minimiza a pressão de vapor de água e o manejo da água não é difícil (*Kordesh e Simader*, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004).

Kordesh e Simader (1996), Aldabó (2004), Negro (2004) e DOE (2004) concordam que o combustível que alimenta o ânodo (hidrogênio) deve ser puro e reformado externamente à célula, e alcança eficiência de cerca 50%.

Para Wendt *et al* (2000), a fabricação deste tipo de célula visava o mercado das usinas queimadoras de metano, tendo sido desenvolvida para aplicações estacionárias.

De acordo com DOE (2004), as principais vantagens no uso desta tecnologia estão descritas a seguir:

- A PAFC é muito menos sensível ao CO do que a PEM ou a AFC;
- A temperatura de operação é ainda baixa em relação à utilização de materiais de construção;
- Tem demonstrado maior eficiência do que a PEM (porém menor que a SOFC ou MCFC);
- O calor produzido pela PAFC pode rapidamente ser aproveitado em aplicações de co-geração.

O DOE (2004) apresenta as seguintes desvantagens desta célula:

- A reação de redução de oxigênio é lenta, exigindo o uso de catalisadores de platina;
- Apesar de menos complexo que na PEM, ainda é necessário o processamento do combustível para atingir um bom rendimento;
- A natureza corrosiva do ácido fosfórico requer o uso de materiais caros nos módulos.

### **3.1.3.3 CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC)**

Uma combinação de carbonatos alcalinos (sódio, potássio ou lítio), retidos em uma matriz cerâmica ( $\text{LiAlO}_2$ ), é normalmente a base do eletrólito utilizado nesta célula, que opera na faixa de 600 a 700°C. Não são necessários metais nobres para a operação e muitos hidrocarbonetos comuns podem ser reformados internamente (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004).

De acordo com DOE (2004), estas células foram desenvolvidas visando o uso estacionário e aplicações marinhas e as principais vantagens no seu emprego são:

- Os de catalisadores empregados são mais econômicos;
- A célula pode ser alimentada tanto com hidrocarbonetos quanto com monóxido de carbono;
- A reforma é feita internamente, aumentando assim sua eficiência (55%);
- O calor gerado pode ser aproveitado em turbinas ou co-geração.

Como desvantagens, DOE (2004) e Aldabó (2004) citam:

- O eletrólito é muito corrosivo;
- Devido às altas temperaturas de operação, há problemas com os materiais construtivos, o que diminui a estabilidade mecânica e a vida útil da célula.

#### **3.1.3.4 CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA TROCADORA DE PRÓTONS (PEM)**

Estas células trabalham em temperaturas baixas (menos de 100° C) e usam como eletrólito uma membrana polimérica, constituída do polímero Nafion<sup>®</sup>, capaz de conduzir prótons (Kordesh e Simader, 1996; DOE, 2004; Aldabó, 2004).

A corrosão é mínima, pois o único líquido utilizado é a água, porém o manejo da água na membrana requer atenção para melhorar sua performance, devendo a célula manter o equilíbrio entre a evaporação e a hidratação na membrana (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004).

Aldabó (2004) e DOE (2004) apontam as principais vantagens da operação de uma célula tipo PEM:

- A PEM tem um eletrólito sólido que provém excelente resistência ao gás;
- O acionamento é rápido, devido à baixa temperatura;
- A célula tem menor custo de produção;

- A célula é capaz de suportar variações de carga.

Aldabó (2004) cita como desvantagem, a necessidade do uso do catalisador de platina, pois a reação promovida por este material, em temperaturas abaixo de 150°C, libera CO.

Na mesma linha de raciocínio, para DOE (2004), a principal desvantagem na utilização desta CaC é a sua sensibilidade no que se refere aos contaminantes incluindo o CO, amônia e alguns compostos com enxofre.

### **3.1.3.5 CÉLULA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)**

#### **3.1.3.5.1 ELETRÓLITOS E MATERIAIS DAS SOFC'S**

Os eletrodos das SOFC's são constituídos por um composto cerâmico não poroso e rígido, normalmente com estrutura cristalina tipo perovskita (DOE, 2011b). Por outro lado, o eletrólito é constituído de zircônia estabilizada, na estrutura cúbica tipo fluorita.

Segundo DOE (2004) e Kordesh e Simader (1996), percebeu-se, em 1890, que alguns materiais cerâmicos conduziam íons em uma certa faixa de temperatura e, em 1943, foi demonstrado que estes materiais poderiam ser usados como eletrólitos nas CaC's. Nos dias atuais, o eletrólito é formado por zircônia ( $ZrO_2$ ) estabilizada com 8-10 mol% de ítria ( $Y_2O_3$ ), também conhecida como YSZ (*Yttrium Stabilized Zirconia*). Outros eletrólitos estão sendo desenvolvidos, por exemplo, zircônia dopada por escândio, que é melhor condutor, permitindo uma redução na temperatura de operação.

O ânodo é formado por Cermet (material composto de cerâmica e metal), constituído por partículas de níquel (Ni) dispersas em YSZ, e o cátodo é, geralmente, constituído por óxidos mistos do tipo  $La(Sr)_xMnO_{3+x}$  na estrutura perovskita (Negro, 2004).

Os interconectores são divididos em duas categorias: materiais de condutividade cerâmica (perovskita) para operações com alta temperatura (de 900 a 1000°C) e metálicos para temperaturas mais baixas. Os primeiros são ligas

cerâmicas tipo cromito de lantânio ou ítria. A condutividade eletrônica destes materiais aumenta com a temperatura. O maior problema encontrado nestes materiais são a rigidez e a baixa resistência à fratura, resultando em falta de flexibilidade para garantir boa pressão ao contato (Negro, 2004; Kordesh e Simader, 1996).

### 3.1.3.5.2 CONFIGURAÇÕES DA CÉLULA SOFC

As células do tipo SOFC são desenvolvidas em duas configurações básicas: a tubular e a planar (Kordesh e Simader, 1996).

- Tubular: a célula tubular mais conhecida foi desenvolvida pela empresa *Siemens*, cujo desenho é mostrado na Figura 3.2, onde a corrente é conduzida tangencialmente ao tubo (Negro, 2004; Kordesh e Simader, 1996).

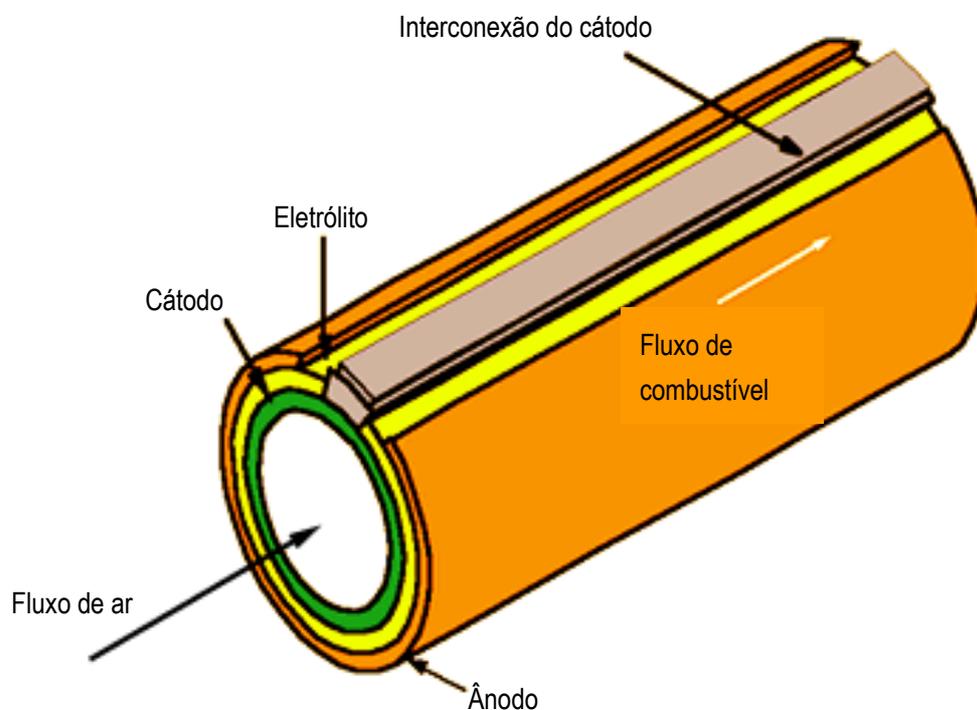
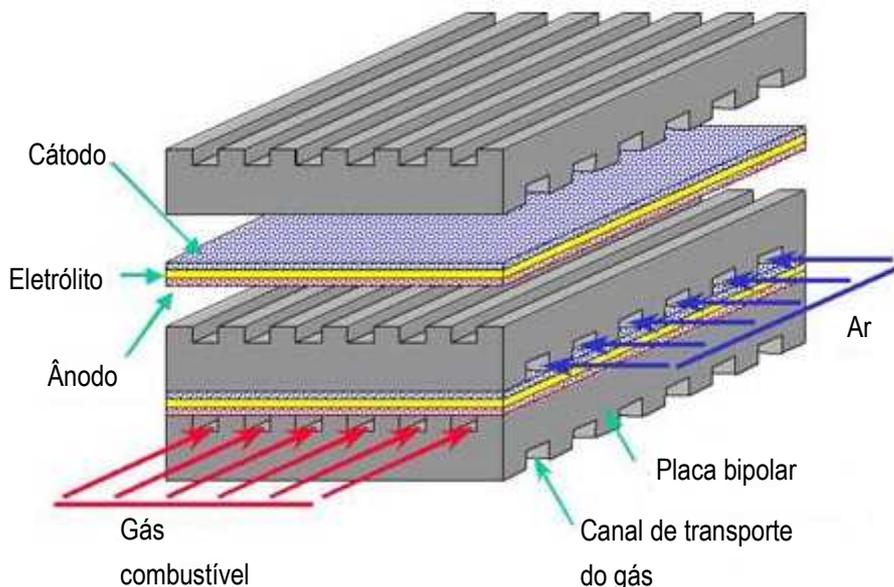


Figura 3.2 - Forma de uma Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC) Tubular – Fonte: Siemens (2011)

- Planar: são placas bipolares de aço inox de alto cromo e terras raras, que ajudam no coeficiente de expansão (Figura 3.3) (Negro, 2004).



**Figura 3.3 - Forma de uma Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC) Planar – Fonte: KIT (2011)**

A possibilidade de uso de catalisadores menos nobres é a principal vantagem desta célula de alta temperatura. Trabalhando em temperaturas entre 600 e 1000°C, as células de óxido sólido são as mais eficientes, entre as células a combustível. A temperatura elevada permite também a reforma interna do combustível, acarretando na utilização de diferentes tipos de combustíveis, bem como o emprego de catalisadores mais baratos. É uma célula que possui alta tolerância a impurezas e o calor liberado, nas reações da célula, podem ser facilmente transferidos e usados para a gaseificação de carvão ou reforma de hidrocarbonetos (Kordesh e Simader, 1996; Aldabó, 2004; Negro, 2004; DOE, 2004; Wendet *et al*, 2000).

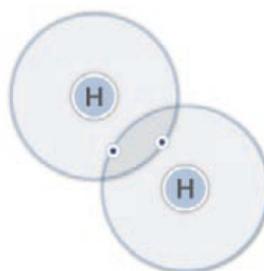
De acordo com Aldabó (2004), qualquer análise feita sobre células a combustível ou seu desenvolvimento deve, necessariamente, levar em consideração o cenário da tecnologia do hidrogênio, contemplando sua produção, armazenamento, distribuição e uso.

A seguir são discutidas as formas de produção do hidrogênio.

### 3.1.4 HIDROGÊNIO

Segundo Gomes Neto (2005), o hidrogênio originou-se na formação do Universo, há 15 bilhões de anos.

O hidrogênio é o mais simples e mais comum elemento encontrado no Universo, sendo que um átomo de hidrogênio tem somente um próton e um elétron. O gás de hidrogênio é uma molécula biatômica, onde cada molécula tem dois átomos de hidrogênio (o hidrogênio puro é expresso:  $H_2$  – ver Figura 3.4) (Koroneos *et al*, 2004; DOE, 2008).



**Figura 3.4 - Molécula de hidrogênio (Fonte: DOE, 2008)**

O hidrogênio está presente em praticamente todos os compostos da natureza, compondo 75% da massa do Universo e 90% das moléculas. O hidrogênio, nas condições normais de temperatura e pressão, é um gás incolor, inodoro, insípido e mais leve que o ar. No estado líquido, deve ser armazenado a baixíssimas temperaturas e ocupa um espaço 700 vezes menor que no estado gasoso. Possui a maior quantidade de energia por unidade volumétrica que qualquer outro combustível (no seu estado líquido representa cerca de três vezes mais calor que o petróleo) (DOE, 2008).

Por não ser um gás encontrado em depósitos geológicos identificados, como o gás natural ou óleo e carvão, não é considerado um combustível primário, e, assim como a eletricidade, o hidrogênio é um vetor de energia. Por ser uma molécula com grande capacidade de armazenagem de energia, está sendo utilizada como fonte renovável de energia elétrica e térmica, e projeta-se que será uma das mais importantes fontes energéticas do século XXI (Kordesh e Simader, 1996; Koroneos *et al*, 2004; Kothari *et al*, 2008; DOE, 2008; Xu *et al*, 2009).

Como descreve Gomes Neto (2005), o hidrogênio é um gás inflamável e explosivo, porém, quando manuseado de forma adequada, é muito mais seguro que outros combustíveis. O hidrogênio possui coeficiente de difusão bem alto, o que significa que, se bem armazenado e manuseado, o gás se dispersa rapidamente no ar e raramente ocorre sua explosão ao ar livre e, quando ocorre, a queima é mais rápida do que, por exemplo, com gasolina ou GLP (Gás Liquefeito de Petróleo).

Por não ser um gás tóxico, nem radioativo ou corrosivo, um vazamento acidental do hidrogênio não causaria nenhum tipo de catástrofe ambiental, o que pode ocorrer, por exemplo, com o petróleo. Os cilindros de armazenamento são projetados para resistir até três vezes à pressão de uso. Assim, mesmo ocorrendo qualquer acidente com um veículo, os cilindros estariam aptos a suportar o choque (Kordesh e Simader, 1996; Gomes Neto, 2005).

Gomes Neto (2005) aponta outras vantagens na utilização do hidrogênio como fonte de energia: quando queimado com oxigênio puro, os produtos gerados da queima são calor e água e, quando queimado com o ar, são formados alguns óxidos de nitrogênio (NOx) que são bem menos poluentes que os produtos gerados pela queima de combustíveis fósseis.

As vantagens da utilização do hidrogênio são tantas que a NASA, percebendo suas qualidades, tem utilizado o hidrogênio para propulsão de foguetes, por ser leve, ter grande capacidade de armazenar energia e, quando utilizado em células a combustível, gera como subproduto a água que é consumida pelos astronautas (Gomes Neto, 2005).

Atualmente, a maior parte do hidrogênio produzido no mundo é aproveitado como matéria prima na fabricação de fertilizantes, margarinas e plásticos e no resfriamento de geradores e motores (Gomes Neto, 2005).

#### **3.1.4.1 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO**

Para Gomes Neto (2005), a produção de hidrogênio é um dos grandes desafios a serem vencidos, pois a maior parte do hidrogênio, produzido

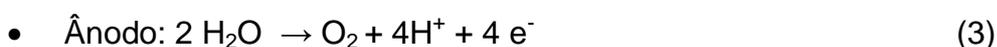
atualmente, é obtido a partir de combustíveis fósseis, como o gás de carvão, gás natural e reforma do petróleo. Sendo assim tem-se procurado novas alternativas na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis.

Por não se encontrar na natureza na forma pura, o hidrogênio, segundo o DOE (2008), obtido por qualquer método de produção, depende de outra fonte de energia (por exemplo, a eletrólise depende da eletricidade). Estão sendo desenvolvidas pesquisas para melhorar econômica e ambientalmente as técnicas de produção de hidrogênio com o intuito de diminuir o uso de outras fontes de energia.

Para Kordesh e Simader (1996), Koroneos *et al* (2004), Gomes Neto (2005), Kothari *et al* (2008), DOE (2008) e Holladay *et al* (2009), os principais métodos de obtenção de hidrogênio são os descritos na sequência.

#### 3.1.4.1.1 PROCESSOS ELETROLÍTICOS OU ELETRÓLISE

A eletrólise é realizada através do uso de eletricidade que divide a molécula de água (H<sub>2</sub>O) em hidrogênio e oxigênio. Consiste de um ânodo e um cátodo separados por um eletrólito. Dependendo do tipo de eletrólito, o meio de produção é levemente diferente. Por exemplo, para eletrólitos de membrana polimérica, a água do ânodo reage para formar oxigênio e carrega positivamente os íons de hidrogênio (reação 3) que se movem para o cátodo. No cátodo, conforme Figura 3.5, os íons de hidrogênio se combinam com os elétrons externos para formar o gás de hidrogênio (reação 4)



Para a utilização ambientalmente correta deste processo deve-se levar em consideração qual será a fonte de energia elétrica. São dois os melhores caminhos para produção de hidrogênio a partir da eletrólise, com baixa emissão de gases poluentes: eletrólise usando fontes renováveis de energia elétrica ou eletrólise nuclear a alta temperatura.

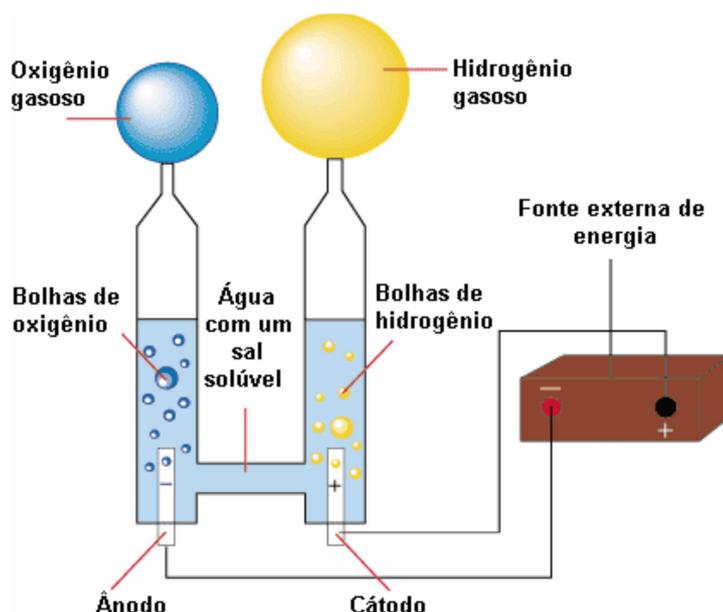


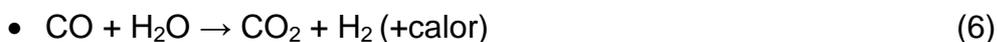
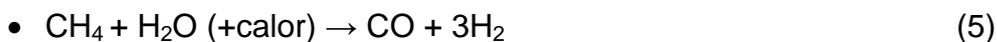
Figura 3.5 - Separação de Oxigênio e Hidrogênio da Água por Eletrólise. (Fonte: Longo *et al*, 2008)

### 3.1.4.1.2 PROCESSOS TÉRMICOS

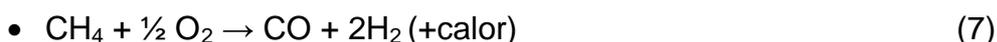
Estes processos se utilizam da energia calorífica de fontes como o gás natural, carvão ou biomassa associados a processos químicos para produzir o hidrogênio, conforme abaixo descritos (Kordesh e Simader, 1996; Koroneos *et al*, 2004; Gomes Neto, 2005; Kothari *et al*, 2008; DOE, 2008 e Holladay *et al*, 2009):

1. Reforma a vapor: O hidrogênio é produzido por meio da reforma a vapor de combustíveis como a gasolina, propano e etanol. No entanto, a maior parte do hidrogênio produzido atualmente é obtido pela reforma a vapor do metano ( $\text{CH}_4$ ). O metano reage com o vapor de água, a uma pressão abaixo de 3-25 bar e com temperatura de  $700^{\circ}\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ , na presença de um catalisador, produzindo hidrogênio, monóxido de carbono e uma pequena quantidade de dióxido de carbono (reação 5). O monóxido de carbono reage então com o vapor, usando um catalisador, e produz mais hidrogênio e dióxido de carbono, reação conhecida como reação de deslocamento água-gás (reação 6). No final do processo, impurezas e o dióxido de carbono são separados deixando puro hidrogênio. Apesar da reforma a vapor ser uma tecnologia bem desenvolvida, comparada com outra produção de hidrogênio, o investimento de equipamento, operação e

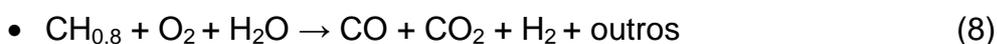
manutenção associados com a distribuição, não consegue competir como os combustíveis convencionais.



2. Oxidação parcial: A oxidação parcial é um processo parecido como a reforma a vapor, com a diferença de ser adicionado oxigênio ou ar às reações. O gás natural reage com uma limitada porção de oxigênio que não é capaz de oxidar totalmente os hidrocarbonetos até transformá-los em dióxido de carbono e água. Assim, conforme a reação 7, é produzido monóxido de carbono e hidrogênio, com pequena quantidade de dióxido de carbono, nitrogênio (caso seja utilizado o ar) e outros compostos. Diferentemente da reforma a vapor, a oxidação parcial não requer calor no processo, somente o libera.



3. Gaseificação: É o processo térmico que converte carvão ou biomassa em uma mistura gasosa de hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros componentes aplicando calor sob pressão na presença de vapor de água (reação 8 – carvão; reação 9 - biomassa). Filtros adequados separam o hidrogênio do restante do gás. Como nos processos anteriores, o monóxido de carbono pode reagir com água formando mais hidrogênio. Para viabilizar economicamente este processo é necessário baixar os custos do gaseificador e dos equipamentos de separação e purificação do hidrogênio (Figura 3.6).



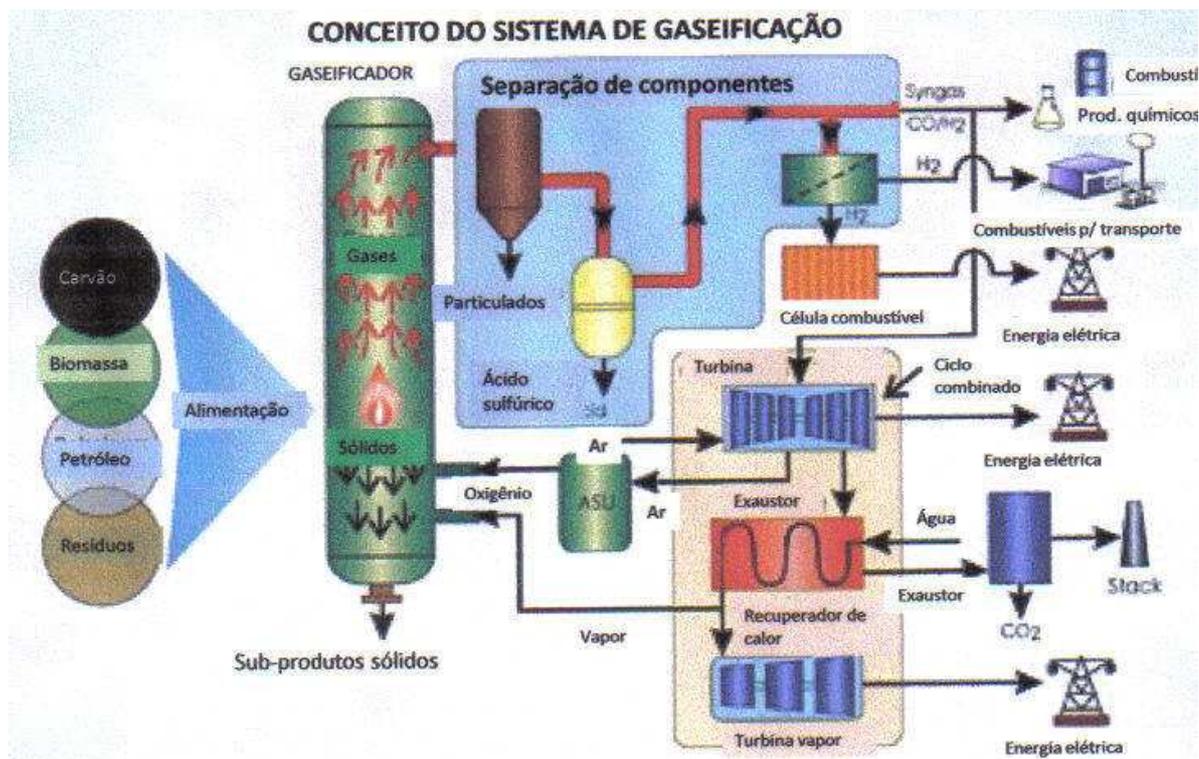


Figura 3.6 - Processo de Gaseificação (Fonte: DOE, 2008)

4. Pirólise: É um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, e também é a primeira fase do processo de combustão e gaseificação e vem seguido da oxidação total ou parcial dos produtos primários. O objetivo da pirólise é obter combustível líquido, conhecido como bio-óleo, que pode ser usado para aquecimento ou produção de energia. A vantagem sobre a gaseificação é que o combustível líquido é mais fácil de transportar que o gasoso ou sólido.

### 3.1.4.1.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS

De acordo com Hallenbeck e Benemann (2002), nos últimos trinta anos têm-se realizado inúmeras pesquisas sobre a produção de hidrogênio biológico.

O processo biológico de produção de hidrogênio é dependente da presença de enzimas produtoras de hidrogênio, que catalisam a mais simples reação química:  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$  (Hallenbeck e Benemann, 2002)

Longo *et al* (2008) e Hallenbeck e Benemann (2002) apontam diferentes processos de produção biológica do hidrogênio:

1. Biofotólise: Envolve reações fotossintéticas, onde a energia solar atua em um sistema biológico resultando na decomposição do substrato (geralmente a água) produzindo hidrogênio. A biofotólise é classificada como direta, quando são utilizadas diferentes espécies de algas verdes, e indireta, quando são usadas cianobactérias.

2. Fotofermentação: Para este processo, uma bactéria fotossintética, que produz hidrogênio durante seu metabolismo, utiliza ácidos orgânicos e álcoois como substrato, na presença de luz.

3. Fermentação anaeróbia: “*Dark fermentation*” é realizada por diversos microorganismos anaeróbios. Neste processo, os principais substratos para a produção de hidrogênio (misturado a outros gases no biogás) são os carboidratos, o amido, a celulose e os resíduos orgânicos.

Spiegel e Preston (2003) apontam que o biogás produzido em estações de tratamento de esgoto representa um caminho economicamente viável para o uso em CaC, pois toda a energia elétrica e térmica produzidas podem ser utilizadas diretamente nas Estações de Tratamento de Esgotos - ETE's. Estima-se que nos Estados Unidos seja possível produzir eletricidade por meio das CaC na ordem de 2 GW ,a partir de plantas de tratamento de esgoto.

## 3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO

### 3.2.1 NÍVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Como afirmam BNDES (1997) e Lima (2005), a implantação de um sistema de tratamento de esgotos tem por objetivo a remoção dos principais poluentes presentes nas águas residuárias, retornando-as ao corpo d'água sem alteração de sua qualidade.

As águas residuárias de uma cidade são geradas, de acordo com Spellman (2009), por cinco fontes:

- Resíduos humanos ou de animais: são aqueles produzidos por humanos e animais e são considerados os mais perigosos do ponto de vista de saúde pública, pois estão carregados de bactérias, vírus e outros micro-organismos.
- Resíduos domésticos: são os descartados das residências, contendo papel, produtos de limpeza, detergentes, lixo e outras substâncias descartadas no sistema de coleta.
- Resíduos Industriais: materiais descartados de processos industriais, e contêm, normalmente, produtos químicos, ácidos, álcalis, detergentes e materiais altamente tóxicos.
- Escoamento de águas pluviais: muitas redes coletoras são preparadas para receber águas de chuvas.
- Infiltração de águas subterrâneas: podem haver infiltrações por canos rachados.

O tratamento deve garantir a qualidade exigida para o uso (abastecimento doméstico, abastecimento industrial, irrigação, preservação da flora e fauna, lazer, geração de energia, transporte e diluição de desejos) e são definidos pela Resolução CONAMA nº 20, de 18/06/1986 (BNDES, 1997; Lima, 2005).

Segundo Spellman (2009), as plantas de tratamento são projetadas para o uso de processos naturais de purificação e para alcançar diferentes propósitos: a)

proteger a saúde pública; b) proteger sistemas de abastecimento de água; c) proteger a vida aquática e d) promover o melhor uso da água.

O parâmetro mais utilizado para definir um esgoto sanitário ou industrial é a Demanda Bioquímica por Oxigênio – DBO<sup>1</sup>, que pode ser aplicada na medição da carga orgânica imposta a uma estação de tratamento de esgotos e na avaliação da eficiência das estações - quanto maior a DBO maior a poluição orgânica. (BNDES, 1997).

Os corpos d'água podem se recuperar da poluição, ou depurar-se<sup>2</sup>, por meio de mecanismos naturais. Frequentemente, os mananciais recebem cargas de efluentes muito elevadas para sua vazão e não conseguem se recuperar pela autodepuração, havendo a necessidade da depuração artificial ou tratamento do esgoto (BNDES, 1997; Von Sperling, 2005).

Segundo Von Sperling (2005), no processo de autodepuração os compostos orgânicos são estabilizados, formando compostos como gás carbônico e água, não sendo muito prejudiciais do ponto de vista ecológico.

São vários os processos de tratamento que podem ser escolhidos em função da composição do esgoto e das características que se desejam para o efluente da estação depuradora (BNDES, 1997).

Estas características dependem da capacidade do corpo receptor de receber carga poluidora e dos usos da água a jusante do local de lançamento, o que também determina os níveis de tratamento para remoção de poluentes. (Von Sperling, 2005).

De acordo com Spellman (2009), Von Sperling (2005) e o relatório do BNDES (1997), de maneira geral, o tratamento do esgoto segue um fluxo que compreende os seguintes níveis:

- TRATAMENTO PRELIMINAR: Remoção de grandes sólidos e areia para proteger as demais unidades de tratamento, os dispositivos de transporte

---

<sup>1</sup> A DBO é a quantidade de oxigênio usada por uma população mista de microorganismos durante a oxidação aeróbia à temperatura de 20°C.

<sup>2</sup> Os fatores de autodepuração são a diluição, a reaeração, a sedimentação, a luz solar e a competição vital

(bombas e tubulações) e os corpos receptores. A remoção da areia previne, ainda, a ocorrência de abrasão nos equipamentos e tubulações e facilita o transporte dos líquidos. É feita com o uso de grades (Figura 3.7) que impedem a passagem de trapos, papéis, pedaços de madeira, etc.; caixas de areia, para retenção deste material; e tanques de flutuação para retirada de óleos e graxas em casos de esgoto industrial com alto teor destas substâncias. Remove os materiais que ocupariam capacidade sem ser tratada.



**Figura 3.7 - Gradeamento da Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí - Fonte: CSJ (2011)**

- **TRATAMENTO PRIMÁRIO:** Os esgotos ainda contêm sólidos não grosseiros em suspensão, cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a matéria orgânica contida no efluente. Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados através de mecanismos físicos, via decantadores (Figura 3.8). Os esgotos fluem vagarosamente pelos decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão de maior densidade sedimentem gradualmente no fundo, formando o lodo primário bruto. Os materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade, são removidos na superfície. A eliminação média do DBO nesta etapa é de 30%.



**Figura 3.8 - Decantadores Primários da Estação de Tratamento de Esgoto de Arrudas - Fonte: COPASA (2011)**

- **TRATAMENTO SECUNDÁRIO:** Processa, principalmente, a remoção de sólidos e de matéria orgânica não sedimentável e, eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo. Após as fases primária e secundária, a redução de DBO pode alcançar 90%. É a etapa de remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de lançamento previsto na legislação ambiental. Basicamente, são reproduzidos os fenômenos naturais de estabilização da matéria orgânica que ocorrem no corpo receptor, sendo que a diferença está na maior velocidade do processo, na necessidade de utilização de uma área menor e na evolução do tratamento em condições controladas. A matéria orgânica é convertida em sólidos estabilizados, dióxido de carbono e outros organismos. Na Figura 3.9 e Figura 3.10 pode-se observar duas etapas deste nível, a decantação secundária e a digestão anaeróbia do lodo produzido.



**Figura 3.9 - Decantador Secundário da Estação de Tratamento de Esgoto Caiçara - Fonte: BDT@ (2011)**



**Figura 3.10 - Digestores Anaeróbios da Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas - Fonte: COPASA (2011)**

- **TRATAMENTO TERCIÁRIO:** Remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis ou eliminação adicional de poluentes não degradados na fase secundária, por meio do uso de processos químicos, físicos e biológicos. Von Sperling (2005) aponta como sendo rara esta etapa em países em desenvolvimento.

A Tabela 3.2 mostra os tipos de poluentes removidos nos principais níveis de tratamento de esgotos, durante a fase líquida do tratamento.

**Tabela 3.2** - Poluentes removidos nos principais níveis de Tratamento de Esgoto

<b>PRINCIPAIS NÍVEIS DE TRATAMENTO</b>	<b>POLUENTES REMOVIDOS</b>
Preliminar	Sólidos grosseiros em suspensão
Primário	Sólidos em suspensão sedimentáveis DBO
Secundário	Sólidos não sedimentáveis DBO Eventualmente nutrientes Eventualmente patógenos
Terciário	Nutrientes Organismos patogênicos Compostos não biodegradáveis Metais pesados Sólidos inorgânicos dissolvidos Sólidos em suspensão remanescentes

Fonte: Von Sperling (2005)

Ainda segundo Von Sperling (2005), as metodologias para tratamento de águas residuárias possuem vários processos e variantes. Na Tabela 3.3 estão listados os principais processos, operações ou sistemas de tratamento utilizados em função dos poluentes removidos.

Na sequência, estão apresentados os sistemas de tratamento mais empregados em países de clima quente, como o Brasil.

**Tabela 3.3** - Processos, Operações e Sistemas de Tratamento para remoção de poluentes em esgotos domésticos

<b>POLUENTE</b>	<b>OPERAÇÃO, PROCESSO OU SISTEMA DE TRATAMENTO</b>
Sólidos em Suspensão	Gradeamento Remoção de areia Sedimentação Disposição no solo
Matéria Orgânica Biodegradável	Lagoas de estabilização e variações Lodos ativados e variações Reatores aeróbicos com biofilmes Tratamento anaeróbio Disposição no solo
Organismos Patogênicos	Lagoas de maturação Disposição no solo Desinfecção com produtos químicos Desinfecção com radiação ultravioleta Membranas
Nitrogênio	Nitrificação e desnitrificação biológica Lagoas de maturação e de alta taxa Disposição no solo Processos físico-químicos
Fósforo	Remoção biológica Lagoas de maturação e de alta taxa Processos físico-químicos

Fonte: Von Sperling (2005)

### 3.2.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO

As tecnologias de tratamento de efluentes nada mais são que o aperfeiçoamento do processo natural de depuração que ocorre nos cursos d'água, buscando reduzir seu tempo de duração e aumentar sua capacidade de absorção (BNDES, 1997).

O relatório do BNDES (BNDES, 1997) destaca, ainda, a importância da diminuição do consumo de recursos em instalações e operação e da melhora nos resultados em termos de qualidade do efluente lançado, sem deixar de considerar a dimensão da população a ser atendida.

Qualquer tecnologia empregada para o tratamento das águas residuárias gera, como subprodutos, o efluente tratado, o lodo e o biogás (BNDES, 1997).

O efluente tratado pode ser utilizado para fins não potáveis em áreas de escassez de água. O reuso da água, isto é, a utilização do efluente tratado em atividades que não necessitam de potabilidade, significa a economia de água potável (BNDES, 1997).

O lodo é o resultado da remoção da matéria orgânica contida no esgoto, cuja quantidade e natureza dependem de suas características e do processo de tratamento empregado (BNDES, 1997). O tratamento deste resíduo tem por objetivo, basicamente, a redução do volume e do teor de matéria orgânica e sua estabilização, considerando a disposição final, que, usualmente, pode ser: **a)** reciclagem agrícola; **b)** recuperação de áreas degradadas; **c)** disposição no solo (*landfarming*); **d)** uso na fabricação de lajotas, combustível e outros; **e)** incineração; **f)** aterro sanitário (BNDES, 1997; Von Sperling, 2005).

Sobre o biogás, existem inúmeros estudos para o seu aproveitamento racional, destacando-se sua utilização para geração de energia elétrica para a própria estação de tratamento de esgoto, além do uso como gás doméstico, industrial ou combustível para veículos (BNDES, 1997; Lima, 2005).

De acordo com BNDES (1997) e Von Sperling (2005), as principais tecnologias existentes para o tratamento do esgoto doméstico são:

- **DISPOSIÇÃO NO SOLO:** Sistema simplificado que requer áreas extensas nas quais os esgotos, após passarem pelos níveis de tratamento preliminar e primário, são aplicados por aspersão, vala ou alagamento, sofrendo evaporação ou sendo absorvidos pela vegetação. Pode gerar maus odores, insetos e vermes, além de apresentar risco de contaminação da vegetação, no caso de agricultura, dos trabalhadores envolvidos, do solo e do lençol freático. Os métodos de disposição podem ser: **a)** infiltração lenta; **b)** infiltração rápida; **c)** infiltração superficial; **d)** escoamento superficial; **e)** terras úmidas construídas (*wetlands*) (Fonseca, 2008; Von Sperling, 2005; BNDES, 1997). A Figura 3.11 ilustra o tratamento de efluente pelo sistema de terras úmidas ou

*Wetland* na ETE Ponte dos Leites, no Rio de Janeiro, enquanto a Figura 3.12 mostra o esquema deste tipo de tratamento.



Figura 3.11 - Sistema de Tratamento tipo “*Wetland*” Estação de Tratamento de Esgoto Ponte dos Leites – Araruama RJ – Fonte: Grupo Águas do Brasil (2011)

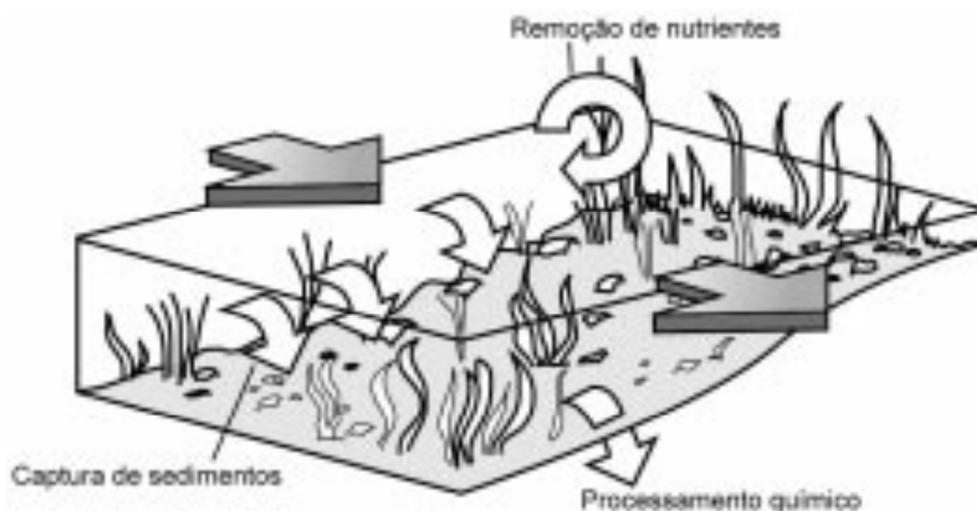
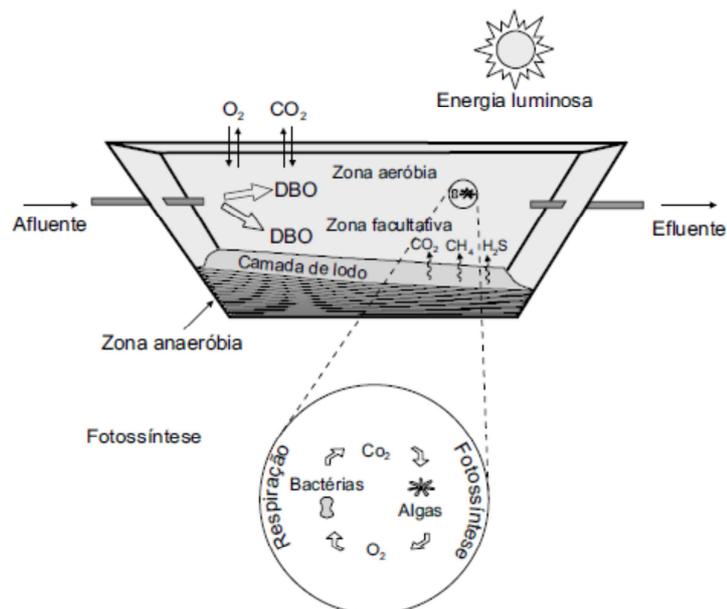


Figura 3.12 - Esquema de manutenção da qualidade da água das terras úmidas: remoção e retenção de nutrientes; redução da carga de sedimento pela sedimentação – Fonte: Von Sperling (2005)

- **LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO SEM AERAÇÃO:** Técnica simplificada que exige uma área extensa para a instalação da lagoa, na qual os esgotos sofrem o processo aeróbio de depuração graças à existência de plantas verdes que oxigenam a água. Sofre com a variação das condições atmosféricas (temperatura e insolação), produz maus odores, no caso das anaeróbias, e insetos. Esquema conforme Figura 3.13 (Von Sperling, 2005; Gonçalves, 2003; BNDES, 1997).



**Figura 3.13** Esquema simplificado de uma lagoa de estabilização - Fonte: Gonçalves (2003)

- **LAGOAS ANAERÓBIAS:** São lagoas mais profundas - até 4,5m - e reduzida área superficial. As bactérias anaeróbias decompõem a matéria orgânica em gases, sendo baixa a produção de lodo. Este tratamento é adequado para efluentes com altíssimo teor orgânico, a exemplo do esgoto de matadouros, não se aplicando aos esgotos domésticos, cujo DBO é inferior (Von Sperling, 2005; BNDES, 1997).
- **LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO AERADAS:** Sistema mecanizado e aeróbio, onde o oxigênio é fornecido por equipamentos mecânicos - os aeradores, como ilustra a Figura 3.14 - ou por ar comprimido por meio de um difusor submerso. A remoção do DBO é função do período de aeração, da temperatura e da natureza do esgoto. O despejo de efluente industrial deve ser controlado para não prejudicar a eficiência do processo. Os sólidos dos esgotos e as bactérias sedimentam, indo para o lodo do fundo, ou são removidos em uma lagoa de decantação secundária. O consumo de energia já é razoavelmente elevado. Em períodos entre 2 a 5 anos é necessária a remoção do lodo da lagoa de decantação (Von Sperling, 2005; BNDES, 1997).



Figura 3.14 - Fluxograma de um sistema de lagoas aeradas facultativas - Fonte: Von Sperling (2005)

- **SISTEMAS ANAERÓBIOS:** Sistemas que utilizam o filtro anaeróbio e o reator anaeróbio de manta de lodo. O primeiro é um tanque submerso no qual o esgoto, já decantado em uma fossa séptica, flui de baixo para cima para ser estabilizado por bactérias aderidas a um suporte de pedras (Von Sperling, 2005; BNDES, 1997).

A Figura 3.15 e a Figura 3.16 apresentam um fluxograma de um sistema utilizando o filtro anaeróbio e um esquema do filtro, respectivamente.

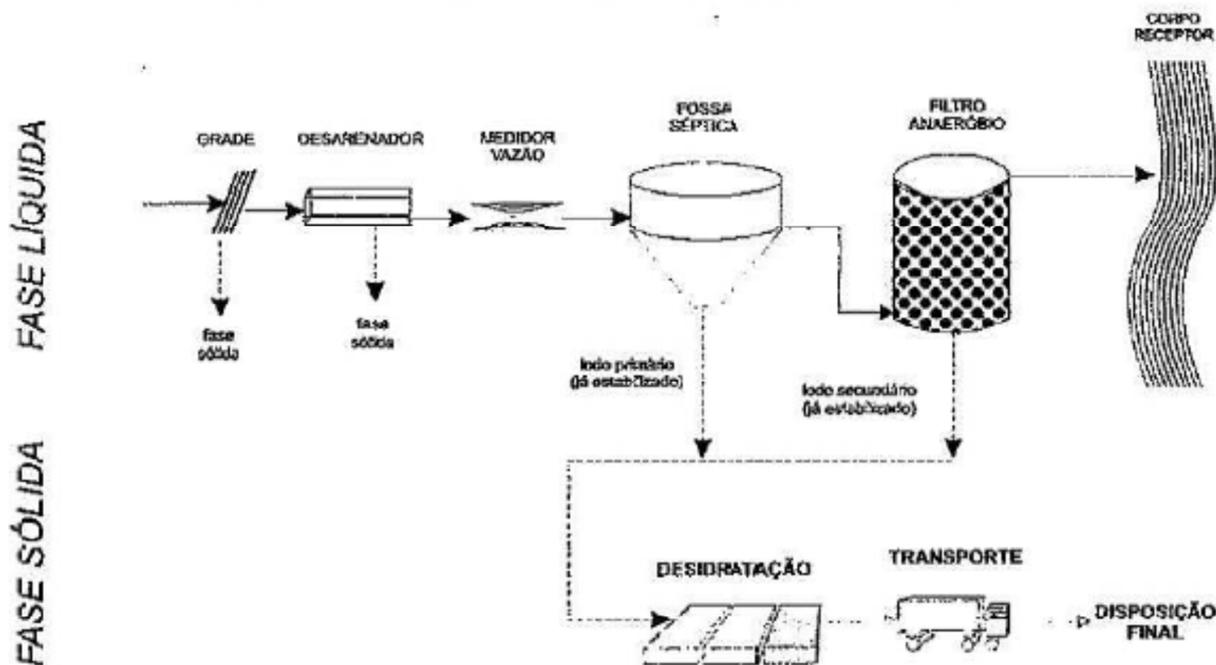


Figura 3.15 - Fluxograma de um sistema de fossa séptica seguida por filtro anaeróbio - Fonte: Von Sperling (2005)

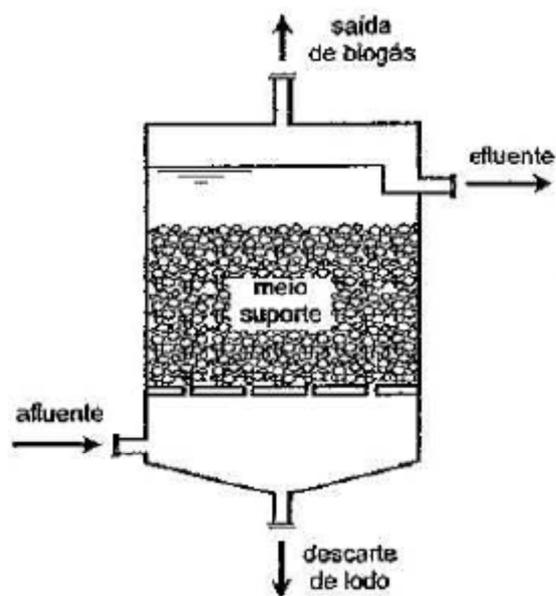


Figura 3.16 - Esquema de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente - Fonte: Von Sperling (2005)

O segundo, ilustrado na Figura 3.17, também conhecido com Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*, estabiliza a matéria orgânica usando as bactérias dispersas em um tanque fechado - o fluxo do esgoto é de baixo para cima e na zona superior há coleta de gás (Von Sperling, 2005; Campos, 1999; BNDES, 1997).

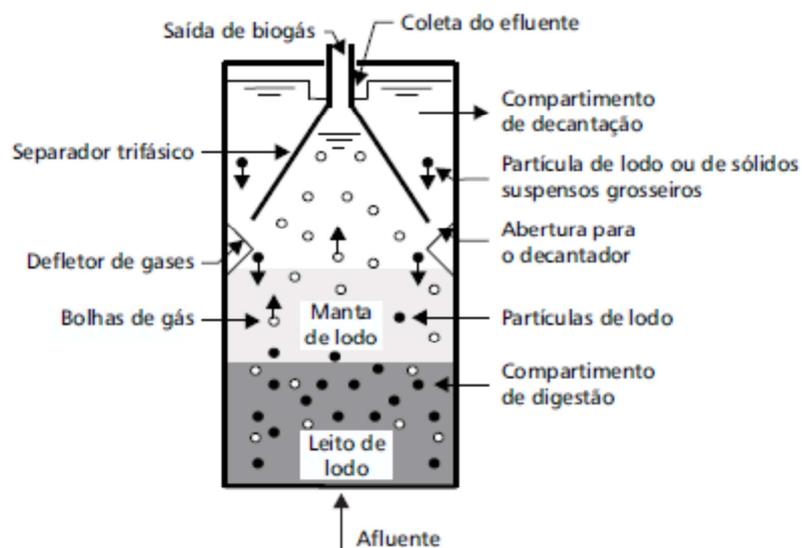


Figura 3.17 - Esquema de Funcionamento de um Reator UASB (Fonte: Campos, 1999)

- **FILTROS ANAERÓBIOS:** A estabilização da matéria orgânica é realizada por bactérias que crescem aderidas a um suporte de pedras ou materiais sintéticos (Figura 3.18). O custo de implantação é alto e há necessidade de tratamento do lodo gerado e sua disposição final. Entre os inconvenientes estão a dificuldade na operação de limpeza e a possibilidade de proliferação de insetos (BNDES, 1997; Campos, 1999).



**Figura 3.18 - Esquema de Filtro Anaeróbico de Fluxo Ascendente – Fonte: Campos (1999)**

- **LODOS ATIVADOS:** Sistema mecanizado e aeróbico. A remoção da matéria orgânica é feita pelas bactérias que crescem no tanque de aeração e formam uma biomassa a ser sedimentada no decantador. A instalação requer área reduzida, mas envolve a necessidade de diversos equipamentos (aeradores, elevatórias de recirculação, raspadores de lodo, misturador de digestor, etc.). Seu custo de implantação é elevado devido ao grau de mecanização e tem alto custo operacional graças ao consumo de energia para movimentação dos equipamentos. Necessita de tratamento para o lodo gerado, bem como sua disposição final. O esquema geral do tratamento de esgotos por lodos ativado está ilustrado na Figura 3.19 (Von Sperling, 2005; BNDES, 1997).

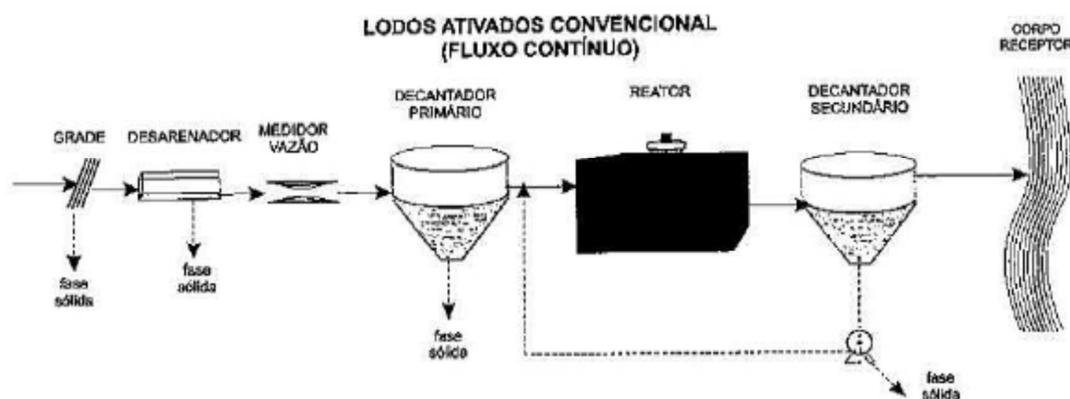


Figura 3.19 - Esquema de Sistemas por Lodos Ativados – Fonte: Von Sperling (2005)

No Tabela 3.4 estão identificadas algumas características dos sistemas de tratamento apresentados neste capítulo.

**Tabela 3.4 – Características dos Sistemas de Tratamento**

SISTEMA	VOLUME DE LODO LÍQUIDO A SER TRATADO (L/hab.ano)	EFICIÊNCIA TÍPICA DE REMOÇÃO DE DBO (%)	DEMANDA DE ÁREA (m <sup>2</sup> /hab)
Disposição no solo	-	80-90	3,0 - 5,0
Lagoa de Estabilização sem Aeração	55-160	75-85	1,5 - 3,0
Lagoas Anaeróbias	55-160	80-85	3,0 - 5,0
Lagoas de Estabilização Aeradas	30-220	75-85	0,25 - 0,50
Sistemas Anaeróbios (Reator UASB/RAFA)	70-220	60-75	0,08 - 0,2
Filtros Anaeróbios	25-50	80-85	0,2 - 0,35
Lodos Ativados	1100-3000	85-93	0,12 - 0,25

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005)

### 3.2.3 TRATAMENTO DE ESGOTO – SISTEMA DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL COM DIGESTÃO ANAERÓBIA DO RESÍDUO

Para Von Sperling (2005), o sistema de lodos ativados é utilizado especialmente em locais com reduzida disponibilidade de área e necessidade de elevada qualidade do efluente.

Para atingir-se o objetivo de redução de volume, deve-se aumentar a concentração de biomassa em suspensão no meio líquido, pois quanto mais bactérias suspensas, maior é a assimilação de matéria orgânica no esgoto bruto (Von Sperling, 2005).

O princípio do tratamento por lodos ativados é o retorno de parte do material recolhido nos decantadores ao sistema, aumentando a concentração de bactérias ativas. Este processo, em que os sólidos são bombeados do fundo da unidade de decantação para a unidade de aeração, chama-se recirculação ou retorno (Von Sperling, 2005).

O sistema de tratamento de esgotos convencional por lodos ativados consiste basicamente em duas etapas: o tratamento do efluente líquido (tratamento preliminar, primário e secundário) e do resíduo sólido (tratamento do lodo), mostrado na figura 3.20 (Sabesp, 2011b).

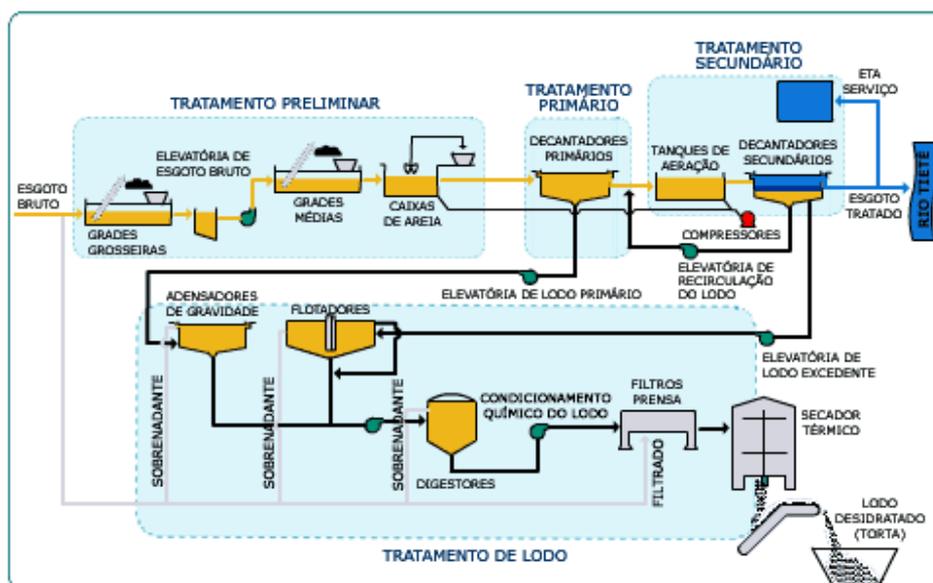


Figura 3.20 - Esquema Típico de uma Estação de Tratamento de Esgoto por Lodos Ativados - (Fonte: SABESP, 2011b)

De acordo com a SABESP (2011b), o tratamento do efluente líquido apresenta as seguintes etapas:

- **Gradeamento:** onde são removidos os sólidos de grandes dimensões de maneira a não danificar bombas e tubulações no restante do sistema.
- **Desarenação:** nesta etapa são removidos grãos de areia com o intuito de não obstruir tubulações, tanques, bombas, entre outros.
- **Decantador Primário:** no decantador, os sólidos em suspensão mais pesados se sedimentam formando o lodo primário que é encaminhado aos adensadores ou diretamente aos digestores.
- **Tanque de Aeração:** o efluente proveniente do decantador primário é levado ao tanque de aeração, onde, pelo processo aeróbio, as reações bioquímicas removem a matéria orgânica, convertendo-as em gás carbônico, água e reprodução de microrganismos, formando lodo e diminuindo a carga poluidora.
- **Decantador Secundário e Retorno do Lodo:** os sólidos em suspensão são separados, por meio da decantação, do efluente clarificado. Nesta etapa do processo, o efluente processado pode ser lançado nos corpos d'água receptores ou após tratamento, pode ser utilizado em lavagem de ruas ou rega de jardins. Parte do lodo produzido no decantador retorna aos tanques de aeração para manter a relação reação bioquímica necessária.

A fase líquida do tratamento termina no retorno do lodo. O volume do lodo nesta fase é muito grande (lodo do decantador primário e do decantador secundário), tornando-se necessário para etapas complementares de tratamento da fase sólida, que consiste nos seguintes estágios:

- **Adensamento do Lodo:** o lodo é adensado de maneira a diminuir o teor de umidade, tornando-o mais concentrado. Nem todas as estações de tratamento passam por esta etapa.
- **Digestão Anaeróbia:** todo o lodo produzido na fase líquida do tratamento vai para os digestores, nos quais, a partir de reações anaeróbias, as bactérias degradam a matéria orgânica produzindo o biogás e água, além de

estabilizar o lodo e reduzir microrganismos patogênicos. Nesta fase, o processo também diminui consideravelmente o volume do lodo.

- Queimadores: o biogás formado pela digestão anaeróbia é queimado, ou, caso a estação tenha secador térmico, é usado para obtenção de energia térmica.
- Condicionamento Químico do Lodo: através de polímeros orgânicos, os sólidos coagulam liberando água ajudando na fase da desidratação.
- Filtro Prensa de Placas: dotado de várias placas com telas filtrantes, que após o preenchimento com lodo por meio de bombeamento, força a remoção da água sob alta pressão. A torta proveniente do prensamento do lodo pode ser encaminhado para aterros ou para o secador térmico.
- Secador Térmico: reduz a umidade pela evaporação de água com aplicação de energia térmica, diminuindo drasticamente o volume final do lodo. O produto do secador pode ser utilizado como fertilizantes ou descartado em aterros.

Segundo Costa (2006), os processos de tratamento do esgoto comumente utilizam a digestão anaeróbia de matéria orgânica com o intuito de reduzir o potencial de contaminação do efluente, produzindo a torta e o biogás como resíduos do processo.

O biogás produzido no tratamento da fase sólida é composto principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) e o seu potencial energético geralmente não é aproveitado, sendo queimado em *flares* ou lançado na atmosfera (Costa, 2006).

### 3.3 BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica proveniente a partir de diferentes fontes: aterros, lodo de esgoto, digestores de resíduos (Coelho, 2006; Costa, 2006; Rasi, 2007; CETESB, 2011).

Esta mistura gasosa, rica em metano, além de ser um potente gás de efeito estufa, é também um gás com elevado poder energético (CETESB, 2011).

O biogás foi descoberto em 1667, também conhecido como gás dos pântanos, porém a presença de metano no biogás só foi verificada um século mais tarde.

No século XIX, um aluno de Louis Pasteur realizou a experiência de fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água a 35 °C e conseguiu obter 100 litros de gás por m<sup>3</sup> de matéria. Em 1884, durante a apresentação deste trabalho à Academia de Ciências, Louis Pasteur considerou que esta fermentação poderia produzir uma fonte de luz e calor (Costa, 2006; Pecora, 2006; Prati, 2010; CETESB, 2011).

No entanto, em 1859 a experiência da utilização do metano produzido por digestão anaeróbia já era realizada em Bombaim, Índia. Na Europa, a primeira utilização deste gás ocorreu 30 (trinta) anos após este primeiro aproveitamento, em 1895, quando foi usado o biogás, produzido em uma estação de tratamento de esgotos, para iluminação de algumas ruas de Exter, Inglaterra (Costa, 2006; CETESB, 2011).

Como expõe Costa (2006), devido às carências energéticas durante a 2ª Guerra Mundial, o biogás voltou a ser utilizado nas cozinhas, no aquecimento das casas e na alimentação de motores a combustão interna.

Nas duas décadas seguintes, com a abundância de fontes energéticas tradicionais, o biogás foi levado ao esquecimento por países desenvolvidos. Somente países como Índia e China e outros do terceiro mundo passaram a desenvolver seus modelos de biodigestor (Costa, 2006; Pecora, 2006; Prati, 2010; CETESB, 2011).

A partir da crise energética dos anos 70, países europeus passaram a aumentar a produção do gás metano com digestores anaeróbios com o objetivo de recuperar a energia gerada neste processo. Também nesta época, os digestores passaram a ser difundidos no Brasil, com o intuito de aproveitar os benefícios obtidos a partir do biogás e do biofertilizante. (Costa, 2006; Pecora, 2006; Prati, 2010; CETESB, 2011).

Na opinião de Costa (2006), Pecora (2006) e Prati (2010), até pouco tempo atrás, o biogás era definido como um subproduto da decomposição de lixo urbano, resíduos animais e lodo proveniente do tratamento de efluentes domésticos.

Atualmente, a alta dos preços dos combustíveis, a tentativa de diminuição da emissão dos gases de efeito estufa, além da busca pela utilização de fontes renováveis de energia, têm encorajado as investigações de novas fontes energéticas, tanto no sentido de serem economicamente atrativas quanto aquelas que reduzam o uso de recursos naturais (Costa, 2006; Pecora, 2006; Prati, 2010; CETESB, 2011).

Para a CETESB (2011), o uso do metano contido no biogás gera não só ganho energético, mas também ganhos ambientais, por reduzir emissões de poluentes na água, solo e ar.

Holm-Nielsen *et al.* (2009) afirmam que o biogás pode ser aproveitado de várias maneiras, tanto na forma bruta, quanto enriquecido. O gás deve ser, no mínimo, resfriado, drenado e seco imediatamente após sua produção.

Holm-Nielsen *et al.* (2009) indicam as várias formas de uso do biogás: **i)** produção de calor ou vapor; **ii)** produção de eletricidade por meio de co-geração; **iii)** fonte de energia industrial para calor, vapor, eletricidade e resfriamento; **iv)** uso como combustível para automóveis; **v)** produção de produtos químicos e/ou proteínas; **vi)** injeção nas redes de gás natural; e **vii)** combustível para CaC's.

Para Pecora (2006) e Costa (2006), digestores anaeróbios especialmente planejados produzem uma mistura gasosa que poderá ser usada como combustível que não produz gás tóxico. A eficiência na produção deste gás, além

de fatores como composição dos resíduos, umidade, pressão e temperatura de fermentação, determinarão a formação, quantidade e composição do biogás.

### 3.3.1 FORMAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é gerado através da digestão anaeróbia, processo fermentativo que tem por finalidade a remoção de matéria orgânica, formação de biogás e produção de biofertilizantes ricos em nutrientes (Pecora, 2006; Grande, 2011).

Segundo Grande (2011), a produção de biogás a partir de matéria orgânica é um processo complexo que envolve diferentes grupos de bactérias.

De acordo com Pierobon (2007), este processo, que se utiliza de seres do Reino das Archaeas<sup>3</sup> para atacar a estrutura de materiais orgânicos complexos, produz compostos simples como o metano, o dióxido de carbono e outros.

Para Costa (2006), Pecora (2006) e Pierobon (2007), a atividade enzimática das bactérias, durante o processo de digestão anaeróbia, depende dos parâmetros abaixo relacionados:

➤ Temperatura: a atividade enzimática das bactérias depende da temperatura, sendo que é fraca a 10 °C. Entre 20 °C e 45 °C ocorre a fase mesófila; entre 50°C e 65°C a fase é a termófila e, acima de 65 °C, as enzimas são destruídas, não havendo nenhum tipo de atividade. Variações de temperatura, desde que não sejam bruscas, são aceitáveis durante a fase mesófila. A fase termófila é onde ocorrem maiores taxas de produção de gás, porém esta fase não permite variações na temperatura.

➤ pH: a atividade enzimática é anulada em meios ácidos e, em meios alcalinos, a fermentação produz anidrido sulfuroso e hidrogênio. O pH ideal para a digestão é o neutro, entre 6,6 e 7,6, preferencialmente pH = 7.

➤ Composição do substrato: a composição ideal para a atividade enzimática é a relação entre carbono e nitrogênio aproximada de 30:1. Acima deste valor, o processo é pouco eficaz porque as bactérias não utilizam todo o

---

<sup>3</sup> Seres capazes de viver na ausência de oxigênio. Neste trabalho, estes seres serão chamados de bactérias, apesar de possuírem estrutura diferente delas.

carbono disponível, e, abaixo, corre-se o risco de aumentar a quantidade de amoníaco, que pode atingir os limites de toxicidade. Deve-se considerar também a presença de fósforo, já que a sua ausência interrompe a fermentação.

➤ Impermeabilidade ao ar: as bactérias são essencialmente anaeróbias. Na presença de ar, a decomposição produzirá somente dióxido de carbono.

➤ Umidade: dentro do digestor, o teor de água deve variar de 60 a 90% do peso do conteúdo total.

➤ Presença de materiais tóxicos: a presença de detergentes e outros produtos químicos devem ser evitados a fim de não provocar a intoxicação e morte das bactérias.

Como descrevem Claassen *et al.* (1999), Costa (2006) e Grande (2011), na primeira fase da digestão anaeróbia, também chamada de hidrólise, as bactérias convertem o material orgânico particulado em compostos dissolvidos a fim de que possam penetrar no interior das células e assim serem metabolizadas.

Na segunda fase, também conhecida por acidogênese ou acidificação, os substratos já no interior das células, são metabolizados em ácidos orgânicos, cetonas, álcoois,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  (Claassen *et al.*, 1999; Costa, 2006; Grande, 2011).

Na fase seguinte (acetogênese), segundo Claassen *et al.* (1999), Costa (2006) e Grande (2011), as bactérias acetogênicas desempenham papel importante entre a segunda e quarta fases. Estas bactérias produzem hidrogênio, capazes de converter ácidos graxos com mais de dois carbonos, em ácidos acéticos. Durante esta fase, a DBO é alta, indicando alta concentração de matéria orgânica.

A metanogênese é a última fase da digestão anaeróbia. Nesta etapa, os compostos formados durante a acetogênese são consumidos por bactérias estritamente anaeróbias, dando origem ao metano ( $\text{CH}_4$ ) e ao gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). O consumo dos ácidos voláteis faz o pH aumentar, enquanto a DBO diminui.

A Figura 3.21 ilustra o processo de decomposição anaeróbia e suas fases.

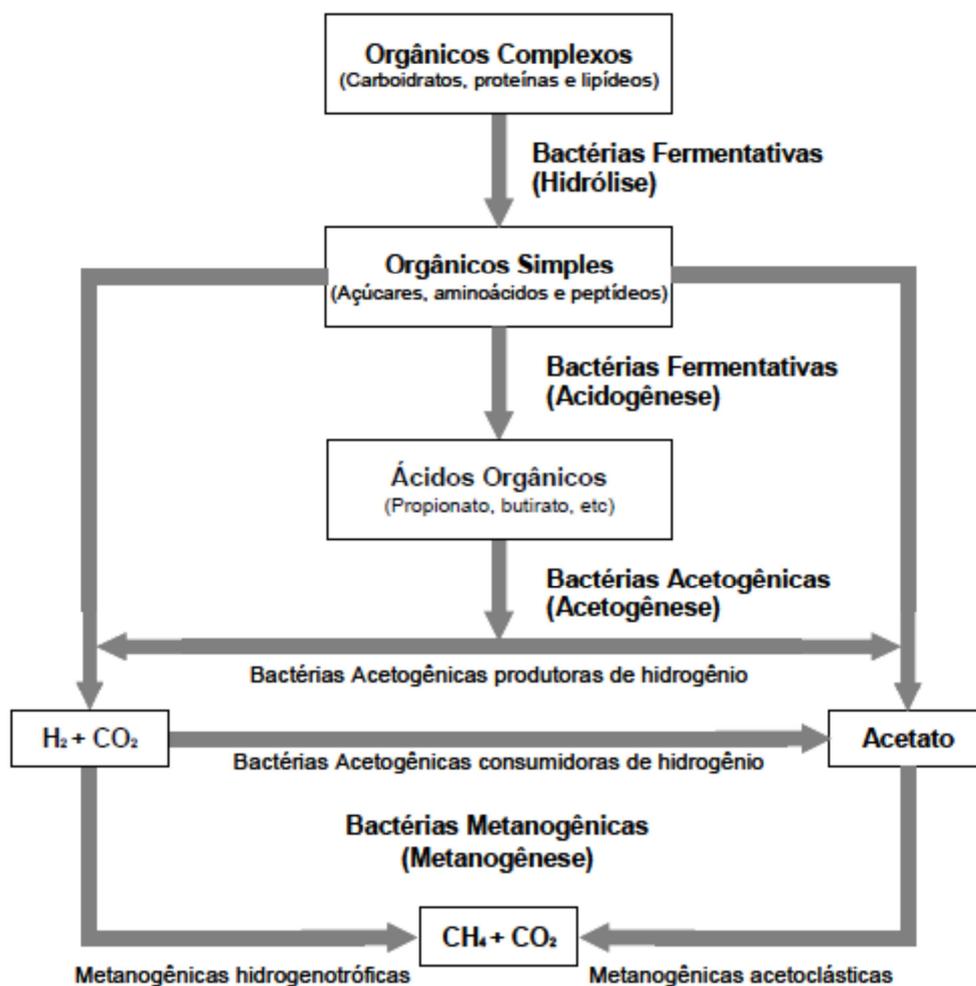


Figura 3.21 - Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia – Fonte: Sprenger (2009)

A composição do biogás, proveniente da digestão anaeróbia de matéria orgânica, é: metano, gás carbônico, nitrogênio, água, gás amoníaco, ácido sulfídrico, hidrogênio, entre outros.

### 3.3.2 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

Lima (2005) e Figueiredo (2007) definem o biogás como sendo um gás solúvel em água, cuja combustão não libera resíduos; não tóxico, porém que atua sobre o organismo humano diluindo o oxigênio e podendo provocar morte por asfixia.

Para Osorio e Torres (2009), além destas características, o biogás é também um gás incolor, inodoro, inflamável e mais leve que o ar.

De acordo com a Coelho (2006) e CETESB (2011), a composição do biogás é difícil de ser definida, pois depende de vários fatores, como por exemplo a composição do substrato (material orgânico), o que pode ser verificado no Tabela 3.5, que foi elaborado de acordo com diferentes estudos já realizados.

**Tabela 3.5** – Composição do Biogás a partir de diferentes substratos

	Metano	Dióxido de Carbono	Nitrogênio/ Amônia/ Oxigênio/ Outros gases	Referência
<b>Digestão de efluentes domésticos (esgotos)</b>	60,0%	40,0%	-	Spiegel e Preston (2003)
	66,5%	30,5%	0,5%	Coelho <i>et al.</i> (2006)
	50% - 90%	10% - 50%	< 1%	Costa (2006)
	55% - 65%	35% - 45%	< 1%	Rasi, Veijanen e Rintala (2007)
	63%	33,60%	3,4%	Jungbluth <i>et al.</i> (2007)
	60% - 70%	300% - 40%	< 1%	Osorio e Torres (2009)
	60%	40%	-	Farhad, Yoo e Hamdullahpur (2010)
	70% - 90%	30% - 40%		Grande (2011)
<b>Digestão de resíduos orgânicos</b>	60% - 70%	30% - 40%	< 1%	Rasi, Veijanen e Rintala (2007)
<b>Digestão em aterros</b>	55% - 70%	30% - 45%	-	Claassen <i>et al.</i> (1999)
	45% - 55%	30% - 40 %	5% - 15%	Rasi, Veijanen e Rintala (2007)
	67%	32,05%	< 1%	Jungbluth <i>et al.</i> (2007)
<b>Digestão de resíduos (sem especificação de procedência)</b>	57% - 66%	33% - 39%	1% - 15%	Spiegel e Preston (2000)
	60% - 80%	20% - 40%	-	Effendi <i>et al.</i> (2005)
	60%	35%	5%	Pecora (2006)
	55% - 70%	27% - 44%	< 4%	Kolbitsch, Pfeifer e Hofbauer (2007)
	55% - 75%	25% - 45%	0 – 7%	Pierobon (2007)
	40% - 75%	25% - 40%	< 2%	Salomon e Lora (2009)
	55% - 65%	30% - 45%	-	Xu <i>et al.</i> (2009)
	50% - 70%	25% - 50%	0 – 14%	CETESB (2011)
<b>Digestão de produtos agrícolas</b>	55%	45%	-	Jungbluth <i>et al.</i> (2007)
	60%	40%	-	Shitori <i>et al.</i> (2010)
<b>Digestão de resíduos indústria alimentícia</b>	50%	50%	-	Jungbluth <i>et al.</i> (2007)
	60%	-	-	Patterson <i>et al.</i> (2011)

Basicamente, os principais gases que compõem o biogás são: metano ( $\text{CH}_4$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) (Lima, 2005).

Para Lima (2005) e Figueiredo (2007), o biogás é uma fonte de energia primária, podendo substituir outros combustíveis na indústria. A Tabela 3.6 apresenta a equivalência energética entre diversos combustíveis e o metano, que é determinada levando-se em consideração o PCI (poder calorífico inferior) de cada combustível.

**Tabela 3.6** - Equivalência entre o Metano e outros combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Valor equivalente a 1 m<sup>3</sup> de metano</b>
Carvão vegetal	0,90 Kg
Carvão mineral	1,40 Kg
Lenha	1,50 Kg
Óleo diesel	0,60 L
Gasolina amarela	0,70 L
Álcool anidro	1,10 L
Álcool hidratado	1,14 L
Bagaço de cana	3,00 Kg
Gás liquefeito de petróleo	0,20 m <sup>3</sup>
Gás Natural	0,64 m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado de Lima (2005)

Conforme afirma Figueiredo (2007), visto que o biogás é composto por diferentes gases, porém os mais significativos são o metano e o gás carbônico, pode-se restringir o estudo das propriedades físico-químicas a apenas estes componentes.

Figueiredo (2007) atesta ainda que, de acordo com a quantidade de  $\text{CH}_4$  existente no biogás, seu poder calorífico aumenta, não dependendo do volume de  $\text{CO}_2$ , pois este gás não pode ser queimado e seu PCI é igual a zero. A Figura 3.22 mostra o poder calorífico inferior do biogás dependendo a concentração de metano que o compõe.

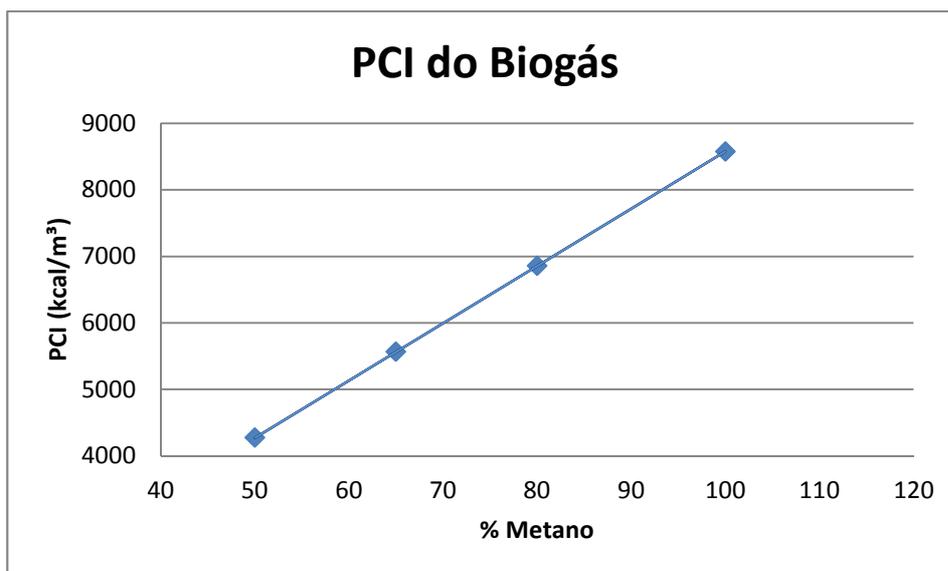
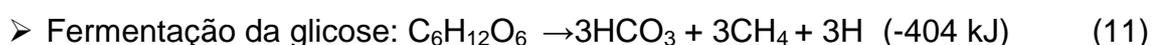
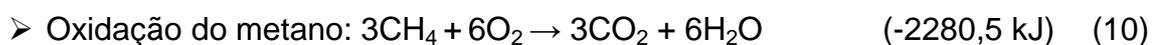


Figura 3.22 - Poder Calorífico Inferior por concentração de Metano - Fonte: Adaptado de Lima (2005)

Na digestão anaeróbia, a energia química existente nos compostos orgânicos é conservada no metano. Se a glicose é fermentada metanogenicamente, a energia tem uma variação de - 404 kJ/mol, e a oxidação do metano por mol de glicose produz - 760,2 kJ/mol (Claassen *et al.*, 1999, Costa, 2006).

Claassen *et al.* (1999) e Costa (2006) demonstram a reação exotérmica de oxidação do metano (reação 10), onde é liberada maior energia quando comparada com a fermentação da glicose (reação 11), de acordo com as equações:



De acordo com Osorio e Torres (2009) para se utilizar a energia obtida no biogás, ele deve ser enriquecido e os poluentes existentes eliminados deixando-se sobrar apenas o metano ( $\text{CH}_4$ ). Esta purificação é realizada tanto para preencher os requisitos necessários dos equipamentos que utilizarão este combustível como para melhorar o poder calorífico do biogás e uniformizar sua qualidade.

### 3.3.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Para Costa (2006), os sistemas de limpeza de gases são desenvolvidos para corrigir as propriedades naturais do biogás, removendo substâncias como água, ácido sulfídrico e dióxido de carbono.

A Tabela 3.7 mostra as principais impurezas contidas no biogás e as da utilização deste gás sem o devido tratamento.

**Tabela 3.7 - Impurezas do Biogás e suas consequências**

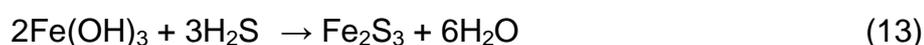
Impurezas	Consequências
Água	Corrosão em dutos, tanques e equipamentos devido à reação com H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> e CO <sub>2</sub> formando ácidos Acúmulo de água na tubulação Condensação ou resfriamento (durante pressurização)
Poeira	Depósito de sujeira em dutos, tanques e equipamentos
H <sub>2</sub> S	Corrosão em dutos, tanques e equipamentos Formação de SO <sub>2</sub> e SO <sub>3</sub> devido à combustão - mais tóxico que H <sub>2</sub> S e em contato com água são corrosivos
CO <sub>2</sub>	Diminuição do poder calorífico inferior (PCI)

Fonte: Adaptado de Ryckebosch (2011)

Grande (2011) e Ryckebosch *et al.* (2011) indicam alguns passos que envolvem o tratamento e purificação do biogás: remoção de impurezas (sobretudo compostos de enxofre), remoção de água e o processo de enriquecimento, que consiste na remoção de CO<sub>2</sub>.

Ryckebosch *et al.* (2011) indicam alguns métodos para a remoção de H<sub>2</sub>S:

- i. Adsorção, usando óxido ou hidróxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou 2Fe(OH)<sub>3</sub>): O H<sub>2</sub>S reage com o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou com o 2Fe(OH)<sub>3</sub> formando sulfeto de ferro (reação 12 e reação 13). Normalmente, o gás passa por uma lã de aço para promover a reação.



- ii. Absorção com líquidos: pode ser tanto física como química. A absorção física envolve o consumo de grande quantidade de água. A absorção química pode usar: **1.** Solução diluída de hidróxido de sódio (NaOH), formando sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) ou hidrossulfeto de sódio (NaHS). Os sais de sódio não são regenerativos e deve-se prever disposição final. **2.** Solução de cloreto ferroso (FeCl<sub>2</sub>): formação de sulfeto de ferro (FeS) insolúvel que precisa ser removido. **3.** Solução de hidróxido de ferro (Fe(OH)<sub>3</sub>).
- iii. Membrana de separação: O H<sub>2</sub>S pode ser separado do gás, quando este passa por uma membrana semi-permeável. Os gases H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> passam pela membrana, enquanto o CH<sub>4</sub> é retido.
- iv. Adsorção com carvão ativado: O carvão ativado é comumente dosado com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para melhorar a reação. Neste filtro, o H<sub>2</sub>S é convertido em enxofre e água (reação 14):



Tanto Grande (2011) como Ryckebosch *et al.* (2011) descrevem as quatro principais técnicas para a remoção do CO<sub>2</sub>:

- i. Absorção física: Esta técnica consiste em separar o CO<sub>2</sub>, lavando o gás com água a alta pressão (100 a 2000 kPa).
- ii. Absorção química: Ao invés de utilizar água, lava-se o gás com polietilenoglicol.
- iii. Membrana de separação: ocorre o mesmo princípio de separação para o H<sub>2</sub>S. São utilizadas fibras produzidas por diferentes polímeros.
- iv. Tecnologia PSA (*Pressure Swing Adsorption*): É a segunda técnica mais empregada, só ficando atrás da absorção física. O PSA usa uma coluna preenchida com carvão ativado, sílica gel, alumina ou zeólito. O biogás é comprimido, colocado em contato com o adsorvente que irá reter o CO<sub>2</sub>. O metano é recuperado no topo da coluna. Dependendo o adsorvente usado, a umidade existente no gás pode ser removida durante este processo.

Segundo El Fadel e Massoud (2001), emissões, na forma de metano e dióxido de carbono, resultantes da emissão direta à atmosfera ou da queima do biogás, produzidos no tratamento de efluentes municipais e industriais, contribuem significativamente para o potencial de aquecimento global. Desta maneira, diversos esforços em pesquisa têm sido conduzidos no sentido de reaproveitar a energia do biogás da ETE (Osório e Torres, 2009).

Para promover o uso racional dos recursos não renováveis e mitigar os impactos relacionados às mudanças climáticas Patterson *et al* (2011) apontam que a Avaliação do Ciclo de Vida oferece um caminho no qual o desempenho de várias infraestruturas de produção de biogás podem ser avaliadas.

### 3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

O aumento da consciência ambiental tem levado vários segmentos da sociedade, em especial, o comércio e a indústria, a pensar nas consequências que suas atividades estão causando ao meio ambiente, seja na questão da depredação e degradação dos recursos naturais ou no descarte dos rejeitos ou dos produtos no fim de suas vidas. Portanto, muitas empresas têm usado “processos verdes” na sua linha de produção ou têm desenvolvido “produtos verdes”. Para a produção destes bens “ecologicamente corretos”, cujo objetivo é poluir o mínimo possível, tem sido utilizada uma ferramenta gerencial valiosa conhecida como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (EPA, 2006).

A ACV teve seu início da década de 60, do século passado. Na Conferência Mundial de Energia, em 1963, Harold Smith divulgou seus estudos sobre o cálculo da energia necessária para a produção de produtos químicos, tendo sido esta a primeira publicação do gênero. Alguns outros estudos publicados, também na década de 60, previam os efeitos do crescimento da demanda de matérias primas e dos recursos energéticos (EPA, 2006).

No ano de 1969, a Coca-Cola encomendou um estudo para analisar qual a embalagem de refrigerante gerava menor impacto ambiental. O processo de quantificação da utilização dos recursos naturais e dos índices de emissão, utilizado pela Coca-Cola, ficou conhecido, nos Estados Unidos, como REPA – *Resource and Environmental Profile Analysis* (Análise do Perfil Ambiental e de Recursos) e na Europa, como *Ecobalance* (Balanço Ecológico). Outras empresas começaram então a se utilizar da REPA (Baumann e Tillman, 2004; EPA, 2006).

Entre 1970 e 1975, com a crise do petróleo e a necessidade de economia do consumo de energia, a EPA - *Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental), dos Estados Unidos, iniciou os estudos para definição de protocolos e metodologias que aprimorariam a REPA e surgiu então a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV (*Life Cycle Assessment – LCA*) (Baumann e Tillman, 2004; EPA, 2006).

Em 1985, a Comunidade Européia criou a “*Liquid Food Container Directive*”, que obrigava as empresas a monitorar o consumo de matéria prima,

energia e lançamento de resíduos durante a fabricação de seus produtos. Assim, o Ministério de Meio Ambiente da Suíça iniciou o desenvolvimento da sua própria ferramenta, resultando no primeiro software com dados atualizados, o Ökobase I e II (EPA, 2006).

No início da década de 90, empresas passaram a se utilizar da ACV de maneira deturpada, apenas com o intuito de fazer marketing e promover seus produtos. A preocupação com o uso indevido da ACV levou, entre 1997 e 2002, a ISO - *International Standards Organization* (Organização Internacional de Normas/Padrões) a desenvolver a padronização dos termos e critérios a serem empregados (Chehebe, 2002).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em novembro de 2001, a primeira versão da NBR/ISO 14.040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura (Ribeiro, 2003). As versões mais atuais da norma foram publicadas em 2009: NBR/ISO 14.040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura e NBR/ISO 14.044 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

### **3.4.1 CONCEITO**

Todo produto, processo ou serviço, não importa de que material seja feito, provoca antes, durante e/ou depois do seu processo produtivo um impacto ao meio ambiente (Chehebe, 2002).

De acordo com a European Commission (2010a), Baumann e Tillman (2004) e Chehebe (2002), o conceito de ciclo de vida de um produto pode ser entendido intuitivamente: a ACV permite avaliar os aspectos ambientais e os impactos associados a um determinado produto, englobando todas as etapas de vida do mesmo, desde a extração de recursos, passando pela produção, uso e reciclagem, até o descarte do produto remanescente. O produto é analisado desde seu nascimento até o seu descarte final, abordagem conhecida como “*cradle-to-grave*”, ou seja, do berço ao túmulo, do nascimento à morte.

O ciclo se inicia com a extração da matéria prima do solo para criar um produto e acaba quando todos os materiais retornam para a terra. A ACV avalia todos os estágios da vida do produto, considerando que cada um deles é interdependente, incluindo impactos muitas vezes não considerados em análises tradicionais (por exemplo, a extração da matéria prima, o transporte de materiais, descarte final do produto, etc) (EPA, 2006).

O uso dos recursos naturais, da energia e das emissões de poluentes é descrito em termos quantitativos de acordo com os estágios do ciclo de vida: **i)** aquisição de matéria prima; **ii)** manufatura, processamento, fabricação; **iii)** distribuição e transporte; **iv)** uso, reuso, manutenção; **v)** reciclagem, disposição final, conforme ilustrado na Figura 3.23 (Schenck, 2000; Baumann e Tillman, 2004; Prado e Kaskantzis Neto, 2005)



Figura 3.23 - Estágios do Ciclo de Vida de um produto (Prado e Kaskantzis Neto, 2005)

Para Chehebe (2002), a Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta imprescindível que tem por objetivo fornecer informações importantes capazes de tornar a atuação e gerenciamento ambiental mais responsável.

Baumann e Tillman (2004) afirmam que a Avaliação do Ciclo de Vida é mais que isto. É todo um procedimento de como os estudos devem ser feitos e interpretados, levando-se em consideração as diferentes fases da ACV.

A European Commission (2010a, 2010b) define ACV como sendo um método estruturado, abrangente e padronizado internacionalmente que quantifica todas as emissões pertinentes, os recursos consumidos, os impactos relacionados ao ambiente, saúde e questões de esgotamento dos recursos, que estão associados a qualquer produto e/ou serviço.

### **3.4.2 USOS**

A grande discussão iniciada por ambientalistas na Europa, na década de 80, levou a sociedade a analisar a questão ambiental sob o enfoque holístico e não mais centrado no sistema produtivo industrial. Assim, passou a se levar em consideração, além da produção industrial e de energia, o ato do consumo como importante fonte de poluição. Iniciou-se a corrida por informações sobre os produtos e desenvolveram-se os selos verdes na Europa e rótulos ambientais no Brasil, todos eles baseados em análises do ciclo de vida dos produtos (Chehebe, 2002).

Algumas empresas resolveram, por considerarem importante nas decisões de investimento e desenvolvimento, procurar novas ferramentas de gerenciamento ambiental e identificaram a ACV como sendo uma técnica que quantifica e compara de maneira integrada o desempenho ambiental dos produtos (Chehebe, 2002).

Assim, segundo Baumann e Tillman (2004), Chehebe (2002) e Schenck (2000), algumas razões para o uso da ACV são:

- Encorajar as indústrias a considerar as questões ambientais;

- Ajudar a melhorar a compreensão dos aspectos ambientais ligados aos processos produtivos;
- Servir de subsídio de marketing;
- Identificar a oportunidade de melhoria do aspecto ambiental, considerando qualquer fase da produção;
- Ajudar na tomada de decisões, estabelecendo prioridades e determinando qual fase da produção é mais impactante;
- Avaliar a seleção de componentes feitos de diferentes materiais;
- Estabelecer a medida do desenvolvimento e progresso do produto/processo/serviço;
- Avaliar o desempenho final ambiental.

### 3.4.3 FASES DA ACV

Para a EPA (2006), a técnica da ACV pode ser associada a produtos, processos ou serviços da seguinte maneira:

- Fazendo um inventário da entrada de energia e materiais e emissões no meio ambiente;
- Avaliando os potenciais impactos associados com as entradas e emissões identificadas;
- Interpretando os resultados para ajudar os tomadores de decisão.

A European Commission (2010b, 2010c), a NBR/ISO 14.044 (2009), a EPA (2006), Prado e Kaskantzis Neto (2005), Baumann e Tillman (2004), entre outros, definem a ACV como um processo sistemático que consiste em quatro fases: **i)** definição de objetivos e escopo; **ii)** análise do inventário; **iii)** avaliação do impacto; e, **iv)** interpretação. (Figura 3.24)

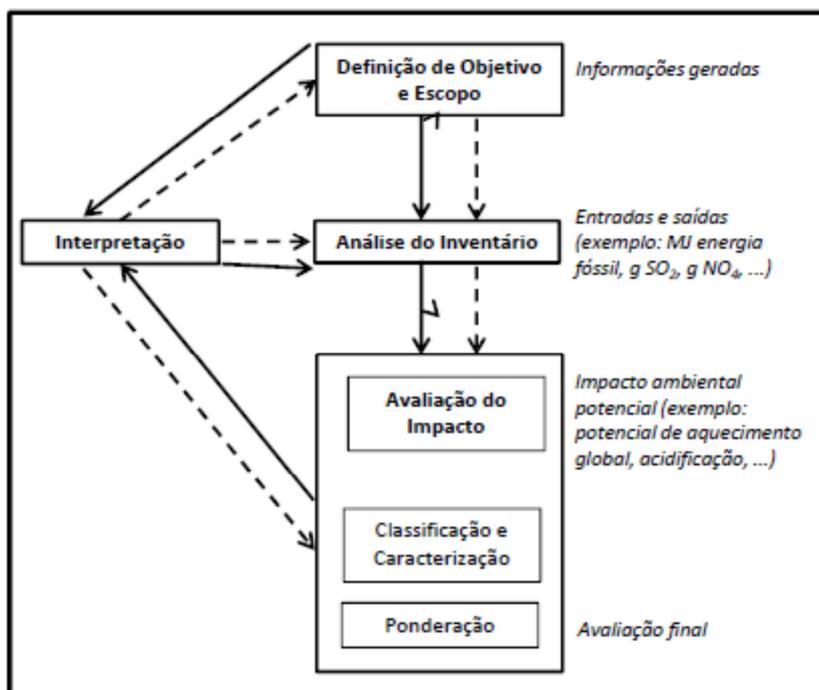


Figura 3.24 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida, onde as formas indicam as etapas do processo, as setas cheias mostram a ordem que ele deve seguir e as setas pontilhadas sugerem possíveis interações entre as fases. (Adaptado de: European Commission, 2010a, 2010b, Baumann e Tillman, 2004 e EPA, 2006).

### 3.4.3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

É nesta fase que se define e descreve o produto, processo ou serviço, estabelecendo-se os limites e os efeitos ambientais a serem estudados. Segundo a European Commission (2010b), esta fase deve ser desenvolvida independente se o estudo da ACV é limitado ao desenvolvimento de um conjunto de dados de uma parte de um processo ou se é um estudo de ACV completo.

A NBR/ISO 14.044 (2009) determina que seja especificada, de forma clara, a utilização dos resultados do estudo, bem como a quem se destina e qual processo de revisão se pretende adotar.

Segundo a NBR/ISO 14.044, o elemento mais importante na definição do escopo é a especificação da unidade funcional, que é definida como sendo o “desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência” (NBR/ISO 14.044, 2009). Portanto, a unidade

funcional deve ser claramente definida e mensurável. Após a definição da unidade funcional, é determinado o fluxo de referência, que é, segundo a NBR/ISO 14.044 (2009), a “*medida das saídas de processos em um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional*”, ou seja, a quantidade de produto que é necessária para cumprir a função (Takahashi, 2008).

De forma simplificada, a NBR/ISO 14.044 (2009) determina que o conteúdo mínimo de uma ACV deve se referir às suas três dimensões: *extensão* (onde começar e parar o estudo); *largura* (quantos e quais subsistemas incluir); *profundidade* (nível de detalhamento do estudo). Estabelece ainda que as dimensões devem ser suficientes para atender aos objetivos do estudo.

Para Chehebe (2002), as fronteiras do sistema a ser estudado devem ser limitadas com cuidado, pois o estudo depende de recursos financeiros e tempo. Assim, deve se determinar os limites do sistema e quais insumos, matérias primas, energias e materiais auxiliares são relevantes para o estudo, tornando-o gerenciável, prático, econômico sem se descuidar da confiabilidade do modelo.

#### **3.4.3.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)**

Identifica e quantifica energia, água e materiais usados, além dos lançamentos ao meio ambiente, a partir da construção do modelo do ciclo de vida. Nesta fase é feita a coleta e quantificação das variáveis envolvidas e o cálculo das emissões produzidas. O inventário é um processo repetitivo, envolvendo a checagem dos dados para garantir a sua qualidade (NBR/ISO 14.044, 2009; Baumann e Tillman, 2004).

Conforme afirma a European Commission (2010b), normalmente, a fase do ICV é o que demanda maiores recursos e esforços para a coleta de dados e modelagem.

O ICV deve ser desenvolvido de acordo com o objetivo e escopo do estudo e seus resultados fornecerão subsídios para possíveis ajustes à fase anterior. Os resultados do ICV também serão os dados de entrada para a fase seguinte: a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (European Commission, 2010b).

### 3.4.3.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Nesta fase, as emissões e recursos, ou seja, entradas e saídas dos fluxos elementares<sup>4</sup>, que foram coletados e informados no inventário, são relacionadas com diversos problemas ambientais, por intermédio de classificação e caracterização, avaliando o efeito humano e ecológico do uso de energia, água e materiais e os lançamentos ao meio ambiente identificados no inventário (European Commission, 2010b; NBR/ISO 14.044, 2009; Baumann e Tillman, 2004).

Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) é a fase da ACV na qual os resultados da análise dos inventários de emissões e recursos consumidos são processados e interpretados em termos de impactos ambientais, usando indicadores para Saúde Humana, Ambiente Natural e Recursos Naturais (European Commission, 2010c; Guinée *et al*, 2001).

A NBR/ISO 14.044 (2009) define Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida como: *“a fase da avaliação do ciclo de vida que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto”*.

Desde a década de 90, várias metodologias da AICV têm sido desenvolvidas, o que, algumas vezes, acarreta confusões desnecessárias, pois são obtidos resultados diferentes dependendo da metodologia empregada. Desta maneira, esforços por parte da EPA e Comissão Europeia tem levado a AICV

---

<sup>4</sup> A NBR-ISO 14044 define fluxo elementar como sendo: *“material ou energia retirado do meio ambiente e que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana”* (NBR/ISO 14.044, 2009).

para rigorosos controles de padronização, resultando em recomendações sobre abordagens e princípios a serem seguidos. (European Commission, 2010c)

Para a European Commission (2010c), Takahashi (2008), entre outros, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida deve ser desenvolvida seguindo-se quatro passos, conforme segue:

1. Escolha e classificação de categoria de impactos: Este passo, assim como o segundo, é obrigatório, pois nele são definidos os impactos ambientais importantes para o estudo. Os fluxos elementares do inventário do ciclo de vida são relacionados a categorias de impacto de acordo com a capacidade que cada substância tem em contribuir com diferentes problemas ambientais, que por sua vez estão divididos nas três áreas de proteção (Saúde Humana, Ambiente Natural e Recursos Naturais), conforme ilustrado na figura 3.25.

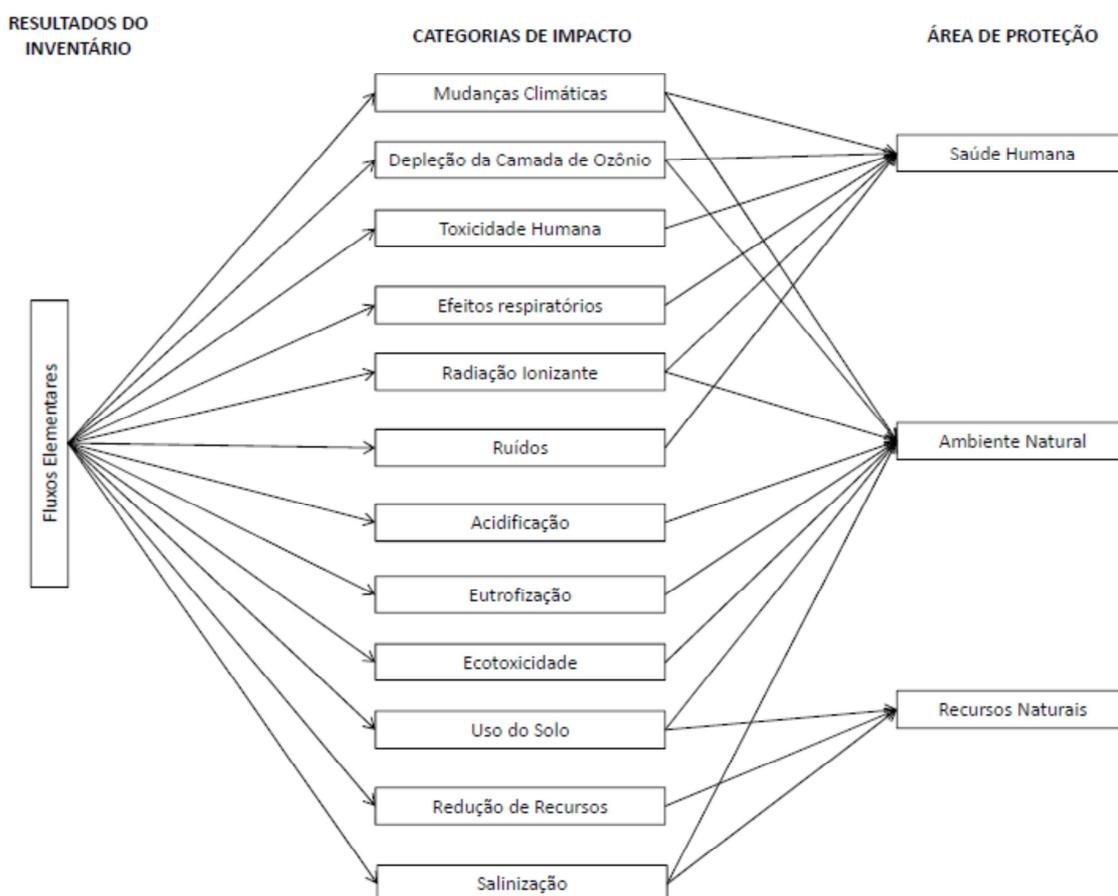


Figura 3.25 - Classificação das Categorias de Impacto (Adaptado de: European Commission, 2010c)

2. **Caracterização:** O impacto relacionado a cada emissão ou a cada consumo de recursos é modelado quantitativamente, ou seja, é determinado um valor numérico relacionando a contribuição de cada aspecto a cada categoria de impacto. Muitas vezes, este resultado já é o suficiente para determinar algumas conclusões no estudo de uma ACV, visto que, dentro das hipóteses admitidas, pode-se relacionar as contribuições do ciclo de vida do produto às diversas categorias de impacto.
3. **Normalização:** Tem por objetivo demonstrar a representatividade dos resultados encontrados em reação a um valor de referência estabelecido para cada categoria.
4. **Ponderação:** As diferentes categorias de impacto são classificadas de acordo com sua importância relativa.

Conforme relata Takahashi (2008), para facilitar a interpretação dos dados resultantes de um ICV, vários métodos para avaliação de impactos têm sido desenvolvidos.

Com a tabela 3.8, Takeda (2008) mostra os métodos mais usados para a AICV, por número de citações por família.

**Tabela 3.8** – Famílias de Métodos de AICV mais citadas em publicações nos últimos dez anos

<b>Família de Métodos de AICV</b>	<b>Nº Citações</b>	<b>%</b>
Eco-indicator	232	41,06
CML	72	12,74
EPS	60	10,62
EDIP/UMIP	59	10,44
Impact	38	6,73
LIME	33	5,84
Eco-points/Eco-Scarcity	31	5,49
USES-LCA	18	3,19
Traci	13	2,30
CST	9	1,59

Fonte: Adaptado de Takeda (2008)

O Eco-Indicator é um modelo desenvolvido por especialistas internacionais, na Holanda, sendo que sua última versão é a Eco-Indicator 99. É um exemplo de abordagem “*endpoint*”<sup>5</sup> (ponto final), que contempla as três áreas de proteção: Saúde Humana, Ambiente Natural e Recursos Naturais (Takeda, 2008).

Conforme expõe Takeda (2008), o CML, também elaborado na Holanda, na Universidade de Leiden, tem uma abordagem do tipo “*midpoint*”<sup>6</sup> (pontos intermediários), sendo que sua última versão é o CML 2001, e aborda diferentes categorias de impacto, como: depleção de recursos abióticos, mudanças climáticas, depleção do ozônio estratosférico, toxicidade humana, eco-toxicidade, formação foto-oxidante e acidificação, entre outros.

#### **3.4.3.4 INTERPRETAÇÃO**

Avalia os resultados do inventário e da avaliação do impacto para selecionar o melhor produto, processo ou serviço com a compreensão clara das incertezas e hipóteses usadas para gerar os resultados (NBR/ISO 14.044, 2009).

A European Commission (2010b) cita dois objetivos da fase de interpretação que diferem entre si: **i)** durante os passos iterativos da ACV, esta fase orienta o trabalho para melhorar o inventário de modo a atender o objetivo do estudo; **ii)** quando os passos iterativos são finalizados, e o estudo da ACV chega ao final, a etapa de interpretação mostra as conclusões e, frequentemente, as recomendações do estudo em questão.

---

<sup>5</sup> Abordagem orientada ao dano

<sup>6</sup> Abordagem orientada ao problema (categoria de impacto)

## 4 METODOLOGIA

A Avaliação do Ciclo de Vida da Estação de Tratamento de Esgoto bem como do Sistema de Produção de Biogás via Biodigestão e sua purificação para uso em Células a Combustível do tipo SOFC foi conduzida com base na norma ABNT/ISO 14.044 (2009). Segundo esta norma, a ACV compreende quatro (4) etapas de análise sequenciais e iterativas, já descritas no capítulo anterior. No presente capítulo, as considerações metodológicas quanto à execução de cada etapa são descritas a seguir.

O desenvolvimento deste trabalho consistiu em duas grandes etapas: **1)** Coleta e análise dos dados disponíveis na literatura; **2)** Pesquisa de campo, coleta e análise dos dados primários.

Na primeira etapa foi feita uma pesquisa bibliográfica que contemplou os seguintes temas: **i)** O estado da arte da tecnologia de célula a combustível e hidrogênio; **ii)** Tratamento de esgoto (águas residuárias); **iii)** Produção e purificação de biogás; **iv)** Avaliação do Ciclo de Vida, que culminaram nos capítulos aqui apresentados como Revisão da Literatura.

Na segunda etapa, a construção do modelo do sistema de tratamento de esgoto e produção do combustível biogás para a SOFC considerou as características das Estações de Tratamento de Esgotos existentes e em operação em Suzano na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), nas quais, obrigatoriamente, além do tratamento das águas residuárias, há biodigestão do lodo e produção de biogás.

A escolha da ETE Suzano foi uma indicação da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), localizada no município de Suzano, e que serve aos municípios de Mogi das Cruzes, Suzano, Poá, Itaquaquecetuba e Ferraz de Vasconcelos, integrantes da RMSP. Para a condução desta ACV, primeiramente foram realizadas pesquisas de campo, com visitas técnicas à ETE Suzano, para coletas de dados primários.

Conforme apresentado no capítulo 3, um estudo de ACV contempla (quatro) 4 etapas. A primeira corresponde à definição do objetivo e escopo da ACV; as etapas seguintes consistem na identificação e quantificação das

variáveis envolvidas no sistema para a determinação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) com a posterior Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV). Por fim, a última etapa da avaliação, que consiste na interpretação dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores.

Tanto para a Análise do Inventário quanto para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida utilizou-se o programa GaBi 4 (PE International) e os dados obtidos nos Relatórios: nº 3 – Implementação dos Métodos de Análise do Ciclo de Vida, nº 13 – Inventários do Ciclo de Vida de Estações de Tratamento de Esgoto, nº 17 – Inventários do Ciclo de Vida de Bioenergia e nº 20 Inventários do Ciclo de Vida de Sistemas de Co-geração e Geração de Energia, adaptados e/ou agregados aos dados obtidos no trabalho de campo.

#### 4.1 MODELAGEM E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Segundo Doka (2007), a construção do banco de dados sobre ETEs partiu da análise de um conjunto de 979 estações de tratamento, existentes na Suíça, realizada no ano 2000, que atendiam uma população de 7 milhões de habitantes e tratavam cerca de 1,5 bilhões de m<sup>3</sup> de esgoto.

Especificamente, no que diz respeito à modelagem da ETE Suzano, foi considerada a classificação estabelecida pelo banco de dados estudado, no qual as estações de tratamento são nomeadas em classe de 1 a 5, de acordo com a Tabela 4.1, conforme a sua capacidade de tratamento. Esta capacidade é expressa em PCE<sup>7</sup> (*per-capita equivalents*), e a média diária de DBO considerado por Doka (2007) foi de 60g DBO/hab\*dia.

---

<sup>7</sup> PCE: carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) gerada por uma pessoa por dia.

**Tabela 4.1** – Classificação da ETE de acordo com classes de tratamento

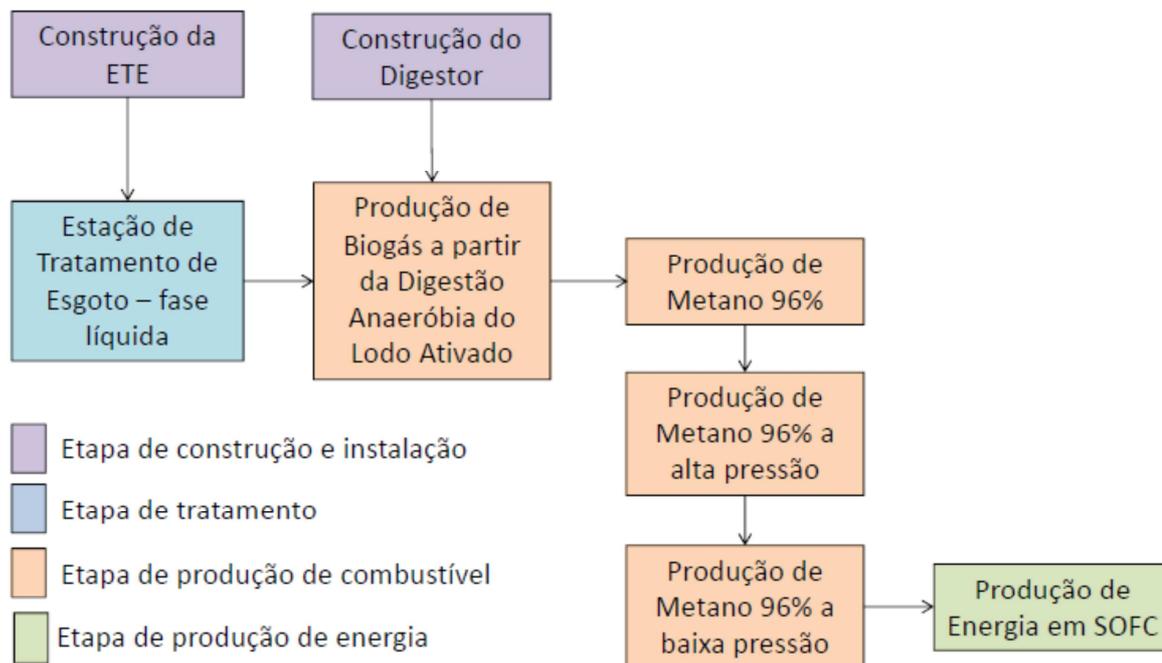
	<b>Capacidade de Tratamento (PCE/ano)</b>	<b>Média da Capacidade por planta (PCE/ano*unid)</b>
Classe 1	> 100.000	233.225
Classe 2	50.000 a 100.000	71.133
Classe 3	10.000 a 50.000	24.865
Classe 4	2.000 a 10.000	5.321
Classe 5	2.000	806

Fonte: Doka (2007)

Cada fase do sistema produtivo modelado no programa Gabi4 foi identificado como um plano, que é o mapeamento dos processos que visualmente descreve um estágio ou sub-estágio do sistema. Para melhorar e facilitar a análise e o desenvolvimento da modelagem, este sistema foi dividido em quatro partes:

- i. Etapa de construção e instalação – que compreende os planos: construção da estação de tratamento e construção do digestor;
- ii. Etapa de tratamento – onde é apresentado o plano da estação de tratamento de esgoto (fase líquida), com o desenvolvimento de todo o tratamento do esgoto recolhido;
- iii. Etapa de produção do combustível – que contempla os planos: geração de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo ativado, purificação e enriquecimento do metano a 96%, seguido de pressurização e despressurização do metano 96%;
- iv. Etapa de produção energia em SOFC – representada pelo plano: produção de energia a partir da reforma interna de metano em SOFC.

A figura 4.1 ilustra o fluxograma dos planos do sistema estudado.



**Figura 4.1 - Fluxograma dos planos estudados no escopo da ACV do biogás gerado em ETE para uso em CaC**

A modelagem do sistema foi elaborada levando-se em consideração um dia de tratamento de esgoto. Em cada uma das etapas foram elaborados os inventários em função dos principais fluxos de entrada e saída, sendo estes, desmembrados por insumos, energia, disposição final, transporte, infraestrutura e produto final. Os procedimentos de cálculos utilizados em cada etapa do estudo são apresentados e detalhados a seguir.

#### 4.1.1 ETAPA DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO

Segundo Doka (2007), mais de 90% do esgoto produzido é tratado naquelas que são consideradas grandes estações, pertencentes às classes 1, 2 e 3. Contudo para a modelagem do sistema de produto, o tratamento do afluyente é independente das classes de capacidade das estações, tendo em vista que a eficácia do tratamento está ligada à tecnologia aplicada.

Neste sentido, a tecnologia aqui aplicada para o tratamento de águas residuárias (esgoto doméstico) é a do tipo convencional com digestão do lodo produzido, com eficiência de 92% na remoção da carga de DBO.

Para a etapa de construção e instalação, o fluxo de referência<sup>8</sup> é uma planta definida pela unidade peça (pç). Os fluxos de entrada e saída de materiais, energia, bem como transporte e disposição final para a construção da ETE são determinados a partir do volume de efluente tratado, conforme a expressão abaixo:

$$C_{ETE} = k_1 \cdot V_{ef} \quad (15)$$

Onde:  $C_{ETE}$ : quantidade de peças (pç);  
 $k_1$ : número de peças por m<sup>3</sup> de efluente tratado (pç/m<sup>3</sup>);  
 $V_{ef}$ : volume de efluente tratado e lançado em corpo d'água (m<sup>3</sup>).

No estudo realizado por Doka (2007), cada metro cúbico de efluente tratado corresponde a  $6,062 \cdot 10^{-10}$  peças.

Assim como na construção da ETE, para a construção dos biodigestores o fluxo de referência é definido pela unidade peças (pç), porém os fluxos de entrada e saída são determinados pela produção de biogás, expressa em Nm<sup>3</sup>, e é definido pela fórmula:

$$C_{DIG} = k_2 \cdot V_b \quad (16)$$

Onde:  $C_{DIG}$ : quantidade de peças de digestores (pç);  
 $k_2$ : número de peças por Nm<sup>3</sup> de biogás produzido (pç/Nm<sup>3</sup>);  
 $V_b$ : volume de biogás gerado na digestão (Nm<sup>3</sup>).

De acordo com o relatório de Doka (2007), são necessárias  $3,65 \cdot 10^{-8}$  peças por Nm<sup>3</sup> de biogás produzido nos biodigestores.

#### 4.1.2 ETAPA DE TRATAMENTO DO ESGOTO

O relatório nº 13 do Ecoinvent (Doka, 2007) determina, como fluxo de referência para o tratamento de esgoto, o volume de efluente tratado (m<sup>3</sup>) que sai

---

<sup>8</sup> A NBR-ISO 14044 define fluxo de referência elementar como sendo: “medida das saídas de processos de um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional” (NBR/ISO 14.044, 2009).

do sistema e é descartado no corpo receptor. Destaca-se que, no presente estudo, foi considerado o volume tratado diariamente pela ETE Suzano. O volume do efluente depende da eficiência de tratamento da fase líquida e do volume de lodo que retorna ao sistema de tratamento:

$$V_{ef} = V_{af} \cdot (1 - k_3) \quad (17)$$

Onde:  $V_{ef}$ : volume de efluente tratado e lançado em corpo d'água ( $m^3/d$ );  
 $V_{af}$ : volume de afluente que entra para tratamento ( $m^3/d$ );  
 $K_3$ : variável relacionada à eficiência do tratamento e retorno do lodo ao sistema;

Durante a visita realizada à ETE Suzano, apurou-se que, para esta estação de tratamento, a taxa de retorno é de 10% (Sabesp, 2011a).

#### 4.1.3 ETAPA DE PRODUÇÃO DO COMBUSTÍVEL

Supõe-se que a digestão do lodo seja completa, produzindo, assim, o máximo de biogás possível nas reações. Para a estruturação do inventário da geração de biogás, o fluxo de referência é o volume de gás produzido ( $Nm^3$ ), nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). Caso não exista um medidor de vazão na saída do digestor, Doka (2007) propõe a utilização da relação:

$$V_b = K_4 \cdot V_{af} \quad (18)$$

Onde:  $V_b$ : volume de biogás gerado na digestão ( $Nm^3$ );  
 $V_{af}$ : volume de afluente que entra para tratamento ( $m^3$ );  
 $K_4$ : razão entre volume de gás gerado por volume de afluente (esgoto) ( $Nm^3/m^3$  de afluente);

Em seus estudos, Doka (2007) indica que, para cada  $m^3$  de afluente, há uma produção de  $0,068 Nm^3$  de biogás.

Rychebosch *et al.* (2011) consideram que os gases, normalmente presentes no biogás, como vapor d'água,  $H_2S$  e  $CO_2$ , podem ser inconvenientes quando não removidos, causando danos a equipamentos e diminuição de

eficiência do sistema. Para que este quadro não ocorra, é necessário que o biogás seja purificado e enriquecido.

Neste sentido, o inventário da etapa de purificação e enriquecimento do biogás tem como fluxo de referência o volume de metano proveniente do biogás medido em normais metros cúbicos (Nm<sup>3</sup>). A fase de purificação e enriquecimento depende da eficiência do processo, e é dada pela equação:

$$V_{\text{CH}_4} = V_b / K_5 \quad (19)$$

Onde:  $V_{\text{CH}_4}$ : volume de metano obtido do biogás gerado na digestão (Nm<sup>3</sup>);  
 $V_b$ : volume de biogás gerado na digestão (Nm<sup>3</sup>);  
 $K_5$ : razão entre o volume de biogás gerado e o volume de metano obtido (Nm<sup>3</sup> de  $V_b$ /Nm<sup>3</sup> de  $V_{\text{CH}_4}$ );

Nesta etapa obtém-se um gás rico em CH<sub>4</sub> (em torno de 96% de metano).

Jungbluth *et al* (2007) demonstraram que, durante a fase de enriquecimento e purificação do biogás, são necessários 1,5 Nm<sup>3</sup> de biogás para produzir 1 Nm<sup>3</sup> de metano.

Para o transporte do metano a 96%, desde o local de enriquecimento até o ponto de consumo, é necessário que o mesmo seja comprimido e, no momento da utilização, descomprimido (Jungbluth *et al*, 2007).

Tanto para a etapa de compressão quanto para a etapa de descompressão do metano, os inventários (de metano 96% a alta pressão e metano 96% a baixa pressão) têm como fluxo de referência a energia obtida do gás metano, expresso em MJ.

Para o cálculo do valor energético do metano, Jungbluth *et al* (2007) consideraram, em sua pesquisa, como sendo de 34,45 MJ/Nm<sup>3</sup> o valor do Poder Calorífico Inferior (PCI) do metano a 96%. Assim sendo, a energia obtida a partir do metano enriquecido a alta pressão é:

$$E_{CH496\%AP} = V_{CH4} \cdot k_6 \quad (20)$$

Onde:  $E_{CH496\%AP}$ : conteúdo energético do metano enriquecido a alta pressão (MJ);

$V_{CH4}$ : volume de metano obtido do biogás gerado na digestão (Nm<sup>3</sup>);

$K_6$ : poder calorífico inferior do metano (MJ/Nm<sup>3</sup>);

Durante a etapa de descompressão do metano (96%) a alta pressão, ocorre perda da energia gerada pelo gás, que varia de acordo com a eficiência do processo e pode ser verificada de acordo com a expressão:

$$E_{CH496\%BP} = E_{CH496\%AP} \cdot (1 - k_7) \quad (21)$$

Onde:  $E_{CH496\%AP}$ : conteúdo energético do metano enriquecido a alta pressão (MJ);

$E_{CH496\%BP}$ : conteúdo energético do metano enriquecido a baixa pressão (MJ);

$K_7$ : coeficiente de perda de energia (%);

Para a construção deste inventário, Jungbluth *et al* (2007a) apontam uma perda de 0,69% durante o processo de descompressão do gás metano.

#### 4.1.4 ETAPA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

A última etapa do sistema consiste no uso do metano (96%) a baixa pressão na célula a combustível do tipo SOFC-125kWe. O fluxo de referência para a construção deste inventário é MJ. A produção de energia elétrica e térmica da SOFC-125kWe é dada por:

$$E_{EL} = K_8 \cdot E_{CH496\%BP} \quad (22)$$

$$E_{CALOR} = K_9 \cdot E_{CH496\%BP} \quad (23)$$

Onde:  $E_{EL}$ : eletricidade em seu equivalente em energia primária (MJ);

$E_{CALOR}$ : calor em seu equivalente em energia primária (MJ);

$K_8$ : coeficiente conversão de energia elétrica (%);

$K_9$ : coeficiente conversão de energia térmica (%);

Primas (2007) considera que uma SOFC de 125 kWe tem, em média, eficiência total de conversão em 80%, sendo 47% na geração de energia elétrica e 33% para geração de calor.

De acordo com a European Commission (2010c), após a construção dos inventários, as emissões e recursos consumidos devem ser analisados em termos de impactos. Assim, a partir dos inventários apresentados, no próximo capítulo, foram elaborados eco-balanços (*eco-balances*), cujos resultados estão apresentados em termos de emissões de CO<sub>2</sub>eq e Demanda Acumulada de Energia (CED).

## 4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS

Vários são os indicadores disponíveis para avaliação dos impactos no que tange o potencial de mitigação dos gases do efeito estufa e de aproveitamento energético do biogás gerado em Estações de Tratamento de Esgoto. Porém, para esta análise, dois indicadores foram escolhidos e utilizados, a saber, Demanda Acumulada de Energia (CED – *Cumulative Energy Demand*) e Potencial de Aquecimento Global (CML, 2001) (Klopper, 1997).

A Demanda de Energia Acumulada (CED) é bastante usada como indicador para impactos ambientais além de formar uma importante base para assinalar as prioridades de potencial de economia de energia na relação entre projeto, produção, uso e disposição final de um produto e/ou serviço (Althaus *et al*, 2007).

O indicador Potencial de Aquecimento Global (kg de CO<sub>2</sub> equivalente) é dado pela metodologia CML 2001 (Nov. 2009). O CML 2001 é um conjunto de métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida, no qual a modelagem quantitativa restringe-se aos estágios iniciais da cadeia causa-efeito, de forma a limitar as incertezas da avaliação e agrupar os resultados da análise de inventário do ciclo de vida a categorias “*midpoint*” (depleção da camada de ozônio, aquecimento global) de acordo com temas (por exemplo, mudanças climáticas, ecotoxicidade) (Guinée *et al*, 2001).

#### 4.2.1 DEMANDA ACUMULADA DE ENERGIA

VDI (1997) *apud* Gürzenhich *et al* (1999), definiu o termo Demanda Acumulada de Energia (*Cumulative Energy Demand* – CED) como: “... é toda a demanda, avaliada como energia primária, que surge devido à produção, utilização ou descarte de um bem econômico...”. Para Gürzenhich *et al* (1999), a CED pode ser entendida como um indicador de impacto, desde que haja uma redução dos recursos naturais na produção/obtenção de energia.

Como afirmam Huijbregts *et al* (2006) e Röhrlich *et al* (2000), a CED de um produto representa a energia direta e indireta usada durante o seu ciclo de vida, incluindo a energia consumida durante a extração, manufatura e disposição final dos insumos e materiais auxiliares.

Klöpffer (1997) afirma que, desde o início do desenvolvimento da ACV, a Demanda Acumulada de Energia (CED) tem sido o mais importante resultado do inventário usado para comparações de sistemas. Para Jungbluth *et al* (2007), a análise da CED é um bom caminho para iniciar um estudo de ACV, porém não substitui outros métodos de avaliação de impactos. Klöpffer (1997) indica quatro razões para demonstrar a importância da CED na ACV:

1. A CED é o único parâmetro que agrega todas as formas de energia usadas em todo o ciclo de vida;
2. A CED é uma somatória, o que indica intervenções ambientais devido ao consumo de energia relacionado ao sistema estudado;
3. A CED é derivada a partir do ICV e não depende de nenhuma suposição ou incerteza envolvida na análise dos impactos. Ela está disponível, mesmo que não seja desenvolvida a etapa da AICV na ACV.
4. A precisão dos cálculos da CED é muito maior que muitos procedimentos para caracterização de impactos.

Os valores de CED podem ser usados para comparar resultados de um estudo de ACV detalhado com outros, onde somente a demanda de energia primária foi relatada. A demanda de energia acumulada é também utilizada para

indicar o consumo equivalente de energia primária na cadeia de um produto ou a energia consumida em um determinado sistema, ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matéria prima até o fim da vida útil do produto ou sistema.

Gürzenich *et al* (1999), Röhrlich *et al* (2000) e Fukurozaki (2011) demonstram que a CED é definida como sendo a somatória das necessidades de energia, de entrada, em todas as fases do ciclo de vida do sistema. Assim, toda a energia consumida para a etapa de construção ( $E_C$ ), para a etapa de tratamento ( $E_T$ ), para a produção do combustível ( $E_P$ ) e seu final uso ( $E_U$ ) até o descomissionamento ( $E_D$ ) do sistema após sua vida útil é expresso da seguinte forma:

$$CED = E_C + E_T + E_P + E_U + E_D \text{ [MJ]} \quad (26)$$

O consumo de energia nos diferentes estágios do ciclo de vida pode ser distinguido em duas principais categorias de energia secundária: energia térmica e energia elétrica. Em determinados casos, adicionalmente, utiliza-se a categoria "não energética" ou "reserva de energia", no qual é contabilizado o valor calorífico de um material quando este também pode ser considerado como um vetor energético. Os procedimentos de cálculo podem ser consultados em Fukurozaki (2011).

#### 4.2.2 CML 2001

Em 2001, foi proposta, por um grupo de estudiosos, sob o comando do CML – Leiden (Centro de Ciência Ambiental da Universidade de Leiden/Holanda - *Center of Environmental Science of Leiden University*), uma série de categorias de impacto e métodos de caracterização para a etapa de AICV (Althaus *et al.*, 2007).

As principais categorias de impacto, ou seja, aquelas que são incluídas na maioria dos estudos de ACV estão discriminadas a seguir (Guinée *et al*, 2001):

- Depleção de recursos naturais: Por ser uma das categorias de impacto que frequentemente é discutida, existem vários métodos para

caracterização de suas contribuições. As diferentes metodologias produzem diferenças na definição do problema o que acarreta em diversas interpretações, podendo incluir resultados tanto apenas em uma das áreas de proteção<sup>9</sup> como nas três. Esta categoria é expressa em kg de Antimônio equivalente (Kg Sb eq);

- Uso do solo – Competição do solo: Esta categoria está contemplada no estudo do solo como recurso, na qual avalia-se a indisponibilidade temporária do uso do solo. A unidade que expressa esta categoria é metro quadrado ao ano (m<sup>2</sup>a);
- Mudanças climáticas: É definida como sendo o impacto das atividades antrópicas quanto às emissões de gases do efeito estufa (GEE) que contribuem para o aquecimento global. Pode produzir resultados nas três áreas de proteção e é conhecida pela medida em kg de Dióxido de Carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq).
- Depleção de ozônio: Refere-se à diminuição da camada de ozônio causada pelas emissões antropogênicas, que acarreta no aumento de radiação UV-B na superfície terrestre, produzindo impacto prejudicial tanto aos seres (terrestres ou aquáticos) que habitam a terra, quanto aos ciclos bioquímicos e materiais. Todas as áreas de proteção podem ser afetadas e esta categoria é expressa em kg de Clorofluorocarboneto-11 (CFC-11) equivalente (kg CFC-11 eq).
- Toxicidade humana: Esta categoria de impacto envolve os impactos relacionados à saúde humana e está conectada às substâncias tóxicas presentes no ambiente. Apesar desta categoria considerar além da exposição, outros impactos, tais como acidentes de trabalho, o CML 2001 não considera exposições ocorridas no ambiente de trabalho. Esta categoria afeta somente a área de proteção da Saúde Humana e é medida em kg de 1,4 Diclorobenzeno equivalente (1,4-DCB eq).

---

<sup>9</sup> Áreas de proteção são as áreas de interesse de proteção nas quais as categorias de impacto do CML podem estar associadas. As três áreas de proteção são Saúde Humana, Recursos Naturais e Ambiente Natural.

- Ecotoxicidade: Esta categoria engloba os impactos de substâncias tóxicas relacionadas aos ambientes aquáticos (água doce e salgada), terrestres e sedimentos do ecossistema. A área de proteção atingida é o Ambiente Natural, e assim como na categoria anterior, é expressa em kg de 1,4 Diclorobenzeno equivalente (1,4-DCB eq).
- Acidificação: Poluentes acidificantes causam uma grande variedade de impactos nas águas subterrâneas, nas águas superficiais, nos organismos biológicos, nos ecossistemas e em construções. Os maiores poluentes acidificantes são o Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), os Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e a Amina (NH<sub>2</sub>). Esta categoria atinge as três áreas de proteção e a unidade do indicador de resultado é kg de Dióxido de Enxofre equivalente (kg SO<sub>2</sub> eq).
- Eutrofização: Envolve todos os impactos relacionados a altos níveis de macronutrientes, sendo os mais importantes o nitrogênio (N) e o fósforo (P). O aumento dos níveis de macronutrientes podem elevar à produção de biomassa em ambientes aquáticos, aumentando o consumo do oxigênio das águas, o que pode, por exemplo, resultar na eutrofização de um corpo d'água. Esta categoria afeta as áreas de proteção de Ambiente Natural e Recursos Naturais. É expressa em kg de fosfato equivalente (kg PO<sub>4</sub> eq).

Especificamente, no presente trabalho utilizou-se o método de caracterização desenvolvido por Guinée *et al* (2001), para a categoria de impacto de Mudanças Climáticas, que envolve um número de mecanismos ambientais que afetam tanto a Saúde Humana quanto o Ambiente Natural (European Commission, 2010c; Guinée *et al*, 2001).

Para Guinée *et al* (2001), a mudança climática é definida como o impacto das emissões antropogênicas em relação ao forçamento radiativo<sup>10</sup> da atmosfera.

---

<sup>10</sup> De acordo com Boucher *et al* (2001) e Borsari (2009), forçamento radiativo é um termo que tem sido empregado pelo IPCC para denotar uma perturbação externamente imposta no balanço de energia radiativa do sistema climático da Terra, que pode ser provocada por mudanças seculares nas concentrações das espécies radiativamente ativas, mudanças na irradiação solar incidente no planeta ou alterações que

Muitas destas emissões aumentam o forçamento radiativo, causando elevação na temperatura da superfície terrestre, conhecido popularmente como “efeito estufa”.

O fator humano, ou seja, as mudanças climáticas ocorridas devido às emissões de gases do efeito estufa produzidos por atividades antrópicas, influencia na concentração destes gases na atmosfera (European Commission, 2010c).

Para a modelagem do forçamento radiativo de uma emissão considera-se a mudança de concentração e o tempo de residência da substância na atmosfera. Um modelo globalmente reconhecido e desenvolvido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC é o modelo *Bern*, que é conhecido como *Global Warming Potentials* – GWP, ou Potencial de Aquecimento Global. Este modelo é recomendado para o uso em categorias de impacto do tipo pontos intermediários, ou *midpoint* (European Commission, 2010c)

O IPCC compilou uma lista de estimativas para GWPs com o horizonte de tempo de 20, 100 e 500 anos que é periodicamente atualizada, conforme ilustra a tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos principais Gases do Efeito Estufa**

Poluentes	Tempo de vida (anos)	Potencial Aquecimento Global (GWP) (kg CO <sub>2</sub> eq) em 2007			Potencial Aquecimento Global (GWP) (kg CO <sub>2</sub> eq) em 2001			Potencial Aquecimento Global (GWP) (kg CO <sub>2</sub> eq) em 1995		
		20 anos	100 anos	500 anos	20 anos	100 anos	500 anos	20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	~150	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	12	72	25	7,6	62	23	7	35	21	4
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	114	289	298	153	275	296	156	260	270	170

Fonte: Adaptado de IPCC, (2007, 2001, 1995)

Para Borsari (2009), o CO<sub>2eq</sub> fornece um padrão universal de medida para avaliação dos potenciais impactos da emissão de diferente gases do efeito estufa

---

afetam a energia radiativa absorvida pela superfície, ou seja, é a mudança no fluxo de energia na atmosfera. É expressa em watts por metro quadrado (W.m<sup>-2</sup>)

(GEE). Para comparar os impactos das emissões destes GEE, cada um deles é associado a um índice chamado GWP, que exprime a relação entre o forçamento radiativo devido à emissão instantânea de 1 kg da substância e uma emissão igual de CO<sub>2</sub>, ambas integradas ao longo do tempo (Guinée *et al*, 2001):

$$GWP_{Ti} = \frac{\int_0^T a_i c_i (t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2} (t) dt} \quad (24)$$

Onde: **GWP<sub>Ti</sub>**: é o potencial de aquecimento global do GEE “i” no tempo “T” (kg CO<sub>2eq</sub>);  
**a<sub>i</sub>**: unidade de forçamento radiativo por concentração do GEE “i” (W.m<sup>-2</sup>.kg<sup>-1</sup>);  
**c<sub>i</sub>**: concentração do GEE “i” no tempo “t” (kg.m<sup>-3</sup>);  
**a<sub>CO2</sub>**: unidade de forçamento radiativo por concentração de CO<sub>2</sub> (W.m<sup>-2</sup>.kg<sup>-1</sup>);  
**c<sub>CO2</sub>**: concentração de CO<sub>2</sub> no tempo “t” (kg.m<sup>-3</sup>);  
**T**: tempo (a);

De acordo com Guinée *et al* (2001), para caracterizar a categoria de impacto “mudanças climáticas” foram utilizados os GWPs conforme abaixo descrito:

$$\text{Mudanças climáticas} = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (25)$$

Onde: **Mudanças climáticas**: é o resultado do indicador (kg CO<sub>2eq</sub>);  
**GWP<sub>i</sub>**: é o potencial de aquecimento global do GEE “i” (kg CO<sub>2eq</sub>);  
**m<sub>i</sub>**: é a massa do GEE “i” (kg).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa da Avaliação do Ciclo de Vida da ETE Suzano, tal como proposto na norma NBR/ISO 14.044 (2009), com destaque aos resultados obtidos na elaboração e Análise do Inventário e Avaliação de Impactos. Os resultados de cada etapa analítica são apresentados da seguinte forma: **i)** Caracterização do sistema; **ii)** Objetivo, escopo, função e unidade funcional; **iii)** Elaboração e análise do inventário; **iv)** Avaliação de impactos do sistema estudado.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Suzano foi construída visando atender uma população de 720.000 habitantes com capacidade total de tratamento de águas residuárias de 1.500 L/s. Atualmente, a ETE Suzano atende 350.000 habitantes e trata uma vazão de 800 L/s com uma carga de DBO de 54g DBO/hab\*dia (Figura .5.1).



Figura 5.1 - Estação de Tratamento de Suzano – Fonte: SABESP, 2011b

O sistema de tratamento empregado nesta estação é o tratamento biológico, no qual o processo de lodos ativados apresenta cerca de 95% de eficiência quanto a remoção de carga orgânica. O afluente é transportado para a estação por uma rede de coleta de cerca de 1.669 Km de extensão, constituída de coletores-tronco, interceptores e emissários (Sabesp, 2011b). O volume de

esgoto recolhido na rede coletora e tratado na ETE Suzano, em 2009, segundo ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) do Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), foi de 16.838 m<sup>3</sup>/ano, conforme Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** – Volume de esgoto tratado e coletado e comprimento da rede por cidade atendida na ETE Suzano

Cidade	Volume Esgoto Coletado	Volume Esgoto Tratado	Comprimento Rede
	1000m <sup>3</sup> /ano	1000m <sup>3</sup> /ano	km
Mogi das Cruzes	11.990	5.043	265
Suzano	7.835	5.485	541
Poá	3.906	3.632	218
Itaquaquecetuba	6.098	426	417
Ferraz Vasconcelos	4.021	2.252	228
<b>TOTAL</b>	<b>33.850</b>	<b>16.838</b>	<b>1.669</b>

Fonte: Adaptada de Santo *et al* (2010)

Os processos de tratamento das águas residuárias e posterior produção do biogás da ETE Suzano são apresentados sequencialmente, conforme a caracterização fotográfica realizada durante pesquisas de campo. O tratamento inicia-se com a remoção dos sólidos grosseiros, como galhos de árvores e garrafas, tal como ilustra a Figura 5.2.



**Figura 5.2** – Gradeamento

Na segunda fase do processo de tratamento, ocorre a remoção dos sólidos finos, como areia, visando eliminar, principalmente, sedimentos capazes de danificar bombas e outros equipamentos utilizados na ETE (Figura 5.3).



**Figura 5.3 - Tanque de areia aerado**

Posteriormente, as águas residuárias são conduzidas para o tanque de decantação primário. Nesta fase ocorre a sedimentação dos sólidos que se encontram em suspensão, como mostrado na Figura 5.4.



**Figura 5.4 - Decantador Primário**

Na próxima fase, as águas residuárias são conduzidas para os Tanques de Aeração, nos quais a matéria orgânica presente é degradada na presença de oxigênio, formando lodo e diminuindo a carga poluidora do esgoto (Figura 5.5).



**Figura 5.5 - Tanque de Aeração**

Após a fase de degradação da matéria orgânica nos tanques de aeração, o esgoto é novamente conduzido para um processo de decantação, denominado Decantação Secundária, onde cerca de 90% do lodo produzido pela decantação é encaminhado para os digestores, enquanto 10% retornam para os tanques de aeração, a fim de manter a relação bioquímica necessária (Figura 5.6). A Figura 5.7 apresenta o efluente clarificado após a decantação secundária



**Figura 5.6 - Decantador secundário**



**Figura 5.7 – Efluente clarificado**

O efluente clarificado é encaminhado para o corpo receptor (neste caso, o Rio Tietê), por canais de concreto, conforme ilustra a figura 5.8.



**Figura 5.8 – Descarte do efluente clarificado**

O lodo, produzido nos decantadores primários e secundários, é encaminhado para os biodigestores (figura 5.9) onde a degradação da matéria orgânica ocorre na ausência de oxigênio (processo anaeróbio), produzindo biogás. Destaca-se que o resíduo sólido (lodo) proveniente dos decantadores é processado em digestores, com capacidade de produção em torno de 3.000 m<sup>3</sup> de biogás por dia.



**Figura 5.9 – Biodigestores**

Posteriormente, o biogás produzido no processo de biodigestão é transformado em  $\text{CO}_2$  em “queimadores” (ou também conhecidos como *flares*) com o objetivo de reduzir os impactos ambientais do biogás, cujo impacto no efeito estufa é cerca de 20 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ , conforme é mostrado na Figura 5.10.



**Figura 5.10 – Queimadores**

A fase final do tratamento consiste na redução do volume e peso dos resíduos sólidos provenientes dos digestores (torta). Estes resíduos passam por um tratamento químico, onde são adicionados floculantes (polímeros) capazes de aglutinar o lodo digerido. Posteriormente, são encaminhados para os filtros prensas (Figura 5.11), nos quais é removida a água em excesso, resultando na torta de lodo ativado (Figura 5.12).



**Figura 5.11 – Filtro Prensa**



**Figura 5.12 - Torta de lodo ativado**

Em algumas ETE's, que não é o caso de Suzano, promove-se um tratamento térmico com a torta de lodo ativado, com o objetivo de eliminar microrganismos para posterior uso da torta em aplicações específicas, como fertilizantes. Quando isto não ocorre o lodo é descartado em aterros sanitários.

## 5.2 OBJETIVO, ESCOPO, FUNÇÃO E UNIDADE FUNCIONAL

O objetivo desta ACV é identificar o potencial de mitigação dos gases do efeito estufa e de economia de energia no aproveitamento energético do biogás produzido na Estação de Tratamento de Efluentes de Suzano, utilizando a tecnologia de Célula a Combustível do tipo SOFC.

Em linhas gerais, o escopo do presente estudo incluiu desde a construção das plantas de tratamento (vida útil de 30 anos) e digestão do lodo, tratamento da fase líquida (águas residuárias) pelo sistema convencional (tecnologias atualmente em uso) e a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos (lodo ativado) com consequente produção de biogás. Foi incluída também a etapa de purificação do biogás, para obtenção do metano a 96%, e seu uso na célula a combustível SOFC.

A Figura 5.13 apresenta o modelo do ciclo de vida baseado na ETE Suzano utilizado no presente estudo.

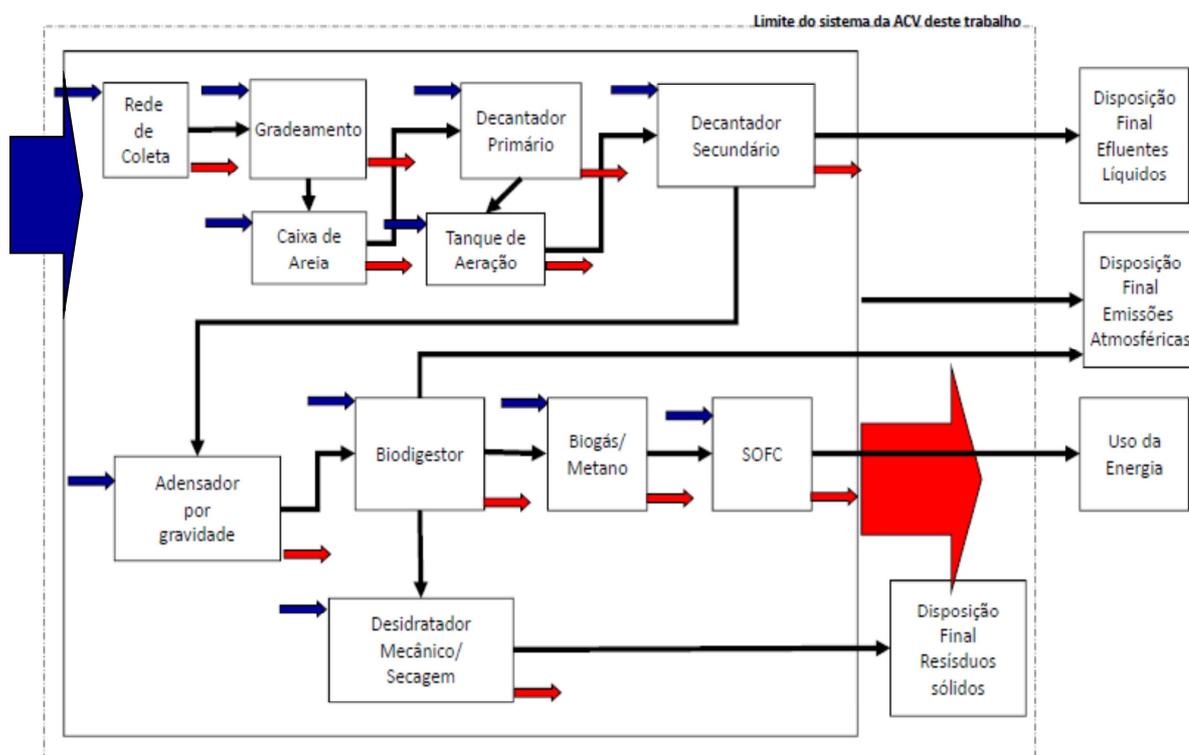


Figura 5.13 – Modelo do ciclo de vida da ETE, produção de Metano e sua queima na SOFC (as setas azuis correspondem às entradas (insumos e energia), as setas vermelhas indicam as saídas (emissões e produtos) e as setas pretas mostram o fluxo do sistema).

Cabe ressaltar que as atividades de transporte de materiais e equipamentos também foram consideradas na etapa de construção da ETE e biodigestor, bem como na sua operacionalização e em outros estágios, tais como, o transporte pela rede coletora de esgoto e a disposição final dos resíduos obtidos no tratamento.

A função do sistema de produto estudado foi determinado como sendo a produção de metano/biogás (energia) para uso em uma célula a combustível do tipo SOFC, por meio do aproveitamento do biogás produzido na ETE Suzano. A unidade funcional é a quantidade de energia gerada (MJ) por volume de afluente diário (MJ/m<sup>3</sup>/dia).

### 5.3 ELABORAÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

É importante destacar que, durante a elaboração e análise do inventário, as informações obtidas no trabalho de campo<sup>11</sup> foram confrontadas com os dados da literatura e do Ecoinvent e adaptados, quando possível, às condições do sistema de tratamento da ETE Suzano. A Tabela 5.2 apresenta uma síntese comparativa das informações obtidas durante as pesquisas técnicas de campo e na literatura técnica especializada e os dados do Ecoinvent.

**Tabela 5.2** – Comparação de dados do Ecoinvent e ETE Suzano

Parâmetros	Unidade	Ecoinvent (ETEs)	ETE Suzano
População	habitantes	7.135.718	350.000
Tratamento diário	m <sup>3</sup> /d	3.949.619,91	69.120,00
Vazão de águas residuárias por habitante	m <sup>3</sup> /hab*d	0,5535	0,1975
Carga típica de DBO por habitante*dia	g/hab*dia	60	54
DBO - afluente <sup>12</sup>	g/m <sup>3</sup>	103,60	274,11
DBO - efluente <sup>13</sup>	g/m <sup>3</sup>	8,29	16,20
Eficiência no tratamento	%	92	95

Fonte: Adaptado de Doka (2007)

<sup>11</sup> Incluindo as comunicações pessoais com especialistas e com a responsável técnica da ETE Suzano – Sabesp, 2011a.

<sup>12</sup> Afluente: esgoto coletado na ETE.

<sup>13</sup> Efluente: água após tratamento na ETE e disponibilizada nos corpos d'água.

É interessante observar que a vazão de águas residuárias, por habitante/dia, tratada pela ETE Suzano representa apenas cerca de 35% do volume considerado na base de dados europeia Ecoinvent. Isto pode indicar, no caso europeu, um tratamento simultâneo de águas residuárias domésticas com as águas pluviais, aumentando, conseqüentemente, a diluição da carga de DBO, como indicado na tabela, onde a DBO europeia é da ordem de 38% da ETE Suzano.

Os inventários de cada etapa do sistema estudado conforme discutido no capítulo 4, são apresentados a seguir.

### **5.3.1 ETAPA DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO**

O inventário da planta de tratamento de esgoto com os principais fluxos de entrada (matérias, energia, transporte e resíduos) e de saída, desenvolvido para o limite temporal de um dia, é apresentado na Tabela 5.3. Tendo em vista a vazão diária do efluente tratado, de 62.208 m<sup>3</sup>, o número equivalente, segundo a metodologia descrita no capítulo 4.1.1, em peças, para construção e instalação da ETE, é de  $3,77 \times 10^{-5}$  por dia.

Na etapa de construção e instalação do biodigestor, os resultados obtidos no inventário são dependentes da estimativa de volume de biogás produzido. Neste sentido, para o volume de biogás obtido no biodigestor de 4.700 Nm<sup>3</sup>/dia, o número equivalente em peças é de  $1,72 \times 10^{-4}$  peças por dia. O inventário da construção e instalação da planta do biodigestor, com os principais fluxos de entrada e de saída é apresentado na Tabela 5.4.

**Tabela 5.3** - Inventário da Construção da Estação de Tratamento de Esgoto – fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
<b>ENTRADA</b>	Energia	Eletricidade, média voltagem	1,32	MJ
	Ocupação e Transformação do Solo	Ocupação - local de construção	2,64	m <sup>2</sup> a
		Ocupação - área industrial, muito ocupada	59,19	m <sup>2</sup> a
		Ocupação - área industrial, vegetação	19,79	m <sup>2</sup> a
		Transformação de pasto e campina/prado	2,64	m <sup>2</sup> a
		Transformação para área industrial, muito ocupada	1,98	m <sup>2</sup> a
		Transformação para área industrial, vegetação	0,66	m <sup>2</sup> a
	Recursos Naturais	Aço cromado 18/8	59,94	kg
		Aço reforçado	746,46	kg
		Água	1.176,24	kg
		Alumínio	8,33	kg
		Betume	4,83	kg
		Borracha sintética	8,48	kg
		Cobre	8,86	kg
		Concreto	9,65	m <sup>3</sup>
		Extrusão, filme plástico	23,60	kg
		Fibra de vidro	18,77	kg
		Inorgânicos químicos	4,79	kg
		Lã mineral	8,37	kg
		Orgânicos químicos	38,83	kg
		Pedra britada lavada	207,35	kg
		Polietileno, alta densidade	23,45	kg
		Polietileno, baixa densidade	0,15	kg
	Resíduos	Betume - disposição final	4,83	kg
		Concreto armado, reciclagem	22.016,80	kg
		Lã mineral - disposição final	27,14	kg
		Polietileno - disposição final	32,08	kg
Serviços	Escavação, escavadora hidráulica	33,52	m <sup>3</sup>	
Transporte	Frete – ferrovia	561,73	tkm	
	Média frota de caminhões (20-28t) - rua	475,02	tkm	
<b>SAÍDA</b>	<b>Produto final</b>	<b>Planta de tratamento de esgoto</b>	<b>3,77E-05</b>	<b>pçs</b>

**Tabela 5.4 - Inventário da Construção do Biodigestor – fluxos de entrada e saída**

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Resíduos	Disposição final de concreto armado	153,60	kg
	Transporte	Frete – ferrovia	2,39	tkm
		Média frota de caminhões (20-28t) - rua	3,30	tkm
	Recursos Naturais	Aço cromado 18/8	0,34	kg
		Aço reforçado	4,18	kg
		Concreto	0,07	m <sup>3</sup>
		Ferro fundido	0,09	kg
	Ocupação e Transformação do Solo	Ocupação - local de construção	0,52	m <sup>2</sup> a
		Ocupação - área industrial, muito ocupada	12,90	m <sup>2</sup> a
		Transformação de pasto e campina/prado	0,52	sqm
Transformação para área industrial, muito ocupada		0,52	sqm	
SAÍDA	Produto final	Planta de digestão anaeróbia de lodo de esgoto	1,72E-04	pcs.

### 5.3.2 ETAPA DE TRATAMENTO

Segundo informações obtidas na ETE Suzano, 90% de todo esgoto bruto que entra para o tratamento, sai do sistema como efluente tratado. Assim sendo, para uma vazão de 0,8 m<sup>3</sup>/s de esgoto bruto recebido na estação, é lançado no Rio Tietê cerca de 0,72 m<sup>3</sup>/s, o que equivale a um total de 62.208 m<sup>3</sup> diariamente. O inventário da ETE (fase líquida), com os principais fluxos de entrada, encontra-se na Tabela 5.5. A Tabela 5.6 apresenta o inventário da mesma etapa, porém para os fluxos de saída.

**Tabela 5.5 - Inventário da Estação de Tratamento de Esgoto – fase líquida – fluxo de entrada**

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Energia	Eletricidade, alta voltagem	43.221,77	MJ
		Eletricidade, incineração de resíduos	4.882,04	MJ
		Calor, incineração de resíduos	7.900,42	MJ
		Gás natural	511,35	MJ
	Instalações	Planta de incineração municipal	2,36E-06	pcs.
		Instalação de aterro	5,61E-07	pcs.
		Rede coletora, classe 1	7,71	m
		Reservatório de escória	3,05E-06	pcs.
		Planta de tratamento de esgoto	3,77E-05	pcs.
	Recursos Naturais	Amonia líquida	5,24	kg
		Cimento hidratado	107,62	kg
		Cloreto de ferro, 40% em água	989,11	kg
		Cal triturado	0,09	kg
		Inorgânicos químicos	0,05	kg
		Orgânicos químicos	0,04	kg
		Sulfato de alumínio	195,96	kg
		Óxido de cromo	3,06E-03	kg
		Ácido hidrocloreto, 30% em água	0,03	kg
		Sulfato de ferro	727,83	kg
		Hidróxido de sódio, 50% em água	25,63	kg
		Dióxido de titânio	0,15	kg
	Resíduos	Cimento, disposição em aterro	269,36	kg
		Papel, incineração municipal	964,22	kg
		Mistura de plásticos, incineração municipal	964,22	kg
		Incineração de resíduos urbanos	9.455,62	kg
		Aterro material residual	269,36	kg
		Escória	1.716,94	kg
		Serviços	Bomba de concreto	14,87
Transporte	Média frota de caminhões (20-28t) - rua	653,18	tkm	
	Frete – ferrovia	1.225,50	tkm	

**Tabela 5.6 - Inventário da Estação de Tratamento de Esgoto – fase líquida – fluxo de saída**

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida		
SAÍDA	EMISSIONES PARA O AR	Alumínio	0,10	kg		
		Amônia	17,42	kg		
		Arsênico	1,57E-05	kg		
		Cádmio	3,43E-07	kg		
		Dióxido de carbono (biótico)	11.881,73	kg		
		Monóxido de carbono (biótico)	10,82	kg		
		Cromo	1,99E-08	kg		
		Cobalto	1,13E-09	kg		
		Cobre	9,14E-06	kg		
		Cianeto	0,09	kg		
		Poeiras	0,71	kg		
		Ferro	0,02	kg		
		Chumbo	1,28E-05	kg		
		Manganês	6,35E-09	kg		
		Mercúrio	2,10E-08	kg		
		Metano (biótico)	31,23	kg		
		Molibdênio	4,21E-05	kg		
		Níquel	5,00E-09	kg		
		Óxido de nitrogênio	44,04	kg		
		Óxido Nitroso	9,27	kg		
		NMVOC	0,14	kg		
		Fósforo	0,10	kg		
		Dióxido de enxofre	55,18	kg		
		Estanho	1,17E-04	kg		
		Calor residual	78.382,08	MJ		
		Zinco	5,51E-05	kg		
			EMISSIONES PARA O SOLO	Alumínio	25,88	kg
				Arsênico	3,42E-03	kg
				Cádmio	2,43E-03	kg
		Carbono		304,20	kg	
		Cromo		0,11	kg	
		Cobalto		0,01	kg	
		Cobre		0,49	kg	
		Outros poluentes		149,24	kg	
	Ferro	233,28		kg		
	Chumbo	0,13		kg		
	Manganês	0,46	kg			
	Mercúrio	2,43E-03	kg			
	Molibdênio	0,01	kg			
	Níquel	0,05	kg			
	Enxofre	27,06	kg			
	Estanho	0,03	kg			
	Zinco	1,33	kg			

EMISSIONES PARA A ÁGUA	Alumínio	52,52	kg
	Amônia	684,29	kg
	Arsênico	0,05	kg
	Arsênico	4,76E-03	kg
	DBO (demanda bioquímica de oxigênio)	617,10	kg
	Cádmio	0,01	kg
	Cálcio	3.048,81	kg
	DQO (demanda química de oxigênio)	1.897,72	kg
	Cloreto	2.519,42	kg
	Cromo	0,42	kg
	Cobalto	0,08	kg
	Cobre	1,61	kg
	COD (carbono orgânico dissolvido)	7,53	kg
	Fluoreto	2,04	kg
	Ferro	501,40	kg
	Chumbo	0,08	kg
	Magnésio	20,37	kg
	Magnésio	23,08	kg
	Manganês	1,67	kg
	Mercurio	4,21E-03	kg
	Molibdênio	0,05	kg
	Níquel	0,36	kg
	Nitrato	3.008,38	kg
	Nitrato	40,06	kg
	Nitrogênio	30,48	kg
	Fosfato	179,33	kg
	Potássio	24,82	kg
	Sódio	136,24	kg
	Sólidos em suspensão	11,70	kg
	Sólidos em suspensão	11,38	kg
	Sulfato	9.192,48	kg
	Estanho	0,13	kg
	Carbono orgânico total dissolvido	69,05	kg
Carbono orgânico total	61,65	kg	
Calor residual	68.428,80	MJ	
Zinco	2,15	kg	
<b>Produto final</b>	<b>Tratamento de esgoto, classe 1</b>	<b>62.208,00</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

De acordo com Doka (2007), o resíduo obtido durante a fase líquida do tratamento do esgoto, também chamado de lodo ativado, passa por fermentação.

O processo de fermentação requer eletricidade para a homogeneização da mistura por meio da movimentação de pás e, calor para manter uniforme (faixa de 30° C) a temperatura de operação, com vista a otimizar a atividade das bactérias (Jungbluth *et al.*, 2007).

Como produto deste processo obtém-se a torta de lodo, resíduo que será descartado e o biogás que, após devido tratamento, é aproveitado como combustível.

### 5.3.3 ETAPA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS, PURIFICAÇÃO E ENRIQUECIMENTO PARA USO NA SOFC

De acordo com Jungbluth *et al.* (2007), para produzir as condições favoráveis resultando na completa digestão anaeróbia do lodo ativado em países de clima frio, torna-se necessário que o biodigestor seja aquecido. Tendo em vista que as condições climáticas do Brasil (clima tropical) favorecem o processo de digestão anaeróbia, não é necessário o aquecimento dos digestores. Desta forma, a energia consumida para o aquecimento do biodigestor não é considerada neste estudo.

O inventário da produção do biogás para um volume, calculado de biogás de 4.700 Nm<sup>3</sup>, e os respectivos fluxos de entrada e saída, é apresentado na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** - Inventário da Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado – fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Energia	Eletricidade, baixa voltagem	4.264,65	MJ
	Instalações	Planta de digestão anaeróbia	1,72E-04	pcs.
	Recursos Naturais	Dióxido de carbono	9.431,96	kg
		Óleo lubrificante	1,34	kg
Transporte	Frete – ferrovia		0,80	tkm
	Média frota de caminhões (20-28t) - rua		0,07	tkm
SAÍDA	Emissões para o Ar	Calor residual	4.264,78	MJ
		Dióxido de carbono (biótico)	469,31	kg
		Metano (biótico)	15,82	kg
	Produto Final	Biogás	4.700,00	Nm3

Para a utilização do biogás na CaC do tipo óxido sólido é necessário que seja feita a purificação do biogás, ou seja, a eliminação das impurezas capazes

de danificar os equipamentos e diminuir a eficiência do sistema (Rychebosch *et al*, 2011).

Jungbluth *et al.* (2007) utilizaram o método PSA (*Pressure Swing Adsorption*), descrito no capítulo 3.3.3, para esta fase do processo, por ser a tecnologia mais moderna para purificação e enriquecimento de biogás. O uso da tecnologia PSA determina uma relação volume de metano/volume de biogás de 1:1,5, ou seja, para a produção de um normal-metro cúbico (Nm<sup>3</sup>) de metano (96%) é necessário 1,5 Nm<sup>3</sup> do biogás.

Portanto, o volume total de metano (96%) produzido no sistema, utilizando-se a tecnologia PSA, é de 3.133 Nm<sup>3</sup>. A Tabela 5.8 apresenta os principais fluxos de entrada (matérias, energia e instalações) e respectivos fluxos de saída desta etapa.

**Tabela 5.8** - Inventário da Produção de Metano (96%) - fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Energia	Eletricidade, média voltagem	5.639,35	MJ
	Recursos	Biogás	4.700,00	Nm3
	Instalações	Instalações, produção química	1,25E-07	kg
SAÍDA	Emissões para o Ar	Calor residual	5.639,40	MJ
		Dióxido de carbono (biótico)	2.712,74	kg
		Dióxido de enxofre	1,73	kg
		Metano (biótico)	69,73	kg
		Sulfeto de hidrogênio	0,01	kg
	<b>Produto final</b>	<b>Metano 96% de biogás - purificado</b>	<b>3.133,00</b>	<b>Nm3</b>

Com o objetivo de transportar o biogás purificado até a célula a combustível SOFC, é necessário que o mesmo seja pressurizado (1-5 bar). Conforme especificado no capítulo de Metodologia, para construção do inventário da pressurização do metano (96%), o fluxo de referência utilizado é a energia obtida do gás metano, expresso em MJ, calculado considerando-se o poder calorífico inferior (PCI) do metano de 34,45 MJ/Nm<sup>3</sup>. O resultado do conteúdo energético do metano foi de 107.932 MJ (Tabela 5.9).

**Tabela 5.9** - Inventário da Produção de Metano (96%) a alta pressão – fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Energia	Eletricidade, média voltagem	28,17	MJ
		Gás natural, queimado em caldeira	180,26	MJ
	Instalações	Gás natural - rede de distribuição alta pressão	0,10	m
	Recursos	Metano 96% de biogás purificado	3.133,00	Nm3
SAÍDA	Emissões para o Ar	Calor residual	28,17	MJ
		Dióxido de carbono (biótico)	0,06	kg
		Dióxido de enxofre	0,00	kg
		Metano (biótico)	1,08	kg
	<b>Produto final</b>	<b>Metano 96% de biogás alta pressão</b>	<b>107.931,85</b>	<b>MJ</b>

Primas (2007) afirma que a célula a combustível do tipo SOFC opera utilizando metano (96%) a baixa pressão. Assim, para o uso do metano na célula é necessária que seja feita a descompressão do gás. Durante o processo de descompressão ocorre uma perda de 0,69% (Jungbluth *et al*, 2007a), equivalente a 746 MJ. A produção final de energia é de 107.184 MJ. O inventário deste processo é apresentado na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10** - Inventário da Produção de Metano 96% a baixa pressão - fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Energia	Metano 96% de biogás alta pressão	107.931,85	MJ
		Gás natural, queimado em caldeira	21,46	MJ
	Instalações	Gás natural - rede de distribuição alta pressão	0,30	m
SAÍDA	Emissões para o Ar	Dióxido de carbono (biótico)	0,88	kg
		Dióxido de enxofre	3,40E-04	kg
		Metano (biótico)	15,40	kg
	<b>Produto final</b>	<b>Metano 96% de biogás baixa pressão</b>	<b>107.184,99</b>	<b>MJ</b>

### 5.3.4 ETAPA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NA CÉLULA A COMBUSTÍVEL DO TIPO SOFC

Para a construção do inventário da produção de energia em CaC do tipo SOFC foram consideradas as seguintes premissas:

- i) O sistema de célula a combustível SOFC é a do tipo tubular com potência final de saída  $125kW_{el}$ ;
- ii) O biogás utilizado apresenta baixo poder calorífico e para ser economicamente viável o uso como combustível na SOFC, torna-se necessário um processo de purificação e enriquecimento. O gás produzido é de qualidade similar à do gás natural<sup>14</sup>;
- iii) A vida útil de operação de célula é de 80.000 horas, com manutenção a cada 8.000 horas;
- iv) A vida útil do tanque de gás, com capacidade de  $8m^3$ , é de 100.000 horas;
- v) Com base no PCI do metano, de  $34,45Nm^3/MJ$ , é necessário  $0,029 Nm^3/MJ$  de biogás;
- vi) A eficiência média da CaC é de 47% para geração de eletricidade e 33% para geração de calor (Primas, 2007).

Os resultados obtidos na etapa de produção de energia elétrica e calor pela SOFC são apresentados na Tabela 5.11. O total de energia elétrica e calor gerado, em seu equivalente em energia primária, são de 50.376 MJ e 35.371 MJ, respectivamente.

---

<sup>14</sup> De acordo com Jungbluth *et al* (2007), comparado com o gás natural, o biogás bruto é um gás pesado e a presença de  $CO_2$  e vapor de água reduzem seu PCI (variando, de acordo com a composição do biogás, entre 18,5 e 22,5 MJ/Nm<sup>3</sup>), tornando-o economicamente inviável para uso e transporte.

**Tabela 5.11** – Inventário da Produção de Energia na SOFC - fluxos de entrada e saída

Fluxos		Unidade Básica	Quantidade	Unidade de Medida
ENTRADA	Instalações	Armazenamento 10.000L	1,23E-03	pcs.
		Célula a combustível SOFC 125 kWe	1,73E-03	pcs.
		Manutenção célula a combustível SOFC 125 kWe	0,02	pcs.
	Recurso	Água	2,57	Kg
Metano 96% de biogás baixa pressão		107.184,99	MJ	
SAÍDA	Emissões para o Ar	Calor residual	68.339,91	MJ
		Dióxido de carbono (biótico)	0,18	Kg
		Dióxido de enxofre	0,06	Kg
		Metano (biótico)	0,43	Kg
		Monóxido de carbono (biótico)	5.988,91	Kg
		NMVOG	0,08	Kg
		Óxidos de Nitrogênio	0,21	Kg
	Produto final	<b>Calor, biogás, exergia alocação, em células a combustível SOFC 125kWe</b>	<b>35.371,05</b>	<b>MJ</b>
		<b>Energia elétrica, biogás, exergia alocação, em células a combustível SOFC 125 kWe</b>	<b>50.376,95</b>	<b>MJ</b>

A partir da análise dos resultados obtidos no inventário verificou-se que é possível gerar cerca de 14.000 kWh de energia elétrica, a partir do tratamento de 69.120 m<sup>3</sup> de esgoto por dia, isto é, 0,20 kWh/m<sup>3</sup> de esgoto a ser tratado na ETE. A relação entre a geração de energia elétrica e o biogás produzido na ETE é 2,98 kWh/Nm<sup>3</sup> de biogás oriundo dos biodigestores.

#### 5.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS

Os resultados aqui apresentados descrevem os principais impactos relacionados à demanda acumulada de energia (CED) e potencial de aquecimento global, das etapas envolvidas nesta ACV: **i)** construção e instalação das plantas de tratamento e digestor; **ii)** tratamento do efluente bruto; **iii)** produção do combustível e **iv)** produção de energia por meio do uso do biogás na célula combustível SOFC.

## 5.4.1 DEMANDA ACUMULADA DE ENERGIA (CED)

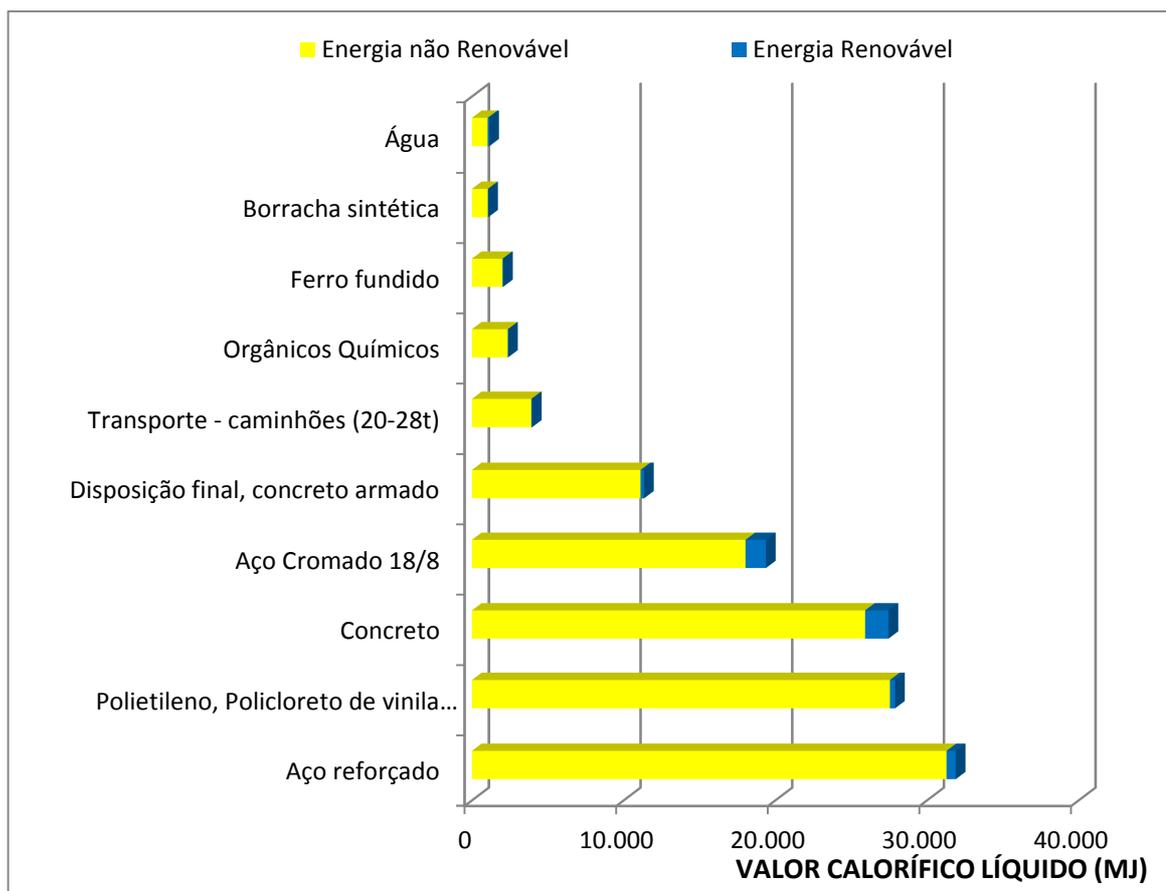
### 5.4.1.1 ETAPA DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO

Conforme apresentado na tabela 5.12, a construção da planta da ETE contribui praticamente em 100% da demanda acumulada de energia (CED) da etapa de construtiva de ambas as plantas – ETE e Biodigestor.

**Tabela 5.12 - Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Construção e Instalação (1 dia de operação)**

	TOTAL ETAPA CONSTRUTIVA		Construção da Planta de ETE		Construção da Planta do Digestor	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Energia não Renovável	129.450,40	96,08	129.348,64	96,00	101,76	0,08
Energia Renovável	5.283,60	3,92	5.159,68	3,83	123,92	0,09
<b>TOTAL</b>	<b>134.734,01</b>	<b>100,00</b>	<b>134.508,321</b>	<b>99,83</b>	<b>225,68</b>	<b>0,17</b>

A figura 5.14 apresenta a contribuição dos principais insumos e/ou serviços da fase de construção da planta da ETE, com destaque aos materiais relacionados tanto a produção, quanto a utilização de concreto e aço durante a construção da planta. Estes dois materiais equivalem, em conjunto, a 44% da CED da construção da planta da ETE, enquanto o uso e manufatura de tubos (da rede de coleta) e o aço (componente do equipamento de aeração), representam 21% e 15%, respectivamente.



**Figura 5.14 - Contribuições de Demanda Acumulada de Energia na fase de Construção da planta da ETE**

#### 5.4.1.2 ETAPA DE TRATAMENTO

A Tabela 5.13 apresenta os resultados referentes à CED da etapa de tratamento do esgoto, onde se verifica que o consumo de eletricidade, oriundo principalmente da movimentação das pás do tanque de aeração, equivale a 58.720 MJ diários, cerca de 65% da demanda total de energia da etapa.

**Tabela 5.13 - Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Tratamento (1 dia operação)**

	TOTAL DA ETAPA DE TRATAMENTO		Eletricidade, alta voltagem, na rede		Cloreto de ferro, 40% em água		Restante	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Energia não Renovável	48.186	53,17	17.948	19,81	17.707	19,54	12.531	13,83
Energia Renovável	42.436	46,83	40.772	44,99	1.170	1,29	494	0,55
<b>TOTAL</b>	<b>90.622</b>	<b>100</b>	<b>58.720</b>	<b>64,80</b>	<b>18.877</b>	<b>20,83</b>	<b>13.025</b>	<b>14,37</b>

Tal como consta em um estudo realizado por Dixon *et al.* (2003), o alto consumo de energia durante a operação da planta é um dos mais significantes impactos do sistema de tratamento. Cabe ressaltar que a CED total desta etapa está relacionada a um dia de operação, sendo que a razão entre o consumo de energia total (90.622 MJ) e o volume de efluente tratado (62.208 m<sup>3</sup>) é de 1,46 MJ/m<sup>3</sup> ou 0,40 kWh/m<sup>3</sup>.

A Figura 5.15 apresenta as contribuições relativas à energia renovável e energia não renovável dos insumos de maior relevância desta etapa. Verifica-se que 69% da eletricidade utilizada para o tratamento do esgoto provem de usinas hidroelétricas (fonte renovável).

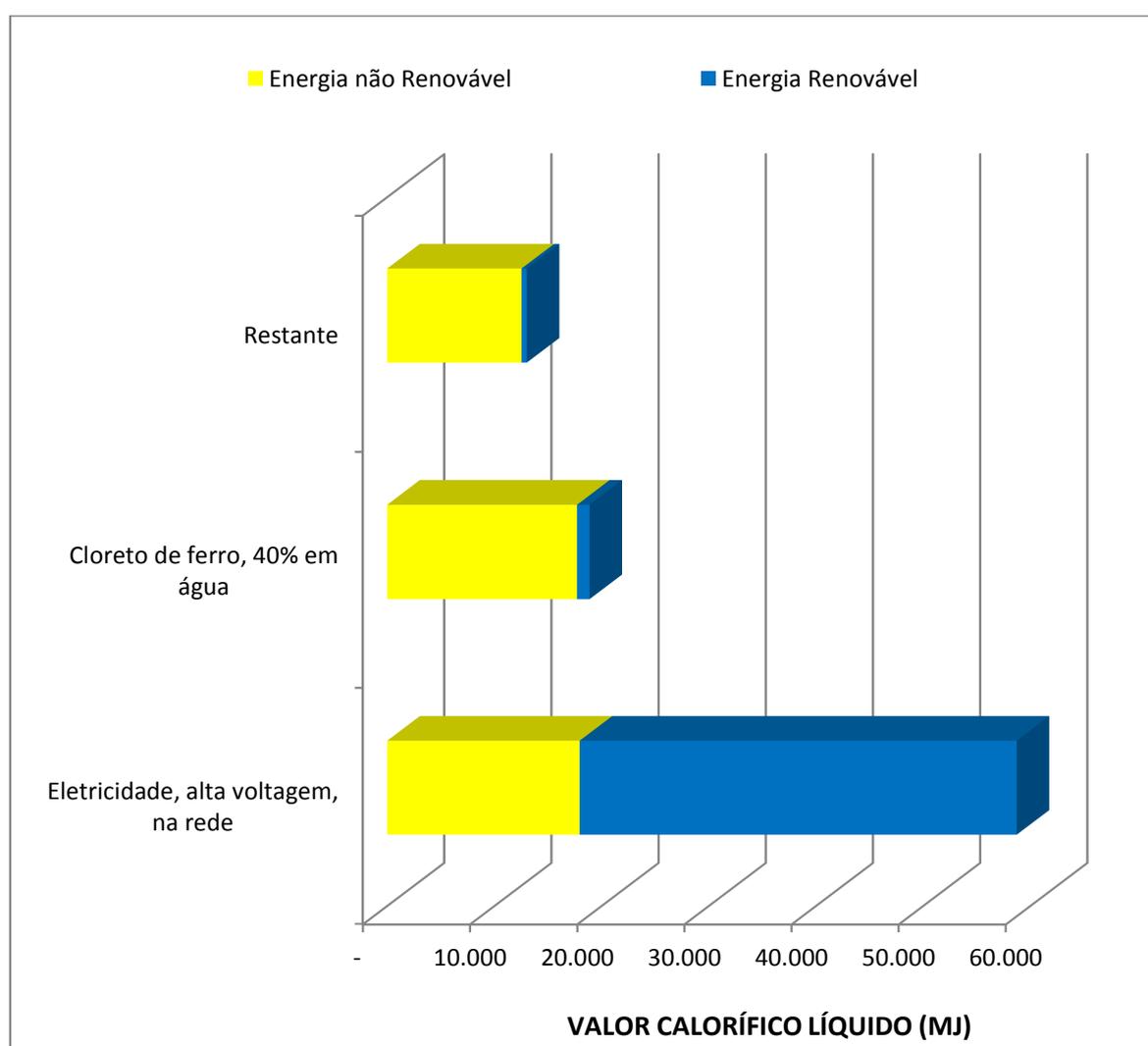


Figura 5.15 - Maiores contribuições na fase do Tratamento do Esgoto

### 5.4.1.3 ETAPA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS/METANO (96%)

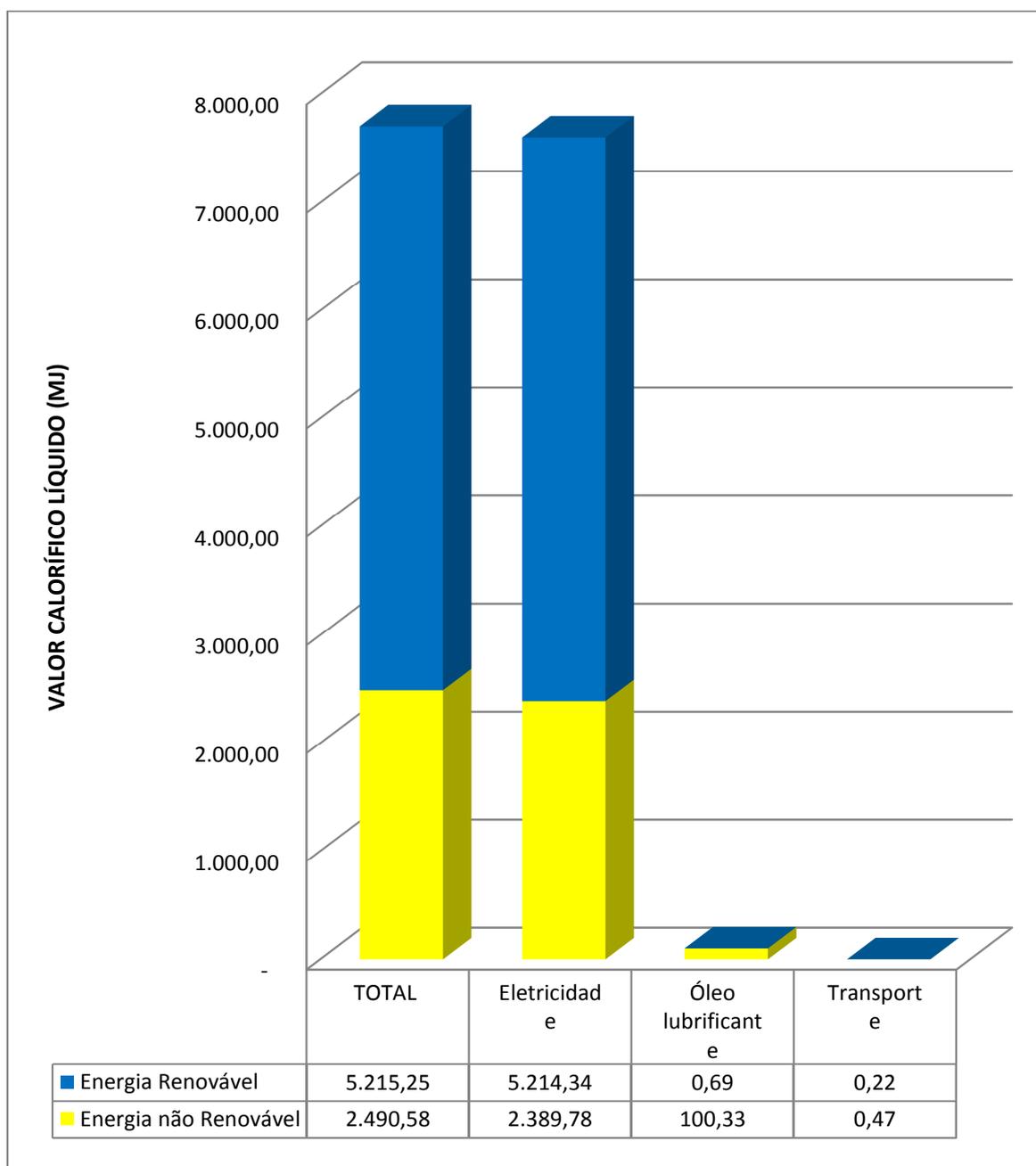
Na etapa de produção do combustível, a maior demanda acumulada de energia é a fase de produção do metano (7.914 MJ), ou seja, de purificação e enriquecimento do biogás, que utiliza a técnica PSA (cf. capítulo 3.3) (Tabela 5.14)

**Tabela 5.14** - Demanda Acumulada de Energia – Etapa de Produção do Combustível (1 dia de operação)

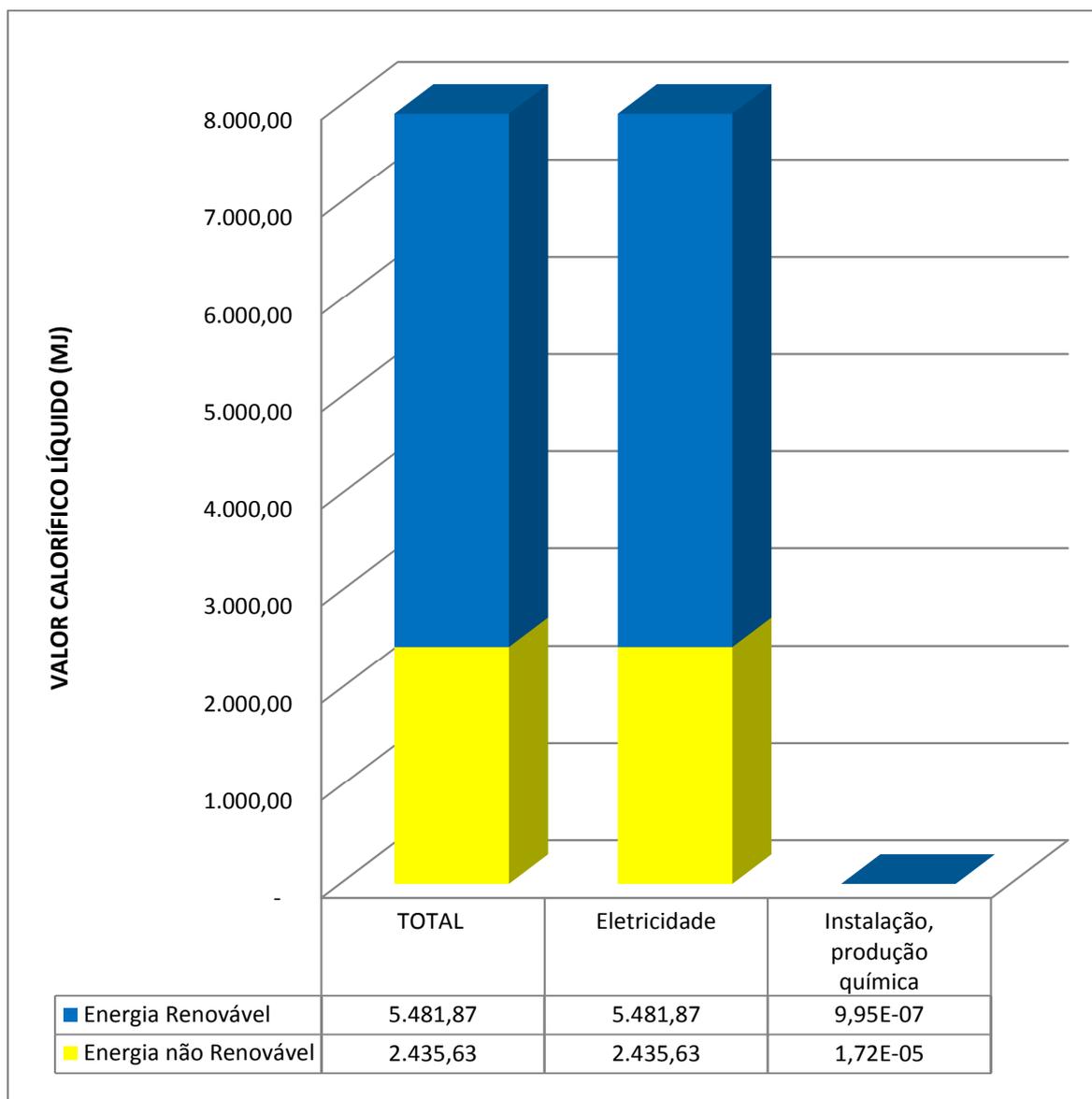
	TOTAL DA ETAPA PRODUTIVA		Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado		Produção de Metano (96%)		Produção de Metano (96%) a alta pressão		Produção de Metano (96%) a baixa pressão	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Energia não Renovável	5.804	35,24	2.489	15,11	2.432	14,77	409	2,49	473	2,88
Energia Renovável	10.664	64,76	5.125	31,12	5.481	33,29	33	0,20	23	0,14
<b>Total</b>	<b>16.469</b>	<b>100,00</b>	<b>7.614</b>	<b>46,23</b>	<b>7.914</b>	<b>48,05</b>	<b>443</b>	<b>2,69</b>	<b>497</b>	<b>3,02</b>

Conforme ilustram a figura 5.16 e a figura 5.17, o consumo de energia elétrica é a atividade de maior demanda acumulada de energia nas duas fases de maior CED da etapa de produção de biogás/metano. Tal consumo está relacionado a dois processos: **i)** ao de purificação e remoção de H<sub>2</sub>S do biogás durante a produção de metano (96%) e **ii)** ao de movimentação das pás de homogeneização da matéria orgânica em decomposição durante a fase da biodigestão.

Similarmente à etapa de tratamento, na etapa de produção de biogás/metano, a eletricidade consumida é oriunda por cerca de 70% de energia renovável (usinas hidroelétricas).



**Figura 5.16 - Demanda Acumulada de Energia – Maiores contribuições - Etapa de Produção do Combustível, fase de Produção do Biogás**



**Figura 5.17 - Demanda acumulada de Energia – Maiores contribuições - Etapa Produção Combustível, fase de Produção do Metano a 96%**

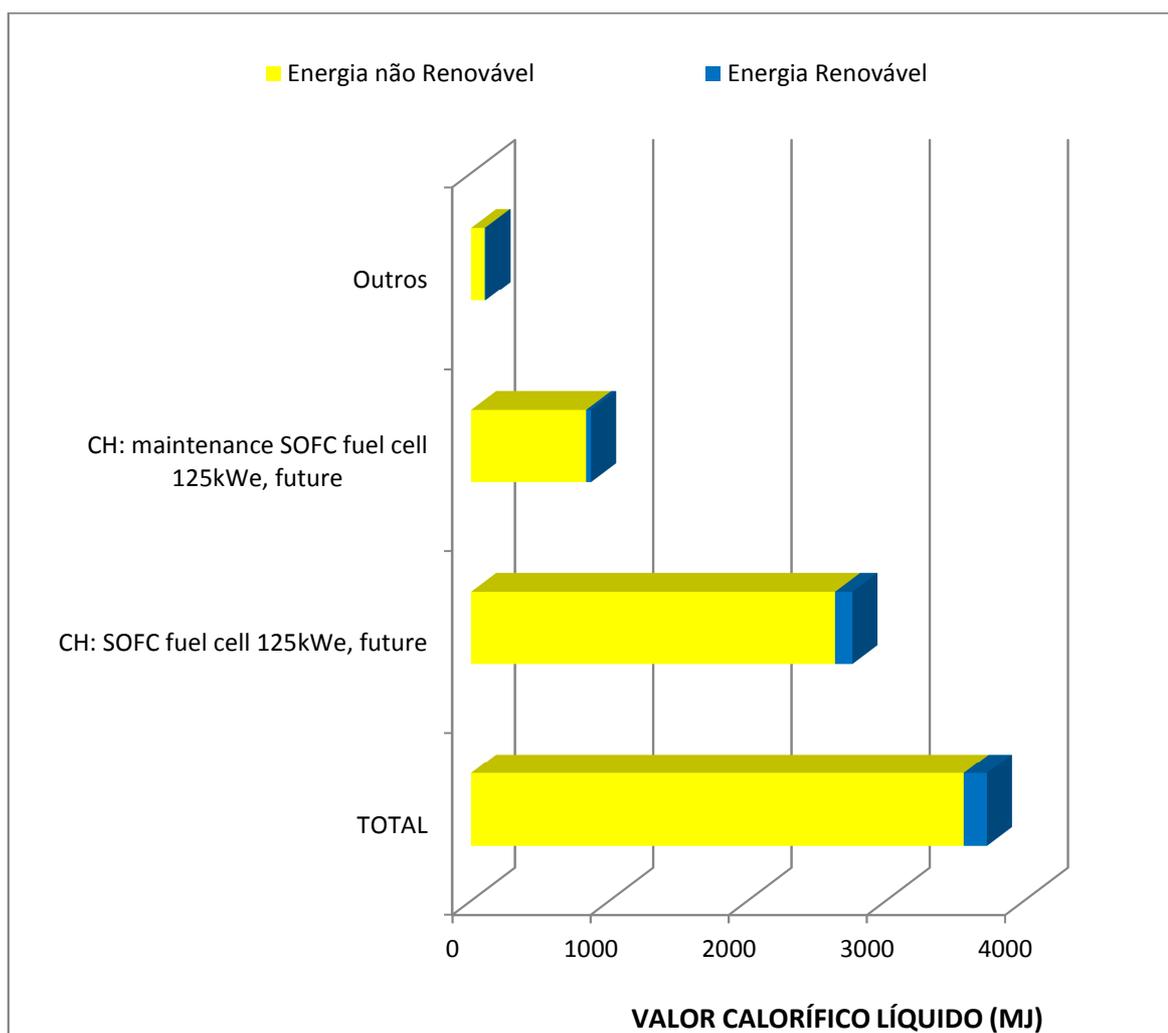
#### 5.4.1.4 ETAPA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NA SOFC

Na produção de eletricidade pela SOFC, o consumo de energia primária não renovável (95,5% do total de energia consumida neste estágio) está relacionada ao próprio processo de manufatura da célula e à sua manutenção (Tabela 5.15).

**Tabela 5.15** - Demanda Acumulada de Energia – Etapa Produção de Energia em SOFC (1 dia operação)

	TOTAL DA FASE		Célula a Combustível SOFC, 125 kWe		Manutenção da CaC SOFC, 125 kWe		Outros	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Energia não Renovável	3.563	95,50	2.632	70,55	831	22,29	98	2,65
Energia Renovável	168	4,50	125	3,38	36	0,98	5	0,15
<b>Total</b>	<b>3.731</b>	<b>100,00</b>	<b>2.758</b>	<b>73,93</b>	<b>868</b>	<b>23,27</b>	<b>104</b>	<b>2,80</b>

O consumo diário de energia renovável (125 MJ) está relacionado a energia elétrica utilizada nos processos de manufatura e manutenção e, não durante a geração de eletricidade da SOFC, uma vez que a energia oriunda do biogás não é contabilizada para a produção de energia elétrica e energia térmica (Figura 5.18).



**Figura 5.18** - Demanda acumulada de Energia – Etapa Produção de Energia em SOFC

A tabela 5.16 apresenta o resumo geral da Demanda Acumulada de Energia de todas as etapas. O maior consumo de energia pode ser observado na etapa de construtiva, com 55% da CED total, em especial de energia não renovável, relacionada com os materiais utilizados para a construção e instalação da ETE e do biodigestor.

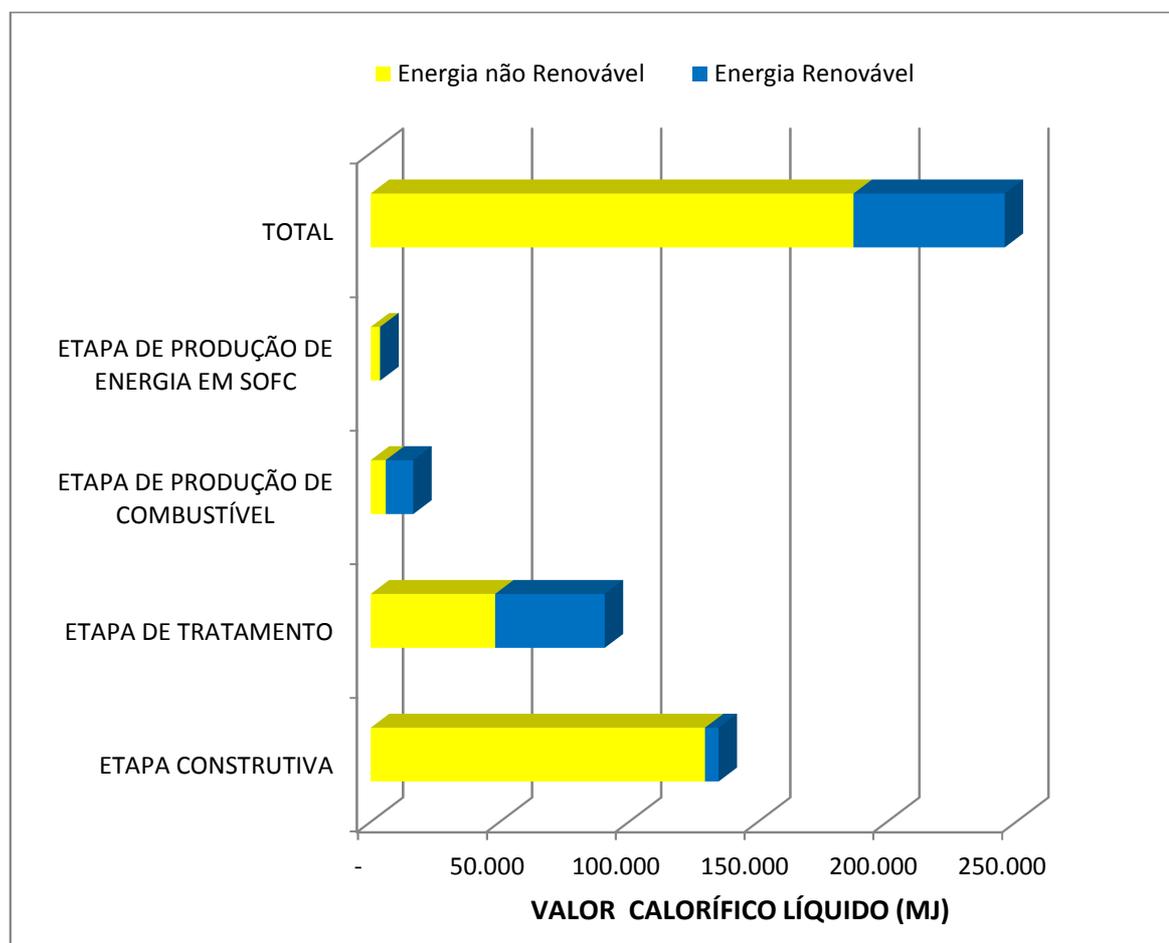
A fase de tratamento, com 37% da CED da etapa de tratamento, consome cerca de 90.600 MJ de energia, sendo 44% (39.827 MJ) no uso da eletricidade proveniente de hidroelétricas durante, principalmente, o funcionamento da pás dos tanque de aeração.

**Tabela 5.16 - Demanda Acumulada de Energia – Todas as Etapas (1 dia operação)**

	ETAPA CONSTRUTIVA		ETAPA DE TRATAMENTO		ETAPA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS		ETAPA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA		TOTAL	
	(Instalações de Tratamento e Digestão)		(Tratamento do Esgoto)		(Biogás e Metano 96%)		(Produção de Energia Elétrica)			
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
Óleo cru	44.387	18,08	9.140	3,72	1.192	0,49	649	0,26	55.368	22,55
Carvão Mineral	40.883	16,65	11.157	4,54	1.377	0,56	1.072	0,44	54.489	22,19
Lignina	4.480	1,82	4.122	1,68	59	0,02	326	0,13	8.986	3,66
Gás Natural	23.640	9,63	11.808	4,81	2.079	0,85	874	0,36	38.401	15,64
Urânio	16.061	6,54	11.958	4,87	1.098	0,45	643	0,26	29.759	12,12
<b>Total Energia não Renovável</b>	<b>129.450</b>	<b>52,72</b>	<b>48.186</b>	<b>19,62</b>	<b>5.804</b>	<b>2,36</b>	<b>3.563</b>	<b>1,45</b>	<b>187.003</b>	<b>76,16</b>
Energia, poder calorífico, substâncias orgânicas	835	0,34	2.458	1,00	620	0,25	40	0,02	3.953	1,61
Energia, poder calorífico, biomassa, florestas	0	0,00	-	-	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Energia, eólica, convertida	160	0,07	149	0,06	4	0,00	11	0,00	324	0,13
Energia, reservatórios hidroelétricas, convertida	4.284	1,74	<b>39.827</b>	16,22	10.040	4,09	117	0,05	54.267	22,10
Energia, solar, convertida	1	0,00	2	0,00	0	0,00	0	0,00	4	0,00
Madeira	0	0,00	-	-	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Recursos materiais	2	0,00	-	-	0	0,00	0	0,00	2	0,00
<b>Total Energia Renovável</b>	<b>5.283</b>	<b>2,15</b>	<b>42.436</b>	<b>17,28</b>	<b>10.664</b>	<b>4,34</b>	<b>168</b>	<b>0,07</b>	<b>58.551</b>	<b>23,84</b>
<b>ENERGIA TOTAL</b>	<b>134.733</b>	<b>54,87</b>	<b>90.622</b>	<b>36,90</b>	<b>16.469</b>	<b>6,71</b>	<b>3.731</b>	<b>1,52</b>	<b>245.554</b>	<b>100,00</b>

O biogás produzido na ETE gera cerca de 3.133 Nm<sup>3</sup> de metano ao dia. O consumo de energia primária (renovável – 5.804 MJ e não renovável – 10.664 MJ) para processar todo biogás produzido nos biodigestores e gerar o metano (96%) é de 5,26 MJ/Nm<sup>3</sup> de metano por dia. Para o processo completo, desde a construção até o uso do metano na SOFC (245.554MJ) são necessários 3,55 MJ/m<sup>3</sup> de esgoto bruto.

Analisando-se a figura 5.19, verifica-se que, no geral, o maior valor de consumo de energia está relacionado com energia não renovável, cerca de 76% do total de energia consumida, sendo que somente na etapa produtiva o valor de energia renovável é superior ao da energia não renovável, com 65% do CED da etapa.



**Figura 5.19 - Demanda Acumulada de Energia – Todas as Etapas**

A tabela 5.17 apresenta o consumo de energia elétrica por etapa de todo o sistema modelado. A produção diária de energia elétrica pela SOFC (14.000 kWh)

é capaz de suprir totalmente o consumo de energia elétrica para o tratamento dos efluentes (fase líquida e digestão anaeróbia), que é de 47.452 MJ (13.181 kWh) ao dia. Considerando-se o volume de 69.120 m<sup>3</sup> de águas residuárias (afluente) que chega na ETE para tratamento, verifica-se que, para o processo completo de tratamento e digestão do esgoto, são necessários 0,69 MJ de energia elétrica por m<sup>3</sup> de esgoto bruto (MJ/m<sup>3</sup>).

**Tabela 5.17** - Demonstrativo de Consumo de Energia por Etapa – (1 dia operação)

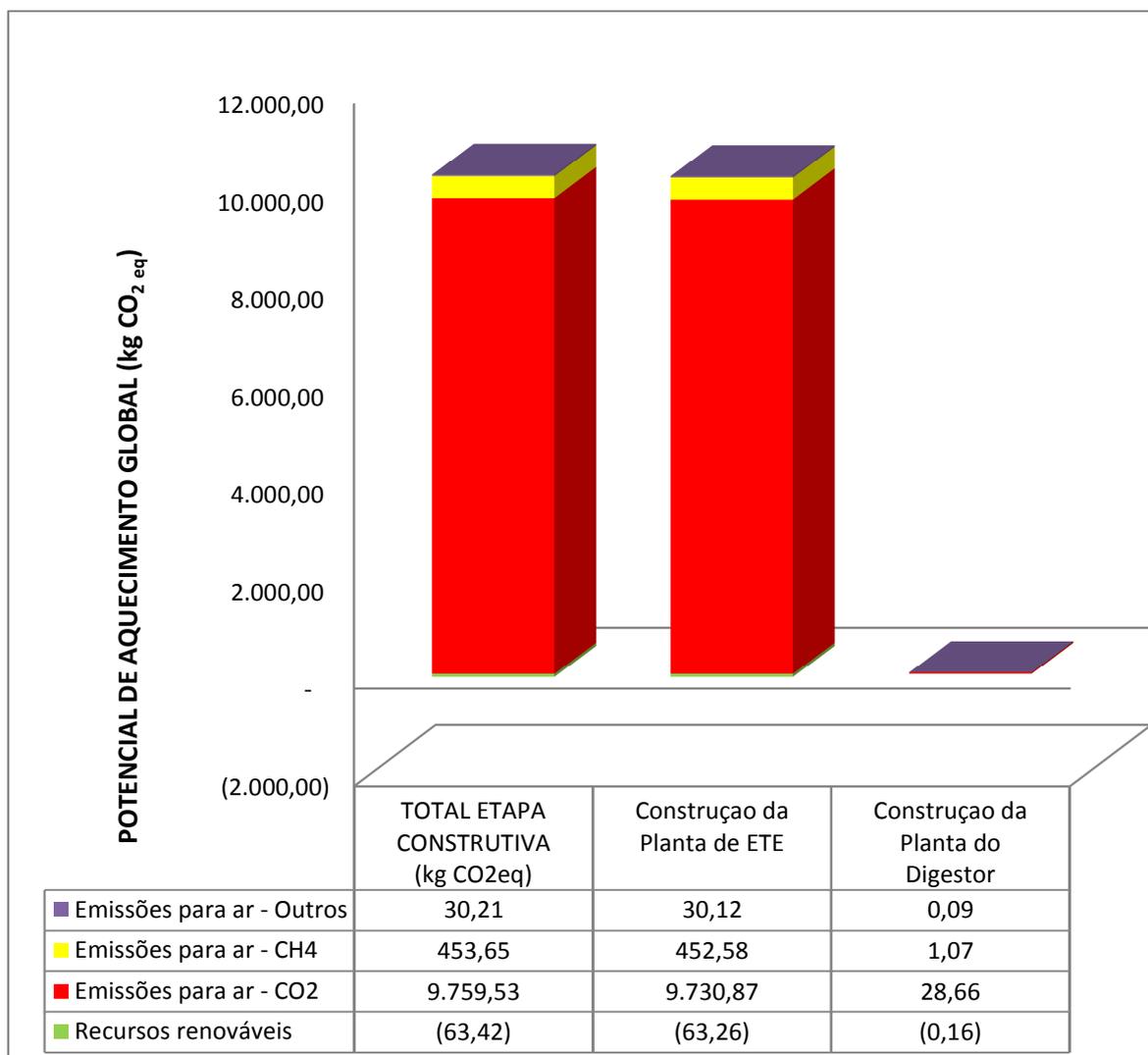
Consumo de Energia (MJ)	Construção da Planta de ETE	Planta Tratamento Esgoto - fase líquida	Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado	Produção de Metano (96%)	Produção de Metano (96%) a alta pressão
Eletricidade, alta voltagem, na rede		43.196,35			
Eletricidade, média voltagem, na rede				5.643,84	28,22
Eletricidade, baixa voltagem, na rede			4.255,71		
Eletricidade, produção	1,32				
<b>TOTAL (MJ)</b>	<b>1,32</b>	<b>43.196,35</b>	<b>4.255,71</b>	<b>5.643,84</b>	<b>28,22</b>

## 5.4.2 POTENCIAL AQUECIMENTO GLOBAL

O indicador Potencial de Aquecimento Global (kg de CO<sub>2</sub> equivalente) utilizado para esta ACV é dado pela metodologia CML 2001 (Nov. 2009). Os resultados referentes a este indicador estão apresentados por etapas, separadamente.

### 5.4.2.1 ETAPA DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO

Em termos de potencial de aquecimento global (emissão de kg de CO<sub>2eq</sub>) na etapa construtiva, assim como ocorreu na CED, o maior valor de emissões de CO<sub>2eq</sub> produzido por dia corresponde à construção da planta da ETE (Figura 5.20), com valor de cerca de 10.150 kg de CO<sub>2eq</sub> ou 99,7% do total da etapa construtiva.



**Figura 5.20 – Principais Emissões na Etapa Construtiva**

A Tabela 5.18 mostra que, os insumos de maior participação no valor total das emissões são: o concreto, o aço reforçado e o cromado, além as atividades de transporte para a disposição final de entulho. O concreto junto com o aço reforçado, materiais básicos da construção da estação de tratamento, emitem por dia 6.349 kg de CO<sub>2eq</sub> (62,5% do total).

Observa-se também, nesta etapa, um valor discreto de emissões evitadas, de - 63,26 kg de CO<sub>2eq</sub>, inferior a 1%, em decorrência do uso de recursos renováveis.

**Tabela 5.18** – Principais contribuições das emissões na Construção da ETE (1 dia operação) (kg CO<sub>2</sub> eq)

	TOTAL	Concreto	Aço reforçado	Disposição final, materiais diversos	Aço Cromado 18/8	Polietileno, Policloreto de vinila (PVC), Polipropileno	Outros
Recursos Renováveis	<b>(63,26)</b>	(15,61)	(18,14)	(2,13)	(16,48)	-	(10,90)
Emissões para ar - CO2	<b>9.730,87</b>	4.594,94	1.553,11	1.617,85	991,37	614,53	359,07
Emissões para ar - CH4	<b>452,58</b>	97,40	124,08	22,48	58,78	132,98	16,86
Emissões para ar - Outros	<b>30,12</b>	7,43	6,71	6,13	6,38	0,23	3,24
<b>TOTAL</b>	<b>10.150,31</b>	<b>4.684,16</b>	<b>1.665,76</b>	<b>1.644,33</b>	<b>1.040,05</b>	<b>747,74</b>	<b>368,27</b>

#### 5.4.2.2 ETAPA DE TRATAMENTO

Em relação à etapa de tratamento de esgoto, observa-se, conforme ilustrado na Figura 5.21, que as maiores emissões de CO<sub>2eq</sub> são oriundas do dióxido de carbono, em especial o CO<sub>2</sub> biótico, que é emitido principalmente durante a atividade de degradação biológica da matéria orgânica nos tanques de aeração.

A Tabela 5.19, apresenta os valores das emissões resultantes. Cerca de 51% (11.881 kg CO<sub>2eq</sub>) referem-se ao CO<sub>2</sub> biótico<sup>15</sup>, produzido durante o tratamento da fase líquida do esgoto.

<sup>15</sup> CO<sub>2</sub> biótico: É o dióxido de carbono proveniente da atividade de biodegradação. O mesmo ocorre com o CH<sub>4</sub> biótico.

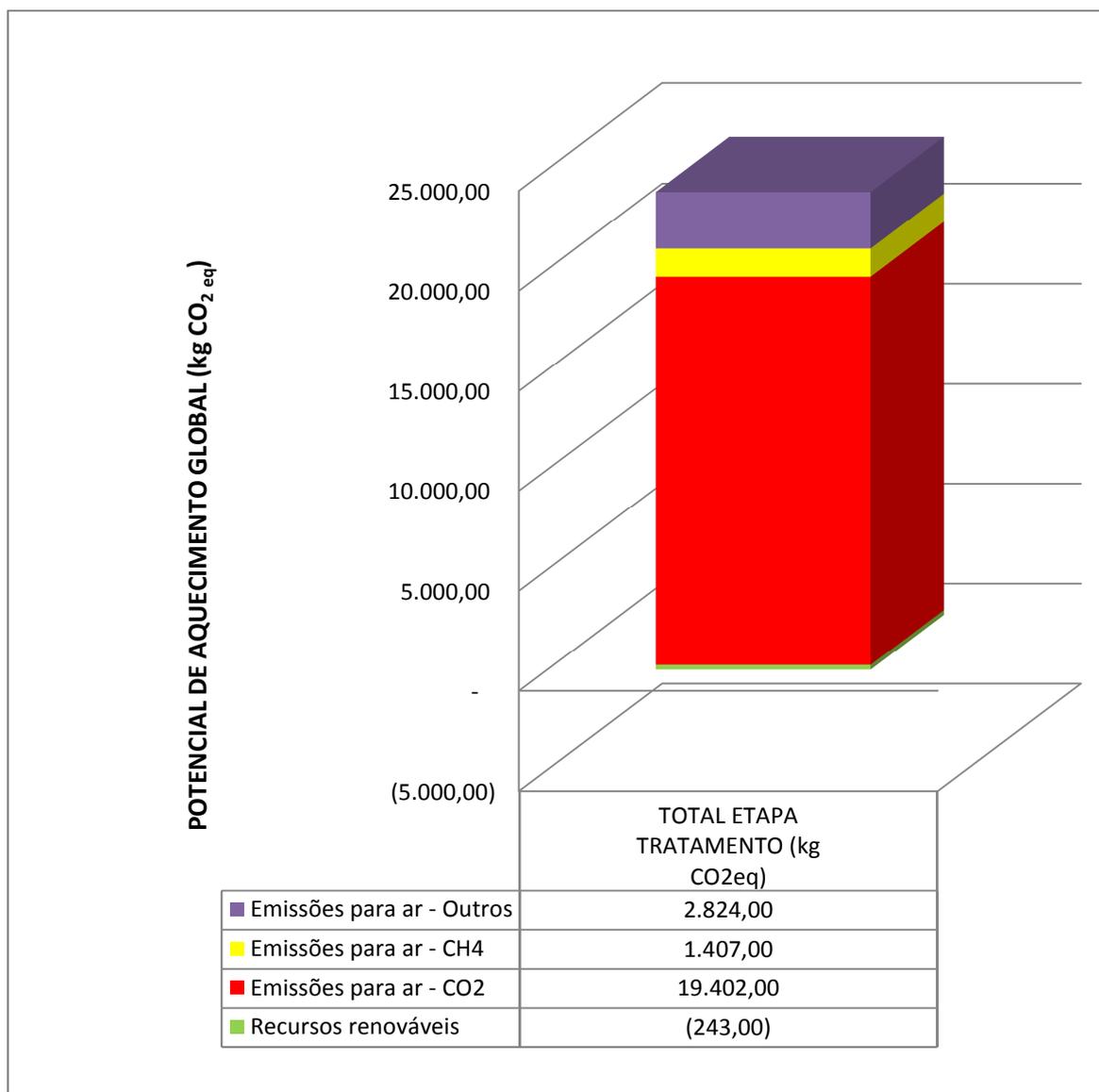


Figura 5.21 - Potencial de Aquecimento Global (kg CO<sub>2</sub>eq) – Etapa Tratamento

Tabela 5.19 - Potencial Aquecimento Global – Etapa de Tratamento – Principais contribuintes para emissões (1 dia operação)

	TOTAL DA ETAPA DE TRATAMENTO kg CO <sub>2</sub> eq	Processo de tratamento de águas residuárias kg CO <sub>2</sub> eq	Eletricidade alta voltagem na rede kg CO <sub>2</sub> eq	Disposição final - resíduos kg CO <sub>2</sub> eq	Outros kg CO <sub>2</sub> eq
Recursos Renováveis - CO <sub>2</sub>	(243)	-	(196)	(1)	(46)
Emissões para ar - CO <sub>2</sub> (biótico)	19.402	<b>11.881</b>	2.325	3.683	1.512
Emissões para ar - CH <sub>4</sub>	1.407	781	557	3	66
Emissões para ar - Outros	2.824	2.762	30	12	20
<b>TOTAL</b>	<b>23.390</b>	<b>15.424</b>	<b>2.716</b>	<b>3.698</b>	<b>1.552</b>

### 5.4.2.3 ETAPA DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS/METANO (96%)

No que tange a produção do combustível, a maior contribuição em termos de emissões encontra-se na fase de purificação do metano, com 4.809 kg de CO<sub>2eq</sub> emitidos por dia (Figura 5.22).

As emissões relativas à fase de purificação e enriquecimento do biogás para a produção do metano (96%) estão relacionadas às emissões do gás residual, cujos componentes não foram aproveitados (Jungbluth *et al*, 2007).

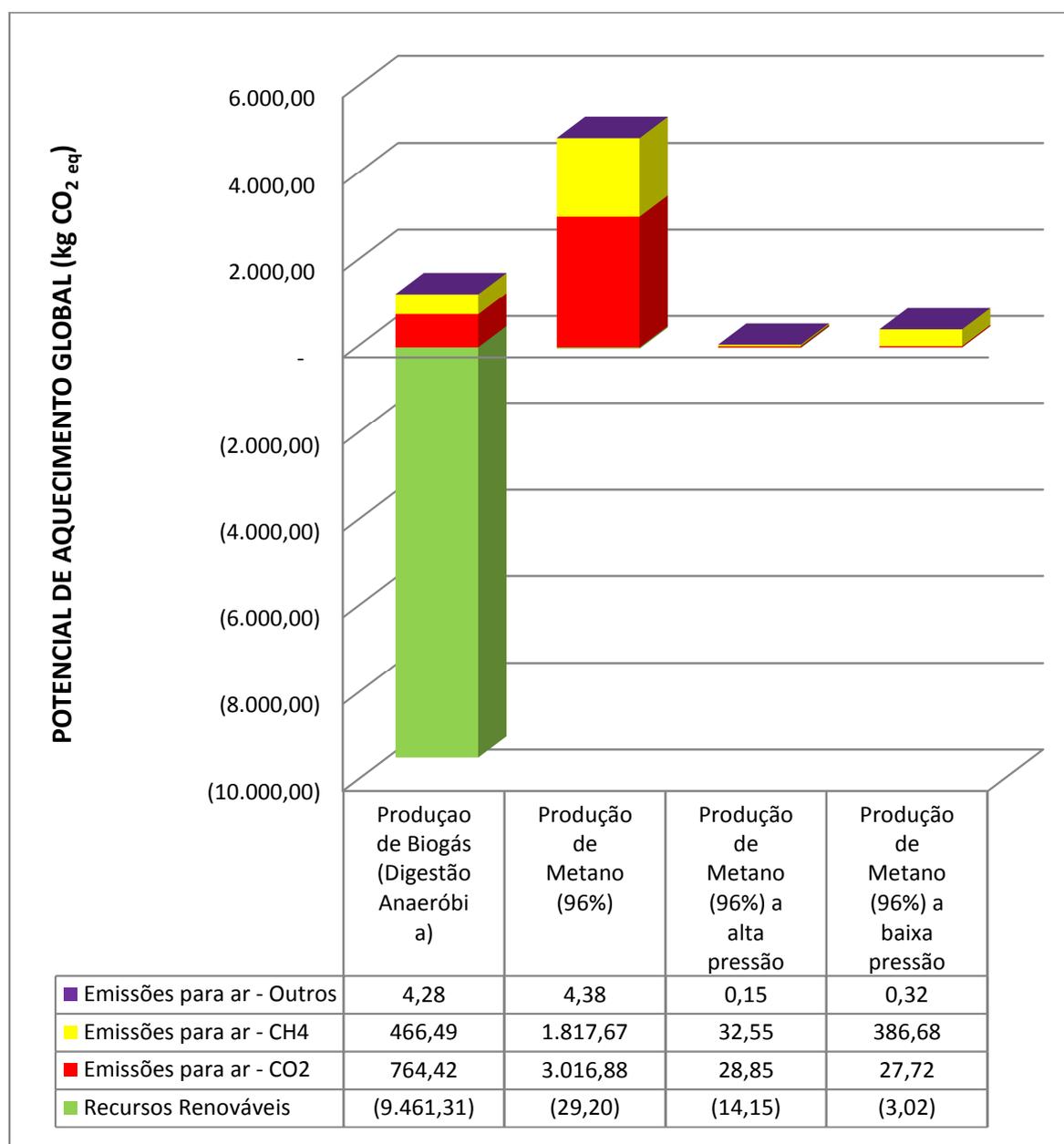


Figura 5.22 - Potencial de Aquecimento Global (Kg CO<sub>2eq</sub>) – Etapa Produção de Combustível

Na fase de digestão anaérobica, a utilização do lodo ativado, como fonte de recurso renovável, com conseqüente produção e aproveitamento de biogás, permite que a emissão de cerca de 9.460 kg de CO<sub>2eq</sub> sejam evitadas (Tabela 5.20). As emissões evitadas nos estágios de produção do metano a 96%, incluindo os processos de compressão e descompressão, referem-se ao uso de energia elétrica oriunda de fontes renováveis.

**Tabela 5.20-** Potencial de Aquecimento Global (Kg CO<sub>2eq</sub>) – Etapa Produção de Combustível – Digestão Anaeróbia do Lodo Ativado (1 dia operação)

	TOTAL (kg CO <sub>2eq</sub> )	Produção de biogás (kg CO <sub>2eq</sub> )	Eletricidade baixa voltagem na rede (kg CO <sub>2eq</sub> )	Outros (kg CO <sub>2eq</sub> )
Recursos Renováveis - CO <sub>2</sub>	(9.461,31)	(9.431,96)	(29,33)	(0,02)
Emissões para ar - CO <sub>2</sub>	764,47	469,31	293,80	1,35
Emissões para ar - CH <sub>4</sub>	466,49	395,48	70,90	0,11
Emissões para ar - Outros	4,28	-	4,27	0,01
<b>TOTAL</b>	<b>(8.226,07)</b>	<b>(8.567,16)</b>	<b>339,64</b>	<b>1,46</b>

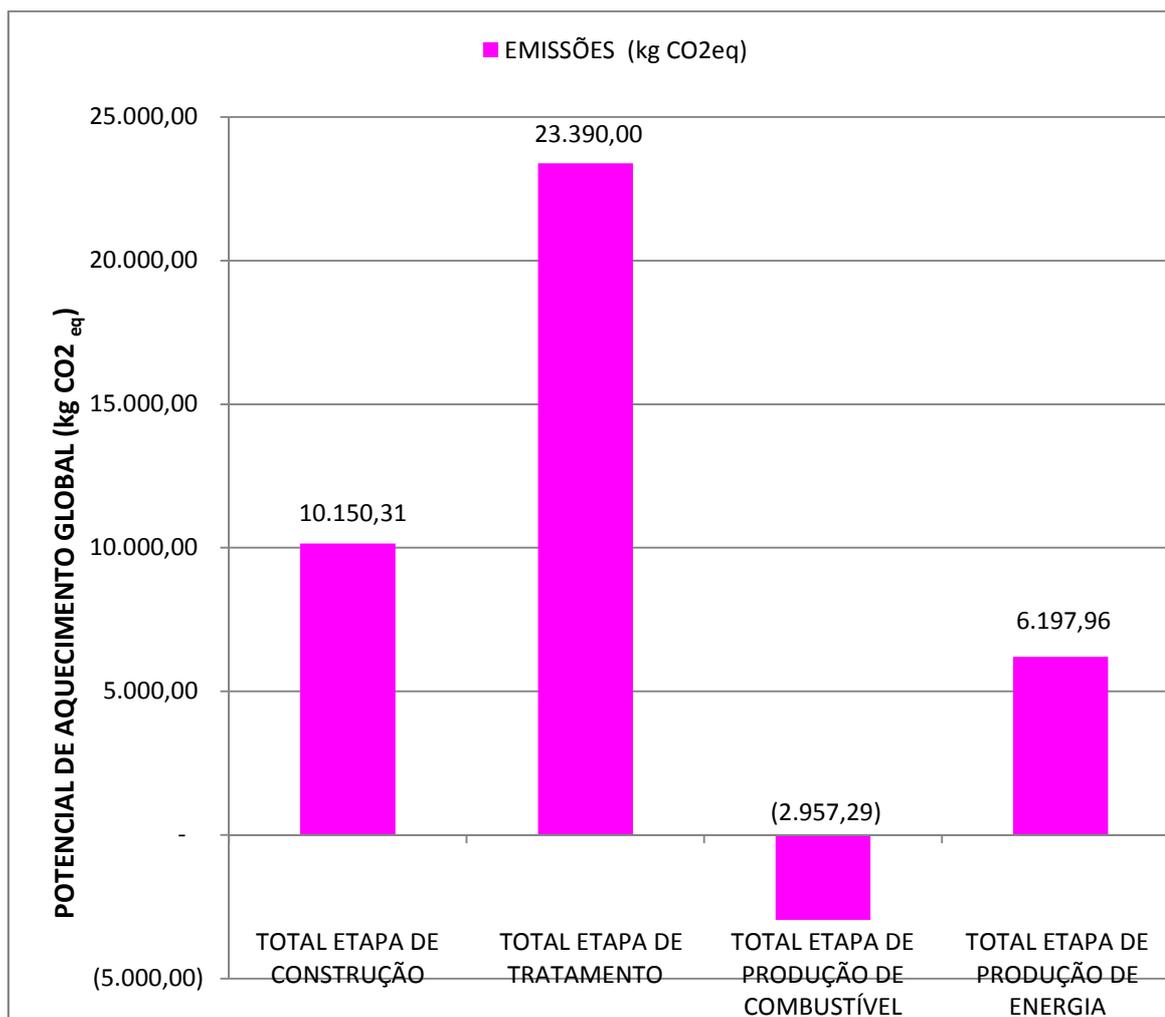
#### 5.4.2.4 ETAPA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA NA SOFC

Na etapa de produção de energia na SOFC, cerca de 146 kg de CO<sub>2eq</sub> estão relacionadas aos materiais utilizados no processo de manufatura de componentes auxiliares do sistema CaC, enquanto a manutenção (incluindo a estocagem de gás) corresponde a 53 kg de CO<sub>2eq</sub>. Em relação a operação da SOFC, o total de emissões de CO<sub>2eq</sub> é de 5998 kg (Tabela 5.21), onde cerca de 5993 kg de CO<sub>2eq</sub> corresponde ao dióxido de carbono biótico (oriundo do metano a 96%). De acordo com Jungbluth *et al* (2007), o fator de emissão de CO<sub>2</sub> para cada MJ é de 0,0558 kg (kg/MJ).

**Tabela 5.21** - Potencial de Aquecimento Global (Kg CO<sub>2</sub> eq) – Etapa Produção de Energia em SOFC (1 dia operação)

	POTENCIAL AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO <sub>2</sub> eq)
Recursos Renováveis	(3,82)
Dióxido de carbono (emissões atmosféricas)	178,61
Dióxido de carbono (biótico)	<b>5.992,52</b>
Dióxido de carbono (transformação do solo)	0,04
Óxido nitroso	8,95
Hexaflurido de enxofre	0,25
Compostos orgânicos voláteis não-metano	0,61
Metano	10,03
Metano (biótico)	10,78
<b>TOTAL</b>	<b>6.197,96</b>

A Figura 5.23 apresenta um panorama geral dos valores obtidos em todas as etapas analisadas no ciclo de vida do sistema estudado, com o balanço final das emissões de CO<sub>2eq</sub>. Verifica-se que a etapa de tratamento é aquela que mais contribui com as emissões de CO<sub>2eq</sub>. O uso do biogás na produção do combustível (metano 96%, alta e baixa pressão) para a SOFC indica que cerca de 2.960 kg de CO<sub>2eq</sub> pôde ser evitada por dia.



**Figura 5.23 - Gráfico Geral Comparativo entre Emissões de CO<sub>2</sub>eq Totais das quatro Etapas estudadas por 1 dia.**

Segundo Primas (2007), é possível reduzir cerca de 20 a 25% de emissões de dióxido de carbono e NMVOC ao se utilizar o metano oriundo biogás (refinado e distribuído via rede regular do gás natural) e não o do gás natural.

Em síntese, considerando os valores em termos de energia primária equivalente (MJ) à energia elétrica, à energia térmica e o calor residual (Cf. Tabela 5.11), produzidos durante a operação da SOFC, estima-se que as emissões correspondentes são de de 0,20 1kg CO<sub>2</sub>eq/ kWh, 0,056 kg CO<sub>2</sub>eq/MJ , 0,056 kg CO<sub>2</sub>eq/MJ, respectivamente.

## 6 CONCLUSÕES

A condução da ACV da Produção de Biogás via Estação de Tratamento de Esgoto para utilização em Células a Combustível do tipo SOFC, apresenta resultados bastante promissores em relação ao aproveitamento do biogás produzido em ETE's, a partir da digestão anaeróbia do lodo proveniente do tratamento de esgoto.

Pela análise desenvolvida podem-se destacar os resultados descritos abaixo:

- ✓ A fase de construção das instalações, incluindo a rede de coleta, é a etapa mais crítica em termos de CED do inteiro ciclo de vida do sistema estudado, principalmente em função dos materiais utilizados nos processos construtivos (concreto e aço) (cf. capítulo 5.4.1.1, página 110);
- ✓ O tratamento do esgoto é a etapa que mais produz emissões atmosféricas, tendo em vista os processos de biodegradação da matéria orgânica (cf. capítulo 5.4.2.2, página 121);
- ✓ É no processo da digestão anaeróbia onde ocorre o maior ganho em termos de emissões, uma vez que a digestão do lodo ativado permite evitar o lançamento de 9462 kg de CO<sub>2eq</sub>, que ocorreriam naturalmente no tratamento do efluente, caso não ocorresse a digestão anaeróbica. Em termos globais, tendo em vista os processos envolvidos na produção do metano a 96%, o total de emissões líquidas evitadas é de 2958 kg de CO<sub>2eq</sub> (cf. capítulo 5.4.2.3, página 124);
- ✓ A utilização da tecnologia da SOFC demonstrou, neste estudo, alta eficiência na geração de energia, considerando-se que a energia primária equivalente de 88.595 MJ (PCI 18.85 MJ/Nm<sup>3</sup>) do biogás produzido (4700 Nm<sup>3</sup>), ao ser utilizado na SOFC, resulta em 14.000 kWh/dia (50.400 MJ/dia) (cf. capítulo 5.3.4, página 109);
- ✓ A energia elétrica produzida com a célula a combustível, utilizando-se o metano gerado durante a digestão anaeróbia do lodo ativado, é capaz

de suprir 100% da demanda elétrica da etapa de tratamento) (cf. capítulo 5.4.1.4, página 119).

Como sugestões para pesquisas futuras, é importante ressaltar a necessidade de análises mais detalhadas, tais como:

- Construção de um banco de dados brasileiro, apresentando resultados que refletem a realidade regional e/ou nacional, considerando, por exemplo, as condições climáticas que afetam a operação do sistema estudado e outras tecnologias de tratamento e biodigestão empregadas no Brasil;
- A análise sensitiva pra verificar a influência de determinados parâmetros de operação que podem influenciar nos resultados da ACV e análise de impactos ambientais utilizando indicadores de impacto em escala regional e local;
- A comparação dos resultados obtidos neste estudo considerando outras tecnologias de produção de biogás e geração de eletricidade;
- A Avaliação do Ciclo de Vida do uso do Biogás produzido em ETE's como combustível de veículos automotores ;

## 7 REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R., **Célula combustível a hidrogênio: fonte de energia da nova era**, São Paulo, Artliber Editora, 2004, 182 p.

ALTHAUS H.; BAUER.C.; DOKA, G.; DONES, R.; HISCHIER, R.; HELLWEG,S.; HUMBERT, S.; KOLLNER,T, LOERINCIK, Y.; MARGNI. M.; NEMECEK, T. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Ecoinvent Report n. 3, Dübendorf, (2007).

BAUMANN H., TILLMAN A.M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA**, Lund, Suécia, Studentlitteratur, 2004.

BDT@ – Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC-UNICAMP) - Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/esgoto/tourcaicara.html>> acesso em 31 ago. 2011

BNDES – **Tratamento de esgotos: Tecnologias acessíveis**, Informe Infraestrutura, Área de projetos de infra-estrutura, n. 16, Nov/1997 – Disponível em: <[www.bndes.gov.br/conhecimento/Infra/g7416.pdf](http://www.bndes.gov.br/conhecimento/Infra/g7416.pdf)> Acesso em 15 ago. 2008 ou Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/infra/g7416.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/infra/g7416.pdf)>. Acesso em 23 jul. 2011.

BORSARI V., **Caracterização das emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves no Estado de São Paulo, 2009**, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BOUCHER O.; HAIGH J.; HAUGLUSTAINE D.; HAYWOOD J.; MYHRE G.; NAKAJIMA T.; SHI G.Y.; SOLOMON S. Radiative Forcing of Climate Change, **Climate Change 2001: The Scientific Basis**, IPCC, United Kingdom, p. 351-406, 2001.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no solo**. Ed. Abes, Projeto Prosab, 1999, 464p. Rio de Janeiro.

CETESB – Cia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/17-Definição>> acesso em 20 nov 2011.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. 1ª reimpressão. Rio de Janeiro, RJ.: Qualitmark Editora. 2002, 120p.

CLAASSEN, P. A. M.; VAN LIER, J. B.; CONTRERAS, A. M. L.; VAN NIEL, E. W. J.; SIJTSMA, L.; STAMS, A. J. M.; DE VRIES, S. S.; WEUSTHUIS, R. A. Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. **Appl Microbiol Biotechnol**. v. 52, p. 741-755, 1999.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: **V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. 31 maio a 02 junho, 2006, Brasília.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Disponível em: <[http://www.mzweb.com.br/copasa/web/arquivos/Apresentacao\\_COPASA\\_Day%20\\_ETE\\_Arrudas.pdf](http://www.mzweb.com.br/copasa/web/arquivos/Apresentacao_COPASA_Day%20_ETE_Arrudas.pdf)> acesso em 29 ago. 2011

COSTA, D.F. da, **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**, 2006, Dissertação (Mestrado), Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo

CSJ – Companhia de Saneamento de Jundiaí – Disponível em: <<http://www.saneamento.com.br/?Id=PaginaMenu&IdMenu=2&IdSubMenu=9>> acesso em 29 ago. 2011

DIXON, A.; SIMON, M.; BURKITT, T. Assessing the environmental impact of two options for smallscale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. **Ecological Engineering**. V. 20. 2003. p. 297-308

DOE - US DEPARTMENT OF ENERGY – **Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program**. Disponível em: <[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html)> Acesso em: 18 jun. 2008 e 13 jul. 2011a.

DOE - US DEPARTMENT OF ENERGY – **How fuel cells work** – Disponível em: <[http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_PEM.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_PEM.shtml)> Acesso em 04 dez 2011b.

DOE - US DEPARTMENT OF ENERGY – **Hydrogen & Our Energy Future**. Disponível em: <[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/hydrogenenergyfuture\\_web.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/hydrogenenergyfuture_web.pdf)> Acesso em 18 jun. 2008

DOE - US DEPARTMENT OF ENERGY – Technical Services, Inc., **Fuel Cell Handbook**, 7 Ed., West Virginia, Nov. 2004.

DOKA, G. **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services**, Ecoinvent Report n. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, (2007)

EFFENDI, A.; HELLGARDT, K.; ZHANG, Z.-G.; YOSHIDA, T. Optimising H<sub>2</sub> production from model biogas via combined steam reforming and CO shift reactions. **Fuel**. v. 84, p. 869-874, 2005.

EL-FADEL, M. MASSOUD, M. Methane emissions from wastewater management, **Environmental Pollution**, v. 114, 2001, p. 177-185.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life cycle assessment: principles and practice.**, EPA/600/R-06/060, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, US, May 2006

EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance., Luxemburgo, 1ª Edição, Março 2010a.

EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** – Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators, Luxemburgo, 1ª Edição, Março 2010c.

EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook** – General guide for Life Cycle Assessment – Provisions and Action Steps., Luxemburgo, 1ª Edição, Março 2010b.

FARHAD, S.; YOO, Y.; HAMDULLAHPUR, F. Effects of fuel processing methods on industrial scale biogas-fuelled solid oxide fuel cell system for operating in wastewater treatment plants. **Journal of Power Sources**. V. 195, p. 1446-1453, 2010.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – Estudo de caso**. 2007. Monografia – Escola de Engenharia – Universidade Mackenzie, São Paulo.

FONSECA, A. R., Tecnologias sociais e ecológicas aplicadas ao tratamento de esgotos no Brasil 2008

FUKUROZAKI, S. H., **Análise Ambiental da Célula a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons sob o Enfoque da Avaliação do Ciclo de Vida, 2006**, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

FUKUROZAKI, S. H., **Avaliação do Ciclo de Vida de Potenciais Rotas de Produção de Hidrogênio: Estudo dos Sistemas de Gaseificação da Biomassa e de Energia Solar Fotovoltaica, 2011**, Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

GOMES NETO, E. H., **Hidrogênio Evoluir sem Poluir: A era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba, Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005, 240p.

GONÇALVES, R. F. **Desinfecção de efluentes sanitários** Ed. Abes, Projeto Prosab, 2003, 438 p., Rio de Janeiro.

GRANDE, C. A. (2011). **Biogas Upgrading by Pressure Swing Adsorption**, Biofuel's Engineering Process Technology, Marco Aurélio dos Santos Bernardes (Ed.), ISBN: 978-953-307-480-1, InTech, Oslo, Norway. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/articles/show/title/biogas-upgrading-by-pressure-swing-adsorption>> acesso em 01 dez 2011.

GRUPO ÁGUAS DO BRASIL - Águas de Juturnaíba – disponível em : <<http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=520>> Acesso em 13 set. 2011

GUINÉE, J.B.; GORRÉE, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; KONING, A. DE; OERS, L. VAN; WEGENER SLEESWIJK, A.; SUH, S.; UDO DE HAES, H.A.; BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M.A.J. **Handbook on life cycle assessment**. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, 2001, 692 pp.

GÜRZENICH, D.; MATRHUR, J.; BANSAL, N. K.; WAGNER, H.J. Cumulative Energy Demand for Selected Renewable Energy Technologies. **International Journal of Life Cycle Assessment** 4(3). 1999. P. 143-149.

HALLENBECK, P. C.; BENEMANN, J. R. Biological Hydrogen Production; Fundamentals and limiting processes. **International Journal of Hydrogen Energy**. V. 27, 2002. P. 1185-1193.

HOLLADAY, J.D.; HU, J.; KING, D.L.; WANG, Y. An overview of hydrogen production technologies, **Catalysis Today**, V. 139, 2009, p. 244-260.

HOLM-NIELSEN, J.B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**. V. 100, p. 5478-5484, 2009

HUIJBREGTS, M. A.; ROMBOUTS, L. J. A., HELLWEG, S.; FRISCHKNECHT, R.; HENDRIKS, J.; MEENT, D. V.; RAGAS, A. M. J.; REIJNDERS, L.; STRUIJS, J. Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? **Environmental Science & Technology**. V. 40, n. 3, 2006, p. 641-348.

JUNGBLUTH, N.; CHUDACOFF, M.; DAURIAT, A.; DINKEL, F.; DOKA, G.; FAIST EMMENEGGER, M.; GNANSOUNOU, E.; KLJUN, N.; SHLEISS, K.; SPIELMANN, M.; STETTLER, C.; SUTTER, J. **Life Cycle Inventories of Bioenergy**. Ecoinvent Report n. 17, capítulo 13 – Use and Upgrading of Biogas, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, (2007).

JUNGBLUTH, N.; CHUDACOFF, M.; DAURIAT, A.; DINKEL, F.; DOKA, G.; FAIST EMMENEGGER, M.; GNANSOUNOU, E.; KLJUN, N.; SHLEISS, K.; SPIELMANN, M.; STETTLER, C.; SUTTER, J. **Life Cycle Inventories of Bioenergy**. Ecoinvent Report n. 17, capítulo 19 – Gaseous fuels at service station, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, (2007a).

KIT, Karlsruhe Institute of Technology – **Solid Oxide Fuel Cell**. Disponível em <[http://www.iwe.kit.edu/english/mitarbeiter\\_sofc.php](http://www.iwe.kit.edu/english/mitarbeiter_sofc.php)> Acesso em 22 jul. 2011.

KLÖPFER, W. In Defense of the Cumulative Energy Demand, (editorial), **International Journal of Life Cycle Assessment**. 2 2, 1997 p.61.

KOLBITSCH, P.; PFEIFER, C.; HOFBAUER, H. Catalytic steam reforming of model biogas. **Fuel**. v. 87, p. 701-706, 2008.

KORDESCH, K.; SIMADER, G. **Fuel Cells and Their Applications**, Alemanha, VCH Publishers, Inc., 1996, 375 p.

KORONEOS, C.; DOMPROS, A.; ROUMBAS, G.; MOUSSIOPOULOS, N. Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes, **International Journal of Hydrogen Energy**, V. 29, 2004, p. 1443-1450.

KOTHARI, R.; BUDDHI, D.; SAWHENY, R.L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 12, 2008, p. 553-563.

LIMA, F. P. **Energia no Tratamento de Esgoto: Análise Tecnológica e Institucional para Conservação de Energia e Uso do Biogás**, 2005, Dissertação (Mestrado), Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo

LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T.A. **Produção Biológica do Hidrogênio**, 2008, Monografia – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina.

NBR/ISO 14.044 - ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

NEGRO, M.L.M., **Impactos da Introdução da Tecnologia de Células a Combustível na Matriz Energética Brasileira visando a Geração de Energia Elétrica Distribuída**, 2004, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

OSORIO, F.; TORRES, J.C. Biogas Purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. **Renewable Energy**. v.34, p. 2164-2171, 2009.

PATTERSON, T.; ESTEVES, S.; DISDALE, R.; GUWY, A. Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale. **Bioresource Technology**. v. 105, p. 7313-7323, 2011.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Energia Elétrica (IEE)/Escola Politécnica/Instituto de Física/Faculdade de Economia e Administração – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

PIEROBON, L. R. P. **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRADO, M.R., KASKANTZIS NETO, G. A Análise do Ciclo de Vida como ferramenta de otimização de processos e gestão ambiental. **Revista eletrônica Polidisciplinar Vãos**, vol 1, nº 1, 2005, ISSN 1808-9305.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores**. 2010. Monografia de conclusão de curso de Graduação de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba

PRIMAS, A., **Life Cycle Inventories of New CHP Systems**, Ecoinvent Report n. 20, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, (2007)

PURWANTO, H. AKIYAMA, T., Hydrogen production from biogas using hot slag, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, 491-495, (2006)

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**. v. 32, p. 1375-1380, 2007.

RIBEIRO, F. de M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: primeira aproximação**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo.

RÖHRLICH, M; MISTRY, M.; MARTENS, P.N.; BUNTENBACH,S.; RUHRBERG,M.; DIENHART, M.; BRIEM, S.; QUINKERTZ, R.; ALKAN, Z.; KUGELER, K. A method to Calculate the Cumulative Energy Demand (CED) of Lignite Extratction. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 5 (6), 2000, p. 369-373.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and bioenergy**. V. 35, p. 1633-1645, 2010.

SABESP – Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Comunicação pessoal com a técnica Sara Freitas - mar. 2011a

SABESP – Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Disponível em: <<http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=2&proj=sabesp&pub=T&nome=TratamentoDeEsgoto&db>> Acesso em 11 jul. 2011b

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**. v. 33, p. 1101-1107, 2009.

SANTO, A. S. E.; MIRANDA, E. C.; NASCIMENTO, E. P.; SCARDUA, F. B.; SILVA, F. B.; FRANÇA F. I. L.; REIS, M. L.; SOUZA, V. C. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2008**. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2010, Brasília

SCHENCK, R.C., **LCA for Mere Mortals**, IERE, 2000

SHITORI, Y.; IJICHI, T.; OSHIMA,T.; SASAKI, K. Internal reforming SOFC running on biogas. **International Journal of Hydrogen Energy**. V. 35, p. 7905-7912, 2010

SIEMENS, **The Principle Behind the Technology** - <<http://www.energy.siemens.com/fi/en/power-generation/fuel-cells/principle-behind-technology.htm>> Acesso em 22 jul. 2011.

SPELLMAN, F.R. **Handbook of water and wastewater treatment plants operations**, Boca Raton, FL, CRC Press, 2009, 2 ed., cap. 19, p.667-774.

SPIEGEL, R.J.; PRESTON, J. L. Test results for fuel cell operation on anaerobic digester gas. **Journal of Power Sources**. v. 86, p. 283-288, 2000.

SPIEGEL, R.J. PRESTON, J.L. Technical assessment of fuel cell operation on anaerobic digester gas at the Yonkers, NY, wastewater treatment plant, **Waste Management**, V. 23, 2003, p. 709-717.

SPRENGER, H. E. **Viabilidade do uso de biogás de ETE para alimentação de células a combustível de ácido fosfórico**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) – Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, Paraná.

TAKAHASHI, S., **Avaliação Ambiental do setor de Transporte de Cargas: Comparação de Métodos, 2008**, Dissertação (Mestrado) – Departamento de Pesquisa e Pós Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Curitiba, Paraná.

TAKEDA, A. **Levantamento dos Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e Análise Comparativa dos Métodos mais Utilizados, 2008**, Monografia – Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, São Paulo.

UTGIKAR, V e THIESEN, T. Life Cycle Assessment of High Temperature Electrolysis for Hydrogen Production via Nuclear Energy, **International Journal of Hydrogen Energy**, V31, n. 7, 2005, p. 939-944.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Editora UFMG, 2005.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. Tecnologia de Células a Combustível, **Química Nova**, V. 23, n. 4, 2000, p. 538-546.

XU, J.; ZHOU, W.; LI, Z.; WANG, J.; MA, J. Biogas reforming for hydrogen production over nickel and cobalt bimetallic catalysts, **International Journal of Hydrogen Energy**, V. 34, 2009, p. 6646-6654.