

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO DOS FLUXOS  
ENERGÉTICOS E GASES DE EFEITO ESTUFA  
EM INSTALAÇÕES "OFFSHORE"**

Por,

**Edgar Amaral Silveira**

**Brasília, 04 de março de 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
CARACTERIZAÇÃO DOS FLUXOS ENERGÉTICOS E  
GASES DE EFEITO ESTUFA EM INSTALAÇÕES  
"OFFSHORE"

POR,

**Edgar Amaral Silveira**

Relatório submetido como requisito para obtenção  
do grau de Mestre em Ciências Mecânicas.

**Banca Examinadora**

Prof. Armando de Azevedo Caldeira, UnB/ ENM,

Prof. Flaminio Levy Neto, UnB/ENM,

Prof. Eugênio Liborio Feitosa, UnB/ENM,



Brasília, 04 de março de 2015.

# Agradecimentos

Dedico este trabalho ao meu pai, minha mãe e meus avós que nunca mediram esforços para garantir minha educação e mostrar o caminho a ser seguido, e a todas as pessoas que contribuíram para realização deste projeto: professores, amigos, namorada, meus irmãos e familiares.

Agradeço ao meu orientador Armando por todos os ensinamentos diários, atenção e disponibilidade em todas as etapas do projeto.

Agradeço as seguintes instituições brasileiras: ANP, FINEP, MCT e Petrobras por fornecerem suporte ao presente estudo, ao Programa de Formação de Recursos Humanos em Ciências Mecânicas PRH-PB 224 da Universidade de Brasília e aos coordenadores do projeto pela atenção e dedicação aos alunos.

---

## RESUMO

Com maiores desafios impostos à atividade de E&P de petróleo *offshore*, torna-se imprescindível aprofundar o conhecimento sobre as fontes de impacto ambiental levando assim ao desenvolvimento de novas ferramentas e metodologias de gerenciamento. Essas permitirão o acompanhamento, avaliação e controle do desempenho cada vez mais efetivos das atividades através de uma descrição mais precisa das suas interações com o meio ambiente. O objeto principal desse estudo é o diagnóstico do desempenho ambiental, a partir da identificação das principais correntes mássicas e energéticas dos processos unitários de um modelo tecnológico genérico, de uma planta offshore de processamento primário de petróleo. Este modelo permitirá avaliar o balanço de energia e emissões em plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), com a utilização de dados secundários e diferentes combinações de tecnologias, através de simulações e análises de sensibilidade, em diferentes cenários, que poderão identificar em quais etapas do ciclo de combustíveis fósseis o consumo de recursos e energia e as emissões de poluentes são mais significativas. O estudo utiliza a caracterização do fluxograma dos sistemas e processos de uma planta de processamento primário offshore através da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida e do sistema de impactos ambientais *CML2001* no estudo de caso. Os módulos dos tratamentos principais do modelo foram separados em processos vinculados tanto diretamente (Processos Internos) ao processo produtivo do óleo e do gás, quanto indiretamente (Processos Externos). Os Processos Internos são: Separação, Tratamento de Óleo, Água e Gás, Geração de Energia e a Queima em tocha. Os Processos Externos são aqueles referentes à produção dos insumos que constituem os produtos químicos utilizados, a produção de combustíveis para a geração de energia e o Tratamento de Resíduos Sólidos. Os resultados aproximados mostraram que as emissões gasosas dos Processos Internos e Externos são dominadas pela Geração de Energia, 100% das emissões de CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>, 80% de materiais particulados (MP), 67% de Total de Hidrocarbonetos (THC), 23% de CO<sub>2</sub> e 25% de SO<sub>2</sub>. O Tratamento de Gás apresentou 73% das emissões de CO<sub>2</sub>, 100% das emissões de CH<sub>4</sub> e 75% das emissões de SO<sub>2</sub>, 14% dos MP e 10% de THC. O Tratamento de Óleo detém 100% das emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) e 23% do THC. O Tratamento de Resíduos representa 4% das emissões de CO<sub>2</sub> e 6% do MP. O Tratamento de Água aparece com 83% do potencial de ecotoxicidade terrestre e 36% do potencial de ecotoxicidade aquática (marinha) devido às emissões de compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados para o mar. No cenário em que o gás natural é utilizado na cogeração de energia, o processo de queima em *flare* é utilizado apenas em situações de emergência e na queima de gás excedente sendo a sua contribuição desprezível se comparada com os outros sistemas.

---

## ABSTRACT

With higher challenges inserted in *offshore* exploration and production of oil activity, it is essential to increase knowledge of the environmental impact sources thus leading to the development of new management tools and methodologies. These will enable the monitoring, evaluation and control of increasingly effective performance of activities through a more precise description of their interactions with the environment. The main object of this study is the environmental performance diagnosis by identifying the main mass and energy currents of unit processes in a generic technological model of an offshore primary oil processing plant. This will allow to evaluate the energy balance and emissions in FPSO platforms, using secondary data and different technologies combinations, through simulations and sensitivity analyzes in different scenarios that will identify which stages of the fossil fuel cycle the resource and energy consumption and pollutant emissions are more significant. The study uses the characterization of the flow diagram of the systems and processes in an offshore primary processing plant through the Life Cycle Assessment methodology and the environmental impacts system CML2001 in the case of study. The modules of the main treatments in the model were divided into processes linked either directly (Internal Processes), and indirectly (External Processes), with the oil and gas production process. Internal Processes are Separation, Oil Treatment, Water Treatment, Gas Treatment, Power Generation Plant and the Flare. External processes are those related to the production of chemicals for all the processes, fuels for power generation and Waste Treatment. The approximate results showed that gaseous emissions from internal and external processes are dominated by the Power Plant, 100% CO, N<sub>2</sub>O and NO<sub>2</sub>, 80% of particulate matter (PM), 67% of total hydrocarbons (HTC), 23% CO<sub>2</sub> and 25% SO<sub>2</sub>. Gas Treatment presented 73% of CO<sub>2</sub> emissions, 100% of CH<sub>4</sub> emissions and 75% of SO<sub>2</sub> emissions, 14% of PM and 10% of HTC. Oil Treatment holds the majority of organic emissions with 99% of VOC (volatile organic carbons) emissions and 23% of HTC. Waste Treatment present 4% of CO<sub>2</sub> emissions and 6% of PM emissions. Water Treatment appears with 83% of the terrestrial ecotoxicity potential and 36% of aquatic ecotoxicity potential (sea water) due to emissions of organic and inorganic compounds and heavy metals into the sea. In the scenario where natural gas is used in cogeneration, the process of flaring is used only in emergency situations and in the case of surplus gas flaring being its contribution negligible compared to other systems.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 METODOLOGIA .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 ASPECTOS DA PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS.....	4
2.1.1 PRODUÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL .....	4
2.1.2 UNIDADES DE PRODUÇÃO OFFSHORE .....	6
2.1.3 DESCRIÇÃO DAS PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO NACIONAIS .....	29
2.1.4 CENÁRIO FUTURO NA E&P .....	31
2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	32
2.2.1 DEFINIÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV) .....	32
2.2.2 APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS.....	35
2.2.3 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DA METODOLOGIA .....	38
2.2.4 NORMATIZAÇÃO .....	41
2.2.5 FASES DE UMA ACV.....	44
2.2.6 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO.....	45
2.2.7 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV) .....	51
2.2.8 PROCESSO DE ALOCAÇÃO .....	57
2.2.9 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA (AICV) .....	57
2.2.10 ELEMENTOS OPCIONAIS .....	66
2.2.11 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA .....	69
2.2.12 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....	73
2.2.13 SOFTWARES DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA .....	77
2.3 ACV NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE PRODUTOS FÓSSEIS.....	82
<b>3. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>84</b>
3.1 OBJETIVOS.....	84
3.2 ESCOPO.....	84
3.2.1 SISTEMA DE PRODUTO .....	84
3.2.2 FRONTEIRA DO SISTEMA DE PRODUTO .....	87
3.2.3 UNIDADE FUNCIONAL.....	87
3.2.4 PROCEDIMENTOS DE ALOCAÇÃO.....	87
3.2.5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO .....	88
3.2.6 REQUISITOS DA QUALIDADE DE DADOS.....	88
3.3 ICV DO PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO <i>OFFSHORE</i> .....	89
3.3.1 PROCESSOS INTERNOS .....	90
3.3.2 PROCESSOS EXTERNOS .....	95
3.3.3 CONTABILIZAÇÃO DOS DADOS .....	98
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>104</b>
4.1 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	104

4.2	AMBIENTAL .....	107
4.3	ANÁLISE DOS PROCESSOS AUXILIARES .....	111
4.3.1	PRODUTOS QUÍMICOS .....	112
4.4	VARIAÇÃO DE CENÁRIOS .....	116
4.4.1	AVALIAÇÃO DA QUEIMA EM FLARE EM SISTEMAS DE COOGERAÇÃO DE ENERGIA .....	116
4.4.2	CONTRIBUIÇÃO DOS TRANSPORTES .....	117
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES .....	121
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>122</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de energia primária (EPE, 2013). .....	5
Figura 2 - Unidade de produção flutuante FPSO (PETROBRAS, 2010a).....	6
Figura 3 - Módulos de uma FPSO (PETROBRAS, 2010a).....	7
Figura 4 - Diagrama esquemático de uma planta de processamento primário com separadores bifásicos (PETROBRAS, 2007). .....	10
Figura 5 - Diagrama esquemático de uma planta de processamento primário com separador trifásico (PETROBRAS, 2007). .....	11
Figura 6 - Separador de produção (PETROBRAS, 2007). .....	12
Figura 7 - Esquema de um separador trifásico de produção (PETROBRAS, 2007). .....	13
Figura 8 - Configuração de um tratador eletrostático de baixa velocidade e dos eletrodos (PETROBRAS, 2007). .....	17
Figura 9 - Etapas do condicionamento do gás natural (PETROBRAS, 2007). .....	19
Figura 10 - Sistema de compressão principal em três estágios, com resfriadores e vasos depuradores (PETROBRAS, 2010a). .....	20
Figura 11 - Processo de desidratação de Gás Natural (PETROBRAS, 2010a). .....	22
Figura 12 - Unidade de remoção de gases ácidos - H <sub>2</sub> S ou CO <sub>2</sub> (PETROBRAS, 2010a)..	23
Figura 13 - Unidade de remoção de H <sub>2</sub> S - processo SULFATREAT (R) (PETROBRAS, 2010a).....	24
Figura 14 - Sistema típico utilizado para tratamento de água produzida em ambiente <i>offshore</i> (PETROBRAS, 2010a). .....	25
Figura 15 - Modelo do sistema de ACV (SANTOS, 2006). .....	33
Figura 16 - Fases da ACV.....	44
Figura 17 - Fluxograma de um processo unitário (Adaptado de US EPA 2006). .....	46
Figura 18 - Etapas para construção do Inventário de Ciclo de Vida (ABNT NBR ISO 14044:2009). .....	52
Figura 19 - Elementos da fase de AICV (ISO 14042, 2000).....	58
Figura 20 - Etapas da AICV (CALDEIRA-PIRES, RABELO E XAVIER, 2002).....	67
Figura 21 - Diferença entre os métodos de AICV (EUROPEAN COMMISSION, 2010). ...	70
Figura 22 - Elementos da fase de Interpretação dentro da ACV (ISO 14043, 2000).....	74
Figura 23 - Modelo tecnológico genérico construído no Software GaBi6.0.....	86

Figura 24 - Ilustração da planta de processamento primária que delimita a Fronteira do sistema de produto.....	87
Figura 25 - Plano Separação construído no software GaBi6.0 .....	90
Figura 26 - Plano Tratamento de Óleo construído no software GaBi6.0.....	91
Figura 27 - Plano Tratamento de Gás construído no software GaBi6.0. ....	92
Figura 28 - Plano Tratamento de Água construído no software GaBi6.0. ....	93
Figura 29 - Plano Geração de Energia construído no software GaBi6.0.....	94
Figura 30 - Processos Externos dentro do plano de Tratamento de Óleo no GaBi6.0....	95
Figura 31 - Processos Externos dentro do plano de Tratamento de Gás no GaBi6.0. ....	96
Figura 32 - Processos da cadeia de produção dos combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia.....	97
Figura 33 - Processos de Tratamento de Resíduos Sólidos construído no software GaBi6.0.....	97
Figura 34 - Desempenho das emissões atmosféricas nos principais processos da FPSO. ....	105
Figura 35 - Comparativo entre os principais processos dentro das categorias de Processos Internos e Externos respectivamente. ....	106
Figura 36 - Percentual de participação dos sistemas nas categorias de impactos.....	107
Figura 37 - Percentual de participação nas categorias de impacto dos Processos Internos e Externos .....	109
Figura 38 - Ilustração do comparativo percentual das categorias de impacto dentro dos Processos Internos. ....	110
Figura 39 - Ilustração do comparativo percentual das categorias de impacto dos Processos Externos. ....	111
Figura 40 - Parâmetros escolhidos para análise dos potenciais de impactos no Tratamento de Gás. ....	112
Figura 41 - Parâmetros escolhidos para análise dos potenciais de impactos no Tratamento de Óleo. ....	114
Figura 42 - Ilustração do comparativo percentual das emissões atmosféricas das cadeias de produção dos produtos químicos utilizados no Tratamento de Gás. ....	114
Figura 43 - Ilustração do comparativo percentual das emissões atmosféricas das cadeias de produção dos produtos químicos utilizados no Tratamento de Óleo. ....	114
Figura 44 - Ilustração do comparativo percentual entre os parâmetros escolhidos para a análise dos combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia. ....	115
Figura 45 - Comparativo das emissões atmosféricas entre os combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia.....	116
Figura 46 - Comparativo entre os processos e o transporte para o Material Particulado. ....	118

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações necessárias à comercialização do óleo e gás (PETROBRAS, 2007).....	9
Tabela 2 - Comparativo das tecnologias usadas nos tratamentos de unidades nacionais de exploração. ....	29
Tabela 3 - Exemplo da realização dos elementos obrigatórios de uma AICV (Adaptado de FERREIRA, 2004 e SALABERRY, 2009).....	65
Tabela 4 - Principais Métodos de AICV (Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida).....	71
Tabela 5 - Identificação dos Processos Internos e Externos que foram quantificados. ...	85
Tabela 6 - Compostos presentes na composição da água descartada no mar.....	93
Tabela 7 - Produtos químicos e seus componentes do Tratamento de Óleo .....	96
Tabela 8 - Produtos químicos e seus componentes do Tratamento de Gás. ....	96
Tabela 9 - Entrada de produtos químicos no Tratamento de Óleo para 1 kg de óleo processado. ....	99
Tabela 10 - Emissões atmosféricas dos Processos Internos do Tratamento de Óleo....	100
Tabela 11 - ICV dos produtos químicos vinculados com o processo de Tratamento de Gás.....	100
Tabela 12 - ICV das emissões atmosféricas dos Processos Internos do Tratamento de Gás.....	100
Tabela 13 - Entrada de combustíveis vinculados à Planta de Geração de Energia. ....	101
Tabela 14 - Emissões atmosféricas dos Processos Internos da Planta de Geração de Energia. ....	101
Tabela 15 - Calor perdido nos processos da unidade de produção. ....	101
Tabela 16 - Resíduos Sólidos produzidos na unidade de produção.....	102
Tabela 17 - Desempenhos das emissões atmosféricas para os principais processos da FPSO.....	104
Tabela 18 - Comparativo entre os principais processos dentro das categorias de processos Internos e Externos.....	106
Tabela 19 - Desempenhos das categorias de impacto para os principais processos da FPSO.....	107
Tabela 20 - Comparativo das categorias de impacto entre os Processos Interno e Externos.....	108
Tabela 21 - Comparativo percentual das categorias de impacto dentro dos Processos Internos e Externos. ....	110
Tabela 22 - Quantitativo de emissões atmosféricas e parâmetros escolhidos para os produtos químicos usados no Tratamento de Óleo e Gás. ....	113
Tabela 23 - Quantitativo de emissões atmosféricas e parâmetros escolhidos para os combustíveis usados na Planta de Geração de Energia. ....	115
Tabela 24 - Quantitativo dos processos responsáveis pelas emissões atmosféricas e a Queima em <i>Flare</i> . ....	116
Tabela 25 - Comparativo do total de emissão atmosférica da planta de processamento e da contribuição da Queima em <i>Flare</i> . ....	117
Tabela 26 - Comparativo quantitativo das categorias de impacto entre os processos e o transporte. ....	117
Tabela 27 - Comparativo quantitativo das emissões atmosféricas entre os processos e o transporte. ....	118

# LISTA DE SÍMBOLOS

ABCV	Associação brasileira de ciclo de vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BS&W	<i>Basic Water and Sediment</i>
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DALY	<i>Disability Adjusted Life Year</i>
E&P	Exploração e Produção
E&P O&G	Exploração e Produção de Óleo e Gás
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HTP	Hidrocarbonetos totais de petróleo
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISO/TR	<i>International Organization for Standardization/Technical Report</i>
ISO/TS	<i>International Organization for Standardization/Technical Specification</i>
MP	Material Particulado
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
PAF	<i>Potentially Affected Fraction</i>
PDF	<i>Potentially Disappeared Fraction of plants Species</i>
PPP	Processamento Primário de Petróleo
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
SDP	Superintendência de Desenvolvimento e Produção
SETAC	<i>Society for Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SIGEP	Sistema de Informações Gerenciais de Exploração e Produção
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
TOG	Teor de Óleo e Graxa
THC	Total de Hidrocarbonetos
UNEP/PNUMA	<i>United Nations Environment Programme</i>
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

# 1. INTRODUÇÃO

O estilo de vida tal como conhecemos é absolutamente dependente do petróleo e de seus derivados para a geração de energia, movimentação da maior parte dos transportes e para a produção de diversos bens de consumo, oriundos da indústria petroquímica. Salientada por ser de alto grau poluidor, a indústria de E&P de petróleo offshore tem potencialidade de gerar uma grande gama de impactos ambientais.

Sendo uma atividade econômica substancial para o Brasil, e também para o resto do mundo, a atividade de E&P de petróleo e gás natural offshore está em fase de expansão e crescimento em território nacional. Novos desafios tecnológicos se encontram nas maiores profundidades de exploração, como na camada do pré-sal. Com maiores incitamentos impostos ao setor, torna-se indispensável aperfeiçoar o conhecimento sobre as fontes de impacto ambiental levando assim ao desenvolvimento de novas ferramentas e metodologias de gerenciamento. Tais ferramentas permitirão o acompanhamento, avaliação e controle do desempenho cada vez mais efetivos das atividades através de uma descrição mais precisa das suas interações com o meio ambiente.

Dentro desse contexto, este trabalho objetiva efetuar um diagnóstico do desempenho ambiental, a partir da identificação das principais correntes mássicas e energéticas dos processos unitários de um modelo tecnológico, de uma planta offshore de processamento primário de petróleo. Com esse modelo, ser capaz de simular o balanço de energia e emissões das plantas de processamento primário em plataformas do tipo FPSO, com a utilização de dados secundários. Esse estudo também proporcionará a possibilidade de outras simulações com distintas combinações tecnológicas de processamento das unidades de produção existentes.

A simulação será realizada em um software especializado em análise de ciclo de vida denominado GaBi. Com base nessa, serão elaboradas caracterizações das emissões atmosféricas, das categorias de impacto e dos processos externos vinculados a cada processo unitário. Uma análise de sensibilidade em diferentes cenários será concebida, assinalando em quais etapas da cadeia de produção de combustíveis fósseis o consumo de recursos, energia e emissões de poluentes são mais vultosos.

## **1.1 OBJETIVOS**

Este trabalho tem por objetivo efetuar um diagnóstico do desempenho ambiental, a partir da identificação das correntes mássicas e energéticas dos processos unitários de uma planta padrão de processamento primário offshore de petróleo e gás natural.

Para tal, um modelo genérico para o processamento primário de gás e óleo em plataformas do tipo FPSO será estruturado. Com esse, uma simulação do balanço de energia e emissões será concretizado com a utilização de dados secundários e diferentes combinações tecnológicas através do uso da metodologia de abordagem de ciclo de vida.

Será realizada uma averiguação dos fluxos de entrada e saída de compostos e das suas emissões resultantes dos seis principais processos de tratamento para a construção do inventário de ciclo de vida. Esses são: separação, tratamento de óleo, gás, água, resíduos sólidos e geração de energia. Para tal, será feita uma caracterização quantitativa através de fatores de emissões e efluentes de equipamentos utilizados no processo a partir de dados secundários.

Com esses dados o mapeamento da etapa de produção e desenvolvimento do poço estará concluída e uma análise de sensibilidade, em diferentes cenários, identificará em quais etapas do ciclo de combustíveis fósseis o consumo de recursos e energia e as emissões de poluentes são mais significativos.

## **1.2 METODOLOGIA**

A dissertação foi disposta em capítulos, que abordaram inicialmente o levantamento dos conhecimentos sobre os assuntos desenvolvidos e depois das aplicações destes dentro da metodologia proposta.

Primeiramente, uma revisão bibliográfica do processamento primário offshore de uma unidade FPSO e do método de avaliação de ciclo de vida foi efetuada no capítulo dois para que se pudesse compreender os principais conceitos e dificuldades envolvidos tanto no funcionamento da unidade quanto na análise de inventário. Para uma melhor concepção de uma planta de processamento primário de petróleo (PPP), foi feita uma revisão com objetivo de avaliar as tecnologias, módulos de tratamentos e componentes empregados na produção, assim como os efluentes gerados nos processos elementares das unidades de tratamento. A partir da separação do escoamento trifásico (óleo, gás e água), foram fragmentados três

sistemas conforme a singularidade de cada corrente fluida. Os planos do sistema de tratamento de óleo, gás e água e sistema de geração de energia suscitaram o aprofundamento da análise e a visualização de cada um dos processos e suas características funcionais.

A revisão da ACV foi estruturada de modo a rever as principais fontes de informação desse tema. A aprendizagem foi embasada em estudos acadêmicos, normatizações e tutoriais do Software Gabi 6.0. O estudo de caso foi realizado de acordo com as instruções presentes na normatização referente à ACV da ISO. Ainda nessa foram abordadas com mais detalhes as fases do estudo da ACV: Definição de Objetivo e Escopo; Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Análise de Impacto Ambiental de Ciclo de Vida (AICV).

A escassez de artigos e trabalhos acadêmicos que correlacionassem melhor os assuntos de ACV e processamento offshore dificultou para uma abordagem conjunta dos temas. Trabalhos que abordavam estudos em planta de processamento offshore de gás e óleo e impactos ambientais na indústria do petróleo, separadamente, serviram como base para a elaboração do estudo desse caso particular. O uso da metodologia ACV no processamento primário offshore foi realizado no estudo de caso presente no capítulo três, utilizando o software GaBi6.0. Esse estudo permitiu a modelagem dos sistemas e a quantificação dos resultados do ICV.

As interpretações dos resultados e das categorias de impacto abordadas pela metodologia CML 2001 foram debatidas no capítulo quatro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS DA PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS

Este capítulo foi estruturado de modo a revisar os processos de produção e os módulos de tratamento de óleo e gás em unidades offshore no Brasil. Através de estudos de teses e trabalhos procurou-se entender as tecnologias associadas a cada unidade de produção e de seus processos unitários relacionados à exploração offshore para, então, associar a esses a metodologia de ACV. Entendidos os principais processos e dificuldades relacionados ao processamento primário, pode-se identificar os fluxos de entrada e saída de materiais para a construção do inventário do estudo de caso e os obstáculos para a obtenção de tais informações. O segmento *upstream* da indústria de petróleo e gás natural pode ser particularizado em quatro grandes etapas, a saber:

Exploração: conjunto de operações ou atividades destinadas a avaliar áreas, objetivando a descoberta e a identificação de jazidas de petróleo ou gás natural (BRASIL, 1997).

Desenvolvimento: conjunto de operações e investimentos destinados a viabilizar as atividades de produção e um campo de petróleo ou gás natural (BRASIL, 1997).

Produção: conjunto de operações coordenadas de extração de petróleo ou gás natural de uma jazida e de preparo para a sua movimentação (BRASIL, 1997).

Abandono: essa etapa envolve o fechamento dos poços, e pode ocorrer em dois casos: quando poços recém perfurados não têm potencial para produzirem quantidades economicamente viáveis de hidrocarbonetos (óleo e/ou gás), ou quando a produção de poços antigos torna-se economicamente inviável (BRASIL, 1997).

Das diferentes etapas e atividades do *upstream* descritas acima, a Produção, também conhecida como a fase de Lavra, integra o caso de estudo. A seguir, essa fase do segmento *upstream*, será caracterizada.

#### 2.1.1 PRODUÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL

O Brasil encontra-se em um período de desenvolvimento econômico e em um processo de mudanças na sua estrutura econômica e de produção de energia. Em 2006, o país inverteu a balança de importação de petróleo e hoje se tornou um médio produtor de petróleo e gás natural com atuação internacional.

A descoberta de novas jazidas de petróleo em águas ultra profundas (lâmina d'água de 1.500 a 3.000 metros) das Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo abriu uma nova fronteira para a indústria de petróleo e gás natural. O desenvolvimento da camada pré-sal estabeleceu uma nova condição para o Brasil no mercado internacional de petróleo e gás natural, ampliando suas reservas provadas e duplicando a capacidade de produção até 2020. A operação sob tais condições geológicas necessita de um número maior de unidades de produção adaptadas em cada campo. O desenvolvimento de infraestrutura de transporte do petróleo e do gás natural à distância de cerca de 300 km da costa é um dos principais desafios. A Petrobras e demais operadoras consideram opções (como bases de apoio, terminais oceânicos e centros de operação remotos) que garantem apoio logístico, operacional e segurança à produção.

Grandes investimentos nos campos do pré-sal estão programados para até 2020. Estima-se um total superior a US\$ 250 bi para o desenvolvimento da produção de petróleo e gás natural, incluindo toda a infraestrutura de transporte. Entre os investimentos divulgados estão: Petrobras, US\$ 53,4 bi (2011-2015); BG, US\$ 30 bi; Repsol YPF, US\$ 14 bi.

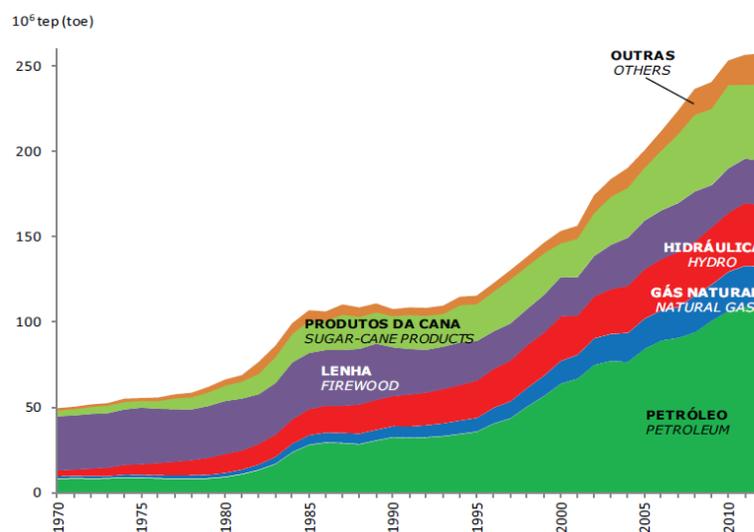


Figura 1 - Produção de energia primária (EPE, 2013).

A produção nacional de petróleo e óleo de xisto caiu 1,8% em 2012, atingindo a média de 2,11 milhões de barris diários. A produção marítima correspondeu a 91,0% do total nacional em 2012. Em relação aos estados produtores, o Rio de Janeiro foi responsável pela maior parcela: 74,2% do montante anual. No que tange à produção terrestre, o maior produtor foi o estado do Rio Grande do Norte, com 27,9% do total onshore (EPE, 2013). Na Figura 1

encontra-se a produção de energias primárias nacionais. Nela pode-se identificar a importância e a ascensão da produção de óleo nessas últimas duas décadas.

### 2.1.2 UNIDADES DE PRODUÇÃO OFFSHORE

As unidades de maior representatividade operando na costa brasileira podem ser divididas em plataformas fixas e flutuantes. A descoberta do pré-sal e de poços localizados em lâminas d'águas mais profundas acabam por limitar as unidades de exploração e produção ao segundo tipo, destacando-se entre as existentes as semissubmersíveis (SS) e a FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*).

Escolhida pela Petrobras para ser utilizada na exploração do pré-sal a FPSO, ilustrada nas Figuras 2 e 3, tem a capacidade de produzir, estocar e transferir o óleo produzido. Essas plataformas geralmente, são convertidas a partir de grandes navios petroleiros, para a instalação de todos os equipamentos de extração, processamento e escoamento de óleo e gás, assim como os equipamentos para o tratamento e descarte de água produzida. Assim, a unidade terá a forma tradicional de navio com adaptações estruturais para processamento de óleo, conexão com as linhas de produção, injeção, umbilicais e fundeio (PETROBRAS, 2007).



Figura 2 - Unidade de produção flutuante FPSO (PETROBRAS, 2010a).

O tipo FPSO será abordado no caso em estudo por ser a tecnologia de exploração nacional a ser mais utilizada nos próximos anos.

Em relação à planta de processamento primário nessas plataformas offshore, os equipamentos são projetados para mínima carga e máxima economia de espaço, resultando em unidades compactas (VAZ, 2009). Toda planta de processamento primário possui uma capacidade nominal de processamento em função do estudo de diversos parâmetros do campo produtor. A planta, ilustrada na Figura 3, é dividida em módulos, posicionados de acordo com

a sequência lógica do processamento dos fluidos da formação, localizados em áreas abertas do convés, expostas à ventilação natural (PETROBRAS, 2010a).



Figura 3 - Módulos de uma FPSO (PETROBRAS, 2010a).

## PLANTA DE PROCESSAMENTO PRIMÁRIO OFFSHORE

A corrente de fluido do poço de produção que chega até a superfície, nas plataformas, não se encontra adequada à utilização ou exportação. Como o interesse econômico é somente na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás), há necessidade de dotar os campos *offshores* de equipamentos de produção, que são instalações destinadas a efetuar o processamento primário dos fluidos, ou seja, a separação e condicionamento gás/óleo/água (PETROBRAS, 2010a).

Assim, o processamento primário da produção tem como finalidades:

- Promover a separação óleo/gás/água;
- Tratar ou condicionar os hidrocarbonetos para que possam ser transferidos para a refinarias ou Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGNs);
- Tratar a água para que seja destinada à condição ambiental e tecnicamente mais aceitável (descarte ou reaproveitamento) (PETROBRAS, 2007).

De acordo com os estudos de reservatório e de viabilidade técnico-econômica, um sistema de produção poderá ter uma planta de processamento bem simples ou mais complexa. As plantas simplificadas efetuam apenas a separação gás/óleo/água, enquanto as mais completas incluem tratamento e estabilização do óleo, condicionamento e compressão do gás, tratamento

da água oleosa, além do tratamento de água para injeção no reservatório e descarte (PETROBRAS, 2007).

O dimensionamento do sistema de processamento primário e a seleção dos equipamentos mais adequados consideram diversos parâmetros técnicos e as características das áreas aonde serão instaladas essas unidades de produção, entre os quais as mais importantes são (CAMPOS, 2012):

- Número de poços produtores interligados à plataforma: um poço por vez, ou diversos poços;
- Temperatura do óleo ao chegar à planta: apresentando uma temperatura mínima e uma temperatura máxima;
- A escolha de métodos de elevação que imponham menores taxas de cisalhamento do fluido é de suma importância para a posterior separação da água do petróleo;
- Grau API (American Petroleum Institute) do petróleo;
- Quantidade de água livre e sua salinidade.

A planta de processamento primário dos fluidos produzidos é projetada considerando as propriedades físico-químicas do fluido oriundo dos poços produtores, sendo capaz de promover a separação do óleo, gás e água, bem como o condicionamento e a compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e o tratamento da água produzida para descarte dentro dos parâmetros regidos pela legislação ambiental, através da CONAMA nº393/07 (PETROBRAS, 2010).

Antes de o fluido chegar à unidade de produção existe um sistema que começa na cabeça do poço, que é equipado com uma válvula para controle da vazão de acordo com as recomendações da engenharia de reservatórios (THOMAS, 2001).

Após uma separação primária das correntes de fluidos produzidos, ocorre o tratamento individual das fases gás, óleo e água a fim de se atingir as especificações necessárias à comercialização do óleo e gás e as especificações ambientais para o descarte da água. (PETROBRAS, 2007). Alguns requisitos são exemplificados a seguir:

- O gás natural, não pode conter quantidades excessivas de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S e deve ser liberado a uma pressão especificada. O gás não deve conter vapor de água que pode condensar e formar hidratos e causar perdas de carga adicionais ou causar corrosão nas tubulações. (PETROBRAS, 2007);

- O óleo não pode conter excessivas quantidades de água e sedimentos (BS&W) e sais dissolvidos na água. Valores típicos máximos são 1% de BS&W e 570 ou 285 mg/L (ou ppm - partes por milhão) de sal no óleo, o primeiro limite para consumo interno e o segundo para exportação (PETROBRAS, 2007);
- A água produzida deve possuir um valor limitado de óleo disperso (teor de óleo e graxas - TOG) para poder ser descartada. As regulamentações internacionais para plataformas limitam em 10 a 40 mg de óleo por litro de água. No Brasil este valor é de 20 mg/L. Também a temperatura deve ser controlada para o descarte. Na Tabela 1 apresenta-se as principais especificações exigidas para as correntes gás, óleo e água produzida (para descarte), após o processamento primário realizado no E&P (PETROBRAS 2007).

Tabela 1 - Especificações necessárias à comercialização do óleo e gás (PETROBRAS, 2007).

<b>Corrente</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
<b>Gás</b>	Teor de água	máx. 3 a 5 lb/Mscf (na BR: 2lb/Mscf)
	Teor de H <sub>2</sub> S.	máx. 10 a 15 ppm
	Teor de Inertes, CO <sub>2</sub>	máx. 4% vol (na BR: 2%vol.)
<b>Óleo</b>	BS&W	Refino: máx. 1% vol Exportação: máxi. 0,5% vol
	Teor de sais	Refino: máx.: 570 mg/L (em NaCl) Exportação: máx. 285 mg/L (em NaCl)
<b>Água Produzida</b>	TOG	máx. 20 ppm
	Temperatura	máx. 40°C

A pressão na qual os separadores operam pode variar bastante, dependendo do grau de separação gás - óleo desejado e da pressão do óleo no sistema de produção. A separação em estágios, que tipicamente envolve separadores de alta, intermediária e baixa pressão em série, visa maximizar a produção de óleo e permitir que vários poços com diferentes pressões de escoamento possam ser alimentados numa mesma facilidade de produção.

No sistema de gás, compressores são necessários para elevar a pressão do gás ao nível desejado para a tubulação. Vários estágios de compressão podem ser necessários para comprimir as correntes de baixa e intermediária pressão. Os compressores são normalmente acionados por turbinas a gás. Alguns campos requerem que o gás produzido passe por um processo de remoção de H<sub>2</sub>S, quando o teor deste contaminante é elevado. A maioria dos equipamentos de produção requer que o gás passe por um sistema de remoção do vapor de

água presente no gás a fim de reduzir a possibilidade de formação de hidratos (sólidos de hidrocarbonetos leves e água que podem obstruir o sistema de gás) (PETROBRAS, 2007).

No sistema de óleo, o principal problema é a remoção de água emulsionada, que também contém os sais dissolvidos e alguns sedimentos inorgânicos. Os vasos tratadores de óleo utilizam uma combinação de métodos que se baseiam na adição de compostos químicos (chamados desemulsificantes), calor, introdução de um campo elétrico e tempo de residência para romper a película de compostos emulsificantes que circundam as gotículas de água permitindo que elas se coalesçam, formando gotas maiores que decantam e permitem a separação em duas fases líquidas, uma oleosa e uma aquosa. Se o óleo produzido tiver um elevado teor de sal pode ser necessário adicionar água fresca ao óleo para permitir a diluição dos sais dissolvidos na água remanescente que sai com o óleo tratado (PETROBRAS, 2007).

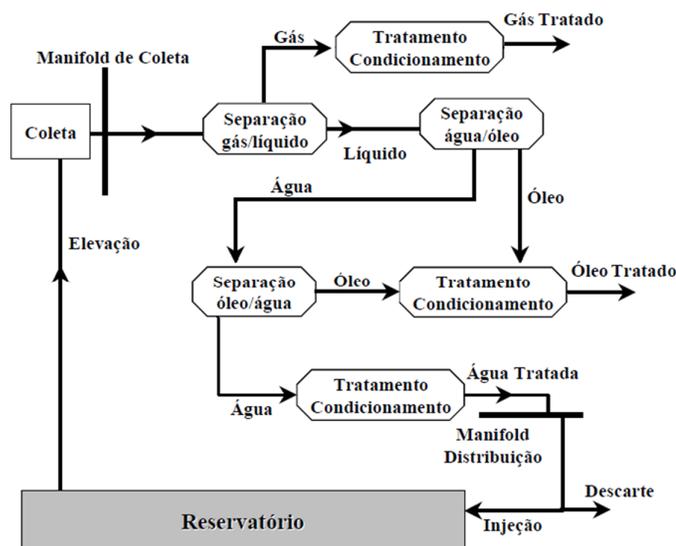


Figura 4 - Diagrama esquemático de uma planta de processamento primário com separadores bifásicos (PETROBRAS, 2007).

A corrente de água produzida que escoam dos separadores trifásicos e do vaso tratador de óleo necessitam passar por um tratamento que visa remover gotículas de óleo que escaparam dos processos anteriores. Tanques separadores (*skimmers*), hidrociclones e flotadores a gás podem ser utilizados para alcançar o limite máximo admissível de óleo na água a ser descartada ou injetada nos poços (PETROBRAS, 2007).

As Figura 4 e Figura 5 exibem dois diagramas esquemáticos genéricos do processo de separação utilizando separadores bifásicos (alta e baixa pressão) e separador trifásico e dos

tratamentos de óleo, gás e água produzida. Assim que chega à unidade de produção marítima, o hidrocarboneto proveniente do poço ou dos vários poços recebe inicialmente a injeção de produtos químicos como desemulsificantes, antiespumante, inibidor de incrustação, inibidores de corrosão polieletrólitos. Essa adição é necessária para auxiliar as etapas de tratamento dos fluidos, bem como manter a integridade das instalações, garantindo assim um aumento da eficiência do processamento do petróleo (PETROBRAS, 2010).

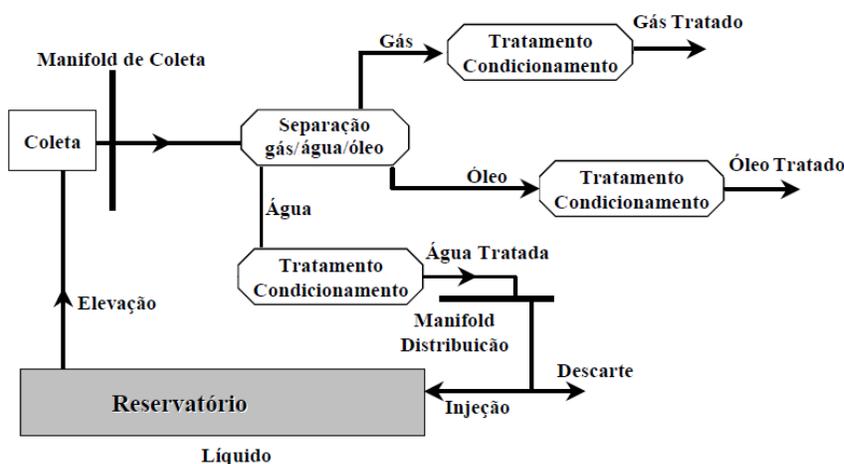


Figura 5 - Diagrama esquemático de uma planta de processamento primário com separador trifásico (PETROBRAS, 2007).

### 2.1.2.1 SEPARAÇÃO

A primeira etapa do processamento primário de petróleo e gás consiste na separação das fases água, óleo e gás. Essa separação é realizada com o auxílio de equipamentos como vasos separadores que, dependendo da quantidade relativa das fases presentes no fluido, podem ser bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou paralelo, orientados vertical ou horizontalmente (SANT'ANNA, 2005).

Separadores de teste são utilizados para separar o fluxo de um ou mais poços para análise e medição detalhada do fluxo. Desta forma, o comportamento de cada poço, sob diferentes condições de fluxo de pressão, pode ser definido. Isto normalmente ocorre quando o poço é perfurado para a produção e deseja-se medir em intervalos regulares (normalmente 1-2 meses), as taxas de fluxo total de componentes sob diferentes condições de produção. Consequências indesejáveis, tais como areia ou lama também podem ser determinadas. Os componentes separados são analisados no laboratório para determinar a composição de hidrocarbonetos do petróleo e do gás condensado (PETROBRAS, 2007).

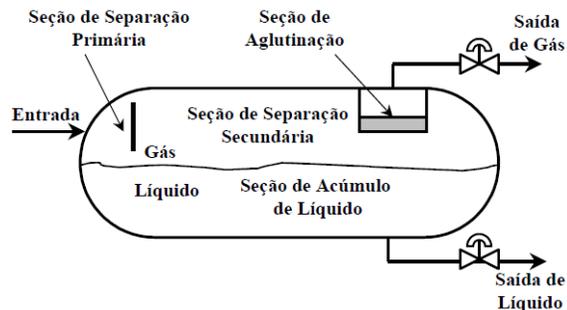


Figura 6 - Separador de produção (PETROBRAS, 2007).

Numa instalação de processamento primário de fluidos o gás, por ser menos denso, é inicialmente separado do líquido por ação da gravidade. Um separador típico de produção é dotado de vários dispositivos internos para aumentar a eficiência de separação. Alguns exemplos são os defletores de entrada, quebradores de espuma, de ondas e de vórtice, extrator de névoa ou *demister*. Para fins didáticos, pode-se dizer que são quatro as seções de um separador típico: seção de separação primária, de acumulação (ou de coleta de líquido), de separação secundária (ou de decantação) e de aglutinação (PETROBRAS, 2007).

Na seção primária, localizada na entrada do vaso, o fluido (líquido e gás) choca-se com dispositivos defletores que provocam uma mudança brusca de velocidade e direção do fluxo ou é dirigido por um difusor que lhe impõe um movimento giratório fazendo com que o líquido se desloque para o fundo do vaso por ação da gravidade, separando-se do gás. É nesta seção que a maior parte do líquido é separada, acumulando-se no fundo do vaso, denominado de seção de acumulação de líquido, por um tempo de retenção de 3 a 4 minutos, suficiente para permitir a separação do gás remanescente e, em alguns casos (nos separadores trifásicos), de grande parte da água (PETROBRAS, 2007).

Na seção secundária, as gotículas maiores de óleo, oriundas da fase gasosa, são separadas por decantação. As gotículas de líquido arrastadas pela corrente gasosa e que ainda não se separaram são, na seção de aglutinação (localizada geralmente próxima a saída do gás), removidas do fluxo gasoso através de meios porosos que por possuírem grande área de contato facilitam a coalescência e decantação das gotas. Utilizam-se vários tipos de extratores de névoa, tais como, aletas de metal, almofadas de tela de arame, placas pouco espaçadas, por

exemplo. A pressão no separador é mantida por um controlador que atua regulando o fluxo de saída do gás na parte superior (PETROBRAS, 2007).

O líquido separado deixa o vaso através de uma válvula de descarga, cuja abertura ou fechamento é efetuado através de um controlador de nível. Os separadores são fabricados nas formas horizontal e vertical. Por apresentarem uma maior área superficial de interface permitindo uma melhor separação líquido/gás e gás/líquido, os separadores horizontais são normalmente mais eficientes, sendo utilizados principalmente em sistemas que apresentem espumas e altas razões gás/óleo. As principais desvantagens destes separadores, por outro lado, são a dificuldade de remoção dos sólidos produzidos (os verticais têm uma geometria que permite a deposição localizada no fundo do vaso facilitando sua remoção) e a menor capacidade de absorver grandes variações de fluxo (golfadas) (PETROBRAS, 2007).

Os separadores podem ainda ser do tipo bifásico (Figura 6), quando promovem a separação gás/líquido (separadores de gás), ou trifásico, separadores de água livre, que, adicionalmente, promovem a separação da água (Figura 7). Os trifásicos apresentam uma maior seção de decantação de líquido que possibilita uma separação melhor do óleo/água.

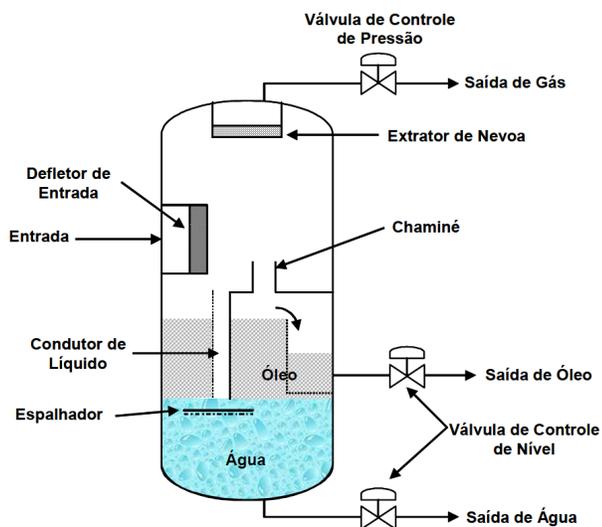


Figura 7 - Esquema de um separador trifásico de produção (PETROBRAS, 2007).

- **Principais problemas operacionais**

Apesar da separação de fluidos ser um processo relativamente simples, alguns problemas podem causar dificuldades durante a separação gás/líquido e óleo/água. Dentre eles cita-se:

- **Formação de espuma:** o gás, de menor densidade, tende a separar-se com facilidade, porém a presença de impurezas presentes no líquido poderão possibilitar o maior arraste de

gotas, gerando as espumas. A presença de espuma no interior de um vaso separador, por tratar-se de uma estrutura de grande volume específico, além de reduzir dramaticamente a área de escoamento do gás, aumenta o arraste de líquido na saída de gás (*LCO - Liquid Carry Over*). Esse carregamento de líquido pode ocasionar danos aos compressores, que se encontram usualmente entre os equipamentos de maior custo, que compõem os equipamentos de produção. Os instrumentos de controle de nível de líquido no vaso, entre os quais, as chaves de alarme e de parada automática (*shut down*) podem ser levados a atuar pela presença de espuma, ocasionando deficiente controle de nível, ou até mesmo parada do equipamento, e consequente perda de produção (PETROBRAS, 2007).

Um dos procedimentos utilizados para combater a espuma formada e/ou evitar sua formação é aquecer os fluidos a serem separados ou utilizar antiespumantes, preferencialmente o silicone (PETROBRAS, 2007).

- **Produção de areia:** proveniente dos reservatórios, a areia que vem com o líquido causa erosão e obstrução das válvulas acumulando-se no fundo do separador, de onde é removida pelos drenos. A solução do problema é evitar a sua produção (PETROBRAS, 2007).

- **Parafinas:** são hidrocarbonetos saturados de elevado peso molecular que podem separar-se do petróleo, caso a temperatura de produção dos fluidos seja inferior à temperatura de aparecimento de cristais (TIAC). As parafinas cristalizam-se e são arrastadas pelo fluido até que, ao chegar aos vasos separadores, onde as velocidades são reduzidas, acabam depositando-se e obstruindo o equipamento e as linhas de transferência. A forma de evitar a deposição de parafinas é operar a temperaturas superiores à TIAC (PETROBRAS, 2007).

- **Arraste de óleo pelo gás:** Ocorre quando: o nível de líquido está muito alto; existe dano em algum componente interno; há formação de espuma; a saída de líquido está obstruída ou o equipamento está subdimensionado. Já o arraste de gás pelo líquido pode ser um indicativo de nível muito baixo de líquido ou falha no sistema de controle de nível (PETROBRAS, 2007).

Após a separação primária das correntes de fluidos produzidos nos vasos separadores, ocorre o tratamento individual das fases gás, óleo e água a fim de se atingir as especificações necessárias à comercialização do óleo e gás e as especificações ambientais para o descarte da água de produção.

### 2.1.2.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÓLEO

Os separadores gravitacionais trifásicos removem a água livre, porém não conseguem retirar do óleo efluente a água emulsionada, que necessita ser removida para atender às especificações de exportação. Estas especificações limitam o teor de BS&W em no máximo 1% em volume e o teor de sais dissolvidos na água em no máximo 570 mg/L de sais no óleo. Para entender melhor o funcionamento dos Tratadores de óleo é importante conhecer melhor as emulsões do tipo A/O (PETROBRAS, 2007).

Diferentes métodos de desestabilização das emulsões de petróleo do tipo A/O são empregados para promover a quebra das emulsões em campo. Eles serão apresentados a seguir.

- **Adição de desemulsificante**

O desemulsificante é um produto químico que desloca os emulsificantes naturais da superfície das gotas, permitindo a coalescência das gotas. Inicialmente, o desemulsificante chega à interface e desloca os emulsificantes naturais, desestabilizando a emulsão. Em seguida, ocorre a coalescência das gotas em gotas de maior tamanho e peso. Finalmente, ocorre a sedimentação das gotas de água, separando as fases água e petróleo, por segregação gravitacional.

Cada petróleo requer o uso de uma formulação específica de desemulsificante que é selecionada pelo fabricante junto à Unidade de Produção, sendo o mecanismo de atuação do desemulsificante ainda pouco elucidado. Atualmente os desemulsificantes utilizados são tipicamente constituídos de misturas de copolímeros em bloco de óxido de etileno (EO) e de propileno (PO), com diferentes relações molares EO/PO. A cadeia etilênica é a porção hidrofílica enquanto a cadeia propilênica é a lipofílica. Normalmente, as bases de desemulsificantes são obtidas mediante a propoxilação seguida da etoxilação de um aduto (A-O), comumente o glicerol, a resina fenólica e a resina epóxi. As formulações comerciais de desemulsificantes são obtidas mediante a mistura dessas bases, o que permite formular desemulsificantes com diversos balanços hidro-lipofílicos (HLB) de acordo com as características do petróleo a ser tratado (PETROBRAS, 2007).

O ponto de injeção do desemulsificante também é um fator importante para seu desempenho. Usualmente é injetado em linha, a montante do sistema de tratamento, numa região de fluxo turbulento, para sua perfeita mistura na emulsão. O ponto de injeção deve ser localizado o mais afastado possível da planta de processamento primário, para que a ação do

produto seja mais efetiva. A prática de injetar o desemulsificante no interior do poço está sendo usada nos novos projetos de óleos pesados, pois melhora a ação de desestabilização das emulsões ao impedir que os emulsificantes naturais migrem para a interface das gotas de água geradas durante o escoamento do petróleo (PETROBRAS, 2007).

- **Aquecimento**

O aquecimento da emulsão é acompanhado da diminuição da viscosidade do meio que é fundamental, conforme a equação de Stokes para aumentar a velocidade de sedimentação das gotas. Na figura 11 observa-se os gráficos de viscosidade em função da temperatura para óleos de diferentes °API.

Além da influência sobre a viscosidade, o aquecimento também:

- Aumenta a difusibilidade do desemulsificante no meio, facilitando a chegada do desemulsificante na superfície das gotas;
- Aumenta a taxa de colisão entre as gotas, pelo aumento do movimento browniano;
- Facilita a drenagem do filme intersticial;
- Diminui a rigidez do filme interfacial, facilitando a ruptura do filme e a coalescência das gotas;

- **Aumento do teor de água**

À medida que aumenta o teor de água na emulsão, aumenta a população de gotas de água. Esse aumento é acompanhado de maior proximidade e do aumento de do tamanho das gotas. Com o aumento da população de gotas na emulsão, o sistema disperso torna-se mais instável, pois aumenta a probabilidade de colisão entre as gotas, condição essencial para o processo de coalescência (PETROBRAS, 2007).

- **Uso de campo elétrico**

Quando uma gota de água é submetida a um campo elétrico intenso, ocorre a formação de um dipolo induzido. A polarização da gota faz com que ocorra seu alongamento, na direção do campo elétrico. Quando várias gotas se encontram vizinhas umas às outras, as gotas alinham-se na direção do campo elétrico e ocorre a formação de dipolos induzidos de sentidos contrários que se atraem. Essa atração gerada faz com que se aumente a taxa de colisão e de coalescência entre as gotas.

Devido ao uso de corrente alternada, o comportamento senoidal do campo elétrico faz com que as gotas sofram alongamentos e contrações sucessivas. Desta maneira, o filme interfacial fica submetido a vibrações longitudinais, que causam a dessorção de parte dos emulsificantes naturais, favorecendo a coalescência das gotas (PETROBRAS, 2007).

Alternativamente, pode-se também utilizar corrente contínua (DC) para promover a coalescência das gotas. Neste caso, as gotas seguem até a região entre as placas energizadas e adquirem a carga da placa mais próxima, sendo então aceleradas em direção à placa com carga oposta, colidindo com outras gotas e coalescendo, dando origem a gotas maiores que serão capazes de sedimentar sob ação da gravidade. Há, basicamente, dois tipos de tratadores eletrostáticos utilizados na indústria de petróleo. O de baixa velocidade, em que a emulsão é introduzida no vaso em escoamento laminar e o de alta velocidade, usado nas Refinarias, em que a carga é alimentada em regime turbulento (PETROBRAS, 2007).

No tratador de baixa velocidade, a carga é introduzida pela parte inferior do vaso cilíndrico - horizontal e distribuída ao longo do seu comprimento. Desta forma, a emulsão sofre uma pré-lavagem pela camada de água, podendo remover-se sais e outras partículas sólidas presentes na emulsão, além de promover-se alguma coalescência das maiores gotículas de água.

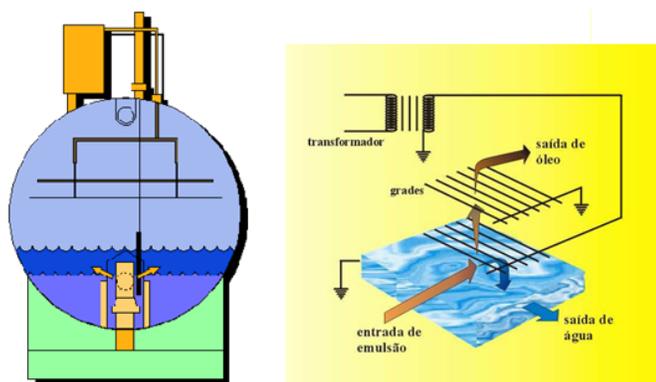


Figura 8 - Configuração de um tratador eletrostático de baixa velocidade e dos eletrodos (PETROBRAS, 2007).

Por diferença de densidade a emulsão, já com teores menores de água vai subindo em direção ao campo elétrico, sofrendo sucessivas reduções no seu conteúdo de água à medida que o campo elétrico vai se intensificando desde o nível da interface água-óleo até os eletrodos. Assim, quando a emulsão alcança o campo elétrico principal, entre os dois eletrodos, onde o gradiente de tensão é mais elevado, ocorre a eliminação das gotas de menor diâmetro,

completando-se o processo. Na Figura 8 apresenta-se o esquema e a configuração do tratador de baixa velocidade (PETROBRAS, 2007).

- **Uso de campo centrífugo**

Baseando-se na equação de Stokes, pode-se deduzir que a velocidade de segregação de uma gota de água dispersa num meio oleoso pode ser aumentada de várias grandezas com o aumento do campo gravitacional. As centrífugas são equipamentos providos de um rotor capaz de girar com velocidades elevadas, dando origem a campo centrífugo que permite separar boa parte de água do petróleo.

### **2.1.2.3 SISTEMA DE TRATAMENTO DE GÁS**

Os esforços exploratórios da Petrobras preferencialmente têm sido focados na descoberta e produção de óleo, portanto a partir de reservatórios em que o gás apresentava um papel secundário. Quanto a sua utilização, o gás natural é prioritariamente consumido nas instalações de produção, para elevação artificial (*gas-lift*) e para a recuperação secundária (injeção em poços) ou ainda na geração de energia, nos turbogeradores ou como combustível em fornos e caldeiras (PETROBRAS, 2007).

Quando comercializado, seu uso predominantemente é como combustível (gás liquefeito de petróleo - GLP de uso doméstico, líquido de gás natural - LGN de uso industrial ou gás natural veicular - GNV). Enquanto o GNV é composto basicamente por metano e algo de etano, o GLP é composto por propano e butano e o LGN é a porção condensável do gás, ou a gasolina redutora (PETROBRAS, 2007).

- **Condicionamento**

O objetivo do condicionamento do gás natural é a remoção de compostos e materiais, que podem alterar suas características e danificar os equipamentos utilizados no seu aproveitamento. A remoção destes compostos visa garantir as condições de qualidade mínimas do gás com vistas a realizar sua transferência de forma eficiente e segura, das áreas de produção até os centros processadores, evitando problemas como formação de hidratos, corrosão, ação de compostos agressivos, acidentes na manipulação, por exemplo (PETROBRAS, 2007).

Condicionamento de gás natural é um termo genérico que abrange vários processos unitários (físicos, químicos e mecânicos) pertencentes a um sistema global de tratamento primário da produção de óleo e gás. Os processos unitários mais comumente utilizados no

condicionamento de gás natural são a separação de óleo e gás, depuração de gás, filtração de gás, dessulfurização, desidratação, compressão e a injeção de inibidor de hidrato.

Os gases ácidos presentes em vários campos de produção, quando presentes em teores elevados, comprometem a qualidade do gás a ponto de inviabilizar o seu transporte e utilização pelos consumidores. A presença de resíduos sólidos em altos teores pode comprometer a integridade física do sistema de transporte de gás, (o qual é composto basicamente por gasodutos) a partir de fenômenos do tipo erosão e corrosão (PETROBRAS, 2007).

Após a etapa de separação a corrente gasosa entra na etapa de depuração e filtração, que tem como finalidade a remoção de gotículas de óleo de pequeno tamanho. O gás depurado e filtrado se dirige ao módulo de dessulfurização de gás, quando necessário.

O gás natural dessulfurizado é comprimido e segue para o módulo de desidratação de gás. Esta unidade tem a finalidade de especificar o gás tratado segundo o teor de umidade definido pelo projeto, para garantia do escoamento eficiente até a unidade de processamento, sem a ocorrência de hidratos e com a qualidade necessária (PETROBRAS, 2007).

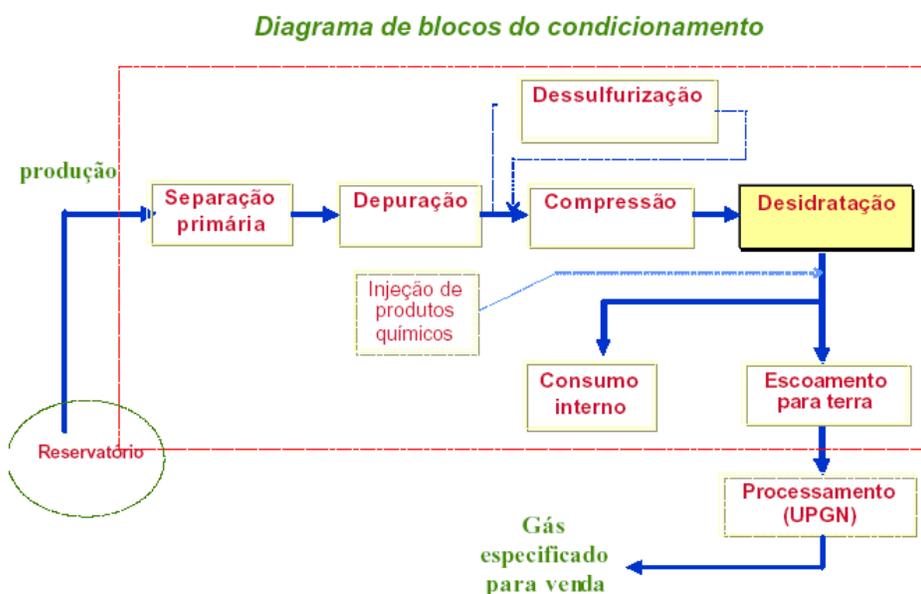


Figura 9 - Etapas do condicionamento do gás natural (PETROBRAS, 2007).

Os principais compostos a serem removidos pelas etapas de condicionamento do gás natural ou reduzidos a determinados teores estabelecidos por normas ou padrões são a água, compostos sulfurados ( $H_2S$ ,  $CS_2$ ,  $COS$ , etc), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sólidos (areia, óxidos de ferro, produtos de corrosão) e os líquidos (condensado de gás, produtos químicos). Na

Figura 9 apresenta-se um diagrama esquemático com as etapas do condicionamento do gás natural.

- **Compressão**

Compressão é a etapa de passagem do gás por um conjunto de compressores, a fim de fornecer a energia necessária a esse fluido para que ele possa ser transferido para as unidades de processamento de gás ou injetados em poços de *gas-lift*. Deve-se elevar a pressão do gás até a maior pressão de sua utilização, que nem geral é a necessária ao *gas-lift*, que é da ordem de 200 kgf/cm<sup>2</sup>.

Um sistema de compressão é composto por compressores principal e auxiliar, sendo o objetivo deste último elevar a pressão para envio ao compressor principal. O sistema de compressão principal é constituído de 2 ou 3 estágios de compressão que são intercalados com resfriadores inter-estágios e vasos depuradores. Além disto também compõe o sistema, os acionadores elétricos ou a gás. A cada estágio de compressão no qual gradualmente eleva-se a pressão ao nível desejado, é necessário resfriar o gás, gerando-se, por consequência, frações de condensáveis que, por sua vez devem ser removidos do sistema nos vasos depuradores. Um esquema deste sistema está mostrado na Figura 10 (PETROBRAS, 2007).

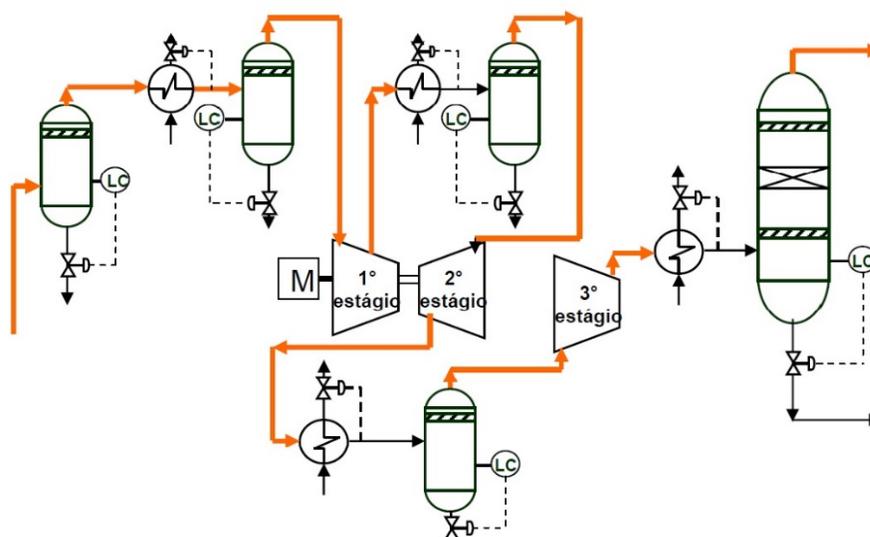


Figura 10 - Sistema de compressão principal em três estágios, com resfriadores e vasos depuradores (PETROBRAS, 2010a).

- **Desidratação**

O objetivo principal da operação de desidratação do gás natural é separar o vapor d'água presente em equilíbrio com o gás para garantir o escoamento e o processamento do mesmo,

sem o risco da ocorrência de formação de hidratos ou de provocar corrosão nos equipamentos e tubulações (PETROBRAS, 2007).

O gás natural oriundo de qualquer formação encontra-se sempre saturado com vapor d'água e à medida que se aproxima da superfície dentro da linha de produção do poço, começa a ocorrer a separação de água livre, devido às mudanças das condições termodinâmicas. Estas condições podem conduzir à formação dos hidratos, que é preocupante quando a temperatura do fundo do mar atinge valores baixos (4°C) e as pressões de escoamento superam os 1500 psi, condições comuns ao desenvolvimento de novos campos de produção, situados à lâmina d'água profunda (PETROBRAS, 2007).

A desidratação de gás é um processo de absorção ou de adsorção, utilizando absorventes líquidos no primeiro caso, ou alternativamente sólidos no segundo caso. O processo de absorção com absorventes líquidos é o mais comum, principalmente em sistemas offshore pois a logística do manuseio de líquidos é mais fácil. Em terra a utilização de peneiras moleculares (material de elevada porosidade) ou ainda membranas pode ser empregado. Os glicóis, dentre os quais o trietilenoglicol - TEG, são os adsorventes mais largamente utilizados devido às suas características. Eles são álcoois muito higroscópicos, não corrosivos, não voláteis, de fácil regeneração a altas concentrações, insolúveis em hidrocarbonetos líquidos e não reativos com os componentes do gás (hidrocarbonetos, dióxido de carbono e compostos de enxofre) (PETROBRAS, 2007).

O processo de absorção ocorre numa torre contactora (ou absorvedora), onde há o contato íntimo entre a fase gasosa (gás natural) e a fase líquida (a solução de glicol). O gás úmido comprimido entra na seção inferior da unidade de desidratação com alto teor de umidade e ponto de orvalho superior a 30°C. Após atravessar um eliminador de névoa, o gás sobe pela torre contactora encontrando a solução de glicol em contracorrente e o líquido, constituído basicamente de água e de hidrocarbonetos pesados é coletado no fundo (PETROBRAS, 2007).

A solução de glicol, que escoar em contracorrente com o gás deve ser altamente pura (no caso do TEG - 98,5%), isenta de água e é denominada glicol pobre. Após o contato com o gás, do qual remove sua umidade, passa a constituir a corrente de glicol rico que se acumula no fundo da torre donde é encaminhada à etapa de regeneração (PETROBRAS, 2007).

Internamente a torre contactora é constituída por um leito recheado, por exemplo, com recheio tipo sela intalox de aço inox, ou recheio estruturado, também de aço inox, cuja finalidade é aumentar a eficiência de contato entre as fases gás e glicol (PETROBRAS, 2007).

No topo da absorvedora, acima do leito recheado existe um eliminador de névoa que tem como finalidade remover partículas líquidas de glicol arrastadas pela corrente de gás. O gás que sai pelo topo da torre, agora chamado de gás seco, possui um teor de umidade em torno de 150 ppm em volume e ponto de orvalho em torno de 5°C, sendo então distribuído aos diversos pontos de consumo, após passar por um vaso depurador para reter partículas líquidas de glicol eventualmente arrastadas (PETROBRAS, 2007).

Por outro lado, o glicol rico que escoar para o sistema de regeneração, sofre, ao sair da torre contactora, uma brusca redução da pressão na válvula controladora de nível, atingindo a pressão de trabalho do vaso de expansão. À baixa pressão, e após passar por filtros para a remoção de contaminantes sólidos e líquidos arrastados, a corrente de glicol rica é aquecida a temperatura tal que não ocorra a decomposição do produto (no caso do TEG a 204°C) mas que libere o máximo do vapor d'água que é conduzido através do vent para atmosfera (PETROBRAS, 2007). Na Figura 11 mostra-se o esquema da desidratação e regeneração de TEG bem como uma torre contactora.

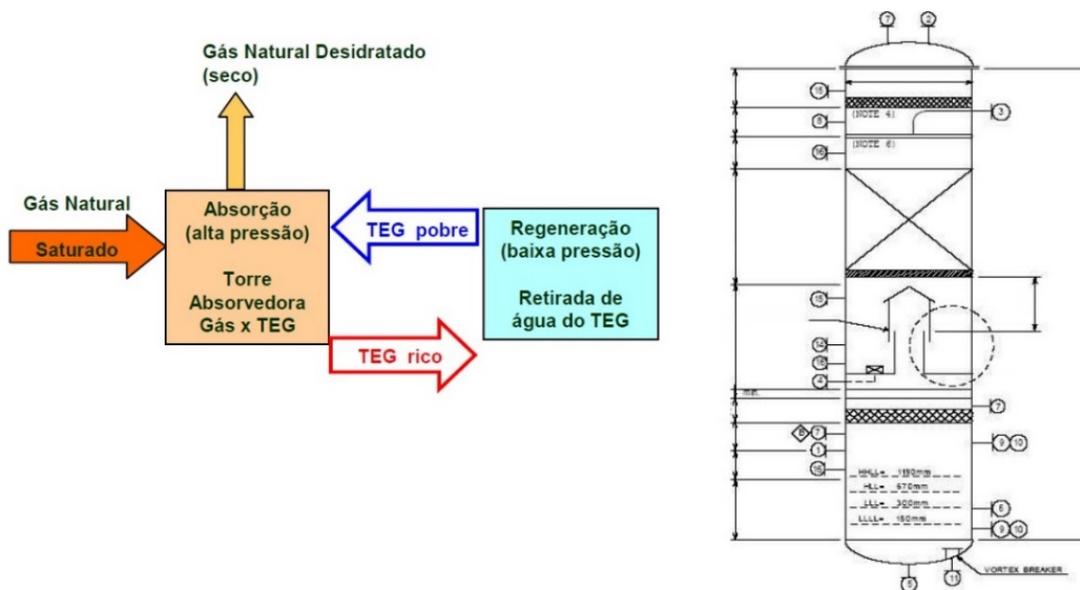


Figura 11 - Processo de desidratação de Gás Natural (PETROBRAS, 2010a).

- **Remoção de gases ácidos**

Dois são os gases ácidos que costumam estar presentes no gás - o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$ , sendo que este último pode também ter sido originado da ação de bactérias redutoras de sulfato (BRS). Para baixas concentrações destes gases, a tendência é utilização de materiais metalúrgicos adequados para minimizar os efeitos corrosivos e, no caso do  $\text{H}_2\text{S}$  também pode-se injetar produtos químicos sequestrantes. Há que se comentar que o  $\text{H}_2\text{S}$  a teores relativamente baixos (4 ppm) já é considerado tóxico (PETROBRAS, 2007).

O processo de remoção destes gases ácidos é designado adoçamento e consiste basicamente na absorção com produtos líquidos ou absorção com materiais sólidos. Enquanto no processo de desidratação os álcoois (glicóis) são empregados, no adoçamento utilizam-se as aminas, principalmente as Monoetanolaminas - MEA ou Dietanolaminas - DEA.

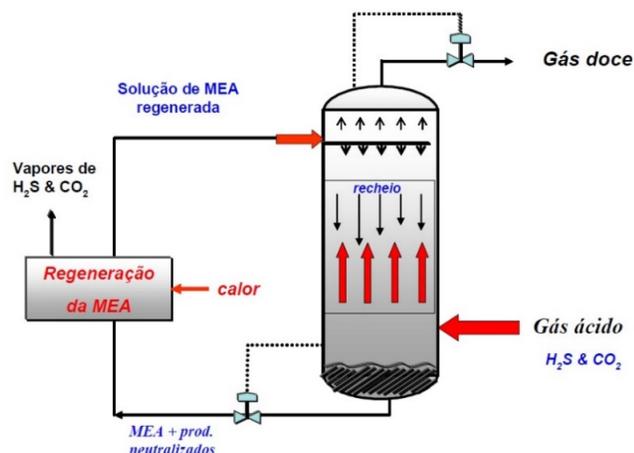


Figura 12 - Unidade de remoção de gases ácidos -  $\text{H}_2\text{S}$  ou  $\text{CO}_2$  (PETROBRAS, 2010a).

As peneiras moleculares e membranas (permeação em polímeros) também são utilizadas, alternativamente. A tecnologia está baseada na reação química de uma base (alcanolamina) com um ácido ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) e é reversível, o que permite que o solvente também seja regenerado por meio de aquecimento (PETROBRAS, 2007).

Nas unidades de tratamento de gases na Estação de Tratamento de Guamaré na UN-RNCE um processo de absorção de  $\text{H}_2\text{S}$  ainda é muito utilizado - o processo patentado Sulfatreat R) onde o absorvente é um suporte granulado a base de óxido de ferro, cujo diagrama está apresentado na Figura 13.

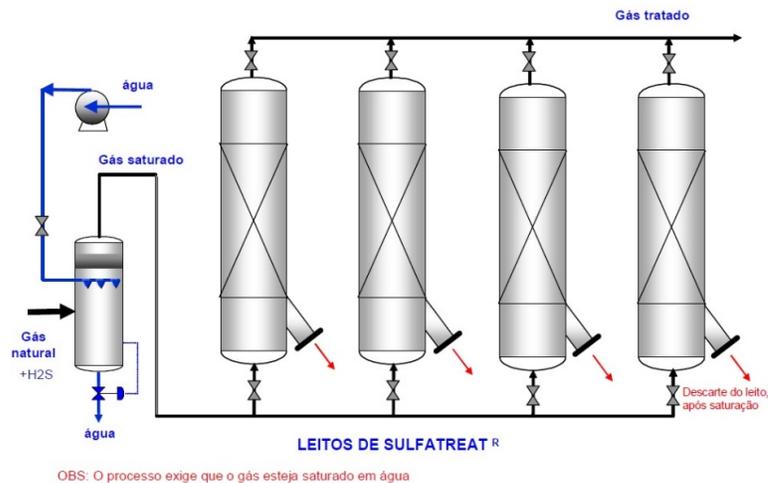


Figura 13 - Unidade de remoção de H<sub>2</sub>S - processo SULFATREAT (R) (PETROBRAS, 2010a).

#### 2.1.2.4 TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA

A água separada do petróleo é um efluente que, quer seja destinada ao descarte ou ao seu reuso (reinjeção ou outra utilização, como por exemplo geração de vapor ou até irrigação), deve ser tratada. Em média, para cada barril de petróleo produzido são gerados 3 a 7 barris de água e, à medida que os campos ficam maduros e aumenta a produção de óleos pesados, maior a tendência de aumento destas quantidades de água produzida. Nas atividades do E&P a água produzida responde por 98% de todos os efluentes gerados (PETROBRAS, 2007).

A água produzida destinada ao tratamento, pode conter concentrações de óleo que variam de 50 a 5000 ppm, possui elevada salinidade (entre 40.000 e 150.000 mg/L de NaCl) e pode conter teor de sólidos suspensos (TSS) variando entre 5 a 2000 ppm. Além disto microorganismos e gases dissolvidos, carbônico e sulfídrico, podem estar presentes.

Caso a água seja descartada, condição comumente adotada em campos marítimos (*offshore*), inevitavelmente deverá ser tratada para atender as normas ambientais brasileiras, que atualmente exigem uma concentração limite do teor de óleos e graxas (TOG) de 20 mg/L. Além desta especificação, caso a água seja descartada em corpos hídricos em terra (caso das refinarias, terminais e unidades onshore) outros requisitos específicos da CONAMA 357/2005 devem ser atendidos relativos, por exemplo, à presença de compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos; presença de sais e outros constituintes nocivos ao meio ambiente, ausência de oxigênio e temperatura elevada. Caso a água seja reinjetada, condição desejável e adotada hoje principalmente pelos campos terrestres, o tratamento deverá ser ainda mais rigoroso. Deve-se

atingir padrões de qualidade que não comprometam a injetividade dos reservatórios e problemas nos equipamentos relacionados à corrosão ou entupimentos (PETROBRAS, 2007).

Para projeto, avaliação ou adaptação de sistemas para tratamento de água, é importante o conhecimento das características da água (salinidade, temperatura, teor de sólidos) e do óleo disperso (concentração, densidade, distribuição de tamanhos). Todas as tecnologias utilizadas no tratamento primário de águas oleosas estão baseadas na Lei de Stokes e se encarregam basicamente da separação de sistemas particulados (óleo livre ou disperso e sólidos em suspensão). A utilização de produtos químicos também é muito importante e no caso das águas oleosas, utilizam-se polieletrólitos que atuarão na desestabilização e coalescência das gotículas de água e de óleo (PETROBRAS, 2007).

Polieletrólitos são agentes floculantes poliméricos que atuam neutralizando as cargas superficiais das gotículas, evitando a repulsão entre as mesmas e induzindo a floculação. Como as gotas de óleo normalmente apresentam cargas negativas, os agentes floculantes mais usados são os polieletrólitos catiônicos, por exemplo, poli (diamina vinílica), poli (brometo de piridínio vinílico), poli (imina vinílica), poli (acrilamida quaternária) (PETROBRAS, 2007).

Alguns esquemas de tratamento de águas oleosas são consagrados. Por exemplo, em unidades offshore (Figura 14) é comum o uso de hidrociclones seguido de flotor para tratamento de água produzida.

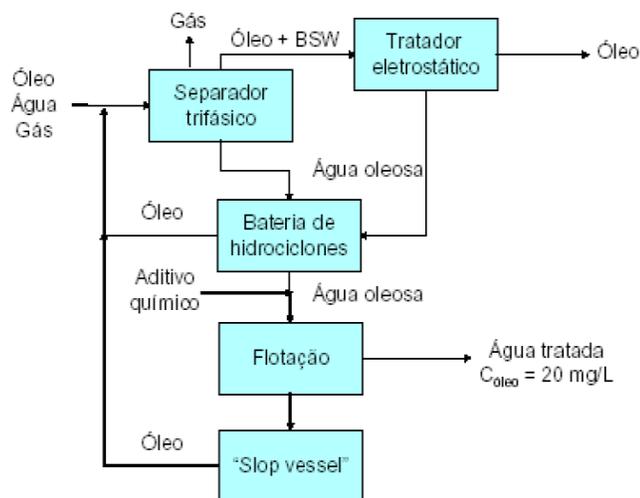


Figura 14 - Sistema típico utilizado para tratamento de água produzida em ambiente *offshore* (PETROBRAS, 2010a).

Em alguns casos, apenas a passagem pela bateria de hidrociclones é suficiente para o enquadramento do efluente para seu descarte. Em outros casos, tem-se tornado prática o uso de tanques *slop* (grandes tanques gravitacionais) para o enquadramento da água em unidades FPSO (“*Floating Production Storage and Offloading*”), porém o risco do crescimento de bactérias redutoras de sulfato (tanques com alto tempo de residência, altas concentrações de sulfato e condição anaeróbia) e a conseqüente geração de H<sub>2</sub>S é bastante elevado (PETROBRAS, 2007).

- **Flotação**

A flotação tem sido aplicada ao tratamento de efluentes oleosos pois é um processo de fácil implantação, operação e manutenção e consiste basicamente nas seguintes etapas: geração das bolhas gasosas (pode ser ar ou gás, como nas unidades de produção) no interior do efluente; colisão das bolhas de gás com as gotículas de óleo dispersas na água; adesão das bolhas de gás nas gotículas de óleo; e ascensão dos agregados bolha-gotícula até a superfície, onde o óleo é recuperado (PETROBRAS, 2007).

O gás pode ser injetado na forma dissolvida e o processo denomina-se Flotação por Gás Dissolvido - FGD ou por gás induzido - FGI. A tecnologia FGI é largamente utilizada em ambiente offshore, por resultarem em unidades mais compactas (trabalham com elevada relação gás/líquido), embora não sejam tão eficientes (em um único estágio) quando comparada à FGD (PETROBRAS, 2007).

- **Hidrociclones**

Os hidrociclones e os flotadores são os equipamentos de separação óleo/água mais utilizados em unidades *offshore*. Enquanto a flotação se baseia no aumento da velocidade de separação via aumento da diferença entre densidades das fases, os hidrociclones procuram acelerar este processo através do aumento do parâmetro relativo à força de campo (incremento no valor de “g”) (PETROBRAS, 2007). Dentre as vantagens do uso de hidrociclones para tratamento de água oleosa destacam-se:

- Compactos e com grande capacidade por área instalada;
- Não requer dosagem de polieletrólitos;
- Não possuem partes móveis, requerendo baixa manutenção mecânica e baixo consumo de energia;

- Não sofrem efeito do balanço, pois operam a elevadas velocidades lineares.

Em contrapartida, os hidrociclones também apresentam algumas desvantagens:

- Dificilmente conseguem enquadrar o TOG em 20 mg/L;
- Podem sofrer abrasão comprometendo a estrutura interna dos *liners*;
- Muito susceptíveis a incrustação devido ao pequeno diâmetro dos *liners*.

#### 2.1.2.5 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A demanda de energia estimada para o processamento do óleo produzido contempla uma parcela fixa de consumo energético, somada com uma parcela que varia de acordo com a produção de óleo. A planta é responsável por grande consumo de energia gerada para toda plataforma (OGP, 2011).

O consumo de energia da instalação está baseado no consumo de diesel e/ou gás natural e na energia elétrica (turbogeradores). O gás é obtido do próprio processo de produção de petróleo e consumido pelas turbinas de gás ou motores para gerarem energia para a planta de processamento primário, principalmente para os compressores de gás e aquecedores de petróleo (OLIVEIRA, S. DE; HOMBEECK, 1997). O diesel é fornecido por transferência pelas embarcações de apoio à atividade e estocado na plataforma.

Parte do gás produzido também é usado para pressurização do sistema de água quente, no(s) flotor(es) do sistema de tratamento de água produzida, no sistema de regeneração do trietilenoglicol (TEG) e para o piloto e purga do sistema de tocha (alívio da planta). No sistema de regeneração do TEG (glicol usado na desidratação do gás produzido) o gás combustível é utilizado para: pressurização do vaso de expansão, como gás de stripping na regeneradora e para alimentação/movimentação do glicol através da pressurização do vaso de drenagem (SANT'ANNA, 2005). Assim, para compreender o consumo energético das plataformas de petróleo, é necessário distinguir os diferentes cenários que ocorrem ao longo da produção.

**Cenário I** - Refere-se à fase de instalação e à fase inicial de operação, momentos em que as caldeiras movidas a diesel estarão em funcionamento e o sistema ainda não terá atingido a estabilização de produção, este cenário ocorre na fase inicial da produção.

**Cenário II** - Refere-se à fase estável de produção, quando as caldeiras passarão a consumir o gás produzido e conseqüentemente os turbogeradores para gerar energia

para toda a plataforma, este cenário ocorrerá até a fase de abandono dos poços e fim da produção.

O gás natural é usado como o combustível da planta no Cenário de Produção II, entretanto, processos de conversão de energia ineficientes implicam no consumo de diesel adicional para a operação do processo. Este fato mostra a importância do desenvolvimento da análise de eficiência dos processos termodinâmicos da plataforma (OLIVEIRA, S. DE; HOMBEECK, 1997).

#### **2.1.2.6 RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS**

Os resíduos da exploração e produção de petróleo em campos marítimos apresentam um alto potencial de impacto ambiental, quer seja pelo volume de resíduos gerados, quer pela toxicidade dos mesmos e pela própria especificidade da atividade que ocorre em alto-mar, onde qualquer falta de controle poderia provocar impactos ao meio ambiente (MARTINS, 2008).

O principal resíduo sólido gerado pela planta de processamento primário é a borra oleosa proveniente do fundo dos tanques de tratamento de petróleo e dos tanques de armazenamento do óleo tratado. Além da borra de óleo, são geradas embalagens plásticas e sucatas ferrosas, em menor importância ambiental e volumétrica (OLIVEIRA, 2006). O óleo lubrificante usado deve ser coletado em tambores e entregues as empresas de reciclagem conforme orienta a resolução CONAMA 450/12. Os resíduos são classificados em:

**Resíduos Classe I:** Perigosos - apresentam periculosidade, ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, ou que apresentam substâncias constantes nos anexos A ou B, existentes nesta norma.

**Resíduos Classe II:** Não Perigosos - se divide em duas classificações:

**Resíduos Classe IIA:** Não Inertes - são aqueles que podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, ou não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de Resíduos Classe II B – Inertes;

**Resíduos Classe IIB:** Inertes - são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações

superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme Anexo G da NBR 10004.

### 2.1.3 DESCRIÇÃO DAS PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO NACIONAIS

Nesse tópico serão detalhadas 6 unidades de exploração nacional utilizadas para o embasamento e construção do modelo tecnológico da planta de processamento primária genérica a ser utilizada no estudo de caso. Essas foram selecionadas por estarem em atuação e possuírem diferentes técnicas de tratamento e equipamentos abrangendo assim uma grande gama de possibilidades para o processamento do óleo e do gás. A Tabela 2 caracteriza nas duas próximas páginas essas unidades de produção. Para tal caracterização foram revisados os capítulos de caracterização da atividade dos RIMAs (Relatórios de Impactos Ambientais) respectivos a cada FPSO. As plataformas foram: Cidade de Rio das Ostras (PETROBRAS, 2010b), P-62 (PETROBRAS, 2009), Cidade de São Vicente (PETROBRAS, 2013), Cidade de Ilha Bela (PETROBRAS, 2013), FFSO - OSX3 (OGX, 2011) e a *Dynamic Producer* (PETROBRAS, 2013).

Tabela 2 - Comparativo das tecnologias usadas nos tratamentos de unidades nacionais de exploração.

	<b>Cidade de São Vicente</b>	<b>Cidade de Ilhabela</b>	<b>Cidade de Rio das Ostras</b>
Geração de Energia	02 turbogeradores a vapor	04 turbogeradores gás/diesel	3 turbogeradores gás/diesel
	03 geradores a diesel	02 geradores a diesel	01 gerador auxiliar a diesel
	01 gerador de emergência	01 gerador de emergência	01 gerador de emergência
	01 caldeiras 25 t/h	-	03 caldeiras a vapor
Tratamento de Esgotos	Tipo: Hamworthy ST4A Lodo ativado com sistema de aeração suspensa	Tipo: Hamworthy ST13 Lodo ativado com sistema de aeração suspensa	Tipo: Hamworthy ST 6A Lodo ativado com sistema de aeração suspensa
Capacidade de produção	30.000 bpd	150.000 bpd	30.000 bpd
	1,0 MM m <sup>3</sup> /dia de gás	6,0 mm m <sup>3</sup> /dia de gás	400.000 m <sup>3</sup> /dia de gás
	-	120.000 m <sup>3</sup> /dia de água	-
Alojamento	80 pessoas	140 pessoas	60 pessoas
<b>Planta de Processamento Primário</b>			
Tipo	Separação óleo - gás - água	Separação óleo - gás - água	Separação óleo - gás
Produtos Químicos	Desemulsificantes	Desemulsificantes	Desemulsificantes
	Antiespumante	Antiespumante	Antiespumante
	Inibidor de incrustação	Inibidor de incrustação	Inibidor de incrustação
	Inibidores de corrosão	Inibidores de corrosão	Inibidores de corrosão
	Polieletrólitos	Polieletrólitos	Sequestrantes de H <sub>2</sub> S

<b>Tratamento do Óleo</b>			
Aquecedor	Casco/tubo	Pré-aquecedores	Pré-aquecedores
	Trifásico de Alta Pressão	Trifásico de alta pressão	Gravitacional trifásico horizontal
Separador	Trifásico de Baixa Pressão	Bifásico de pressão média	Flash
		Bifásico de baixa pressão	Bifásico de baixa pressão
Tratamento eletrostático	Tratamento eletrostático	Pré-tratador eletrostático	-
		Tratador eletrostático	Tratador eletrostático
<b>Processamento e Compressão do Gás</b>			
	Trifásico de Alta Pressão	Trifásico de Alta Pressão	Trifásico horizontal
Separador	Trifásico de Baixa Pressão	Bifásico de pressão média	<i>Flash</i>
	-	Bifásico de baixa pressão	Bifásico de baixa pressão
Compressor	-	Compressão principal	-
Desidratador	-	Recuperação de Vapor	-
	-	Peneiras moleculares	-
Sweeting	-	Reação com leito fixo a base de óxidos metálicos	-
Ponto de orvalho	-	Ciclo de resfriamento com fluido refrigerante R-134-a	Sim
Remoção de CO <sub>2</sub>	-	Permeação através de membranas	-
Utilização	Combustível/queima <i>flare</i>	Combust./export./ <i>gas-lift</i>	-
<b>Tratamento da Água Produzida</b>			
Flotador	-	Flotador	-
Hidrociclone	-	Hidrociclones	-
<b>Dynamic Producer</b>			
Geração de Energia	04 Turbogeneradores.	04 Turbinas a gás/diesel	04 Turbogeneradores
	06 Geradores diesel	02 Caldeiras	02 Geradores
	01 Gerador de emergência		01 Gerador de emergência
<b>FPSO OSX-3</b>			
Tratamento de Esgotos	Hamworthy ST4A	-	-
	Lodo ativado com sistema de aeração suspensa	-	-
<b>FPSO P-62</b>			
Capacidade de produção	1 poço produtor	-	-
	30.000 bpd	100.000 bbp	180.000 bpd
	1,0 MM m <sup>3</sup> /d de gás natural	22.258 m <sup>3</sup> /dia de água	-
Alojamento	126 pessoas	80 pessoas	-
<b>Planta de Processamento Primário</b>			
Tipo	Separação óleo - gás - água	Separação óleo - gás - água	Separação óleo - gás - água
Produtos químicos	Desemulsificantes	Desemulsificantes	Desemulsificantes
	Antiespumante	Antiespumante	Antiespumante
	Inibidor de incrustação	Inibidor de incrustação	Inibidor de incrustação
	Inibidores de corrosão	Inibidores de corrosão	Inibidores de corrosão
	Polieletrólitos	Polieletrólitos	Polieletrólitos
<b>Tratamento do Óleo</b>			
Aquecedor	Pré-aquecedores/Aquecedores	Pré-aquecedores/Aquecedores	Casco e Tubo

Separador	Separador de Teste bifásico	Separador de Teste	Separador de Teste trifásico
	Separador de Produção	Separador de água livre	Separador de Alta Pressão bifásico
	Separador Atmosférico	Separador de Produção	Separador de Baixa Pressão bifásico
Tratamento eletrostático	-	Desidratador eletrostático	Pré-tratador Eletrostático
	Tratador Eletrostático	Tratador eletrostático	Tratadores Eletrostáticos
Tanque de lavagem	-	-	Tanques de Lavagem
Bombas	-	-	Bomba de Óleo do Tanque de Lavagem - Vertical submersa
	-	-	Bombas de Reciclo de Água
<b>Processamento e Compressão do Gás</b>			
Separador	Separador de Teste bifásico	Separador de Teste	Separador de Teste trifásico
	Separador de Produção	Separador de água livre	Separador de Alta Pressão bifásico
	Separador Atmosférico	Separador de Produção	Separador de Baixa Pressão bifásico
Compressor	Vaso depurador	-	Compressão Principal
	Compressão Principal	-	Compressão <i>Booster</i>
Desidratador	<i>Demister - Scrubber</i>	Sim	Trietilenoglicol (TEG)
Sweeting	-	Sim	-
Ponto de orvalho	Sim	-	-
Remoção de CO <sub>2</sub>	-	Sim	Solução de amina
Utilização	-	-	Gás combustível
<b>Tratamento da Água Produzida</b>			
Flotador	Sim	Sim	Sim
Hidrociclone	Sim	Sim	Sim

A partir das informações assimiladas, a planta de processamento genérica foi desenvolvida para atender ao tratamento das 6 diferentes plataformas. Assim, esse modelo engloba possíveis unidades de tratamento capazes de simular desde uma simples separação das fases do escoamento multifásico até o processamento complexo de cada uma delas.

A descrição mais pormenorizada das unidades em relação ao processamento, equipamentos, materiais utilizados e efluentes foi a do FPSO P-62. Tal sistema e seus detalhes serão usados para a construção do modelo. Outras tecnologias e particularidades das demais instalações citadas serão agregadas compondo assim um conjunto único.

#### 2.1.4 CENÁRIO FUTURO NA E&P

As descobertas a e produção de óleos pesados e ultra pesados no território nacional e o amadurecimento dos campos produtores tem levado o corpo técnico da Petrobras e buscar soluções inovadoras, por exemplo, pioneiramente testando e implantando tecnologias que ainda encontram-se em fase de desenvolvimento a nível mundial, como os equipamentos

compactos do tratamento de óleo. Esforços significativos também têm sido realizados para reduzir as temperaturas necessárias aos tratamentos e as dimensões dos equipamentos, como alternativa para a viabilização de vários empreendimentos da E&P, sem desconsiderar as exigências ambientais cada vez mais rigorosas (PETROBRAS, 2007).

Sendo a água particularmente crítica e impactante no processamento primário, como amplamente discutido, novas tecnologias são cogitadas, sendo a mais arrojada a Separação Submarina, que tem por objetivo separar, no fundo do mar, a água produzida, reinjetando quase que imediatamente a sua produção, minimizando a possibilidade de sua emulsificação que tantos problemas acarreta para seu posterior tratamento. Além disso, minimiza-se o contato com o ambiente, reduzindo-se a própria contaminação desta água que pode ser reinjetada no reservatório sem maiores necessidades de tratamento (PETROBRAS, 2007).

## **2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA**

Neste capítulo de revisão bibliográfica foram reunidas as principais fontes de estudo relacionadas com a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), assim como estudos de ACV relacionados a algum seguimento dentro da indústria de exploração e produção *offshore*. Entre elas estão as principais diretrizes estabelecidas nas normas da ISSO, bem como artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

### **2.2.1 DEFINIÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)**

Em linhas gerais, uma Avaliação do Ciclo de Vida de um produto ou serviço consiste da definição do seu objetivo e escopo, da realização de um levantamento quantificado de dados (inventário) de todas as entradas (materiais, energia e recursos) e saídas (produtos, subprodutos, emissões, etc) durante todo o ciclo de vida, bem como da identificação dos impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida e da interpretação dos resultados do estudo (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Benjamin (2002) esclarece que a ACV não irá determinar qual produto ou processo é melhor, apenas aquele que pode carregar menor carga ambiental. A informação desenvolvida em uma ACV deve ser usada como um componente para uma decisão mais focada na análise do processo em relação a custo e performance.

A crescente conscientização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactos associados a produtos manufaturados consumidos tem aumentado o interesse no

desenvolvimento de métodos, como a ACV, para melhor compreender e buscar diminuir as alterações no meio ambiente (ISO, 2009).

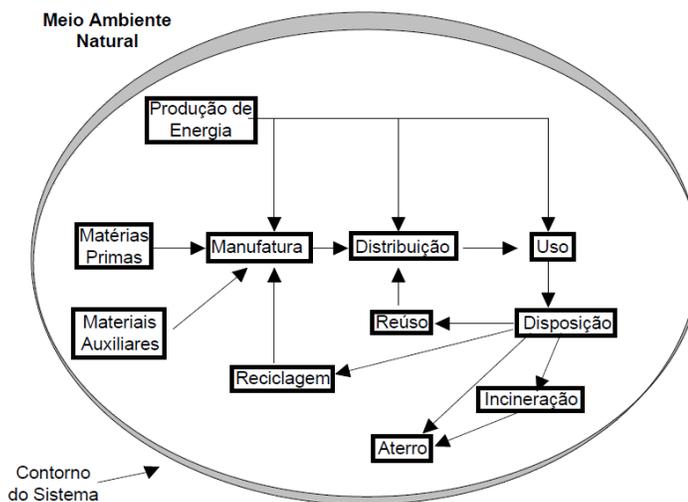


Figura 15 - Modelo do sistema de ACV (SANTOS, 2006).

Não contemplando apenas a fase do uso do produto, esses novos métodos buscam analisar onde eles são verdadeiramente significativos, e, dessa forma, a ferramenta da Avaliação de Ciclo de Vida pode ser de grande utilidade para desenvolver produtos, escolher tecnologias, identificar as fases do Ciclo de Vida em que os impactos ocorrem e selecionar os indicadores ambientais relevantes para avaliação de projetos assim como reformular produtos ou processo.

A *Helsinki University of Technology* (1996) apud (SANTOS, 2006) elaborou um esquema simplificado do sistema de ACV, ilustrado na Figura 15. Desde a extração de matéria-prima, produção, utilização e destinação final ou reutilização existem diversas alterações no meio ambiente. O consumo de bens naturais, geração de efluentes e emissões de poluentes ocorrem em diversas etapas do ciclo de vida para a produção de produtos e serviços para a nossa sociedade.

A ACV pode ser realizada em determinadas etapas do ciclo de vida, não se restringindo assim à uma visão geral de toda a cadeia de impactos de um processo, como diz a terminologia “berço-ao-túmulo”. Avaliações de fronteiras determinadas do “berço ao portão”, do “portão ao portão” e do “portão ao túmulo” são formas interessantes de estudo.

De acordo com a norma ISO/TS 14048/2002 pode-se definir os diferentes escopos de estudos de ACV:

- “Berço-ao-túmulo” (*cradle-to-grave*): Como já explicado, envolve todas as etapas do ciclo de vida, da extração de matérias primas até a disposição final;
- “Berço-ao-portão” (*cradle-to-gate*): Escopo que envolve extração de recursos, que pode incluir algumas operações de fabricação ou operações de serviço, mas excluindo todas as fases subsequentes;
- “Portão ao portão” (*gate-to-gate*): Escopo que envolve um processo em que todas as fases de produção ocorrem dentro de um local (indústria). O local pode ser geograficamente especificado, ou, no caso de dados genéricos, a especificação geográfica pode ser mais geral. Processos fora dos portões do local definido não estão incluídos;
- “Portão ao túmulo” (*gate-to-grave*): Escopo que inclui processos de distribuição, o uso e o descarte final do produto.

As atividades que ocorrem fora dos “portões” (aquisição de matéria prima, transporte, destinação final dos resíduos e etc.) são geralmente negligenciadas por ocorrerem além dos limites físicos da indústria, e muitas vezes representam as principais fontes de impactos ambientais.

Com a ACV é possível apontar com clareza a origem das maiores contribuições da degradação ambiental, pois esta considera os impactos ambientais de um produto ou processo em todo seu ciclo de vida. Essa caracterização, demonstra que as responsabilidades das empresas, governos ou consumidores não estão apenas limitadas à produção de seus produtos ou condução de seus processos.

A utilização da ACV, como ferramenta de análise de impacto ambiental, ajuda a evitar a substituição de um problema por outro, no sentido de evitar um possível deslocamento de impacto ambiental de um estágio do ciclo de vida para outro (KIPERSTOK, A., 2003).

É importante salientar que a ACV não deve ser considerada apenas como a única ferramenta na tomada de decisão ambiental em uma indústria, governo ou instituição, ela pode ser utilizada integrada a inúmeras outras ferramentas de gestão ambiental ou também subsidiárias, tais como:

- Avaliação de impactos ambientais;
- Design sustentável;
- Rotulagem ambiental;
- Análise do consumo de energia e materiais;

- Análise do fluxo de substâncias;
- Análise de custo-benefício.

No Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de uma determinada atividade ou empresa, é realizada a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA). Essa avaliação de impacto pode ser modelada e diagnosticada ambientalmente pela metodologia de ACV. Podendo esse estudo gerar Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) que contemplariam todos os impactos relacionados a cadeia produtiva. Essas avaliações supracitadas são necessárias para obtenção das licenças ambientais das indústrias potencialmente poluidoras.

A indústria de exploração e produção de óleo e gás, por apresentar significativa importância econômica e alto potencial poluidor, pode e já está usando ACV na tentativa de diminuir seus impactos ambientais (CAMPOS, 2012).

### **2.2.2 APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS**

As técnicas de análise do ciclo de vida têm diferentes aplicações. Internamente, as indústrias podem, através das técnicas de ACV, desenvolver novos produtos ou otimizar produtos e processos, reduzindo os impactos ambientais. Externamente, elas podem utilizar as técnicas para divulgar ao consumidor ou a órgãos ambientais melhorias dos aspectos ambientais de seus produtos e processos, ou ainda comparar qualidades ambientais com outros competidores (SANTOS, 2006).

Os esquemas montados, chamados na Europa de Selos Verdes e no Brasil de Rótulos Ambientais, frequentemente baseados em análises do ciclo de vida de produtos do tipo berço ao túmulo, levaram as empresas a iniciar esforços no sentido de um melhor entendimento e gerenciamento do ciclo de vida de seus produtos (CHEHEBE, 1997).

Chehebe (1997) entende que a Avaliação do Ciclo de Vida de produtos pode ser utilizada em uma grande variedade de propósitos. Segundo o autor, as informações coletadas na ACV e os resultados de suas análises e interpretações podem ser úteis para tomadas de decisão, na seleção de indicadores ambientais relevantes para avaliação da performance de projetos ou otimização de projetos de produtos ou processos e/ou planejamento estratégico.

A Sociedade para Toxicologia e Química Ambiental - (SETAC, 1993) enumera possíveis aplicações da ACV:

- Desenvolvimento do planejamento estratégico;
- Otimização, melhoria e projeto de produtos e processos;
- Identificação de oportunidades de melhoria ambiental;
- Auxílio ao estabelecimento de procedimentos comerciais ou especificações;
- Suporte à auditoria ambiental e à minimização de resíduos;
- Desenvolvimento do marketing ambiental;
- Seleção de critérios para a rotulagem ambiental;
- Definição de políticas públicas e privadas;
- Auxílio às metodologias educacionais.

Instituições públicas podem usar a ACV para analisar os sistemas de serviços públicos, propondo melhorias ambientais, além de ter uma ferramenta para controle da performance ambiental tanto de indústrias, como de outros setores como construção civil e agropecuária.

Para Chehebe (1997) a grande importância da Avaliação de Ciclo de Vida está na utilização desta ferramenta de gestão ambiental no aprimoramento das questões de todo o sistema vinculado à produção de um bem e, conseqüentemente, aprimorar os aspectos ambientais do mesmo. Existe uma tendência da ACV tornar-se um instrumento capaz de estabelecer modificações no sistema tributário mundial – tributo sócio ambiental - através do qual os produtos seriam taxados de acordo com sua carga ambiental, avaliada ao longo de todo o seu ciclo de vida (*Helsinki University of Technology*, 1996 apud (SANTOS, 2006)). Obviamente que para isso será necessário a elaboração de um banco de dados mundial consistente sobre a carga ambiental dos diversos produtos.

As diversas regulamentações impostas para o controle da poluição, fazem com que algumas empresas verifiquem os benefícios de se ir além da conformidade da legislação. Assim, as empresas estão encontrando benefícios holísticos em suas operações, através do procedimento de ACV (BENJAMIN, 2002). Apesar das importantes aplicações da ACV, Chehebe (1997) comenta sobre a existência de uma crença de que a ACV poderia ser manipulada para reproduzir os resultados que o patrocinador do estudo desejar. Isso porque a ACV não parece ser uma ferramenta fácil de ser aplicada e reproduzir os mesmos resultados a despeito de quem conduza o estudo.

Várias empresas responderam às preocupações ambientais providenciando produtos "verdes" e usando processos "verdes" (CURRAN, 1993). Benjamin (2002) acredita que a

performance ambiental de produtos e processos se tomou um assunto chave, isto explica o porquê de algumas companhias procurarem caminhos para minimizar seus efeitos sobre o meio-ambiente. Várias companhias vêm encontrando vantagens na utilização de estratégias de prevenção à poluição e sistemas de gerenciamento ambiental para melhorar suas performances ambientais, através do procedimento sistemático da ACV.

Na prática as indústrias encontram grandes dificuldades para conseguir inventários detalhados do ciclo de vida, maiores ainda em relacionar os mesmos com uma análise de impacto defensável e, enormes, em transformar os resultados dos dois primeiros estágios da ACV em ações adequadas.

A ACV tem como importante benefício o suporte para se realizar decisões ambientais estratégicas. Isso implica em que todos os participantes de uma cadeia do ciclo de vida de um produto, do berço até o túmulo, têm uma responsabilidade e um papel a desempenhar, levando em conta todos os atores relevantes sobre a economia, o ambiente e a sociedade (SETAC, 2005).

Essa metodologia pode ajudar governantes, indústrias e organizações privadas a tomar decisões sobre o design de produtos, processos e serviços que podem impactar o meio ambiente.

A abordagem em ciclo de vida permite que os designers de produtos, prestadores de serviços, agentes governamentais e indivíduos façam escolhas consideradas de longo prazo, considerando todos os aspectos ambientais (SETAC, 2005).

A seguir são descritos os benefícios da ACV para as indústrias, governo e consumidores

- **Indústrias:** Ao integrar a perspectiva de ciclo de vida na gestão global da indústria e trazendo produtos e desenvolvimento de processo para uma direção mais sustentável, a organização terá benefícios na sua gestão ambiental, saúde e segurança ocupacional, riscos e gestão da qualidade, bem como desenvolvimento e aplicação da produção e tecnologia mais limpas de produtos e processos. Incorporando ciclo de vida e gestão da sustentabilidade irá melhorar a imagem e o valor de sua marca perante o mercado (SETAC, 2005).
- **Governos:** Iniciativas governamentais não só garantem e reforçam a posição dos setores industriais e de serviços nos mercados regionais e globais, mas também garantem benefícios globais em termos ambientais para a sociedade (equilibrado com

aspectos econômicos e sociais). Ao envolver-se em programas de apoio e iniciativas ambientais para promover a implantação da ACV, os governos podem mostrar responsabilidade global e governança através do compartilhamento e divulgação de opções de sustentabilidade em todo o mundo (SETAC, 2005).

- Consumidores: ACV ajuda o consumidor a caminhar para uma direção mais sustentável, oferecendo melhores informações para a compra, os sistemas de transporte, fontes de energia, orientando, assim, as decisões dos consumidores. A ACV oferece uma plataforma para o diálogo multilateral e envolvimento do público com as indústrias e governos, passando pela agenda local até as estratégias nacionais e internacionais para o desenvolvimento sustentável (SETAC, 2005).

### **2.2.3 HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DA METODOLOGIA**

No final da década de 60, nos Estados Unidos, foram desenvolvidos, os princípios que envolvem a técnica de ACV para contabilizar o uso cumulativo de energia e para prever futuros fornecimentos de matérias-primas e recursos energéticos. O estudo mais conhecido desta fase inicial da ACV foi a análise que a Coca-Cola encomendou para o *Midwest Research Institute* - MRI, cujo relatório foi publicado em 1969, comparando diversas embalagens de bebida no que diz respeito a disposição de resíduos e consumo de recursos naturais (CHRISTIANSEN, 1996; VIGON e outros, 1993 apud RIBEIRO, 2003). Este tipo de estudo passou a receber o nome de *Resource Environmental Profile Analysis* - REPA (WENZEL e outros, 1997). Paralelamente, na Europa, desenvolveu-se o método conhecido como Ecobalance (CHRISTIANSEN, 1996 apud RIBEIRO, 2003), similar ao REPA.

Este estudo nunca foi publicado devido ao caráter confidencial do seu conteúdo, sendo, no entanto utilizado pela companhia no início dos anos setenta como uma ferramenta nas suas decisões sobre embalagens. Um dos resultados interessantes do trabalho da Coca-Cola foi demonstrar que as garrafas de plástico não eram piores, do ponto de vista ambiental, do que as de vidro. Anteriormente, os plásticos tinham a reputação de um produto indesejável em termos ambientais, tendo o estudo REPA demonstrado, que esta reputação era baseada em más interpretações (FERREIRA, 2004).

Esse modelo foi aprimorado em 1974 pelo MRI, durante a realização de um estudo para a EPA (*Environmental Protection Agency*), e é muitas vezes referenciado como um marco para o surgimento do que hoje conceitua-se como Avaliação do Ciclo de Vida - ACV (*Life Cycle*

*Assessment*). Posteriormente, na Europa, foi desenvolvido um procedimento similar chamado Ecobalance (CHEHEBE, 1997).

Entre o final da década de 60 e o início da década de 70, Fava e outros (1993) apud Tosta (2004) contabilizaram cerca de 12 estudos desenvolvidos nos Estados Unidos sobre o “ciclo do combustível”, estimando custos e implicações ambientais associadas com fontes alternativas de energia. Após este período alguns anos se passaram sem a ocorrência de grande evolução da ACV (TOSTA, 2004).

No início da década de 1980, devido às crises do petróleo, o interesse nesse tipo de abordagem diminuiu e as metodologias de abordagens em ciclos de vida se transferiram para a Europa, onde se tornaram mais populares, fazendo com que governos e empresas ficassem mais interessados em sua aplicação (ARGONNE, 2007). A opinião pública europeia passou a alertar sobre a crescente utilização dos recursos, a preocupação com o destino de resíduos, principalmente de embalagens de bebidas. Ressurge o interesse por ferramentas de comparação e avaliação de desempenho ambiental (VIGON e outros, 1993 apud RIBEIRO, 2003). Nesta época, vários países europeus realizaram estudos para avaliar a carga ambiental e os potenciais impactos decorrentes de embalagens de bebidas (SANTOS, 2006).

Nos anos 90, a metodologia consistia apenas em estimações de emissões e era usada tipicamente para avaliações internas de alternativas de embalagens (como no caso da empresa Coca-Cola). Entretanto, existia a vontade de se avaliar os impactos ambientais das contabilizações de emissões realizadas e assim surgiu uma introdução do conceito atual de ACV, voltada para a tradução dos dados de emissões para impactos ambientais. Esse passo foi de grande importância, já que apenas com os dados de emissões, tinha-se uma pequena ideia dos danos reais causados ao meio ambiente (ARGONNE, 2007).

Nessa mesma década, a ACV foi utilizada para propósitos externos, principalmente de marketing verde. Estudos sobre os mesmos produtos ou serviços foram realizados com modelos diferentes, encontrando-se resultados distintos, o que ocasionou confusão acerca da sua interpretação. A falta de transparência em aspectos cruciais, a falta de explicações das suposições do estudo, dados questionáveis e avaliações subjetivas levantaram dúvidas quanto à credibilidade dos estudos e a confiança nas propagandas que envolviam estudos de ACV diminuiu (ABCV, 2014).

Com a mudança nas abordagens industriais ambientais por parte das empresas, que passaram a reconhecer que poluição representa ineficiência de processos e por isso perdas

econômicas e a mudança para um foco mais amplo de todo o processo, pela busca de ações sustentáveis (LIMA; RUTKOWSKI, 2009), a ACV passou a estar em destaque mais uma vez e passou a ser utilizada, não somente para comparações ambientais entre embalagens, mas nas áreas de materiais de construção, construção, produtos químicos, automóveis e eletrônicos.

O final da década de 80 e toda a década de 90 foram pautados pelo esforço internacional para normalizar os princípios e técnicas da ACV e para desenvolver procedimento de boa conduta (SANTOS, 2006). A normalização da ACV, começou com:

- European Comitee for Standardization (CEN).
- International Organization for Standardization (ISO).

A demanda pela criação de normas específicas para ACV continuou crescendo e no final dos anos 90, a ISO começou a desenvolver tais padrões. Foi publicada pela ISO uma série de normas para ACV entre 1997 e 2003. A primeira norma publicada foi a ISO 14040:1997, seguido pelas ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000.

Em 2002, o PNUMA e a SETAC lançaram uma parceria internacional, conhecida como Iniciativa do Ciclo de Vida (*The Life Cycle Initiative*) com o objetivo de popularizar o conceito da abordagem em ciclo de vida para usuários em todo o mundo e assim conseguir que se fosse colocado em prática essas abordagens (SETAC, 2005).

Recentemente, importantes estudos de ACV foram realizados pelo mundo para o conhecimento do real impacto ambiental de produtos. A agência de proteção ambiental do Reino Unido publicou uma ACV de sacolas de supermercado, o que gerou grande repercussão mundial e uma ACV de fraldas descartáveis e reutilizáveis.

Mais recentemente, na década atual, a Sociedade para Toxicidade e Química Ambiental (SETAC) na América do Norte e a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) estão realizando workshops e outros projetos para desenvolver e promover um consenso sobre uma estrutura para a condução da análise de inventário do ciclo de vida e avaliação de impactos (TOSTA, 2004).

Tosta (2004) entende que devido à grande demanda de tempo e dinheiro, associado à necessidade de tornar a ACV mais objetiva na sua aplicação a casos específicos, conduziu naturalmente ao desenvolvimento de estudos que otimizassem os procedimentos, através de cortes na sua extensão, profundidade ou largura, ou através da realização de estudos puramente qualitativos.

Buscando promover esta técnica no mundo empresarial brasileiro, nove empresas (Braskem, Danone, Embraer, GE, Grupo Boticário, Natura, Odebrecht, Oxiteno e Tetra Pak) criaram, em parceria com a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) e o Instituto Akatu, em 2012, a Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida. Desde maio de 2014 o CEBDS assumiu a coordenação da Rede, que atualmente conta também com as empresas: 3M do Brasil, Alcoa, Basf, Duratex, Klabin, Petrobras, Vale e Votorantim Cimentos (CEBDS, 2014).

#### 2.2.4 NORMATIZAÇÃO

Atualmente, as normas relacionadas com ACV da ISO são:

- **ISO 14040:2006** - *Environmental management - Life cycle assessment Principles and framework*: Descreve os princípios e a estrutura para ACV, incluindo: definição do objetivo e escopo da ACV, a fase de análise do inventário de ciclo de vida (ICV), a fase de avaliação do impacto de ciclo de vida (AICV), a fase de interpretação do ciclo de vida, elaboração do relatório e análise crítica da ACV, as limitações da ACV, a relação entre as fases da ACV, e as condições de uso das escolhas de valor e elementos opcionais. Essa Norma não descreve a técnica de ACV em detalhes, nem especifica metodologias para as fases individuais da ACV. (ISO, 2009).
- **ISO 14044:2006** - *Environmental management - Life cycle assessment -Requirements and guidelines*: Especifica os requisitos e fornece orientações mais específicas para as fases citadas na ISO 14040:2006.
- **ISO 14045:2012** - *Environmental management - Eco-efficiency assessment of product systems - Principles, requirements and guidelines*: Descreve os princípios, requisitos e orientações para a avaliação ecológica de Eficiência de sistemas de produtos, incluindo:
  - Definição de metas e escopo da avaliação ecológica de Eficiência;
  - Avaliação ambiental;
  - Valor produto - sistema de avaliação;
  - Quantificação da eco eficiência;
  - Interpretação (incluindo a garantia de qualidade);
  - Relatórios;
  - Revisão crítica da avaliação ecológica de Eficiência.

Requisitos, recomendações e orientações para escolhas específicas de categorias de impacto ambiental e os valores não estão incluídos. A aplicação prevista da avaliação ecológica

de eficiência é considerada durante a fase de definição do objetivo e escopo, mas a utilização real dos resultados está fora do escopo da ISO 14045: 2012.

- **ISO 14046:2014** - *Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines*: ISO 14046:2014: Especifica princípios, requisitos e orientações relacionadas com a avaliação da pegada de água de produtos, processos e organizações com base na avaliação do ciclo de vida (ACV). Estabelece princípios, requisitos e orientações para conduzir e relatar uma avaliação pegada hídrica como uma avaliação independente, ou como parte de uma avaliação ambiental mais abrangente. Apenas as emissões de ar e do solo que impactam na qualidade da água estão incluídas na avaliação. Considerando que o relato é no âmbito da ISO 14046: 2014, a comunicação dos resultados da pegada de água, por exemplo, na forma de rótulos ou declarações, está fora do escopo da ISO 14046: 2014.
- **ISO/TR 14047:2012** - *Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations*: O objetivo da ISO/TR 14047:2012 é fornecer exemplos para ilustrar a prática atual de avaliação de impacto do ciclo de vida de acordo com a ISO 14044:2006. Estes exemplos são apenas uma amostra de todos os exemplos possíveis que poderiam satisfazer as disposições da norma ISO 14044. (ISO/TR, 2012).
- **ISO/TS 14048:2002** - *Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format*: Especificação Técnica que estabelece os requisitos e uma estrutura para um formato de documentação de dados, a ser utilizado para uma transparente e inequívoca documentação, e faz o intercâmbio dos dados da ACV e do ICV, permitindo assim a documentação consistente dos dados, elaboração de relatórios de coleta de dados, cálculos de dados e qualidade dos dados, através da especificação e estruturação de relevantes informações (ISO/TS 14048:2002).
- **ISO/TR 14049:2012** - *Environmental management - Life cycle assessment Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis*: Fornece exemplos sobre as práticas na realização da fase da Definição do Objetivo e Escopo e da análise do ICV como um meio de satisfazer certas disposições da norma ISO 14044:2006. Esses exemplos, assim como na ISO/TR 14047, são apenas uma amostra dos possíveis casos que satisfaçam as disposições da norma ISO 14044 e refletem apenas partes de um estudo de ICV completo (ISO/TR 14049:2012).

- **ISO/TS 14071:2014** - *Environmental management - Life cycle assessment - Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006*: Fornece especificações adicionais para a ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Ela fornece requisitos e orientações para a realização de uma revisão crítica de qualquer tipo de estudo de ACV e as competências necessárias para a revisão.

Fornece

- Diretrizes para entregar o processo de revisão crítica necessária, vinculada ao objetivo da avaliação do ciclo de vida (LCA) e sua utilização prevista;
  - Conteúdo e os resultados do processo de análise crítica;
  - Diretrizes para melhorar a consistência, transparência, eficiência e credibilidade do processo de revisão crítica;
  - Competências necessárias para o revisor (s) (interna, externa e membro do painel);
  - Competências necessárias para ser representado pelo painel como um todo.
- **ISO/TS 14072:2014** - *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment: ISO / TS 14071:2014*:

Segundo o portal eletrônico da ISO, encontra-se em estágio de desenvolvimento:

- **ISO/AWI TR 14073** - *Environmental management - Water footprint - Illustrative examples on how to apply ISO 14046*.

Atualmente, estas normas internacionais estão sendo internalizadas no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A norma NBR ISO 14040 foi publicada pela ABNT em 2001, sendo atualizada em 2006 e 2009. Atualmente, as normas brasileiras relativas à ACV são:

- **ABNT NBR ISO 14040:2009** - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura.
- **ABNT NBR ISO 14044:2009** - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações.
- **ABNT ISO/TR 14049:2014** - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário.

## 2.2.5 FASES DE UMA ACV

A metodologia da técnica de ACV inclui, de acordo com a ISO 14040, quatro fases principais e mais a etapa de elaboração do relatório e revisão crítica. Em cada fase é apresentada a norma ISO que lhe rege.

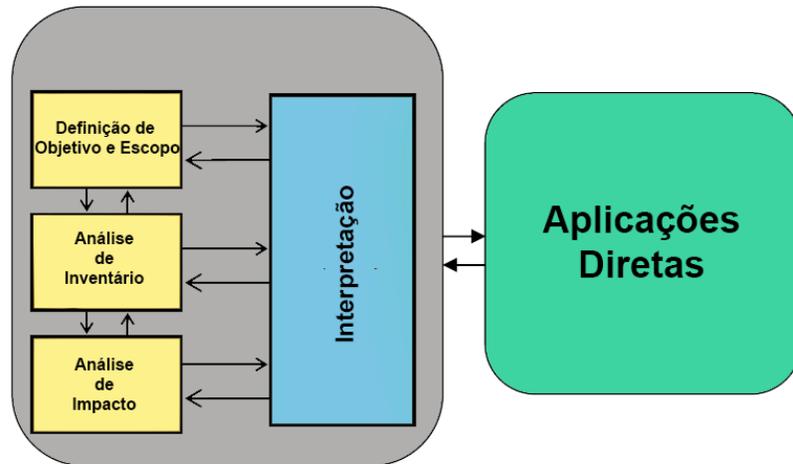


Figura 16 - Fases da ACV.

1. Definição de Objetivo e Escopo;
2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV);
3. Análise de Impacto Ambiental de Ciclo de Vida (AICV);
4. Interpretação de Resultados;
5. Elaboração do Relatório e Revisão Crítica.

A Figura 16 ilustra como cada uma destas fases relaciona-se de maneira iterativa sobre diretivas gerais da ISO 14040. Ao passo que muitos estudos incluem essas quatro principais fases empregando ferramentas computacionais para análises de sensibilidade dos resultados, grande parte dos estudos param depois da segunda fase (ICV). Muito frequentemente, a ACV realiza-se apenas nas duas primeiras fases, dando-se ênfase ao inventário. Devendo neste caso, segundo os autores, designar-se Inventário do Ciclo de Vida (CALDEIRA-PIRES, A.; RABELO, R.R.; XAVIER, 2002).

Estes estudos que não abordam todas as exigências da norma, apesar de não serem considerados como ACV, ainda fornecem importantes informações para tomada de decisões (CAMPOS, 2012). As próximas seções detalham as particularidades de cada fase.

## 2.2.6 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Nessa fase, a norma ISO 14040 preconiza que seja esclarecida de forma clara e inequívoca a utilização que se pretende dar aos resultados, bem como o tipo de audiência que se destina e o processo de revisão crítica a ser adotado. São definidos todos os detalhes práticos e hipóteses adotados relacionados ao projeto. A exequibilidade da ACV depende fundamentalmente de um objetivo muito claro ao longo de todo o processo (KIPERSTOK, A. ET AL, 2003).

É a fase do processo de ACV que define o propósito e os métodos para inclusão dos impactos ambientais do ciclo de vida dentro do processo de tomada de decisão (GUINEÉ, J. & HEIJUNGS, 1993a). Durante o processo de definição de objetivos, devem ser avaliados fatores como as expectativas do cliente quanto às conclusões do estudo, assim como os custos e o tempo de duração envolvidos (KULAY, 2000). Apesar de parecer ser uma fase curta, é extremamente importante para a continuidade da elaboração do estudo de ACV, já que todos os aspectos e suposições do estudo definidos nessa etapa são considerados em todas as próximas fases da ACV (EC-JRC, 2010). O objetivo de uma ACV inclui:

**Aplicação pretendida** - Um estudo de ACV pode ter diversas aplicações pretendidas, as mais comuns são o desenvolvimento, aprimoramento e comparação de produtos ou processos; planejamento estratégico; design; estudo ambiental; comunicação para consumidores; tomada de decisão pública; rotulagem ambiental e marketing. Deve ser informado se os resultados do estudo são destinados a serem utilizados em afirmações comparativas para divulgação ao público. Nesses casos, a ISO estabelece uma série de precauções que devem ser tomadas para a divulgação do estudo (CAMPOS, 2012).

**Principais razões para a realização do estudo** - Deve-se descrever as motivações que levaram a realização de cada estudo, sendo essas razões muitas das vezes com caráter ambiental. Deseja-se conhecer quais são os impactos ambientais de todo ciclo de vida de um produto; qual etapa da vida de um produto ou processo que existe maior dano ao meio ambiente e etc. (CAMPOS, 2012).

**Público-alvo** - O estudo pode ser dirigido para diversos públicos-alvo, como por exemplo, consumidores, indústrias, governos ou comunidades científicas (CAMPOS, 2012). Segundo a ISO 14041, a definição do escopo de uma ACV deve considerar e claramente descrever as seguintes etapas:

## 1. Sistema de produto ou processo:

Coleção de operações que representam uma ou mais funções definidas. As unidades de processo, segundo Kulay (2000), correspondem a conjuntos formados pelas operações e atividades contidas no sistema e agrupados por fronteiras próprias. As ligações entre as unidades de processo são realizadas por correntes internas de matéria e energia. As unidades de processo são ligadas umas às outras por fluxos intermediários de produtos e/ou resíduos para tratamento, a outros sistemas por fluxos de produtos, e ao meio ambiente por fluxos elementares (CHEHEBE, 1998). As cargas ambientais associadas a bens de capital (como equipamentos) ou construções utilizados pelas unidades de processo, usualmente não afetam os resultados da ACV (KULAY, 2000).

A divisão do sistema de produto em seus processos unitários componentes auxilia na identificação das entradas e saídas de todo o sistema (ARGONNE, 2007). Cada processo unitário apresenta consumo de insumos, como energia e materiais e emissão de poluentes para o ar, água e solo, além do(s) fluxo(s) dos produtos úteis para a cadeia produtiva.

Processos unitários de um sistema de produto hipotético que abrangem todo o ciclo de vida de um produto ou processo, desde a sua extração de matéria prima até o seu descarte final estão ilustrados na Figura 17.

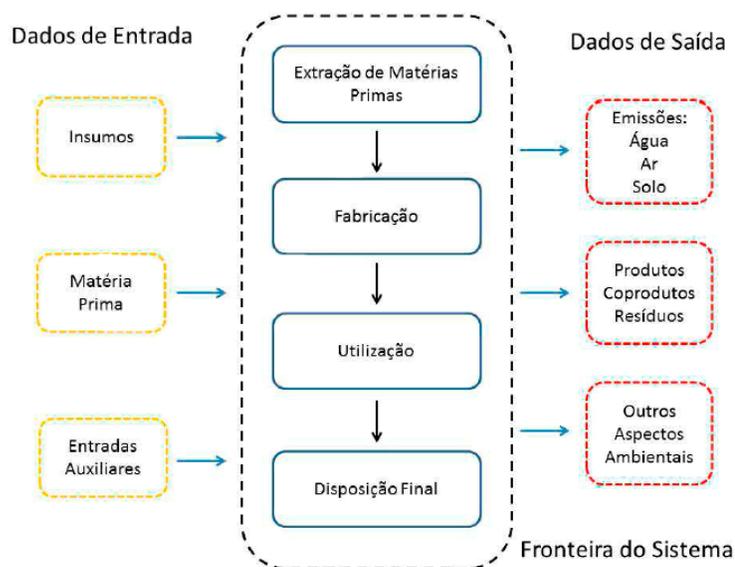


Figura 17 - Fluxograma de um processo unitário (Adaptado de US EPA 2006).

Estes processos unitários estão ligados uns aos outros por fluxos intermediários de produtos e/ou por fluxos de resíduos para o tratamento. Podem estar ligados também com outros sistemas de produtos por fluxos de produtos, e para o meio ambiente, por fluxos elementares. Em um estudo real de ACV, esse sistema de produto seria muito extenso e incorporaria uma grande quantidade de dados, por essa razão é de suma importância à delimitação das fronteiras do sistema a ser estudado.

## **2. Função do sistema de produto:**

Trata-se, de acordo com Chehebe (1998), da definição clara das características de performance do produto a ser modelado. Define a que se presta o sistema que está sendo analisado, ou seja, qual sua função (KULAY, 2004). Caldeira-Pires (2007) esclarece que a função do sistema permite a comparação de produtos diferentes, por exemplo, toalhas de papel e secadores elétricos de mão fornecem a mesma função de secar mãos.

## **3. Unidade funcional:**

A unidade funcional é a unidade básica da ACV (SALLABERRY, 2009). A unidade funcional fornece uma referência quantitativa das entradas e saídas do sistema de produto e seu estabelecimento é de fundamental relevância, pois permite que todas as atividades e serviços possam ser analisados e comparados para uma mesma unidade (REBITZER et al., 2004). Embora, muitos produtos tenham várias funções e possa ser difícil determinar qual é o produto principal, eles devem ser sempre comparados com base na igualdade de funcionalidade (SALLABERRY, 2009). Portanto a unidade funcional deve ser claramente definida e mensurável (ISO 14044:2006).

Esta referência é necessária para assegurar que a comparabilidade dos resultados, colocando a ACV em uma base comum, sendo particularmente crítica quando diferentes sistemas estão sendo avaliados. Muitas das discrepâncias aparentes entre estudos ACV relatados na literatura surgem porque os sistemas não são especificados convenientemente numa base comparável ou porque sistemas diferentes estão a ser comparados (FERREIRA, 2004).

Exemplos de unidades funcionais para a indústria de exploração e produção offshore podem incluir: barris de petróleo produzidos por petróleo extraído, metros perfurados em um poço para petróleo e gás por tempo, quantidade de resíduos produzidos e quantidade de água de produção gerada por barril de petróleo produzido.

#### **4. Fronteiras do sistema:**

As fronteiras ou limites do sistema são formulados com base no escopo e pode ser reformulado na medida em que novos dados são coletados. A qualidade das próximas fases de um estudo de ACV depende de uma descrição precisa do sistema e das suas fronteiras traçadas (ARGONNE, 2007).

A fronteira do sistema define todos os processos e os fluxos ambientais de entrada e saída a serem considerados no estudo da ACV. Embora a definição da fronteira do estudo seja uma decisão subjetiva, é muito importante definir com clareza os critérios adotados na sua demarcação. Segundo Tillman & Baumann (1995) apud Kulay (2004), as fronteiras de um sistema de produto podem ser provenientes de diversas origens. São elas:

- Fronteiras em Relação ao Sistema Natural: são os limites que indicam onde seu ciclo de vida se inicia e termina, em relação ao meio natural;

- Fronteiras em Relação a Outros Sistemas: em geral, cada sistema de produto tem associado uma rede de outros sistemas, como produção de insumos, obtenção de matérias-primas, coprodutos gerados, etc. Deve-se delimitar dentro desta rede quais processos serão ou não estudados, sob pena de se estar tentando abranger um universo demasiadamente amplo;

- Fronteiras Geográficas: define onde cada processo será considerado como realizado, uma vez que cada localidade possui características que podem fazer o resultado se tornar inadequado (por exemplo, cada país possui uma matriz energética, e o uso de um modelo de geração do Brasil, por exemplo, é inadequado ao europeu);

- Fronteira Temporal: considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro;

- Fronteiras de Bens de Capital: determina se serão incluídas ou não no estudo as infraestruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios, estradas e etc.).

Uma outra fronteira definida pela UNEP/SETAC (2005) é a de:

- Limites entre os processos relevantes e irrelevantes - este tipo de limite aborda a remoção dos processos da análise. Os processos podem ser removidos (ou cortados) por duas razões:

- Para simplicidade - processos que não apresentam grande influência no impacto ambiental total do ciclo de vida (carga ambiental baixa) podem não ser analisados;
- Falta de (acesso) de dados - um processo não pode ser quantificado, se não há dados suficientes.

#### **5. Procedimento de Alocação:**

Diversos processos possuem mais de uma saída de interesse para o sistema produtivo. Além de poder haver mais de um produto, pode-se gerar subprodutos, que são incorporados a processos através de reuso ou reciclagem. Uma vez que todos estes são resultados de interesse para o sistema de produto, é justo que cada um seja responsável por parte do conjunto de aspectos ambientais do sistema. Para isso desenvolve-se o procedimento de alocação, que busca criar um método de distribuição das contribuições aos impactos entre os diferentes resultados do sistema (WENZEL e outros, 1997). As soluções sugeridas à alocação de impactos, de acordo com Santos (2006), é a determinação do peso, do conteúdo energético ou do valor dos produtos individuais como uma base para alocação. Entretanto, (GUINEÉ, J. & HEIJUNGS, 1993b) apud Kulay (2004) adverte que o fato de não existir consenso em torno de um critério universal de alocação faz com que a escolha do mesmo seja definida em função do contexto em que o estudo se realiza;

#### **6. Tipos de Impacto e Metodologia de Avaliação de Impactos e Interpretação Subsequente:**

Para que seja dada sequência aos estudos, após o inventário, é necessário que sejam estabelecidos critérios para avaliação dos aspectos ambientais (RIBEIRO, 2003). As classes de problemas ambientais são definidas de acordo com os propósitos específicos a que o estudo se destina (KULAY, 2004). A metodologia de avaliação de impacto e a interpretação subsequente a ser usada são abordadas pelas normas ISO 14042 e ISO 14043, tratadas detalhadamente mais adiante;

#### **7. Suposições:**

Entendem-se como conjecturas de fatos a fim de se possibilitar uma avaliação direta tanto em termos qualitativos como quantitativos;

#### **8. Limites do Sistema:**

Os limites do estudo devem ser analisados de acordo com o objetivo proposto. Segundo Chehebe (1998), os limites do sistema determinam quais unidades de processo deverão ser incluídas dentro da ACV. A norma ISO 14041 ressalta que algumas decisões para omitir estágios do ciclo de vida, processos ou entrada devem ser claramente declarado e justificado. Segundo a norma ISO 14041, o critério usado na seleção de limites do sistema dita o de grau de confiança garantindo que os resultados do estudo não tenham sido comprometidos e que o objetivo seja alcançado.

### **9. Requisitos da Qualidade dos Dados:**

Os requisitos da qualidade dos dados especificam em termos gerais as características dos dados necessários ao estudo, devendo ser definidos para possibilitar o alcance dos objetivos propostos. Segundo a norma ISO 14041, os requisitos da qualidade dos dados devem incluir os seguintes parâmetros:

- **Período de tempo coberto:** A idade dos dados coletados (por exemplo, dentro dos últimos 5 anos) e o período mínimo para a coleta dos dados (por exemplo, de 1 ano);

- **Área Geográfica Coberta:** A área geográfica em que os dados das unidades de processos serão coletados devem satisfazer o objetivo estabelecido no estudo, que pode ser: local, regional, nacional, continental ou global;

- **Tecnologias Cobertas:** Deve ser considerada a variação tecnológica, por exemplo, uma média dos níveis tecnológicos empregados, a melhor tecnologia disponível ou a tecnologia típica empregada. Santos (2006) ressalta que a otimização de tecnologias industriais faz com que os dados relativos às emissões ambientais tornem-se rapidamente obsoletos.

De acordo com o nível de detalhes requerido pelo estudo, podem ser considerados também os seguintes parâmetros (GALDIANO, 2006).

- **Precisão:** Medida da variabilidade dos valores de cada categoria de dados, sendo empregada, por exemplo, a variância;

- **Compleitude:** Percentagem de dados primários em relação ao total de dados para uma unidade de processo;

- **Representatividade dos Dados:** Avaliação qualitativa do nível em que os dados refletem o sistema real de interesse (por exemplo, período de tempo, área geográfica e tecnologias cobertas);

- **Consistência:** Avaliação qualitativa da uniformidade da metodologia empregada para os vários componentes analisados;

- **Reprodutibilidade:** Avaliação qualitativa da extensão das informações sobre a metodologia e os dados coletados, permitindo que um especialista independente reproduza os resultados obtidos no estudo.

#### **10. Tipo de Análise Crítica:**

Para a norma ISO 14040, a análise crítica pode ser realizada para facilitar a compreensão e aumentar a credibilidade de estudos de ACV, por exemplo, envolvendo as partes interessadas. Segundo a mesma norma, o processo da análise crítica deverá verificar se: os métodos usados para realizar a ACV são consistentes com o padrão internacional; os métodos usados para realizar a ACV são cientificamente e tecnicamente válidos; os dados usados são apropriados e razoáveis com relação ao objetivo do estudo; as interpretações refletem as limitações identificadas, bem como o objetivo do estudo; o relatório do estudo apresenta-se de forma transparente e consistente.

#### **11. Tipo e Formato do Relatório Final:**

Segundo a norma ISO 14040, os resultados de uma ACV devem ser relatados ao público alvo de forma fiel, completa e exata, e o tipo e formato deste relatório devem ser definidos na etapa de definição do escopo. Assim deve haver total isenção dos elaboradores do estudo em relação ao contratante.

### **2.2.7 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV)**

A segunda etapa do estudo refere-se a coleta de dados de entrada e saída do sistema, envolvendo recursos naturais, energia, produtos, emissões atmosféricas, resíduos sólidos e efluentes líquidos envolvidos no ciclo de vida (MONTEIRO, 2008).

É importante salientar que a construção do ICV é iterativa, e com o decorrer dos dados obtidos e conseqüentemente maior conhecimento do sistema, deve-se proceder sempre que necessário a novas definições de meta e escopo. Quanto à estrutura do ICV, a ISO 14041 apresenta as seguintes etapas ilustradas na Figura 18.

Para simplificação, a seguir serão detalhadas algumas das etapas mais importantes para a elaboração do ICV.

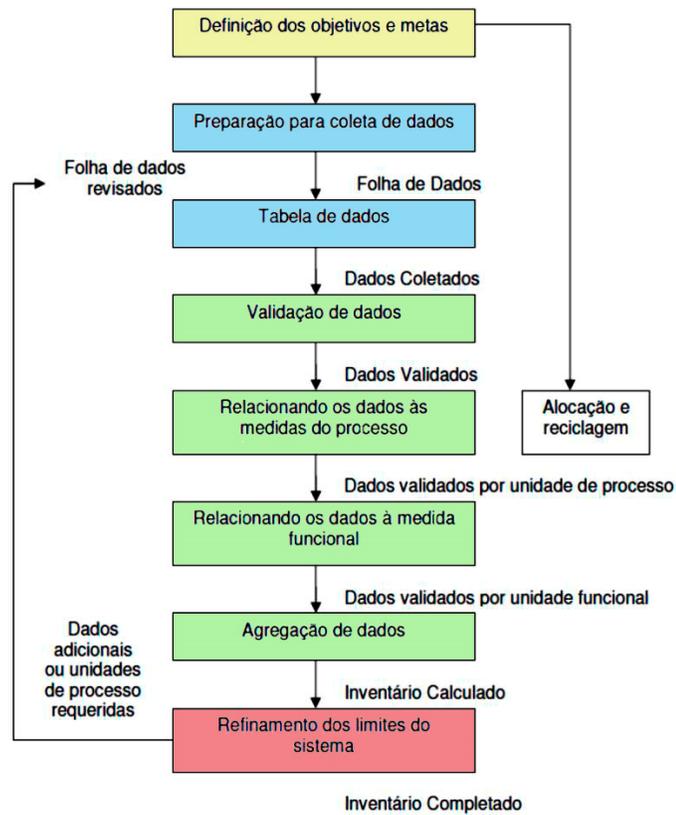


Figura 18 - Etapas para construção do Inventário de Ciclo de Vida (ABNT NBR ISO 14044:2009).

#### - Preparação para coleta de dados

Os dados deverão ser coletados para cada unidade de processo constante das fronteiras do sistema. Conforme a norma ISO 14041, a etapa de definições de escopo e objetivo fornecerá tanto a relação destes processos como a categoria de dados que devem ser obtidos. Uma vez que estes processos podem estar bastante distribuídos no espaço e no tempo, é recomendável que se sigam alguns passos para garantir a uniformidade e consistência do sistema modelado. Estes, segundo a referida norma, incluem:

- Construção de fluxogramas dos processos unitários, incluindo suas inter-relações. O fluxograma representa as atividades no sistema (por exemplo, processos, transporte, tratamento de resíduos) e os fluxos de entrada e saída entre eles durante todo o ciclo de vida. A fronteira do sistema é usada como o limite para a elaboração do fluxograma do ciclo de vida (U.S EPA, 2006).

- Descrição de cada processo e listagem das categorias de dados a estes associados;
- Determinação das unidades de medida;

- Determinação dos métodos de coleta e cálculo para cada categoria de dado;
  - Provisão de instruções para documentação de casos especiais, irregularidades, etc.
- Coleta de dados

A coleta de dados é a tarefa mais demorada de uma ACV (WENZEL e outros,1997), e segundo a norma ISO 14041 pode ser igualmente intensiva na demanda de recursos. Este problema, entretanto, pode ser enfrentado, principalmente através da criação de bancos de dados, constituídos paulatinamente com a incorporação dos resultados de estudos realizados. A adoção desta prática leva, progressivamente, à redução do tempo e custo de obtenção das informações necessárias para a execução de ACV (RIBEIRO, 2003).

De acordo com Chehebe (1998), as principais fontes de informação incluem:

- Informações internas nas empresas;
- Normas técnicas;
- Licenças ambientais;
- Literatura técnica;
- Associações de classe;
- Fornecedores reais ou potenciais;
- Banco de dados de ACV.

Os dados devem ser recolhidos com valores de quantidade e tipos de insumos materiais e os tipos e quantidades de insumos energéticos. As emissões de poluentes para o ar, água e terra devem ser quantificadas por tipo de poluente e origem. A descrição de como e onde o dado foi obtido também é relevante nesse processo. Conhecendo as dificuldades da coleta dos dados de entrada e saída para o estudo de ACV, é útil distinguir 02 (dois) tipos de dados (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

- **Dados de primeiro plano:** são dados específicos e necessários para modelar o sistema de produto. Normalmente, são dados que descrevem um sistema de determinado produto ou um sistema de produção particular especializado;
- **Dados de fundo:** são dados para materiais genéricos, fornecimento de energia, transportes e sistemas de tratamento de resíduos. São tipicamente valores que podem

ser encontrados em bases de dados internacionais, permitindo ganho de tempo para o estudo.

A distinção entre estes tipos de dados não é nítida e depende do assunto abordado da ACV. Muitas das vezes, uma atividade pode ser considerada como um dado de fundo, já que o estudo não se trata de especificamente dessa etapa, embora ela esteja presente no escopo do estudo, como no caso de transporte ou fornecimento de energia. Entretanto, se a ACV for um estudo que envolva especificadamente os impactos relacionados com essas atividades, esses dados passam a ser considerados como de primeiro plano, necessitando assim de maior cautela na utilização (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Uma maneira de se obter os dados de primeiro plano para o inventário é através da elaboração de questionários a serem respondidos normalmente por funcionários de uma empresa que conheçam ou possam obter os dados de um processo. Entretanto, esse procedimento deve ser realizado com bastante cautela e deve ser endereçado para os grupos corretos (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Outra maneira de conseguir esse tipo de dado é através de visitas e medições in loco ou com informações internas das empresas. Entretanto, o tempo, os recursos limitados e não disponibilidade dos dados internos de uma empresa, algumas vezes não permitem investigações detalhadas, exigindo uma abordagem mais simples (TAKAHASHI, 2008).

Todavia, 80% dos dados necessários para um estudo de ACV vêm dos dados de fundo, não sendo necessária a realização de questionários ou visitas a instalações para sua obtenção, uma vez que eles já estão presentes em bancos de dados conhecidos, ou podem ser encontrados na literatura científica ou na internet (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

#### - Procedimentos de cálculo

Após coletar os dados faz-se necessário que sejam feitos cálculos com o intuito de adequá-los aos processos unitários e à unidade funcional, além de avaliar sua qualidade (RIBEIRO, 2003). Este procedimento, segundo a ISO 14041, pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Validação dos dados: envolve verificações do tipo de balanços de massa e energia, análises comparativas, etc. A intenção destes procedimentos é detectar ainda numa fase inicial quaisquer anomalias existentes. Deve-se também determinar o que será feito na ausência do dado desejado;

- Adequação dos dados à unidade de processo unitário: significa transpor os dados obtidos na coleta à base unitária do processo (por exemplo: 1 kg de cimento, 1 MJ de energia, etc.), fazendo tanto as necessárias alocações das cargas ambientais como a conversão de unidades;

- Adequação dos dados à unidade funcional: Para que possa-se realizar cálculos sobre todo o sistema (sobre a função deste na verdade) deve-se transformar os valores obtidos para cada processo, na base unitária de cada um, a uma mesma base de cálculo referente à unidade funcional;

- Agregação dos dados: Por último, nesta etapa deve-se agregar os dados obtidos.

Uma observação importante sobre o tratamento de dados refere-se à unidade na qual são medidos os processos de transporte de materiais na ACV. Embora nenhuma norma estabeleça este procedimento, é usual nos estudos de ACV que as etapas de transporte de materiais sejam sempre expressas numa unidade denominada “tonelada - quilômetro” (t.km). Esta unidade refere-se aos aspectos ambientais do transporte de uma tonelada de carga por cada quilômetro percorrido. Na verdade, a medição dos aspectos das etapas de transporte em t.km existe como uma forma de alocar, a cada tonelada transportada, apenas a respectiva parcela dos aspectos ambientais dentre o total impingido ao meio pelo meio de transporte considerado. Desta forma, o cálculo dos valores das contribuições aos aspectos em t.km é obtido dividindo-se cada um dos aspectos referentes a um quilômetro percorrido pelo meio de transporte em questão pela capacidade de carga em toneladas.

#### - Refino das fronteiras do sistema

A norma ISO 14041 recomenda (considerando processo iterativo da análise) que as fronteiras do sistema sejam revistas, identificando necessidades de novos refinamentos e dados adicionais. Devem ser realizadas análises de sensibilidade quando necessário, de modo a avaliar a pertinência de:

- Excluir estágios do ciclo de vida ou processos que não sejam significantes;
- Excluir aspectos ambientais sem representatividade no resultado final;
- Incluir novos processos ou aspectos que sejam julgados relevantes.

Chehebe (1998) ressalta que os resultados deste processo de refinamento do sistema e da análise de sensibilidade devem ser documentados.

Ao final das etapas descritas, o que se obtém é um inventário, que segundo Santos (2006) é uma lista das quantidades de materiais e energia, dos produtos e subprodutos gerados, bem como dos resíduos e emissões para o meio ambiente. Tal inventário é denominado de ICV, balanço de materiais e energia ou ecobalanço. A análise do inventário do ciclo de vida é uma parte essencial da ACV, responsável pela coleta de todos os dados relativos às entradas e saídas de matéria e energia ao longo de todo o ciclo de vida do produto (GALDIANO, 2006).

De acordo com Kulay (2000), para realização de um Inventário de Ciclo de Vida é preciso ter em mente que, em termos práticos, será impossível considerar todos os aspectos ambientais de um sistema. O autor refere-se a enorme quantidade de variáveis ambientais de pouca significância envolvidos no sistema. Daí a necessidade de um especialista conduzir o estudo, de forma a selecionar adequadamente os ecovetores relevantes envolvidos na ACV.

Chehebe (1998) afirma que um grande volume de dados deverá ser coletado das unidades de processo associadas aos locais de produção dentro dos limites. Esses dados podem ser obtidos de diversas fontes, devendo ser organizados permitindo uma análise seletiva.

Segundo a norma ISO 14041, os grandes títulos sob quais dados podem ser incluídos são:

- Energia, matérias-primas, materiais auxiliares, outras entradas físicas;
- Produtos;
- Emissões para o ar, emissões para a água, emissões para a terra, outras emissões.

Dentro desses títulos, a norma ISO 14041 define que, as categorias individuais podem ser posteriormente detalhadas para satisfazer os objetivos do estudo. Sob o título emissões para o ar, por exemplo, categorias de dados tipo monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de enxofre podem ser separadamente identificadas.

De acordo com Santos (2006) os dados ambientais do inventário são agrupados para cada etapa envolvida ao longo do ciclo de vida do produto, identificando, desta forma, a análise da completa carga ambiental associada ao produto.

Os resultados da fase de inventário são apresentados em tabelas para realização da próxima fase, a avaliação do impacto. As quantidades de material e energia de cada ciclo da tabela são provenientes do inventário detalhado de cada etapa que compõe o ciclo (RIBEIRO, 2003).

## 2.2.8 PROCESSO DE ALOCAÇÃO

Normalmente, um sistema de produto inclui diversos processos que podem gerar mais de um produto. Como consequência, existe a necessidade de que a carga ambiental seja alocada sobre os diferentes produtos de saída do processo. A ISO 14040:2006 recomenda o seguinte procedimento, a fim de lidar com questões de alocação (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

- Evitar a alocação, ao dividir o processo de tal forma que possa ser descrito como dois processos separados, cada um com um único *output*. Muitas vezes, isto não é possível, uma vez que o processo não pode ser separado em dois.
- Extensão do limite do sistema, incluindo processos que seriam necessários para fazer um *output* semelhante.
- Se não for possível evitar a alocação dessas maneiras, a norma ISO 14044:2006 sugere a atribuição com base em uma causalidade física, tal como a massa ou o conteúdo de energia dos *outputs*.
- Se este último procedimento não puder ser aplicado, a ISO 14044: 2006 sugere o uso de uma base de alocação socioeconômica, como o valor econômico dos produtos.

## 2.2.9 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA (AICV)

A AICV tem por objetivo compreender e avaliar a magnitude e importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema, baseada na ICV realizada. Nessa etapa, convertem-se os valores obtidos nos resultados do inventário em impactos e danos ao meio ambiente. Para tal, uma série de conceitos e metodologias, que se encontram em constante evolução, devem ser colocadas em prática (CAMPOS, 2012).

Segundo a ISO 14044:2006, a AICV consiste de elementos obrigatórios e elementos opcionais ilustrados na Figura 19. Os elementos obrigatórios convertem os resultados do ICV em resultados para as diferentes categorias de impacto e os elementos opcionais servem para normalizar ou pesar os resultados do indicador e requerem uma análise mais subjetiva dos impactos ambientais, em relação aos elementos obrigatórios (FERREIRA, 2004). A seguir são descritos os elementos obrigatórios e opcionais de uma AICV.

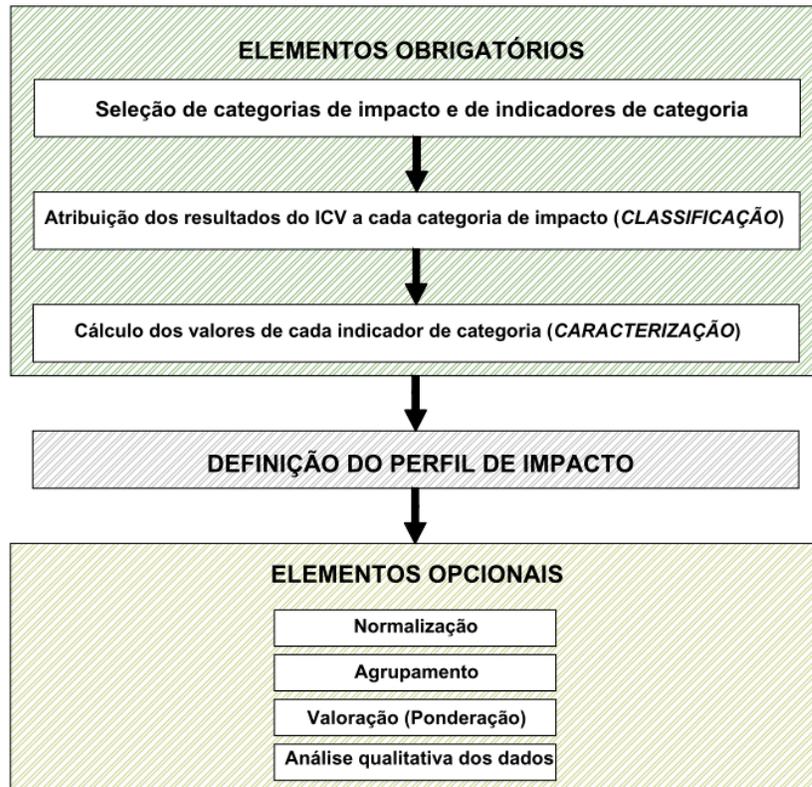


Figura 19 - Elementos da fase de AICV (ISO 14042, 2000).

### 2.2.9.1 SELEÇÃO E DEFINIÇÃO DOS INDICADORES E CATEGORIAS DE IMPACTOS

Nesta etapa realiza-se a identificação das categorias de impactos, indicadores ambientais, modelos de caracterização e associação dos resultados do ICV. Dependendo da metodologia de avaliação selecionada, poderão ser empregados em uma ACV tanto indicadores intermediários de impacto, conhecidos como *midpoints*, quanto indicadores finais: *endpoints*.

Kulay (2004) explica que os indicadores de *midpoint* procedem à avaliação de impactos valendo-se de indicadores relativos, restringindo-se em sua grande maioria aos efeitos primários provocados pela disposição (ou consumo) de determinado aspecto ambiental no meio ambiente. São exemplos desses indicadores os potenciais de: aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática e terrestre, depleção de recursos naturais (materiais e energéticos), diminuição de camada de ozônio, acidificação, eutrofização (ou nutrificação) entre outros.

Os indicadores do tipo *endpoints*, segundo o mesmo autor, concentram-se por sua vez na avaliação dos efeitos finais provocados por determinado aspecto ambiental. A norma ISO 14042 cita como exemplo, a categoria de mudança climática que representa emissões dos gases

do efeito estufa (resultado do ICV), utilizando radiação infravermelha como indicador ambiental. Para este caso, Chehebe (1998) exemplifica a ordem dos *enpoints*:

- Efeito de 1º ordem: perturbação no balanço da radiação;
- Efeito de 2º ordem: aumento da temperatura global;
- Efeito de 3º ordem: derretimento das camadas de gelo;
- Efeito de 4º ordem: elevação do nível dos oceanos como resultado do derretimento das camadas de gelo.

As categorias de impacto, em geral, são estabelecidas com base no conhecimento científico e nos mecanismos ambientais referentes. Como isso nem sempre é possível, admite-se que, em alguns casos específicos, o julgamento de valores possa substituir parte do conhecimento científico (CHEHEBE, 1998).

De acordo com Santos (2006) há um consenso de que as categorias de impacto sejam definidas em três tipos de problemas ambientais: Consumo de recursos; Impacto à saúde humana; Impactos ecológicos. As categorias de impactos ambientais normalmente utilizados em sistemas de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (CHEHEBE, 1998) são:

- **Depleção abiótica:** refere-se ao consumo dos recursos naturais não bióticos que são utilizados como insumos no ciclo de vida do produto. Chehebe (1998) destaca dentre eles, a extração de combustíveis fósseis e minérios. As propostas de cálculos para esta categoria, somente consideram a extração dos recursos e os impactos associados às atividades relacionadas com a extração (SUPPEN, N. & ABITIA, 2005). Segundo Santos (2006), esta categoria utiliza algoritmos relacionando a reserva do recurso natural com o seu uso. Chehebe (1998) explica que o resultado desta categoria é medido em relação à oferta global do recurso;
- **Aquecimento global:** o aumento da radiação térmica junto à superfície do globo eleva sua temperatura, podendo trazer desequilíbrios ecológicos como o degelo das calotas polares e conseqüentemente, a diminuição da área ocupada do planeta (Kulay, 2000). Este aumento de temperatura provém principalmente da crescente quantidade de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, aerossóis e outros gases na atmosfera terrestre, os quais impedem a dispersão dos raios solares que atingem o planeta. Os fatores de conversão para transformação dos gases do efeito estufa em CO<sub>2</sub> equivalente são denominados Potenciais de Aquecimento Global (PAG). O potencial de determinada substância é a taxa entre a contribuição à absorção do calor irradiado resultante da emissão instantânea

de 1 kg de um gás de efeito estufa e uma emissão igual de CO<sub>2</sub> integrado em um dado tempo (SANTOS, 2006);

- **Depleção da camada de ozônio:** a exaustão da camada de ozônio conduz a um crescimento na quantidade de raios ultravioletas que atingem a superfície da Terra, o que pode resultar no aumento de doenças, bem como danos a diversos tipos de materiais e interferências no ecossistema (CHEHEBE, 1998). Kulay (2000) explica que o uso de aerossóis a base haletos orgânicos como o clorofluorcarbono (CFC-11) e seus derivados são os principais agentes de depleção da camada de ozônio. Acredita-se que esta categoria de impacto será menos importante no futuro, devido à diminuição da emissão dos compostos clorofluorcarbonos e halons (LINDFORS, 1995). O modelo de caracterização utilizado para medir impactos dessa natureza foi desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) e define o Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para os mais diferentes gases em termos de kg CFC-11 equivalente/kg emissão. O escopo geográfico do PDCO é mundial e seu horizonte temporal é infinito (KULAY, 2004);
- **Toxicidade humana:** a exposição do ser humano a substâncias tóxicas através do ar, da água ou do solo, principalmente por intermédio da cadeia alimentar, pode causar problemas à saúde humana (CHEHEBE, 1998). Os fatores que caracterizam a toxicidade humana, descritos como Potencial de Toxicidade Humana (PTH), são calculados por meio de modelos do tipo dose-resposta, cujos horizontes temporais serão normalmente infinitos (KULAY, 2004). O valor de PTH para uma dada substância, segundo Chehebe (1998) é medido como a massa do corpo humano que estaria exposta ao limite toxicológico aceitável por 1 kg de substância. Kulay (2004) afirma que o escopo geográfico do efeito em questão é determinado, em síntese, pela capacidade de dispersão da substância, podendo, portanto, variar de local a global;
- **Ecotoxicidade:** a exposição da fauna e da flora a substâncias tóxicas pode trazer consequências irreversíveis, entre as quais o desbalanceamento da cadeia alimentar, que poderá resultar inclusive na extinção de espécies. A ecotoxicidade pode ser aquática ou terrestre (Kulay, 2000). Segundo Kulay (2004), o Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa) poderá ser calculado também com base em um modelo de dose-resposta, por meio do qual se podem estimar os efeitos causados por substâncias tóxicas aos meios em questão, para um horizonte de tempo infinito.

Chehebe (1998) explica que os resultados do (PEa) referem-se ao volume de água poluída a um nível crítico por kg de substância, enquanto que os resultados do Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (PEt) referem-se à massa de solo poluída a um nível crítico por kg de substância. Tais indicadores podem ser aplicados às escalas local, regional, continental e mesmo à escala global (KULAY, 2004);

- **Acidificação:** a deposição ácida no solo ou na água - resultante da emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera - pode alterar o teor de acidez desses meios, trazendo assim efeitos tanto para a fauna quanto para a flora. Segundo Santos (2006), as emissões de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio são transformadas na atmosfera, por onde podem percorrer milhares de quilômetros até se depositarem como chuva ácida, neve, poeira ou gás. Os Potenciais de Acidificação (PAc) de emissões atmosféricas são calculados por um modelo de dispersão, o qual descreve não apenas os mecanismos de dispersão das substâncias enquadradas nessa categoria, mas também, a forma como ocorre sua deposição. Os PAc são expressos em kg de SO<sub>2</sub> equivalentes/kg emissão, seu horizonte temporal é infinito e a escala geográfica varia entre local e continental.
- **Oxidação fotoquímica:** a reação entre o óxido de nitrogênio e substâncias voláteis sob a ação de raios ultravioleta provoca a formação de oxidantes fotoquímicos. Esses últimos causam nevoeiros que entre outros efeitos, podem levar a diminuição da atividade biológica fotossintética de vegetais por redução da taxa de luminescência solar (KULAY, 2000). Os fatores de conversão para transformação dos compostos transformadores de oxidantes fotoquímicos em etileno equivalentes são denominados de Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (PFOF). O PFOF é a taxa entre a mudança na concentração do ozônio devido a uma emissão de um composto orgânico volátil e a mudança na concentração de ozônio devido à emissão de etileno (SANTOS, 2006);
- **Eutrofização (ou nutrificação):** a adição de nutrientes à água ou ao solo aumenta a produção de biomassa nesse meio. Dessa forma há uma diminuição da taxa de oxigênio livre, o que afeta outros organismos vivos como os peixes. Tanto no solo quanto na água, a eutrofização pode levar a alterações indesejáveis no número de espécie no ecossistema, e, portanto a problemas relativos à biodiversidade (CHEHEBE, 1998). De acordo com Kulay (2004), o estabelecimento do chamado Potencial de Eutrofização

(PEn) baseia-se em um procedimento estequiométrico proposto por Heijungs (1992), cujos resultados são expressos em kgPO<sub>4</sub> equivalentes/ kg emissão. Apesar de Chehebe (1998) também citar a medida em relação ao efeito de 1 kg de fosfato, Santos (2006) demonstra que o PEn também pode expressar os resultados em kgNO<sub>3</sub> equivalentes/ kg emissão. Esta dubiedade entre a unidade de equivalência da categoria de eutrofização é perfeitamente compreensível, uma vez que os principais elementos causadores da eutrofização são o fósforo e o nitrogênio.

- **Radiação radioativa:** caracteriza a emissão de radiações ionizantes, que segundo Cesana (2006) podem ser de três tipos: núcleos de hélio (partículas alfa); elétrons (partículas beta) e radiação eletromagnética (radiação gama). Elevada energia de radiação pode ser resultado direto da presença de materiais radioativos em produtos ou resíduos (SETAC, 1993). Tal radiação pode resultar no aumento de doenças graves, bem como danos a diversos tipos de ecossistema. Os resultados do Potencial de Radiação Radioativa São expressos em DALY - “*Disability Adjusted Life Years*”, anos de incapacidade e de vida perdidos.

Existem ainda diversos impactos ambientais passíveis de serem considerados nos estudos de ACV, como por exemplo, exaustão de recursos hídricos, redução de espaço físico, poluição sonora ou odor. Esses impactos precisam, entretanto, ser ainda melhor avaliados em termos de mecanismos ambientais (KULAY, 2000). Para a caracterização dos impactos ambientais é necessária a existência de uma matriz de conversão que é responsável pela transformação das intervenções em impactos ambientais, num processo que se denomina de classificação/ caracterização (CALDEIRA-PIRES, RABELO E XAVIER, 2002).

### **2.2.9.2 CLASSIFICAÇÃO**

Após a definição dos impactos ambientais que serão considerados no estudo, passa-se então ao processo de classificação que consiste em organizar os aspectos ambientais pelos impactos a eles associados. Chehebe (1998) explica que na medida do possível a classificação deve ser completa, independente, operacional, prática, devendo ser claramente explicitadas as categorias levadas em consideração. Entretanto, segundo o autor em casos específicos, havendo motivos relevantes, algumas categorias poderão ser deixadas de lado. A definição das categorias do estudo deve estar nos processos ambientais envolvidos, pois isto permite basear a análise de impacto em conhecimento científico relacionado a estes processos (SETAC, 1993).

Nesta fase, todos os dados do ecobalço, que contribuem com impacto ambiental, são classificados de acordo com o tipo de problema para o qual elas contribuem. Por exemplo: a atribuição do fosfato à categoria de nutrifcação (CHEHEBE, 1998). A norma ISO 14042 esclarece que os resultados do ecobalço podem se relacionar com mais de uma categoria de impacto, como por exemplo, o SO<sub>2</sub> que pode ser relacionada tanto na categoria de saúde humana, quanto de acidifcação. Devido a isto, Ribeiro (2003), afirma que devem ser tomados cuidados com o modo de realizar a classificação, a fim de se evitar equívocos.

Para um melhor entendimento, Chehebe (1998) exemplifica a cadeia do efeito estufa. Se na etapa de seleção tiver sido escolhido o aquecimento global como uma de suas categorias do estudo, deve-se então na classificação atribuir os dados do ecobalço relativo aos gases de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub> a essa categoria. Pois, segundo o autor, o mecanismo básico de suas ações consiste em aprisionar as radiações infravermelhas conduzindo a uma elevação da temperatura do planeta.

Desse modo, a fase de classificação estabelece a correspondência entre um conjunto de intervenções ambientais listadas no inventário e um conjunto de categorias ambientais. Essa correspondência é efetuada através da atribuição de pesos que ponderam a contribuição das diversas intervenções ambientais em cada categoria de impactos ambientais, mas não estabelece qualquer relação entre estes (CALDEIRA- PIRES, RABELO E XAVIER, 2002).

### **2.2.9.3 CARACTERIZAÇÃO**

A caracterização consiste na quantifcação da classificação, ou seja, na determinação numérica de qual é a contribuição de cada aspecto a cada categoria de impacto (CONSOLI e outros, 1993 APUD RIBEIRO, 2003). Este procedimento, segundo a norma ISO 14042, é feito por meio da conversão dos resultados do ICV em unidades comuns e posterior agregação de resultados, dentro de cada categoria de impacto.

Uma vez que as categorias de impacto são definidas e os resultados do inventário são atribuídos a estas categorias de impacto, é necessária a determinação dos fatores de caracterização, também denominados de equivalentes ou potenciais. Esses fatores devem refletir a contribuição relativa de um resultado do inventário para a categoria de impacto (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Esta fase, de acordo com Santos (2006), promove a definição de fatores de equivalência a cada entrada e saída culminando na identificação do impacto potencial associado ao produto.

Os fatores de caracterização são utilizados para calcular os efeitos diretos do composto original emitido. Podem existir efeitos indiretos tanto positivos quanto negativos quando os compostos individuais reagem quimicamente no meio ambiente.

Segundo Chehebe (1998), vários modelos ambientais têm sido desenvolvidos para determinar a equivalência destes fatores, que indicam quanto uma determinada substância contribui para um determinado problema ambiental comparado a uma substância de referência. Após terem sido aplicados os respectivos fatores de equivalência a cada um dos aspectos ambientais, essas quantidades podem então ser somadas para totalizar o valor do Indicador.

O conjunto de Indicadores de impacto representa o Perfil Ambiental do sistema em estudo. Ao final da Caracterização obtém-se um valor total de contribuição daquele ciclo de vida para cada categoria de impacto. Este resultado muitas vezes já é o suficiente para os propósitos da ACV, uma vez que permite conhecer, dentro das hipóteses admitidas, as contribuições do ciclo de vida do produto para as categorias de impacto (RIBEIRO, 2003).

Esses fatores são derivados de modelos científicos de causa e efeito dos sistemas naturais, e eles indicam o quanto uma substância contribui para uma categoria de impacto em comparação com uma substância de referência (CAMPOS, 2012).

A Tabela 3 apresenta as categorias de impacto ambiental, a escala no qual as categorias impactam o ambiente, os principais poluentes classificados nas categorias pertencentes que podem estar presentes em diversos inventários de diferentes estudos de ACV, o fator de caracterização de cada categoria e como os dados finais caracterizados são expressos (valor de referência) (CAMPOS, 2012).

Essas três etapas (Identificação e Seleção de Impacto, Classificação e Caracterização) constituem os elementos básicos e por isso, imprescindíveis para uma AICV (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida). Esses elementos são relativamente objetivos, apesar de alguns julgamentos serem necessários (por exemplo, na seleção dos impactos ambientais). Em muitos casos, os diferentes Indicadores de impacto definidos pela caracterização são difíceis de serem interpretados por apresentarem unidades diferentes. Para contornar essa dificuldade os indicadores são normalizados.

A seguir são descritos os elementos opcionais, que apresentam caráter mais subjetivo, por consequência, os resultados destas etapas têm menor embasamento científico do que a dos três primeiros.

Tabela 3 - Exemplo da realização dos elementos obrigatórios de uma AICV (Adaptado de FERREIRA, 2004 e SALABERRY, 2009).

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Escala</b>	<b>Classificação (Dados de um ICV)</b>	<b>Fator de Caracterização</b>	<b>Descrição do Fator de Caracterização</b>	<b>Caracterização</b>
Aquecimento Global	Global	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) Metano (CH <sub>4</sub> ) Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Brometo de Metil (CH <sub>3</sub> Br)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Converte dados de ICV em equivalente dióxido de carbono. Nota: potenciais de aquecimento global podem ser potenciais 50, 100, ou 500 anos.	Kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção do Ozônio Estratosférico	Global	Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Brometo de Metil (CH <sub>3</sub> Br) Halons	Potencial de Depleção do Ozônio	Converte dados de ICV em - equivalentes triclourofluormetano (CFC-11).	kg CFC-11 eq
Acidificação	Regional	Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ) Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) Ácido Hidroclorídrico (HCL) Ácido Hidrofluorídrico (HF) Amônia (NH <sub>4</sub> )	Potencial de Acidificação	Converte dados de ICV em - equivalentes íão de hidrogénio (H <sup>+</sup> ).	Kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofização	Local	Fosfato (PO <sub>4</sub> ) Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) Nitratos Amônia (NH <sub>4</sub> )	Potencial de Eutrofização	Converte dados de ICV em - equivalentes fosfato (PO <sub>4</sub> ).	Kg PO <sub>4</sub> eq
Oxidação Fotoquímica	Local	Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	Potencial de Criação de Oxidante Fotoquímico	Converte dados de ICV em - equivalentes eteno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ).	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Toxicidade Terrestre	Local	Químicos tóxicos com um registo de concentração letal para roedores	LC50	Converte dados LC50 em equivalentes.	Kg 1,4-DB eq
Toxicidade Aquática	Local	Químicos tóxicos com um registo de concentração letal para peixes	LC50	Converte dados LC50 em equivalentes.	Kg 1,4-DB eq
Depleção de Recursos	Local Regional Global	Quantidade de minerais usados Quantidade de combustíveis fósseis usados	Potencial de Depleção de Recursos	Converte dados de ICV em razão da quantidade de recurso usado versus quantidade de recursos deixados em reserva	Kg Sb eq
Uso do Solo	Local Regional Global	Quantidade depositada num aterro.	Resíduo Sólido	Converte massa de resíduo sólido em volume usando uma densidade estimada.	Kg

## 2.2.10 ELEMENTOS OPCIONAIS

- **Normalização**

Após a caracterização são delimitadas as categorias de impacto ambientais, que são normalizadas a fim de aumentar o fator de comparação entre as diferentes categorias de impacto e obter, desta forma, uma mensuração dos impactos gerados por cada categoria. A normalização é um processo que permite a conversão de todos os Indicadores de impacto a uma única base de referência, a fim de que esses possam então ser comparados (MONTEIRO, 2008).

Após a normalização dos aspectos ambientais a base de cálculo da unidade de processo, pode então ser construída a Tabela Bruta de Valores, que lista todos aspectos ambientais relevantes para o estudo, em suas respectivas unidades de processo. Na segunda fase, segundo Kulay (2000), são calculados os chamados fatores de ajuste à unidade funcional, dividindo-se as bases de cálculo de cada unidade de processo por essa última. Os fatores de ajuste são então multiplicados pelos valores das correntes já normalizadas para cada unidade de processo Kulay (2000) explica que a normalização é feita em duas etapas. Na primeira, todos os aspectos ambientais levantados para uma unidade de processo são convertidos para uma base de cálculo comum à própria unidade. Finalmente, a normalização da unidade de processo acontece, dividindo-se todas as demais correntes relacionadas à unidade de processo por essa base comum.

A fim de se organizar as categorias de impacto é que se pode realizar o agrupamento. Segundo Caldeira-Pires (2007), esta é uma etapa da análise de impacto em que as categorias de impacto estão agregadas em mais de um grupo definido na fase do objetivo e abrangência. Caldeira-Pires (2007) explica ainda que esta etapa pode se apresentar como uma hierarquização e uma classificação. A hierarquia é o método de agregação pelo qual as categorias de impacto são classificadas seguindo sua importância (por exemplo: alta, média, e baixa prioridade), aplicando escolha de valores. Enquanto a classificação é o método de agregação pelo qual as categorias de impacto são distribuídas em bases nominais, por exemplo, por características tais como emissões e uso de recursos, ou escalas espaciais global, regional e local.

De acordo com Kulay (2004), assim como no caso da normalização, o agrupamento é também um recurso bastante útil em processo de tomada de decisão que sejam

decorrentes da realização de estudos de ACV. Apesar desta consideração, Caldeira-Pires (2007) ressalta que existem poucos estudos na operacionalização desta etapa.

Após ter sido normalizado, o Perfil Ambiental do sistema poderá, por exemplo, ser útil para a hierarquização de ações de melhoria de desempenho ambiental, atividade esta, inerente ao processo de tomada de decisão. A avaliação constitui a última fase da análise de impacto ambiental associada a uma ACV, onde são alcançados os indicadores ambientais. A Figura 20 ilustra a interação entre as fases da avaliação do impacto do ciclo de vida de um produto.

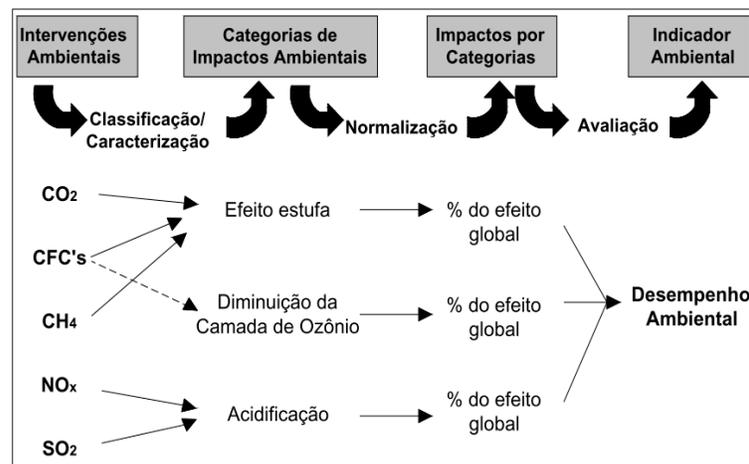


Figura 20 - Etapas da AICV (CALDEIRA-PIRES, RABELO E XAVIER, 2002).

Chehebe (1998) explica que a base para a atribuição de valores é o perfil ambiental do sistema estudado. O índice ambiental é formado atribuindo-se pesos a cada problema ambiental em termos de sua importância, somando-se, após isso, os resultados ponderados. O fator de ponderação difere de país para país (ou dentro do próprio país), em função das diferenças nas condições locais. O ponto de vista político também afeta o processo de ponderação, como um resultado, por exemplo, de diferentes opiniões sobre a importância relativa de problemas locais. Segundo Ribeiro [2003] o impacto é avaliado por meio da utilização de fatores de impacto e fatores de peso, mas esta aproximação gera controvérsias por não considerar as condições locais onde ocorre a emissão. Por isso, de acordo com Chehebe (1998), a fase de atribuição de valores tem sido altamente criticada devido a seu caráter subjetivo. Segundo o mesmo, é verifica-se uma clara distinção entre a fase de caracterização e essa fase.

- **Ponderação**

De acordo com Kulay (2004), consiste na atribuição de pesos às categorias de impacto que formam o Perfil Ambiental do produto, segundo seu grau de importância. Soma-se após isso, os resultados ponderados. Chehebe (1998) afirma que o fator de ponderação difere de país para país, em função tanto de diferenças das condições locais como do ponto de vista político (devido a diferentes opiniões sobre a importância relativa de problemas locais). Caldeira-Pires (2007) explica que a ponderação é baseada na escolha de valores, como por exemplo: valores monetários, padrões, júri de especialistas etc.

Não há um consenso sobre qual método a ser utilizado. Daí, Chehebe (1998) afirmar o caráter subjetivo da fase de atribuição de pesos. Apesar desta subjetividade, a norma ISO 14042 afirma que a aplicação e uso dos métodos desta valoração devem ser consistentes com o objetivo e escopo do estudo de ACV, além de ser totalmente transparente. Esta norma ressalta ainda outro ponto importante; no estudo de ACV pode ser desejável o uso de vários e diferentes fatores de definição de pesos, métodos de valoração, e conduta da análise de sensibilidade para alcançar as consequências dos resultados da ACV.

Por ser um método subjetivo, é o mais controverso e mais difícil em uma ACV, especialmente para alguns métodos de avaliação de impactos (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Segundo a ISO 14040:2006, esse método não pode ser utilizado em comparações públicas entre produtos, sendo apenas utilizado para estudos não comparativos.

É possível que algumas categorias de impactos sejam mais importantes do que outras para uma ACV. Logo, cada categoria de impacto é multiplicada pelo respectivo fator de ponderação, fazendo com que as categorias de impacto que realmente são importantes para a ACV se sobressaiam das outras não tão importantes e contribuindo para que os resultados se diferenciem e se aproximem da realidade. Por exemplo, em uma localidade que eutrofização não seja uma categoria de impacto tão importante quanto toxicidade humana, um maior fator de ponderação é atribuído ao segundo em comparação ao primeiro (ARGONNE, 2007). Portanto, nessa etapa se pode escolher quais são as categorias de impacto mais importantes para o estudo de ACV. Com relação a essa etapa,

ainda não existe nenhum acordo internacional sobre a metodologia mais aplicada para essa finalidade, são decisões que contam com a experiência dos realizadores da ACV.

- **Agrupamento**

Nada mais é do que uma reordenação da apresentação das categorias de impacto (RIBEIRO, 2003; KULAY, 2004). De acordo a norma ISO 14042, existem duas possibilidades de realizar este processo:

- Selecionar as categorias de uma base comum, por exemplo, de características tais quais emissões e recursos ou regional/ global e escala espacial local;

- Organizar as categorias de impacto, segundo o critério não numérico da ordem de importância (ex: alta, média e baixa importância).

A norma ISO 14042 afirma que a aplicação e uso dos métodos de agrupamento devem ser consistentes com o objetivo e escopo do estudo de ACV, de forma absolutamente transparente. Esta norma ressalta que diferentes indivíduos, organizações, e sociedades podem ter diferentes preferências, por isso é possível que as distintas partes alcancem diferentes resultados se baseado no mesmo resultado de indicador (normalizado ou não).

### **2.2.11 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA**

De um modo geral, os modelos de AICV podem ser agrupados em duas categorias:

- Modelos Clássicos ou *Midpoint*;
- Modelos de Danos ou *Endpoint*.

A primeira consiste nos modelos que ligam diretamente os resultados do ICV para categorias de impacto intermediárias, por exemplo, acidificação e mudança climática (GOEDKOOP; SPRIENSMA, 2001).

A segunda categoria são os modelos de danos. Esses modelos vão além das categorias de impacto intermediárias, sendo modelados causas e efeitos para estimar danos (GOEDKOOP ; SPRIENSMA, 2001). Enquanto que os modelos clássicos produzem categorias de impacto intermediárias, os modelos de danos estimam quais são os danos que decorrem dessas categorias intermediárias para o homem, fauna e flora (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

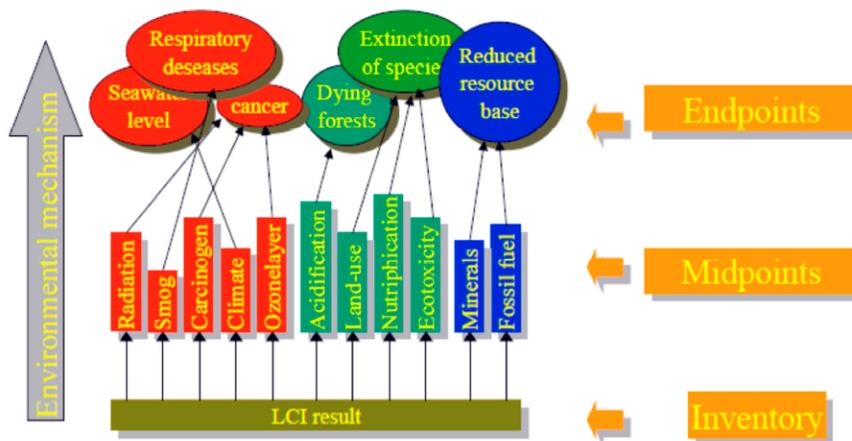


Figura 21 - Diferença entre os métodos de AICV (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Em geral, indicadores que são escolhidos próximos ao inventário, tem um grau de confiabilidade maior que os indicadores que vão além dos intermediários, já que as hipóteses assumidas são menos específicas. Entretanto, indicadores específicos são mais fáceis de serem interpretados que os indicadores intermediários. A Figura 21 apresenta a diferença de abordagem das metodologias de impacto *Midpoint* e *Endpoint* (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Dentre os métodos de AICV existentes nos documentos do Programa Iniciativa do Ciclo de Vida (UNEP, 2010) são listados 10 métodos que são amplamente utilizados: Eco-indicator 99, EDIP 97 - 2003, EPS 2000, (Dutch) Handbook on LCA, Impact 2002+, JEPIX, LIME, Swiss Ecotoxicity e TRACI (MENDES, 2013).

Já o ILCD Handbook, documento baseado nas normas internacionais da ISO, apresenta uma análise geral dos seguintes métodos de AICV: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP 1997, EDIP 2003, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Ecological Scarcity Method, TRACI, MEEuP e USEtox (MENDES, 2013).

Um levantamento de métodos de AICV realizado por Takeda, Tachard e Ometto (2010) indica quais são os métodos mais utilizados e citados em artigos científicos disponíveis em bancos de dados internacionais. Embora a pesquisa, realizada por meio de revisão sistemática, tenha encontrado 85 métodos de AICV na literatura, segundo Takeda, Tachard e Ometto (2010) a utilização de métodos de AICV está concentrada em basicamente sete famílias: Eco-indicator, CML, EPS, LIME, EDIP, Impact e Swiss Ecotoxicity (MENDES, 2013).

Tabela 4 - Principais Métodos de AICV (Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida).

Metodologia	Desenvolvedor	País	Descrição do Método	Ano
<b>Eco-indicator 99</b>	Pré	Holanda	<i>Endpoint</i> (Danos), incluindo Normalização e opção de Ponderação padrão	1999
<b>EPS 2000</b>	IVL	Suécia	Método com Ponderação	1999
<b>ReCiPe</b>	RUN + PRé + CML + RIVM	Holanda	Método que integra e harmoniza as abordagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> em uma estrutura consistente.	2000
<b>CML2002</b>	CML	Holanda	<i>Midpoint</i> com Normalização	2002
<b>IMPACT 2002+</b>	EPFL	Suíça	<i>Midpoint</i> com Avaliação de Danos e Normalização	2003
<b>TRACI</b>	US EPA	USA	<i>Midpoint</i> com Normalização	2003
<b>LIME</b>	AIST	Japão	<i>Midpoint</i> (caracterização), <i>endpoint</i> (avaliação de danos) e ponderação	2003
<b>EDIP 97-2003</b>	DTU	Dinamarca	<i>Midpoint</i> com Normalização	2004
<b>LUCAS</b>	CIRAIG	Canadá	<i>Midpoint</i> em que, eventualmente, poderá ser desenvolvido para o nível <i>endpoint</i>	2005

Com base nos métodos relacionados nesses documentos internacionalmente reconhecidos verifica-se que há concordância sobre a relevância dos métodos listados neste capítulo. A Tabela 4 apresenta os métodos de AICV que foram citadas com o objetivo de promover o conhecimento de suas características e apresentar uma análise comparativa entre eles. Por ser a metodologia selecionada para se realizar a AICV desse estudo de caso o modelo CML 2002 será caracterizado a seguir.

### **CML 2002**

Em 1992, o Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML), em colaboração com a Organização Holandesa para Pesquisa Científica Aplicada (TNO) e com o Escritório de Combustíveis e Matérias-Primas (Bureau B&G) produziram um guia e documento de referência sobre uma metodologia de avaliação de ciclo de vida ambiental (HEIJUNGS et al., 1992). Desde então essa metodologia de ACV progrediu substancialmente. Um novo projeto foi iniciado e financiado principalmente pelo governo holandês. CML, Escola de Engenharia de Sistemas, Análises Políticas e Gestão, *Delft University of Technology*, Departamento Interfaculdades de Ciências Ambientais da Universidade de Amsterdam e Bureau B&G, com contribuições do Instituto de Estudos

Ambientais da Universidade Livre de Amsterdam, IVAM- Pesquisa Ambiental, TNO e consultores de ACV participaram desse projeto, que resultou em um novo guia de ACV inteiramente holandês (GUINÉE, 2001).

De acordo com Guinée et al. (2002) o Dutch Handbook on LCA (Manual Holandês de ACV) oferece um “livro de receitas” com as diretrizes operacionais para a realização de um estudo passo-a-passo de ACV, justificado por um documento de base científica, com base nas normas ISO para ACV. Os diferentes elementos e requisitos da ISO tornam-se operacionais para o que é julgado como "melhores práticas disponíveis" para cada etapa. A versão revisada deste método intitulada “*Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*” foi publicada em 2002.

O novo guia fornece orientações para dois níveis de sofisticação da ACV: uma versão simplificada e um nível detalhado, além disso, extensões opcionais para o nível detalhado são fornecidas (GUINÉE, 2001)

Esse método de AICV é baseado em uma abordagem midpoint que cobre todas as emissões e recursos relacionados aos impactos para os quais práticas e modelos de caracterização aceitáveis estão disponíveis (GUINÉE, 2002).

Os modelos de caracterização disponíveis foram selecionados com base em uma extensa revisão das metodologias existentes em todo o mundo. Para a maioria das categorias de impacto são recomendados um modelo base e modelos de caracterização alternativos, além de serem fornecidas listas abrangentes de fatores de caracterização e fatores de normalização. Ecotoxicidade e toxicidade humana, por exemplo, são categorias modeladas a partir do modelo USES-LCA, desenvolvido por Huijbregts (HUIJBREGTS, 2000).

As categorias de impacto abordadas por este método são: depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática (água doce), ecotoxicidade aquática (marinha), ecotoxicidade terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização. Algumas categorias de impactos adicionais são abordadas dependendo dos requisitos do estudo, estão entre elas: perda de função de suporte à vida, perda de biodiversidade, ecotoxicidade em água doce (sedimentos), ecotoxicidade marinha (sedimentos), impactos da radiação ionizante, mau cheiro do ar, ruído, calor residual, acidentes, letal, não letal, depleção de recursos bióticos, dessecação e mau cheiro da água (EC-JRC, 2010; GUINÉE et al., 2002).

O método apresenta um escopo de aplicação global, exceto para as categorias de impacto acidificação e formação de foto-oxidantes, as quais apresentam o escopo de aplicação regional para a Europa (EC-JRC, 2010).

Segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010) os fatores globais para normalização estão disponíveis para 1990 e 1995 tanto para intervenções mundiais anuais agregadas ou per capita quanto para um cidadão médio. Planilhas de base estão disponíveis para que os fatores de normalização possam ser adaptados para outros métodos e novos dados desenvolvidos, e fatores de normalização para a Holanda e Leste Europeu estão disponíveis para ‘extensões’ (análises de sensibilidade).

Segundo o ILCD Handbook (EC-JRC, 2010) o método CML 2002 apresenta seis características particulares, são elas:

- Fundamentos científicos explícitos que apoiam todas as escolhas importantes;
- Fatores de AICV alternativos fornecidos para análises de sensibilidade para cada categoria de impacto;
- Todos os fatores de AICV podem ser obtidos como planilhas, as quais são regularmente atualizadas;
- Distinção entre categorias de impacto básicas, específicas do estudo e outras categorias de impacto;
- A maioria das categorias de impacto já foi descrita em artigos científicos;
- Princípios para AICV desenvolvidos juntamente com os princípios para outros elementos da metodologia de ACV (como unidade funcional, alocação, etc.) de uma maneira consistente em relação à manipulação do tempo, espaço, não linearidades, mecanismos econômicos, sociais e tecnológicos, etc.

## **2.2.12 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

É na fase de interpretação que cada uma das etapas anteriores, com seus respectivos aspectos ambientais, é contabilizada e comparada. Nesta fase, segundo Chehebe (1998), deve-se: analisar os resultados obtidos nas fases anteriores, tirar conclusões compatíveis com os objetivos estabelecidos, explicar as limitações do estudo e identificar as oportunidades de melhoria de acordo com o objetivo. Segundo a norma ISO 14043, as características-chave da Interpretação do Ciclo de Vida são:

- O uso de um procedimento sistemático para identificar, qualificar, checar, avaliar e apresentar resultados baseados nas conclusões de toda a ACV ou apenas de indicadores do ciclo de vida atendendo aos requisitos definidos no objetivo e escopo do estudo;

- O uso de um procedimento iterativo, fazendo interpretações a partir das demais fases da ACV;

- A previsão de links entre a ACV e outras técnicas de gestão ambiental enfatizando os pontos fortes e as limitações do estudo.

Para Chehebe (1998) e Curran (1999) a fase de interpretação de uma ACV compreende as três etapas seguintes:

1) Identificação das questões ambientais mais significativas resultados da análise do inventário e/ou ACV; baseadas nos resultados da análise do inventário e/ou ACV;

2) Avaliação - que pode incluir elementos tais como a checagem da integridade, sensibilidade e consistência;

3) Conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais significativas.

A norma ISO 14043 apresenta esquematicamente as relações dos elementos dentro da fase de interpretação com as outras fases da ACV, conforme ilustrado na Figura 22.

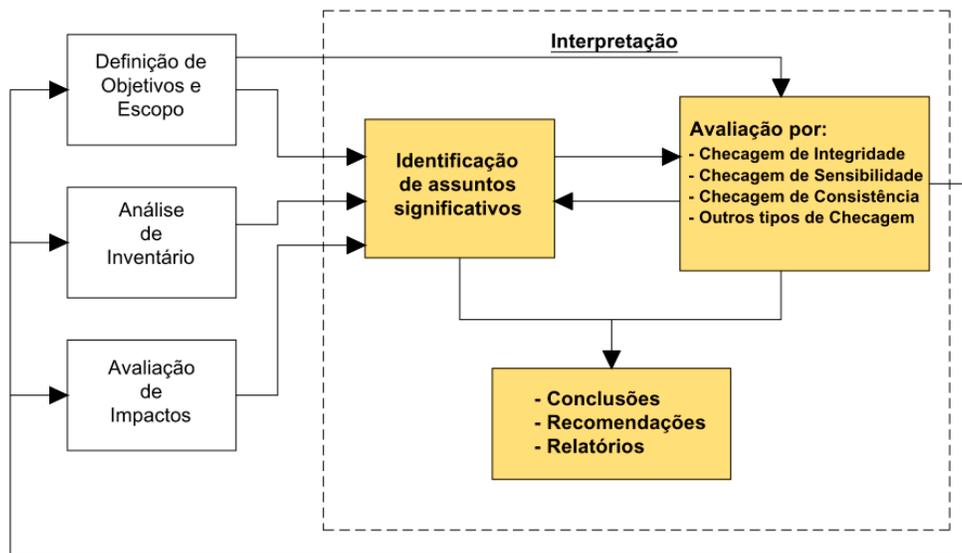


Figura 22 - Elementos da fase de Interpretação dentro da ACV (ISO 14043, 2000).

O processo de identificação deve ser realizado levando-se em consideração os objetivos e o escopo do estudo, de forma iterativa com a etapa de avaliação. O objetivo

do processo de avaliação é fazer uma síntese do estudo baseado nas fases anteriores da ACV e nos dados estruturados na primeira etapa da interpretação. Após a elaboração da ACV completa, todo o material deve ser integralizado dentro de um relatório compreensível do estudo, de forma clara e organizada. Isto, segundo Benjamin (2002), irá ajudar a se comunicar os resultados do estudo de forma confiável, completa e precisa aos outros interessados nos resultados. O referido relatório, segundo a autora, deverá apresentar o resultado, dados, métodos, hipóteses e limitações em detalhe suficiente para permitir ao leitor compreender as complexidades e as inter-relações inerentes do estudo de ACV. De acordo com a norma ISO 14043 existem três elementos básicos na interpretação: - Identificação dos temas de relevância; - Avaliações; - Conclusões, recomendações e relatório.

Uma vez que os resultados do inventário do ciclo de vida (ICV) e da avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) corroboram com a meta e escopo do estudo, deve se proceder à identificação dos pontos mais relevantes do estudo. Segundo a norma ISO 14043 a identificação de temas de relevância pode ser:

- Aspectos do inventário ou suas categorias como energia, emissões, resíduos, etc.);
- Categorias de impacto;
- Contribuições essenciais dos estágios do ciclo de vida do produto, como operações unitárias de processos ou grupo de processos como transporte, produção de energia.

Ribeiro (2003) ressalta que existem diversas técnicas para esta identificação, e os procedimentos a serem seguidos variam de caso a caso. Segue-se à identificação de temas relevantes, uma avaliação por meio da qual será determinada a confiabilidade dos resultados obtidos, devendo ser apresentada ao cliente de forma clara e compreensível. Para tanto a norma ISO 14043 recomenda que sejam considerados os seguintes elementos:

- **Análise de integridade:** Tem como objetivo verificar se todas as informações relevantes e dados necessários estão disponíveis e completos (RIBEIRO, 2003). Chehebe (1998) adverte que ao haver uma informação relevante incompleta ou não disponível devem ser tecidas considerações sobre tal fato, devendo ser realizada uma revisão na análise do inventário e na avaliação de impacto, ou quando necessário um ajuste nos objetivos e escopo do estudo.

- **Análise de sensibilidade:** Tem como objetivo descobrir, e em que extensão, pequenas mudanças nos dados influenciam o resultado final (CHEHEBE, 1998). Segundo Kulay (2004), esta avaliação deve levar em conta as hipóteses e simplificações feitas na etapa de definições, as análises de sensibilidade e incerteza já realizadas nas etapas de ICV e AICV e também a opinião de especialistas na área e experiências anteriores. Santos (2006) afirma que o uso de sensibilidade deve ser uma parte integrada da construção da árvore de processo, da descrição dos processos e da elaboração do inventário
- **Análise de consistência:** Visa o estabelecimento de um determinado grau de confiança para os resultados do estudo, de acordo com seu objetivo geral (CHEHEBE, 1998). Verifica-se, por exemplo, as diferenças de qualidade de dados entre as diferentes etapas do ciclo de vida, se houve consideração de variações temporais/espaciais, se a aplicação de alocação e estabelecimento de fronteiras foi adequada, se os elementos da avaliação de impacto estão de acordo com o estabelecido ao início, etc (RIBEIRO, 2003).

Os dois elementos seguintes da etapa de uma interpretação de uma ACV consistem do estabelecimento das conclusões e recomendações, bem como elaboração final do estudo (KULAY, 2004). A norma ISO 14043 define o atendimento destes requisitos é realizado seguindo as seguintes recomendações:

- **Conclusões:** Segundo a norma ISO 14043, devem ser estabelecidas de modo iterativo com outros elementos da etapa de interpretação, considerando sempre a sequência lógica;
- **Recomendações:** Sempre que apropriado à meta e escopo estabelecidos, devem ser feitas recomendações aos tomadores de decisão que irão utilizar os resultados da ACV (RIBEIRO, 2003). De acordo com a ISO 14.043, as recomendações devem ser justificadas e baseadas nas conclusões de modo a refletir as consequências lógicas e razoáveis destas;
- **Relatório:** Uma vez que já se tenha considerado o estudo terminado, seus resultados devem ser relatados ao público alvo (RIBEIRO, 2003). De acordo com Chehebe (1998), o tipo e o formato deste relatório devem ser definidos na fase de escopo do estudo, embora a norma ISO 14.040 (ISO, 1997) relacione alguns itens fundamentais.

Ribeiro (2003) ressalta, a título de observação final, que a norma ISO 14.040 ainda requer, após o término do estudo a condução de uma avaliação, denominada de Análise Crítica, que deve verificar o atendimento da norma pelo estudo quanto à metodologia, dados e relatório. Tanto o realizador do estudo como o modo de condução do mesmo devem ser definidos a priori, e a referida norma traz considerações a respeito dos objetivos, necessidades, processo e responsáveis por este procedimento.

Além de todas as fases para a elaboração de um estudo de ACV, a ISO 14040 dispõem sobre a necessidade da realização de análises críticas, pois segundo a norma, essa análise pode facilitar a compreensão do estudo e aumentar sua credibilidade.

A revisão crítica é uma avaliação independente do estudo de ACV obrigatória para estudos de comparação de ciclos de vida e verifica se as metodologias, dados coletados, interpretação e a exposição dos resultados estão em conformidade com as normas e se os resultados são válidos (ARGONNE, 2007).

Segundo a ISO 14040, os processos de Revisão Crítica podem ser:

- Análise crítica por especialista interno;
- Análise crítica por especialista externo;
- Análise crítica por partes interessadas.

Após a revisão crítica, o relatório final pode ser publicado e endereçado a seu público-alvo.

### **2.2.13 SOFTWARES DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA**

Em anos recentes, a ACV tem sido aceita como uma ferramenta para múltiplos usos, tais como a rotulagem ambiental, a melhoria ambiental do produto, a concepção do projeto ambiental do produto, a avaliação ambiental de processos e a definição de políticas ambientais (VIGON, B.W. & JENSEN, 1995). Em consequência disto, segundo Vigon & Jensen (1995), foram desenvolvidos softwares e bancos de dados para se conduzir ACV de forma ágil e adequada. Vários destes softwares e bancos de dados estão disponíveis para licença ou aquisição.

Benjamin (2002) acredita que a condução de uma ACV seria praticamente inviável sem o apoio dos recursos da informática. Este apoio faz-se necessário nas diferentes etapas da metodologia e com diferentes finalidades. É fácil perceber que a utilização de

um software de apoio seria conveniente e de grande valia para a execução das diversas etapas do processo de análise de ciclo de vida de um produto. A primeira é a etapa do inventário, onde o número de informações é muito extenso e o tratamento complexo, uma vez que os dados devem ser transformados para a base de cálculo escolhida, e posteriormente fazer o tratamento matemático específico para transformar em emissões equivalentes de algum aspecto potencial de poluição, identificando desta forma o impacto ambiental equivalente (avaliação de impactos).

Benjamin (2002) afirma que a utilização de uma biblioteca compatível (banco de dados) como fonte de referência e classificação, e que possua a capacidade de adaptar as informações para as condições dos processos analisados através de um pacote matemático adequado, minimize o tempo exigido para esta etapa de vital importância para a qualidade do estudo.

Os tratamentos dos aspectos associados aos impactos também podem ser viabilizados por softwares que transformam a magnitude de cada par aspecto/impacto e montam uma comparação levando todos a uma mesma variável e assim justificando uma análise comparativa de influência e porte. Desta forma, Benjamin (2002) afirma que a utilização de softwares é fundamental na interpretação de resultados, pois o mesmo facilita o refino das informações, deixando que o pesquisador possa ocupar-se com as conclusões e consequentes recomendações para a montagem de um plano de ação de acordo com os objetivos a que se propõe o estudo.

Benjamin (2002) verificou em sua pesquisa que nas etapas do inventário e avaliação de aspectos, o pacote matemático e a biblioteca são fundamentais, isto é, quanto mais completos e diversificados forem, maior será a abrangência de utilização do mesmo software de apoio com relação a diferentes escopos e metas. Entretanto, segundo a autora, é fundamental a possibilidade de inclusão de novos dados, alterando-se assim o banco de dados inicial, pois dados colhidos e transformados diferem de país para país, segundo grau de desenvolvimento, matriz energética, etc e seria interessante que o software pudesse readaptar sua biblioteca para ser compatível com estes novos dados de referência.

Até 1996 Menke e outros (1996) identificaram 37 softwares para análise do ciclo de vida nos Estados Unidos e Europa (Anexo 1). Alguns softwares foram desenvolvidos exclusivamente para indústrias específicas, e não estão disponíveis comercialmente (SANTOS, 2006).

- **Software GaBi6.0**

O Software GaBi é uma ferramenta de modelagem de avaliação do ciclo de vida. Os processos de modelagem suportados por ele estão em linha com as SETAC “*Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases*”. A sigla GaBi significa “*Ganzheitliche Bilanz*”, que em alemão significa Equilíbrio Holístico.

O software é desenvolvido pela PE International, uma empresa de software e consultoria de sustentabilidade situada em Leinfelden-Echterdingen, Alemanha, composta por um grupo de trabalho no âmbito da Avaliação do Ciclo de Vida e Engenharia do Ciclo de Vida. Original da Universidade de Stuttgart, a PE International é agora uma organização global com subsidiárias em todo o mundo, bem como uma rede de parceiros de vendas em todo o mundo.

O GaBi é a próxima geração de soluções de produtos sustentáveis com uma poderosa ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida para ser usada nas seguintes aplicações de negócios:

#### **Avaliação do Ciclo de Vida**

- Projeto para o Meio Ambiente: o desenvolvimento de produtos que atendam às normas ambientais;
- Eco eficiência: redução do uso de materiais, energia e recursos da maneira mais rentável;
- Eco -design: o desenvolvimento de produtos com menores *footprints*, como menos emissões de GHG, redução do consumo de água e resíduos;
- Cadeias de valor eficientes: melhorar a eficiência das cadeias de valor, por exemplo: design, produção, fornecedores, distribuição

#### **Custeio do Ciclo de Vida**

- Redução de custos: a concepção e otimização de produtos e processos para redução de custos;
- Relatórios do Ciclo de Vida;
- Marketing de Produto Sustentável: rótulos de sustentabilidade do produto e reclamações, Declarações Ambientais de Produtos;

- Relatórios de Sustentabilidade: comunicação ambiental e de produtos de relatórios de sustentabilidade;
- Compartilhamento de conhecimento LCA: relatórios e análises para os departamentos internos, gestão e cadeia de suprimentos;

### **Ciclo de Vida Ambiente de Trabalho**

- Fabricação Responsável: desenvolver processo de fabricação que estejam dentro das responsabilidades sociais

O programa gera resultados para análise de ciclo de vida usando claras etapas definidas, através da elaboração de modelagem simples e análises de produtos e processos. O software é detalhado abaixo:

- Banco de dados: O banco de dados do Gabi inclui cerca de 800 fluxos diferentes de matéria e energia, sendo cada fluxo pertencente a um grupo de fluxos o que permite ao usuário desenvolver um sistema hierárquico (BENJAMIN, 2002). O banco de dados contém informações dos parâmetros das fases de vida do produto. O usuário especifica a fase (categoria, tipo), através da seleção do sumário de parâmetros, pré-existentes no banco de dados do software, aplicados dentro da fase analisada. Por exemplo: fosfatos pertencem ao grupo de matérias primas; um cabo de cobre pertence ao grupo de composição e CO<sub>2</sub> pertence ao grupo de emissões para o ar.

Dez tipos de processos genéricos, os quais contêm 400 processos industriais específicos estão também incluídos no banco de dados. Os dez processos incluem (BENJAMIN, 2002): Processos industriais; Transporte; Mineração; Plantas de energia; Processos de transformação; Serviços; Limpeza; Manutenção; Recobrimento e; Processos de redução de consumo.

Os fluxos estão contidos dentro destes processos; caixas de diálogo multifuncionais permitem ao usuário acrescentar e editar dados e comentários. Além dos processos comuns provenientes de bibliografias atualizadas, o banco de dados possui dados especiais provenientes de pesquisas desenvolvidas pelo fornecedor do software, em cooperação com a indústria de diversos setores da indústria alemã.

- Interface com usuário: O usuário desenvolve o sistema de produto para análise através de uma planilha gráfica do Windows. A edição de dados e entradas desta janela é

fornecida. Além disso, conforme explicitado, o software oferece uma ajuda on-line, assim como a edição de imagens e textos.

- Métodos para cálculos de Inventário: O desenho modulado distingue seis áreas de trabalho: inventário (ex: fluxos); cenários; métodos; balanços; avaliação e ferramentas gerais. Um sistema é desenvolvido usando a planilha gráfica do programa. Sub-processos do sistema podem ser desenvolvidos em planilhas separadas, salvas, e depois combinadas no sistema. A conexão destas planilhas do software permite o fácil deslocamento entre as camadas. Planilhas são desenvolvidas por simples arraste, tipo industrial de caixa de ferramenta apresentadas na janela da planilha (Windows). Fluxos entre sistemas industriais são criados através do desenho de uma linha entre eles. Parâmetros de banco de dados podem ser vistos por qualquer tipo de planilha. O uso de editor de texto e imagem permite ao usuário mudar planilhas e especificar dados de processos (BENJAMIN, 2002). O Gabi define a estrutura do produto do usuário de acordo com as informações contidas na lista das partes do produto, através da inserção de pesos destas partes. Então, o usuário, especifica as partes e componentes, do produto estudado, através de escolha de material e escolha do processo de manufatura. Na etapa da especificação de um produto baseado na sua composição material é feita a definição de produto através de escolha de material (BENJAMIN, 2002). O software realiza a definição da fase do fim de vida utilizando opções pré-programadas de restabelecimento e menus “*Scroll-Down*”.

- Métodos de cálculos para Avaliação de Impactos: A área de avaliação do software permite o usuário definir os critérios de avaliação. Monetário, técnico e análises ecológicas são possíveis. Pesos para os critérios de valoração permitem ao usuário perceber preferências individuais (BENJAMIN, 2002). A partir de algoritmos são feitas a integralização e compatibilização dos dados do inventário, obtendo-se a avaliação dos mesmos. O método padrão para Avaliação de Impacto é subdividido em cinco estágios; seleção dos campos críticos ecológicos; classificação; determinação dos impactos correlatos, padronização, e avaliação (BENJAMIN, 2002). Campos ecológicos podem ser classificados usando índices estocados no banco de dados (ex: consumo de recursos; degradações da camada de ozônio; liberação efetiva de substâncias tóxicas, acidificação, etc).

- Apresentação dos Resultados: O software define os resultados a serem apresentados de acordo com a escolha do usuário. Estes resultados podem incluir: Nível de inventário;

Avaliação de Impacto; Resultados normalizados provenientes da Avaliação de Impacto; Balanços avaliados.

Diversas folhas de balanço estão disponíveis dentro do software, incluindo energia, e balanços avaliados. Exportar folhas de balanço para aplicativos do Excel é possível. Finalmente, os resultados são apresentados dentro de um relatório esquemático mostrando tabelas e diagramas, cujas informações podem ser exportadas para o Microsoft Word.

Benjamin (2002) adverte que ao se escolher um programa para uso, é importante além de verificar o software em si, considerar a assistência técnica que será disponibilizada pelo fornecedor, como updates de bancos de dados com frequência regular e custo razoável, além de apoio para a fase de aprendizagem e dúvidas no manuseio do aplicativo. Segundo Benjamin (2002), o software GaBi, ao lado do Sima Pró e Team™, estão entre os melhores softwares do mercado, no que diz respeito à análise de ciclo de vida. Entretanto, a autora ressalta que não existe nada universalmente aceito para requisitos óbvios que compõem a qualidade de um software, deixando claro que as necessidades variam com cada usuário ou tomador de decisão, de acordo com suas expectativas.

### **2.3 ACV NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UNIDADES DE PRODUÇÃO DE PRODUTOS FÓSSEIS**

A metodologia de ACV ainda não tomou grandes proporções dentro da indústria de E&P sendo uma abordagem mais recente. Porém, alguns estudos de caso aplicados direta ou indiretamente a esse segmento da cadeia de produtos fósseis já foram elaborados.

O estudo mais antigo encontrado foi o de McCann e Magee 1999 que busca fornecer o primeiro passo para a gestão da relação custo benefício das emissões de GEE, identificando fontes dessas emissões no ciclo de vida do petróleo bruto. No trabalho “Emissões de GEE a partir de óleo cru”, as emissões de GEE foram estimadas para cada fase do ciclo de vida de sete tipos de petróleo bruto. Conclui-se neste estudo que as preocupações que vão desde a alocação de fatores de emissões indicam que maiores refinamentos são necessários para que a técnica possa ser usada para atribuir valores monetários para o comércio de emissões.

Na análise dos estudos que fazem referência a essa metodologia dentro da E&P, as fases de Exploração e Desenvolvimento foram as mais discutidas. No trabalho de Ulrich

e Franz (2002) é debatido a utilização da ACV para identificar e controlar os aspectos ambientais de projetos de perfuração profunda com o propósito de definir objetivos e metas ambientais usando padrões ISO ACV. Conclui-se que os fluidos de perfuração e rejeitos de perfuração são os maiores contribuintes para os impactos ambientais.

O trabalho de Paulsen *et al.* (2003) aborda a disposição final dos resíduos de perfuração. Neste, utiliza-se a ACV dentro das restrições legislativas e regulamentares para avaliar riscos e levantar considerações econômicas para identificar opções de tecnologia preferíveis para a disposição de resíduos de perfuração de operações offshore.

Paulsen et al (2006) discute a gestão integrada de efluentes líquidos e resíduos provenientes da atividade de perfuração offshore. O estudo discursa o envolvimento da cadeia de fornecedores de compras através do ciclo de vida das operações, integrando fluidos e gestão de resíduos. Neste, a abordagem de ciclo de vida é aplicada como uma ferramenta para minimizar custos e maximizar o desempenho ambiental. Seus resultados demonstram um cenário de aumento significativo da reciclagem de fluidos de perfuração, redução dos resíduos de perfuração, e redução de custos.

Garcia e Kalipa (2006) aplica a ACV na Gestão dos Rejeitos de Perfuração com o objeto de avaliar o uso da energia e das emissões atmosféricas dos componentes na gestão de resíduos de perfuração e, assim, realizar análises comparativas em vários cenários.

Souza (2012) aplica a metodologia para a análise comparativa de fluidos de perfuração utilizando o *Software* Umberto. Neste, utiliza a ACV para comparar os impactos dos fluidos a base de água, óleo e sintética. O resultado desse estudo mostrou que os fluidos a base sintética são os que impactam menos durante todo ciclo de vida.

Dentro da fase de produção foram encontrados apenas dois estudos de caso. Vlasopoulos *et al.*(2006) faz uso da ACV para avaliar as tecnologias de tratamento de água de produção e assim ser capaz de levantar os impactos ambientais dessas. Neste trabalho é investigado o impacto ambiental de vinte tecnologias disponíveis para tratamento de extensivos volumes de água de produção durante a produção de óleo e gás.

O trabalho de Campos (2012) aborda a ACV dentro do processamento primário de petróleo. Este utiliza o software Simapro com a metodologia Econindicator 99, baseada em critério de *endpoints*, para avaliar o processamento primário de uma planta de processamento.

## **3. ESTUDO DE CASO**

Um estudo de unidades nacionais do tipo FPSO em atividade foi efetuado na análise bibliográfica em busca de mapear um cenário das tecnologias de exploração utilizadas. A partir desse, foi possível gerar um modelo tecnológico genérico que abrangesse uma pluralidade de possibilidades de sistemas de processamento do escoamento multifásico.

Partindo do conceito de Análise do Ciclo de Vida, foi realizada uma caracterização e quantificação de fluxos energéticos e materiais consumidos e descartados para o meio ambiente desse modelo. Para a elaboração do projeto foram levados em conta todos os parâmetros obtidos nos estudos bibliográficos em relação as unidades offshore e à ACV.

A ACV foi realizada de acordo com as recomendações das normas ISO vigentes. A extensão do estudo foi reduzida e não detalhada, já que não foram realizadas visitas para coleta de dados em plantas de processamento offshore.

### **3.1 OBJETIVOS**

O propósito deste estudo é construir um modelo tecnológico a partir da identificação e análise dos processos unitários da planta de processamento primário de petróleo offshore. Com esse modelo desenvolvido, ser capaz de simular plataformas do tipo FPSO com as tecnologias existentes e identificar em quais etapas do ciclo as emissões de poluentes para o ambiente são mais significativas através da metodologia da ACV.

Os resultados poderão permitir uma maior compreensão do sistema dentro do segmento de E&P a fim de aumentar a eficiência no uso de matérias-primas, água, energia e minimizar resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas vinculadas ao processamento de óleo e gás natural em unidade desse tipo.

### **3.2 ESCOPO**

#### **3.2.1 SISTEMA DE PRODUTO**

O sistema em questão é constituído de um modelo de uma planta de processamento primário em uma plataforma do tipo FPSO em Cenário II de produção ilustrado na Figura 23. Nele, cada módulo dos tratamentos principais, foram separados em processos vinculados tanto diretamente ao processo produtivo do óleo e do gás, quanto

indiretamente. Esses processos são capazes de reproduzir as principais técnicas e equipamentos para a adequação do óleo, gás, água e seus sistemas auxiliares (energia e calor gerados offshore) aos níveis internacionais de exigência.

Os processos vinculados diretamente a produção foram denominados Processos Internos. Esses são sistemas instalados e operados dentro da plataforma e compõe a configuração física da FPSO. Os vinculados indiretamente foram denominados de Processos Externos à FPSO e são processos que englobam a cadeia produtiva de cada elemento auxiliar e necessário para a operação da FPSO. Cada Processo Externo tem sua participação em um determinado Processo Interno. A produção de Dietileno Glicol, por exemplo, é um Processo Externo e necessário para o Tratamento de Gás. A produção de Diesel é uma Processo Externo e necessário para a planta de Geração de Energia.

É de suma importância pontuar que todos os processos externos e fluxos dos processos internos foram retirados do banco de dados do Software GaBi. Assim, os dados secundários obtidos no estudo bibliográfico apenas quantificaram os fluxos retirados desse banco de dados. Este cuidado é importante, pois ao criar fluxos extra-software compromete-se o modelo de avaliação adotado, uma vez que correntes criadas pelo usuário não contém os pesos pré-definidos referentes às categoriais de impacto adotadas por um determinado modelo de avaliação.

A apresentação do fluxograma do processo está na Figura 23 e é importante para a transparência do estudo, uma vez que explicita as entradas e saídas das correntes em cada etapa do processo. Os dados referentes a este item compreenderam a identificação dos aspectos ambientais de todos os subsistemas envolvidos neste estudo.

Tabela 5 - Identificação dos Processos Internos e Externos que foram quantificados.

Processos Internos	Processos Externos
Separação	Tratamento de Resíduos Sólidos
Tratamento de Óleo	Água Marinha para processamento
Tratamento de Gás	Produção de Sulfato de Amônio
Tratamento de Água	Produção de Metanol
Geração de Energia	Produção de Dietileno Glicol
Queima em tocha	Produção de Etanol
Perda de Calor	Produção de Etileno Glicol
	Produção de Xileno
	Produção de Gasolina
	Produção de Diesel
	Produção de Óleo Combustível leve e pesado
	Navios de Carga
	Caminhões de Carga

### Modelo de Processamento Offshore

Plano de processo GaBi: Mass [kg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

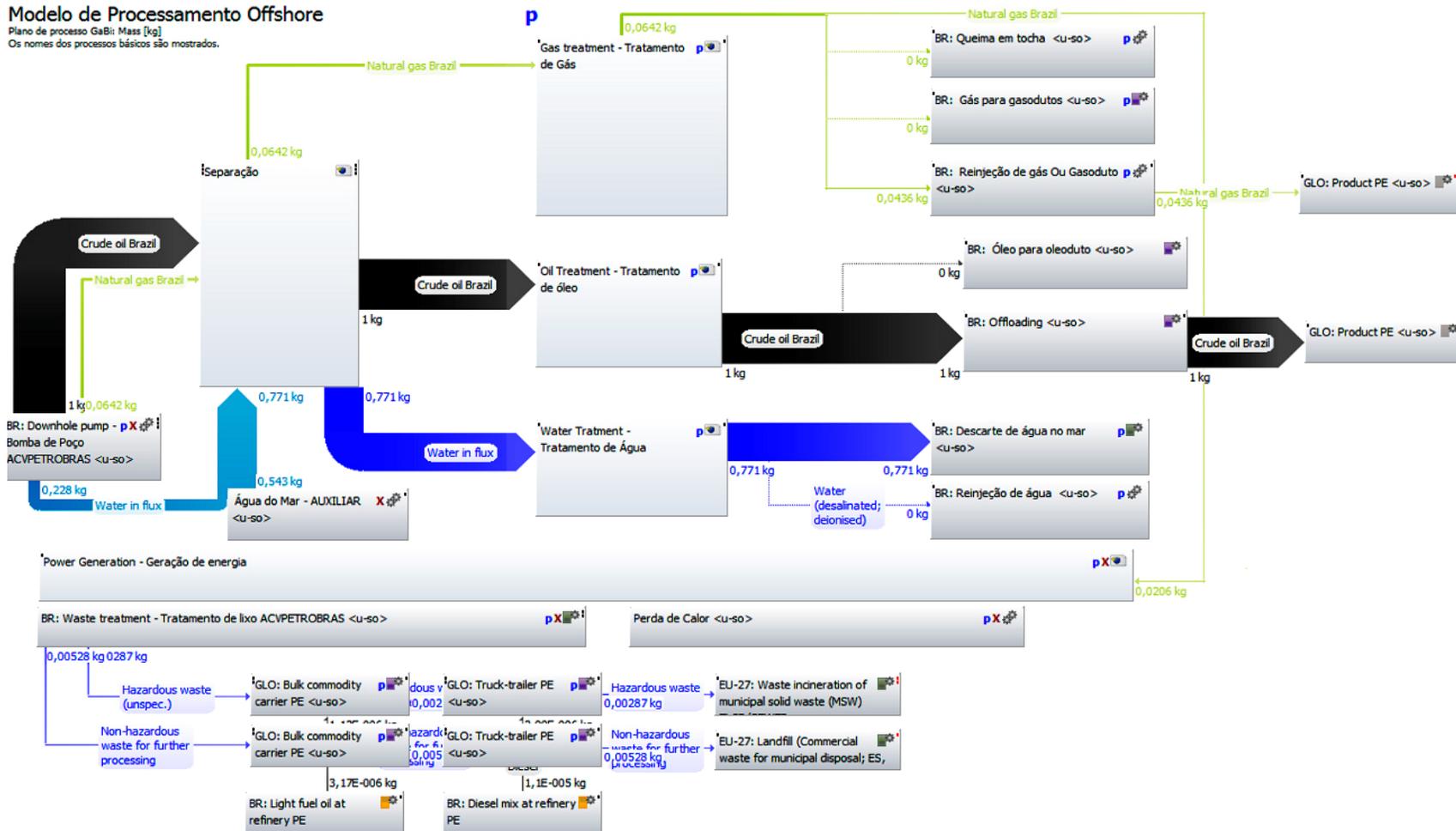


Figura 23 - Modelo tecnológico genérico construído no Software GaBi6.0.

### 3.2.2 FRONTEIRA DO SISTEMA DE PRODUTO

A fronteira de estudo se limita à planta de tratamento de petróleo. Foram quantificados apenas os dados de entrada e saída do sistema de processamento, considerando também os impactos da geração e trato dos efluentes.

O trabalho realizado é uma análise de portão a portão (*gate to gate*). Delimitando a fronteira do sistema à contemplação da fase processamento dentro do segmento *upstream* de E&P. Os impactos referentes a outras fases do ciclo como: prospecção geofísica, perfuração, completação, construção da unidade exploradora, transferências para navio aliviador e gasodutos, abandono e descarte final dos equipamentos não foram contabilizados.

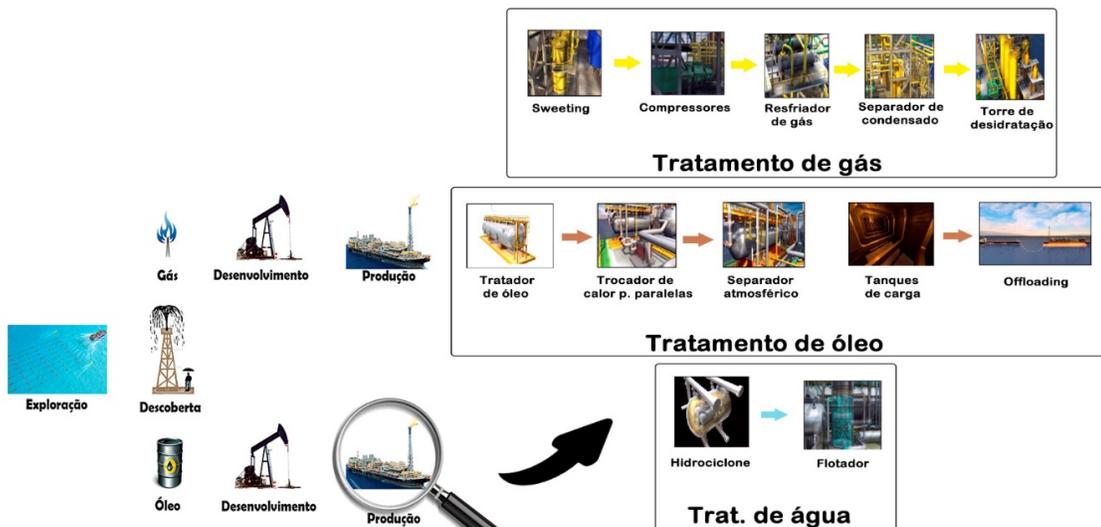


Figura 24 - Ilustração da planta de processamento primária que delimita a Fronteira do sistema de produto.

### 3.2.3 UNIDADE FUNCIONAL

Foi estabelecida a unidade funcional de 01 (um) kg de petróleo tratado. Essa unidade serviu como fator para o cálculo dos dados de entrada e saída do sistema dos principais processos unitários abordados.

### 3.2.4 PROCEDIMENTOS DE ALOCAÇÃO

Conforme ressalta Kulay (2004), a aplicação de procedimentos de alocação só terá sentido, caso as unidades de processo do sistema em estudo gerem mais de um produto

(os subprodutos) ao longo de seu desenvolvimento. Ressalta-se que as saídas somente serão consideradas subprodutos, caso haja valor comercial para as mesmas. No caso da planta de processamento o procedimento de alocação realizado foi baseado no critério mássico para os três efluentes gerados, óleo, gás e água.

### **3.2.5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO**

Adotou-se um perfil de impacto constituído por apontadores do tipo midpoint para prover um quadro mais conciso do desempenho ambiental da avaliação dos produtos em estudo. Dentre os modelos existentes foi selecionado aquele com enfoque em categorias de impacto intermediárias, que considera os impactos a partir do ponto primário da intervenção ambiental. Após avaliar alguns modelos disponíveis dentro do software GaBi, decidiu-se optar pelo método CML 2001, proposto pelos pesquisadores do *Centre of Environmental Science - CML*, da Universidade de Leiden – Holanda. As categorias de impacto ambiental foram selecionadas com o objetivo de representar adequadamente o perfil ambiental. Estas categorias são:

- Potencial de Depleção Abiótica (elementos e fósfil) (PDA);
- Potencial de Acidificação (PA);
- Potencial de Eutrofização (PE);
- Potencial de Ecotoxicidade Aquática (água doce e marinha);
- Potencial de Ecotoxicidade Humana;
- Potencial de Ecotoxicidade Terrestre;
- Potencial de Aquecimento Global (PAG 100 anos);
- Potencial de Redução da Camada de Ozônio (PRCO);
- Potencial de Criação de Oxidantes Fotoquímicos (PCOF).

Os indicadores foram normalizados em relação aos totais de alguns processos em análise, com o intuito de maximizar a comparabilidade dos dados das diferentes categorias de impacto.

### **3.2.6 REQUISITOS DA QUALIDADE DE DADOS**

Todos os dados utilizados para a construção do ICV do modelo desenvolvido foram dados secundários provenientes de teses e artigos acadêmicos, relatórios quantitativos de desempenho de empresas e Estudos de Impactos Ambientais (EIA) disponíveis ao público. Foram tomadas as precauções necessárias quanto a confiabilidade e

representatividade dos dados de acordo com os critérios de qualidade da norma ISO 14040.

Devido à dificuldade de obtenção de dados concisos de uma única unidade de produção, foi necessário se extrair informações de diferentes estudos em diferentes anos. Portanto, o modelo em estudo é uma simulação aproximada de um modelo genérico real. Para se ter uma representatividade exata do processo, é necessário acrescentar ao modelo dados primários de uma unidade existente.

### **3.3 ICV DO PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO *OFFSHORE***

A modelagem em estudo foi realizada consultando-se as fontes supracitadas e o banco de dados do software Gabi 6.0 para os dados não obtidos. Entretanto, como não houve a coleta de dados primários de plantas *offshore* e ainda por se tratar de um processo bastante complexo, variável e sigiloso segundo diversos parâmetros, foram considerados os principais dados que por pressuposição e revisão bibliográfica são considerados os que mais afetam o meio ambiente.

A construção do ciclo de vida incluiu os processos produtivos vinculados direta e indiretamente ao produto final, bem como os processos de transporte (marítimo e rodoviário). Ressalta-se ainda, que não foi possível a obtenção integral dos dados do processo. Em alguns sistemas o arranjo de equipamentos é descrito e essa estrutura existe na modelagem computacional, porém, por falta de informação, não foi quantificada.

Os dados quantificam informações relacionadas aos fluxos mássicos requeridos pelas operações e aos principais poluentes gerados. Para uma melhor compreensão das etapas (processos) do ciclo de processamento (Figura 23) será feita a seguir a individualização descritiva do modelo tecnológico genérico desenvolvido e de seus subsistemas. Em cada subsistema será pontuado com mais detalhes os dados de entrada e saída considerados para o ICV:

- Emissões para o ar;
- Emissões para a água;
- Uso de produtos químicos e combustíveis;
- Resíduos sólidos gerados;
- Calor perdido;
- Descarte de água no mar.

Em seguida será apresentado o ICV completo do estudo.

### 3.3.1 PROCESSOS INTERNOS

- Separação: Um conjunto de diferentes tecnologias de separadores foi idealizado para simular plataformas distintas. Nesse modelo desenvolvido estão presentes: Separadores de testes, separadores de produção trifásicos e separadores de produção bifásicos horizontais de baixa pressão e alta pressão. Para a simulação foi utilizado o Separador trifásico.



Figura 25 - Plano Separação construído no software GaBi6.0

-Tratamento de Óleo: O Fluxograma do plano de Tratamento de Óleo e dos equipamentos que o constituem está ilustrado na Figura 26.

- Aquecedor: Fornece calor para vários processos;
- Venting: Liberação controlada de gases não queimados direto para atmosfera devido a lançamentos de rotina ou de emergência. Os principais poluentes emitidos são os COV, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>;
- Bombas: Atuam de forma pneumática. A maior parte do gás utilizada para seu funcionamento é liberada diretamente para a atmosfera. Os poluentes emitidos são COV, THC, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.
- Conectores e Flanges;
- Tratamento Eletrostático: Um sistema composto por um Pré-tratador e um Tratador eletrostático integra o modelo;

- Controlador e armazenador de nível e pressão: Dispositivos que controlam a pressão e os níveis de líquido nos vasos e nas linhas de fluxo. Unidades concebidas para abrir ou fechar uma válvula quando uma pressão predefinida ou nível de líquido é atingido. Os poluentes emitidos são COV, THC, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>;
- Armazenamento do óleo: Libera emissões atmosféricas, principalmente de COV pela volatilização do óleo tratado armazenado nos tanques. Também é perdida significativa quantidade de calor para o ambiente pela falta de isolamento dos tanques, pela não recuperação de condensados e por procedimentos inadequados.

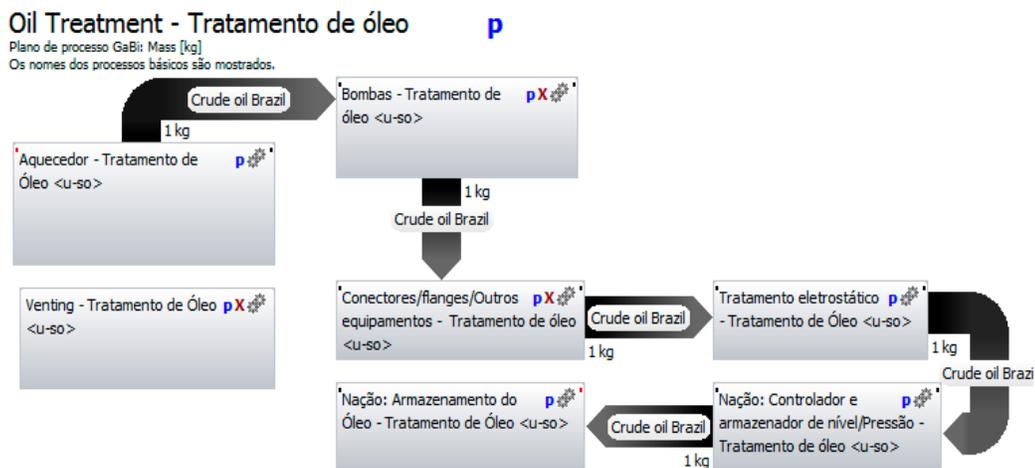


Figura 26 - Plano Tratamento de Óleo construído no software GaBi6.0.

-Tratamento de Gás: O Fluxograma do plano de Tratamento de Óleo e dos equipamentos que o constituem está ilustrado na Figura 27.

- Bombas: A maior parte do gás utilizada para seu funcionamento é liberada diretamente para a atmosfera. Os poluentes são COV, THC, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>;
- Conectores e Flanges;
- Desidratador: Sistema de desidratação do gás por peneiras moleculares ou uso de uma torre de absorção de água utilizando o composto a base de glicol como fluido de absorção. Os poluentes emitidos nesse processo são os COV<sub>s</sub>;
- Sweeting: Sistema de remoção de H<sub>2</sub>S através da reação com leito fixo a base de óxidos metálicos ou uso de reação em contra corrente de gás com Monoetanolaminas (MEA) ou Dethanolaminas (DEA);
- Remoção de CO<sub>2</sub>: Processo de permeação através de membranas.

- Compressores: A compressão do gás é realizada por um arranjo composto por: compressão principal (três estágios de compressão), compressão *booster* e o conjunto de vasos depuradores.
- Utilização: O gás descontaminado poderá ser utilizado na unidade como gás combustível. O excedente de gás é encaminhado para sistema de compressão de exportação e/ou pode ser utilizado para *gas-lift*. O gás descontaminado também poderá ser parcialmente ou totalmente encaminhado para o sistema de compressão de injeção necessária para a injeção do gás em reservatório.

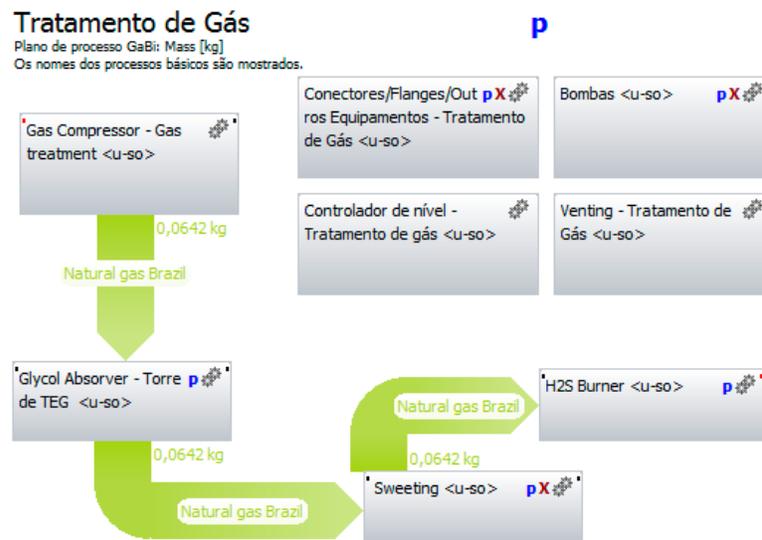


Figura 27 - Plano Tratamento de Gás construído no software GaBi6.0.

-Tratamento de Água: O Fluxograma do plano de Tratamento de Água e dos equipamentos que o constituem está ilustrado na Figura 28. Esse plano é composto por:

- Desalinizador;
- Filtro;
- Desareador.

A composição da água processada após os tratamentos é encontrada no processo de descarte de água produzida para a água do mar e apresenta os compostos inorgânicos, orgânicos e metais pesados qualificados na Tabela 6.

## Tratamento de Água

Plano de processo GaBi: Mass [kg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

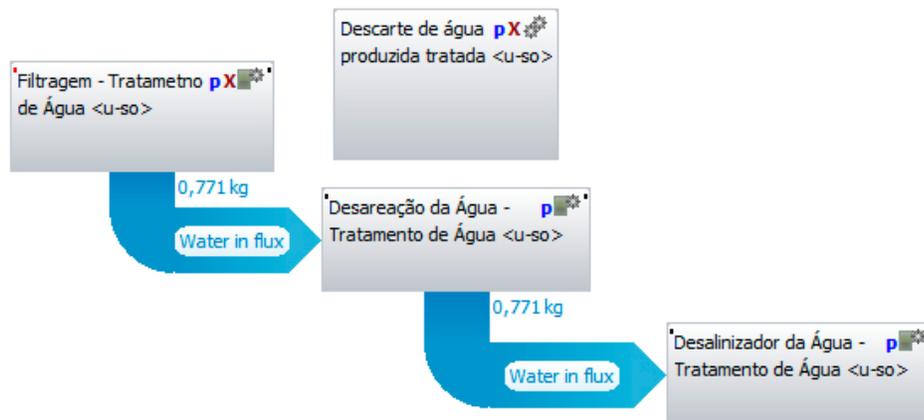


Figura 28 - Plano Tratamento de Água construído no software GaBi6.0.

Tabela 6 - Compostos presentes na composição da água descartada no mar.

Compostos Inorgânicos	Compostos Orgânicos	Radioisótopos
Arsênio	HPAs	Radio -226
Bário	Benzeno	Radio -228
Cádmio	Etilbenzeno	
Cromo	Tolueno	
Cobre	Xilenos	
Ferro	BTEX	
Manganês	Fenóis	
Níquel	Óleos e graxas	
Chumbo		
Vanádio		
Zinco		
Mercúrio		

- Geração de Energia: O plano é composto por equipamentos que suprem a energia do plano de Tratamento de Gás e de Óleo. Toda a energia elétrica necessária para o processamento dos produtos finais é gerada na unidade de produção. Os combustíveis necessários para esses equipamentos chegam à FPSO através de navios. A Figura 29 ilustra esse plano.

- Turbina: A turbina a gás natural ou a diesel é um motor de combustão interna, que opera com movimento rotativo, sendo usadas principalmente para ativar o funcionamento dos compressores (BOYER e BRODNAX 1996 apud MMS,

2007b). Os poluentes emitidos a partir de turbinas de gás natural incluem COV, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>

- Motor: Motores a gás natural ou a diesel são usados no PPP para colocar em funcionamento geradores, bombas e compressores. Estes poluentes incluem: COV, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP, CO e THC, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> (TCEQ, 2010).
- Caldeira, aquecedores: fornecem calor e vapor para vários processos, como a geração de eletricidade, o desidratador de glicol e a dessulfurização com amina.



Figura 29 - Plano Geração de Energia construído no software GaBi6.0.

Os parâmetros de potência e eficiência de cada um desses equipamentos dependerá da quantidade de óleo e gás processados. Esses são definidos para cada simulação em particular.

- Queima em tocha: Na indústria *offshore* as rotinas de queima zero na produção de gás no *flare* já são comuns atualmente. As queimas são autorizadas exceto em casos especiais de emergência ou falha de equipamentos. O cenário descreve uma produção

sem queima excedentes, aonde todo o gás natural é utilizado na planta de geração de energia com um pequeno percentual de queima em situações de produção excedente e necessidade de alívio do sistema. Os principais poluentes emitidos no processo de queima em tocha são o SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, MP, COV e HTP (TCEQ, 2010).

### 3.3.2 PROCESSOS EXTERNOS

- Produtos Químicos: A seleção dos produtos químicos mais adequados para um dado sistema é função de muitos fatores técnicos e econômicos, tais como tipo de óleo, vazão de água e óleo, quantidade de água livre, temperatura de tratamento, salinidade, destino a ser dado à água de produção, instalações necessárias e etc. A descrição mais pormenorizada das unidades em relação aos produtos químicos foi do FPSO P-62. A seguir serão descritos os produtos químicos e seus componentes utilizados na simulação realizada.

- Tratamento de Óleo: No tratamento de óleo são utilizados os produtos químicos citados na Tabela 7.

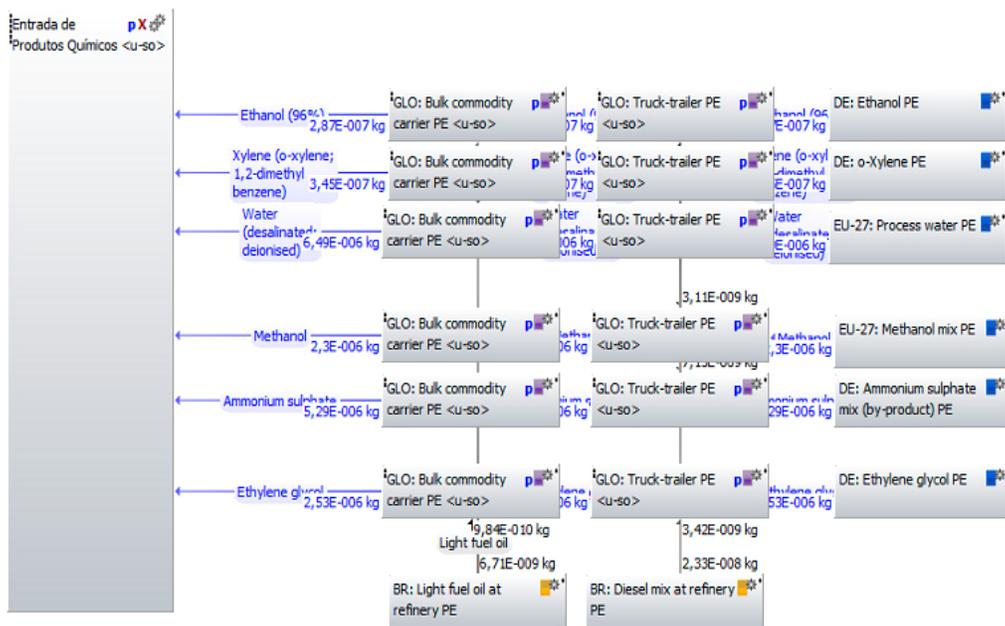


Figura 30 - Processos Externos dentro do plano de Tratamento de Óleo no GaBi6.0.

Tabela 7 - Produtos químicos e seus componentes do Tratamento de Óleo

Produto Químico	Componente Químico
Antiespumante (Polan P JJ Sol (Poland))	Silicone 26 a 30% Solvente 70%
Desemulsificante (Dissolvan 040(Clariant).)	Etanol 25% Xileno 30% Água 45%
Inibidor de incrustação (POLAN IDOS 150 - SCALETREAT DF 8144)	Sulfato de Amônio 38% Etileno glicol 22% Água 40%
Inibidor de Corrosão	Metanol 50% Sulfato de Amônio 20% Água 30%

- Tratamento de Gás: No tratamento de Gás são utilizados os produtos químicos citados na Tabela 8.

Tabela 8 - Produtos químicos e seus componentes do Tratamento de Gás.

Produto Químico	Componente Químico
TEG	Dietileno Glicol
Inibidor de Corrosão	Metanol 50% Sulfato de Amônio 20% Água 30%

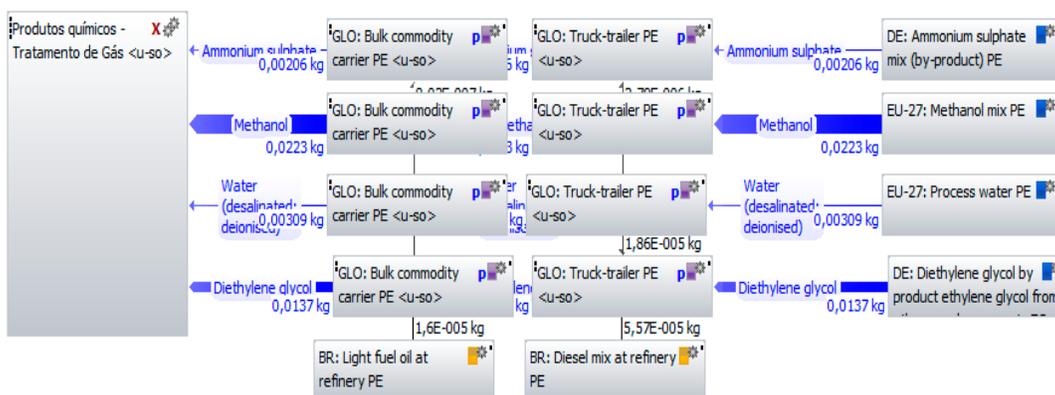


Figura 31 - Processos Externos dentro do plano de Tratamento de Gás no GaBi6.0.

- Combustíveis: Os combustíveis utilizados na planta de geração de energia foram o Diesel, a Gasolina, o Óleo combustível pesado e o Gás Natural. Além desses combustíveis estão contabilizados no desempenho ambiental os combustíveis utilizados para abastecer as unidades de transporte (Navio e Caminhão) para uma distância média estipulada.

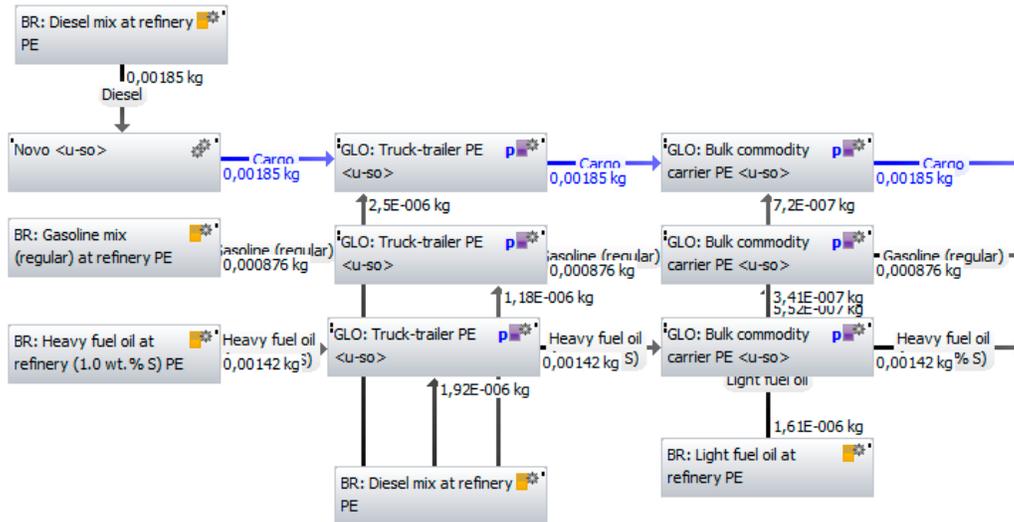


Figura 32 - Processos da cadeia de produção dos combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia.

- Resíduos Sólidos: O tratamento de resíduos sólidos envolve resíduos não perigosos (Classe I) e resíduos perigosos (Classe II A e B) como pode ser visto na Figura 33. Estes são produzidos na unidade de exploração e tratados em terra por incineração (Resíduos perigosos) ou deposição em aterro municipal (resíduos não perigosos). Na contabilização dos dados de ICV esses resíduos são caracterizados e quantificados.

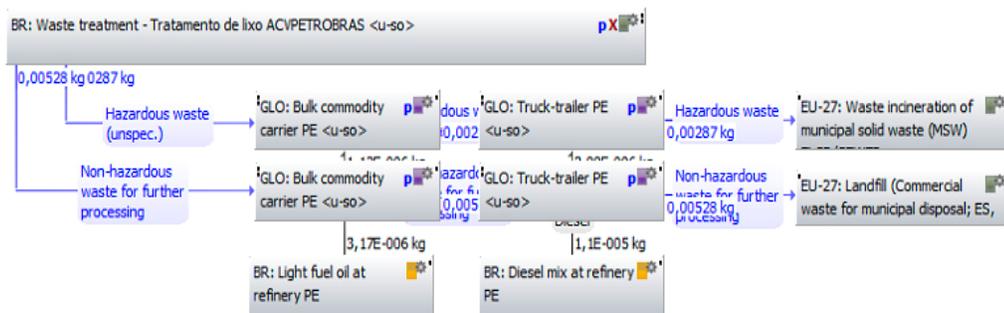


Figura 33 - Processos de Tratamento de Resíduos Sólidos construído no software GaBi6.0.

Após concretizada a estrutura física do modelo e assimilada todas as tecnologias contidas nesse conjunto de processos, a contabilização dos dados do inventário de ciclo de vida pôde ser realizada.

### **3.3.3 CONTABILIZAÇÃO DOS DADOS**

#### **- Emissões para o Ar:**

Após as etapas envolvidas no processo de produção de petróleo bem caracterizadas e descritas em relação aos seus subsistemas e seus principais insumos e emissões geradas, é possível se quantificar o inventário do ciclo de vida. Para a confecção das emissões atmosféricas foram utilizadas duas fontes de fatores de emissão:

- **MMS** (*U.S. Department of the Interior - Minerals Management Service*) relativos à produção *offshore* de petróleo do Golfo do México no ano de 2005;
- Relatório da **TCEQ** (*Texas Commission on Environmental Quality*) relativo à produção de petróleo no estado americano do Texas no ano de 2008, que baseou-se no primeiro relatório citado para a sua elaboração.

Os dois trabalhos fornecem os fatores de emissão atmosférica relativos a cada equipamento da planta de PPP, baseados em outros estudos, como os apresentados pela US EPA no documento AP-42. As duas fontes também foram tratadas no trabalho de Campos (2012), porém com uma metodologia de avaliação diferente (Ecoindicator 99) e sem distribuir os fatores nos processos da unidade de produção. Após calculados para a unidade funcional de 1 kg de petróleo produzido e normalizados quanto ao total em cada etapa do estudo, todos os fatores de emissão das correntes de entrada e saída utilizados no estudo foram correlacionados com os fluxos existentes na base de dados do GaBi6.0.

#### **- Emissões para a Água:**

A partir do estudo das concentrações médias das principais substâncias presentes na água de produção do FPSO Marlim Sul na Bacia de Campos (CAMPOS, 2012) foram estabelecidos fatores de emissão para cada composto. Normalizou-se, para um quilograma de óleo processado, o valor total de cada composto a partir do total de óleo produzido em um ano da unidade de produção.

#### **- Produtos Químicos:**

A caracterização da atividade contida no relatório de impacto ambiental da plataforma P-62 (PETROBRAS, 2010a) descreve a entrada de produtos químicos indicando qual o nome comercial de cada um desses. Uma pesquisa detalhada desses

produtos foi feita identificando a proporção dos componentes químicos pertencentes a cada um deles em fichas de licenciamentos ambientais. Uma correlação dos fluxos da base de dados do GaBi com esses componentes foi então estruturada e pode-se assim caracterizar a entrada de químicos para o processamento.

A quantidade de produtos químicos relativos a um quilograma de petróleo processado foi calculada a partir do valor total desses para a produção de um ano estimado por HANSEN e DAVIES e encontrados no trabalho de Campos, 2012.

**- Combustíveis:**

Os valores para a quantidade de combustíveis utilizados foram retirados da base de dados do Software GaBi do processo “*Crude Oil, at production*” e “*Natural gas, at extraction site*”. Esses valores foram adaptados para a planta de geração de energia estruturada e para a unidade funcional adotada.

**- Resíduos Sólidos:**

Para a quantificação de resíduos sólidos foi utilizado o trabalho de Oliveira, 2006. Neste é apresentado o levantamento do quantitativo de resíduos gerados na Bacia de Campos no período de janeiro a julho de 2005, realizado por meio do sistema de gerenciamento de resíduos da Petrobras. Neste quantitativo, está incluída a geração de resíduos da plataforma de produção P-40, plataforma que é utilizada com referência pela sua representatividade na Bacia de Campos. Os cálculos necessários foram feitos para se obter fatores de emissão para um quilograma de óleo processado para cada resíduo. A classe a que cada resíduo pertencia foi estabelecida através da NBR 10004 e vinculada aos dois fluxos de resíduos encontrados no GaBi6.0, perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II A e B).

A seguir o ICV é apresentado em tabelas para todos os Processos estabelecidos.

**3.3.3.1 TRATAMENTO DE ÓLEO**

Tabela 9 - Entrada de produtos químicos no Tratamento de Óleo para 1 kg de óleo processado.

Produto Químico	Componente Químico	(kg/kg de óleo)
Antiespumante (Polan P JJ Sol (Poland))	Silicone 26 a 30%	2,30E-06
	Solvente 70%	
Desemulsificante (Dissolvan 040(Clariant).)	Etanol 25%	2,87E-07
	Xileno 30%	3,45E-07
	Água 45%	5,17E-07
Inibidor de incrustação (POLAN IDOS 150 - SCALETREAT DF 8144)	Sulfato de Amônio 38%	4,37E-06
	Etileno glicol 22%	2,53E-06
	Água 40%	4,60E-06

Inibidor de Corrosão	Metanol 50%	2,30E-06
	Sulfato de Amônio 20%	9,20E-07
	Água 30%	1,38E-06

Tabela 10 - Emissões atmosféricas dos Processos Internos do Tratamento de Óleo.

Equipamentos Offshore	Fatores de Emissão Tratamento de Óleo (kg/kg de óleo)			
	COV	THC	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Bombas	1,83E-04	-	2,89E-04	-
Conectores (Fugitivos)	7,66E-06	-	5,54E-05	-
Flanges (Fugitivos)	3,87E-06	-	2,47E-05	-
Outros Equipamentos	6,07E-04	-	7,75E-04	-
Válvulas	8,82E-05	-	1,13E-04	-
Bombas Pneumáticas	2,33E-06	5,76E-05	5,09E-05	2,21E-06
Controlador de Nível/Pressão	1,20E-07	2,97E-06	2,63E-06	1,15E-07
Armazenamento de Nível/Pressão	8,95E-07	-	-	-
Armazenamento de Óleo	1,35E-05	-	-	-
Venting	6,75E-05	-	4,86E-04	5,71E-06

### 3.3.3.2 TRATAMENTO DE GÁS

Tabela 11 - ICV dos produtos químicos vinculados com o processo de Tratamento de Gás.

Produto Químico	Componente Químico	(kg / kg de óleo)
TEG	Dietileno Glicol	1,37E-02
Inibidor de Corrosão	Metanol 50%	5,15E-03
	Sulfato de Amônio 20%	2,06E-03
	Água 30%	3,09E-03
Metanol		1,72E-02

Tabela 12 - ICV das emissões atmosféricas dos Processos Internos do Tratamento de Gás.

Equipamentos Offshore	Fatores de Emissão Tratamento de Gás (kg/kg de óleo)				
	SO <sub>2</sub>	COV	THC	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Sweetening (amina)	1,73E-07	-	-	-	-
Cent Dry (Fugitivos)	-	1,01E-05	-	8,95E-05	-
Conectores (Fugitivos)	-	7,27E-06	-	1,41E-05	-
Cent Pack (Fugitivos)	-	7,75E-05	-	4,15E-04	-
Cent Wet (Fugitivos)	-	8,09E-06	-	5,12E-05	-
Flanges (Fugitivos)	-	2,98E-06	-	3,31E-05	-
Open-Ended Lines (Fugitivos)	-	8,59E-05	-	5,96E-05	-
Outros Equipamentos	-	4,29E-04	-	1,69E-03	-
Bombas (Fugitivos)	-	1,11E-04	-	6,32E-04	-
Válvulas (Fugitivos)	-	6,94E-05	-	1,10E-05	-

Desidratador de glicol (TEG)	-	3,95E-05	-	-	-
Bombas pneumáticas	-	8,31E-07	2,07E-05	1,83E-05	7,95E-07
Controlador de nível/pressão	-	1,97E-07	4,90E-06	4,33E-06	1,88E-07
Armazenamento de Condensado	-	1,39E-06	-	-	-
Armazenamento de Óleo	-	6,80E-08	-	-	-
Venting	-	1,53E-05	-	3,33E-01	8,77E-03

### 3.3.3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

Tabela 13 - Entrada de combustíveis vinculados à Planta de Geração de Energia.

<b>Combustível</b>	<b>(kg / kg de óleo)</b>
Diesel	1,85E-03
Gasolina	8,76E-04
Óleo combustível pesado	1,42E-03

Tabela 14 - Emissões atmosféricas dos Processos Internos da Planta de Geração de Energia.

<b>Trat. De Óleo (kg/kg de óleo)</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>MP10</b>	<b>MP2.5</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
Caldeiras/Aquecedores/Queimadores	3,09E-07	1,18E-07	7,67E-09	-	2,56E-09
Motor Gás Natural	1,69E-03	1,09E-03	4,58E-06	4,58E-06	2,84E-07
	<b>COV</b>	<b>THC</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
Caldeiras/Aquecedores/Queimadores	2,05E-08	4,04E-08	7,67E-09	2,56E-09	4,42E-04
Motor Gás Natural	1,44E-05	1,73E-04	1,11E-04	5,29E-02	-
<b>Trat. De Gás (kg/kg de óleo)</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>MP10</b>	<b>MP2.5</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
Caldeiras/Aquecedores/Queimadores	3,55E-06	4,22E-06	8,02E-08	8,02E-08	2,53E-08
Motor	9,72E-04	6,26E-04	2,62E-06	2,62E-06	1,62E-07
Turbina a gás Natural	1,24E-05	4,83E-05	2,87E-07	2,87E-07	5,29E-07
	<b>COV</b>	<b>THC</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
Caldeiras/Aquecedores/Queimadores	2,32E-07	4,64E-07	9,71E-08	2,70E-08	5,06E-03
Motor	8,27E-06	9,91E-06	6,39E-05	-	3,06E-02
Turbina a gás Natural	3,17E-07	-	1,30E-06	4,53E-07	1,66E-02

Tabela 15 - Calor perdido nos processos da unidade de produção.

<b>Calor perdido</b>	<b>KJ/ kg de Óleo</b>
Calor perdido para a água de produção	2,04E+01
Calor perdido pelo condensado	5,13E+00
Calor perdido pelo armazenamento	2,10E+00
Calor perdido na caldeira	9,89E+00

### 3.3.3.4 TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Os fatores para os resíduos gerados relativos ao processamento de um quilograma de óleo estão quantificados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resíduos Sólidos produzidos na unidade de produção.

Resíduo Sólido	(kg/kg de Óleo)	Classificação
Fibra de vidro: 1,896%	1,59E-04	Classe II-A
Carepas de tinta e ferrugem: 2,106%	1,77E-04	Classe I
Óleo usado (lubrificante): 0,373%	3,13E-05	Classe I
Resíduos de serviço de saúde (farmacêuticos): 0,022	1,85E-06	Classe I
Sucata de metais ferrosos: 18,039%	1,51E-03	Classe II-B
Lã de vidro: 0,038%	3,19E-06	Classe IIA
Papelão: 3,434%	2,88E-04	Classe II-B
Resíduos de serviço de saúde: 0,051%	4,28E-06	Classe I
Restos de alimentos (cozinha/refeitório): 9,958%	8,35E-04	Classe II -A
Entulho de obra: 0,043%	3,61E-06	Classe II-B
Sacarias de produtos químicos: 0,048%	4,03E-06	Classe I
Filtro de água ou ar usado: 14,422%	1,21E-03	Classe II-A
Baterias veiculares e industriais: 0,014%	1,17E-06	Classe I
Papel: 0,259%	2,17E-05	Classe II-B
Vidro: 0,365%	3,06E-05	Classe II-B
Cartuchos de impressora: 0,059%	4,95E-06	Classe II-A
Embalagens metálicas: 1,818%	1,52E-04	Classe II-B
Cartucho de toner usado: 0,003%	2,52E-07	Classe II-B
Sucata de metais não ferrosos: 0,263%	2,21E-05	Classe II-A
Lâmpadas fluorescentes: 0,245%	2,05E-05	Classe I
Lata de alumínio: 0,017%	1,43E-06	Classe II-B
Lixo comum: 15,047%	1,26E-03	Classe II-A
Pilhas / baterias comuns e alcalinas: 0,032%	2,68E-06	Classe I
Plástico reciclável: 1,284%	1,08E-04	Classe II-B
Produtos químicos vencidos ou em não conformidade (líquido): 2,799%	2,35E-04	Classe I

Resíduo químico de laboratório: 0,395%	3,31E-05	Classe II-A
Sinalizadores pirotécnicos: 0,008%	6,71E-07	Classe I
Solução esterilizante saturada: 0,008%	6,71E-07	Classe II-A
Madeira: 3,562%	2,99E-04	Classe II-B
Sucata de material elétrico/eletrônico: 0,153%	1,28E-05	Classe II-B
Mangote / mangueira: 0,460%	3,86E-05	Classe II-B
Resíduos contaminados com óleo e/ou produtos químicos: 16,485%	1,38E-03	Classe I
Embalagem plástica: 5,578%	4,68E-04	Classe II-A
Lâmpadas incandescentes: 0,031%	2,60E-06	Classe I
Latas de flandres - serviços de cozinha: 0,684%	5,74E-05	Classe II-B

## 4. RESULTADOS

O desempenho ambiental foi efetuado levando-se em consideração os cinco principais processos: Tratamento de Óleo, Gás, Água, Resíduos Sólidos e a planta de Geração de Energia, acrescidos das etapas de produção de insumos externos necessários para o funcionamento desses. Foi definido que os resultados da ACV seriam representados para as emissões atmosféricas definidas (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, PM, CH<sub>4</sub>, COV, THC) e para as categorias de impacto ambiental selecionadas no estudo de caso. Primeiramente os resultados das emissões atmosféricas serão apresentados.

### 4.1 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Uma análise da emissão de gases de efeito estufa foi desenvolvida a partir de fatores de emissão para cada componente da planta de processamento descritos no caso de estudo. Com isso foi possível a caracterização a partir de dados secundários de cada sistema de tratamento da unidade de produção. Na Tabela 17 encontra-se o desempenho das emissões atmosféricas nos quatro principais sistemas incluindo os processos internos, externos e o transporte para 1 kg de óleo tratado.

Tabela 17 - Desempenhos das emissões atmosféricas para os principais processos da FPSO.

	Trat. Gás	Trat. Óleo	Ger. Energia	Trat. Resíduos Sólidos
CO <sub>2</sub>	3,65E-02	1,52E-05	1,16E-02	2,18E-03
CO	1,34E-05	2,97E-09	1,91E-03	8,22E-06
N <sub>2</sub> O	3,23E-05	8,07E-09	5,29E-02	2,42E-06
NO <sub>x</sub>	5,04E-07	2,18E-10	1,22E-03	1,20E-08
SO <sub>2</sub>	2,79E-05	8,69E-09	9,00E-06	2,27E-07
COV	8,68E-04	1,13E-01	1,75E-05	8,33E-08
HTC	2,57E-05	6,06E-05	1,75E-04	3,09E-10
CH <sub>4</sub>	3,36E-01	1,80E-03	1,40E-04	1,98E-04
MP	3,31E-06	5,99E-10	1,95E-05	1,36E-06

Pode-se identificar na Figura 34 que o sistema de geração de energia prevalece sobre os demais tendo 100% das emissões de CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>, 81% de materiais particulados, 67% de THC e 23% de CO<sub>2</sub>. Esses valores são consequência do arranjo de

equipamentos de combustão interna e da produção de seus combustíveis. O Tratamento de Óleo teve destaque nas emissões orgânicas para o ar devido principalmente do processo de armazenamento de óleo. Esse tratamento apresenta 99% das emissões do grupo COV, 1% de CH<sub>4</sub> e 23% THC.

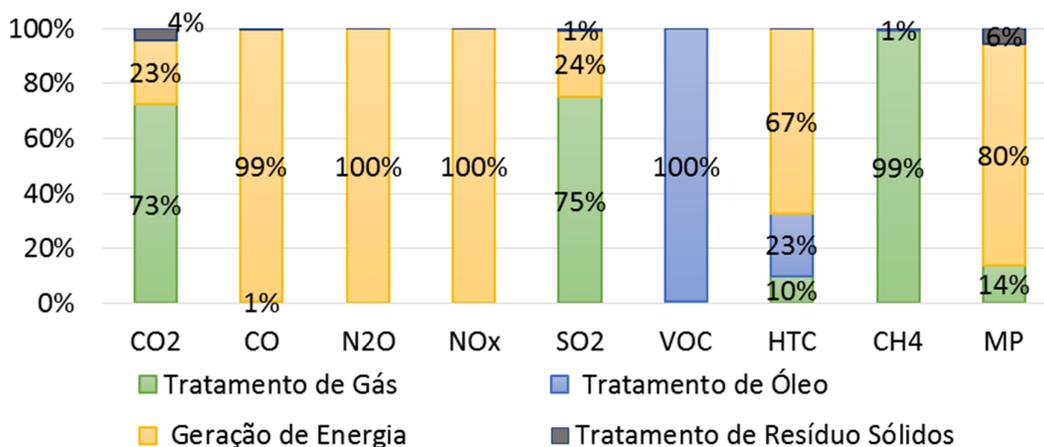


Figura 34 - Desempenho das emissões atmosféricas nos principais processos da FPSO.

O Tratamento de Gás apresentou 73% das emissões de CO<sub>2</sub> e 99% das emissões de CH<sub>4</sub> devido principalmente ao processo de *venting*, 14% para MP e 75% de SO<sub>2</sub> devido principalmente a produção dos componentes químicos Metanol e Dietileno Glicol.

Na Tabela 18 um comparativo dentro dos processos internos, externos e transportes foi quantificado. Na Figura 35 observa-se que dentro dos Processos Internos, a planta de geração de energia é responsável por quase todas as emissões, com exceção das emissões orgânicas COV (principalmente do processo de armazenamento de óleo no FPSO), THC (proveniente das bombas e do controlador de nível e pressão) e CH<sub>4</sub> em que o tratamento de óleo detém 100%, 23% e 1% respectivamente. Com esse gráfico consegue-se identificar que o expressivo resultado para emissões CO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, MP e THC analisadas simultaneamente para os Processos Interno e Externos na Figura 34 devem-se principalmente aos Processos Internos da Geração de Energia. Os Processos Externos têm uma boa contribuição no total em relação as emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

Analisando os processos externos o tratamento de gás aparece com uma maior porcentagem sobre os demais exceto nas emissões de CO e MP em que a geração de energia detém 63% e 66% respectivamente e na emissão de CH<sub>4</sub> em que o tratamento de resíduos sólidos aparece com 63% devido a incineração.

Tabela 18 - Comparativo entre os principais processos dentro das categorias de processos Internos e Externos.

	Processos Internos da FPSO			Processos Externos à FPSO			
	Trat. de Gás	Trat. de Óleo	Ger. de Energia	Trat. de Gás	Trat. de Óleo	Ger. de Energia	Trat. de Resíduo Sólidos
<b>CO<sub>2</sub></b>	8,77E-03	8,04E-06	1,03E-02	2,75E-02	7,09E-06	1,28E-03	2,13E-03
<b>CO</b>	0,00E+00	0,00E+00	1,88E-03	1,31E-05	2,84E-09	3,70E-05	8,15E-06
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,00E+00	0,00E+00	5,29E-02	3,12E-05	7,64E-09	6,87E-06	2,22E-06
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-03	4,99E-07	2,17E-10	1,55E-07	1,13E-08
<b>SO<sub>2</sub></b>	1,73E-07	0,00E+00	4,21E-07	2,76E-05	8,63E-09	8,56E-06	1,98E-07
<b>COV</b>	8,59E-04	1,13E-01	1,61E-05	9,06E-06	7,90E-09	1,46E-06	6,92E-08
<b>THC</b>	2,56E-05	6,06E-05	1,75E-04	1,67E-07	1,79E-11	8,41E-09	2,68E-10
<b>CH<sub>4</sub></b>	3,36E-01	1,80E-03	1,23E-04	9,83E-05	2,41E-08	1,66E-05	1,98E-04
<b>MP</b>	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-05	3,26E-06	5,81E-10	9,16E-06	1,35E-06

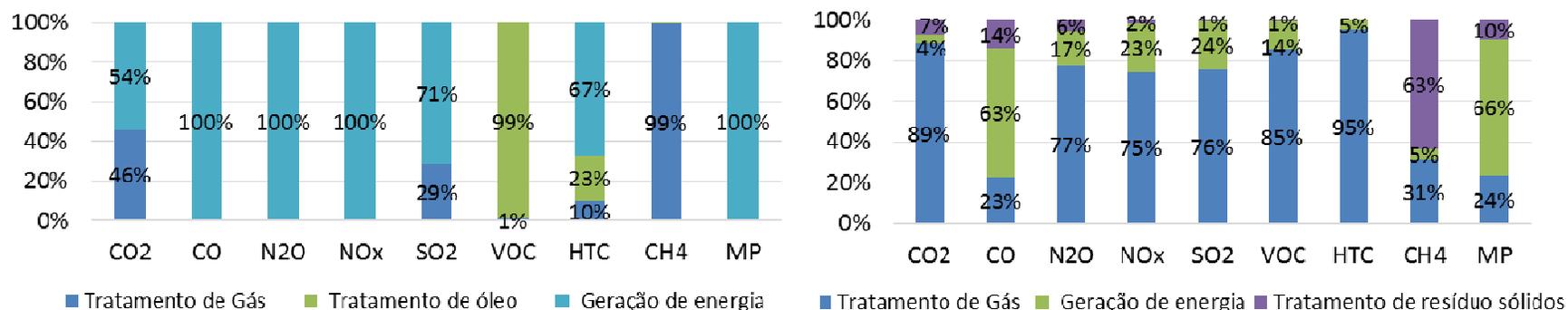


Figura 35 - Comparativo entre os principais processos dentro das categorias de Processos Internos e Externos respectivamente.

## 4.2 AMBIENTAL

Nessa seção foram abordados os resultados para cada categoria de impacto comentada no estudo de caso. Na Tabela 19 estão quantificadas as categorias de impacto para os principais processos da planta de processamento da FPSO.

Tabela 19 - Desempenhos das categorias de impacto para os principais processos da FPSO.

CML2001 - Apr. 2013	Tratamento de Gás	Tratamento de Óleo	Geração de Energia	Trat. de Água	Trat. Res Sólidos
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	2,14E-08	3,86E-12	4,56E-10	0,00E+00	-2,26E-08
ADP fóssil [MJ]	1,33E+00	2,50E-04	1,03E+00	0,00E+00	3,33E-03
Acidification Pot. [Kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	5,15E-05	1,56E-08	2,68E-02	0,00E+00	1,84E-06
Eutrophication P. [kg Phosphate-Eq.]	5,86E-06	1,80E-09	7,26E-03	3,65E-08	7,32E-06
Freshwater A.E.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	2,43E-04	5,61E-04	1,90E-04	6,03E-07	1,30E-06
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,44E+00	4,49E-02	3,83E-01	0,00E+00	1,05E-02
GWP- excl. b.c [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,44E+00	4,49E-02	3,84E-01	0,00E+00	7,14E-03
Human Toxicity Pot. [kg DCB-Equiv.]	1,08E-03	5,55E+03	6,68E-02	2,48E-03	-1,93E-04
Marine Aq. Eco. Pot. [Kg DCB-Equiv.]	1,32E+00	1,11E-02	3,44E-01	9,77E-01	2,87E-02
Ozone Lay. Depl. Pot. [Kg R11-Equiv.]	1,09E-12	1,61E-16	6,33E-10	0,00E+00	5,14E-12
Photo. Ozone C.P. [Kg Ethene-Equiv.]	2,34E-03	6,16E+00	1,61E-03	0,00E+00	1,59E-06
Terrestrial Eco.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	2,26E-05	1,00E-04	3,61E-06	6,80E-04	1,03E-05

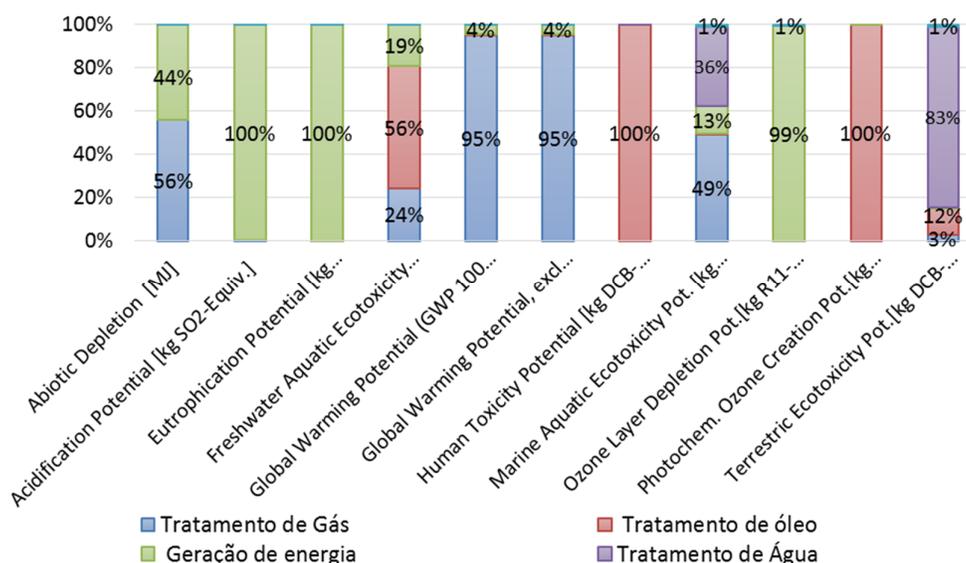


Figura 36 - Percentual de participação dos sistemas nas categorias de impactos

Na Figura 36 observa-se que o processo de Geração de Energia possui 100% dos potenciais de acidificação e eutrofização (os dois provenientes principalmente das

emissões inorgânicas do motor a gás natural para o tratamento de óleo), 99% do potencial de depleção da camada de ozônio (devido ao Processo Externo de produção de gasolina) e 44% de depleção abiótica (resultantes dos processos externos de produção de combustíveis).

O Tratamento de Óleo aparece com 100% do potencial de ecotoxicidade humana e do potencial de criação fotoquímica de ozônio (as emissões de COV são o principal contribuinte para o potencial de criação fotoquímica de ozônio (POCP)) e com 56% do potencial de ecotoxicidade de aquática (água doce).

O Tratamento de Água aparece com 83% do potencial de ecotoxicidade terrestre e 36% do potencial de ecotoxicidade aquática (marinha) devido às emissões de compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados para o mar do processo interno de descarte de água utilizada nos processos.

O Tratamento de Gás aparece com 95% do potencial de aquecimento global devido a liberação de compostos orgânicos, particularmente o metano no processo interno de *Venting*, para a atmosfera, 56% da depleção abiótica e 49% do potencial de ecotoxicidade aquática (marinha) devido principalmente aos dois processos externos de produção dos químicos Dietileno Glicol e Metanol.

Tabela 20 - Comparativo das categorias de impacto entre os Processos Interno e Externos.

CML2001 - Apr. 2013	Processos Internos	Processos Externos
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	0,00E+00	-7,96E-10
ADP fóssil [MJ]	8,51E-01	1,51E+00
Acidification Pot. [Kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	2,68E-02	6,86E-05
Eutrophication P. [kg Phosphate-Eq.]	7,26E-03	1,73E-05
Freshwater A.E.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	6,08E-04	3,83E-04
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,84E+00	4,17E-02
GWP- excl. b.c [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,84E+00	3,90E-02
Human Toxicity Pot. [kg DCB-Equiv.]	5,55E+03	3,29E-03
Marine Aq. Eco. Pot. [Kg DCB-Equiv.]	9,87E-01	1,68E+00
Ozone Lay. Depl. Pot. [Kg R11-Equiv.]	0,00E+00	6,39E-10
Photo. Ozone C.P. [Kg Ethene-Equiv.]	6,17E+00	1,34E-05
Terrestrial Eco.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	7,86E-04	3,11E-05

Na Figura 37 observa-se o domínio dos processos internos nas categorias de impacto. Os processos externos aparecem em destaque com 100% do potencial de depleção da camada de ozônio (devido principalmente às cadeias de produção de

combustíveis para a planta de Geração de Energia) e com 100% do potencial de depleção abiótica (derivado das cadeias dos químicos utilizados no Tratamento de Gás). Detém também um percentual do potencial de ecotoxicidade aquática, sendo 63% marinha e 38% de água doce.

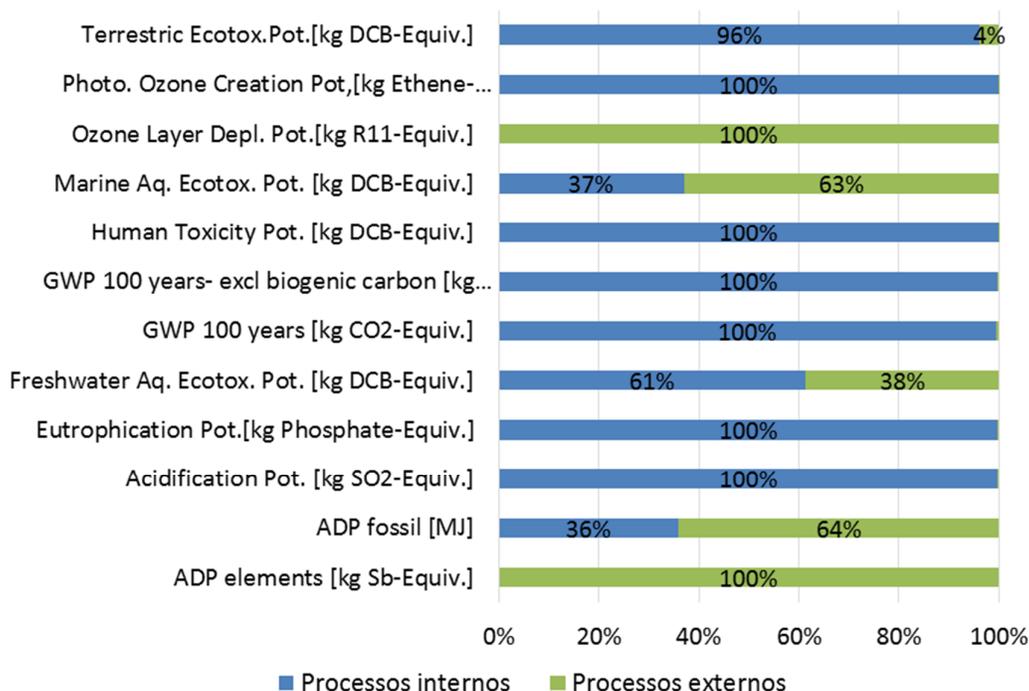


Figura 37 - Percentual de participação nas categorias de impacto dos Processos Internos e Externos

A Tabela 21 e a Figura 38 ilustram como se comportam as categorias de impacto em um comparativo dentro dos processos internos da FPSO. Os resultados para o comparativo total (processos internos mais os processos externos) se confirmam. A Geração de Energia, o Tratamento de Gás e o Tratamento de Óleo aparecem com a mesma relevância apontados na Figura 36.

Em relação aos processos externos, a Tabela 21 juntamente com a Figura 39 mostram o predomínio dos processos que compõem o Tratamento de Gás pelos mesmo motivos apontados na comparação global. A Geração de energia aparece em três categorias com um certo destaque. Detém 99% do potencial de depleção da camada de ozônio, 75% da ecotoxicidade humana e 48% do potencial de ecotoxicidade aquática (água doce) devido às cadeias de produção dos combustíveis vinculados à combustão interna

Tabela 21 - Comparativo percentual das categorias de impacto dentro dos Processos Internos e Externos.

	Processos internos				Processos externos			
	Trat. Gás	Trat. Óleo	Gera. Energia	Trat. Água	Trat. Gás	Trat. Óleo	Gera. Energia	Trat. Resi. Sólidos
Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,14E-08	3,86E-12	4,55E-10	-2,26E-08
Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	0,00E+00	0,00E+00	8,51E-01	0,00E+00	1,33E+00	2,48E-04	1,82E-01	2,63E-03
Acidification Potential (AP) [kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	2,08E-07	0,00E+00	2,68E-02	0,00E+00	5,01E-05	1,50E-08	1,69E-05	1,56E-06
Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	0,00E+00	0,00E+00	7,26E-03	3,65E-08	5,57E-06	1,66E-09	4,44E-06	7,25E-06
Freshwater Aq. Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	4,29E-05	5,61E-04	3,88E-06	6,03E-07	1,97E-04	5,75E-08	1,85E-04	5,52E-07
Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,41E+00	4,49E-02	3,82E-01	0,00E+00	3,03E-02	7,78E-06	9,06E-04	1,05E-02
GWP, excl biogenic carbon (GWP 100 years) [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,41E+00	4,49E-02	3,82E-01	0,00E+00	3,01E-02	7,75E-06	1,76E-03	7,09E-03
Human Toxicity Potential (HTP inf.) [kg DCB-Equiv.]	5,07E-05	5,55E+03	6,43E-02	2,48E-03	1,02E-03	2,40E-07	2,46E-03	-1,95E-04
Marine Aq. Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	8,52E-06	1,08E-02	7,69E-07	9,77E-01	1,31E+00	2,67E-04	3,43E-01	2,75E-02
Ozone Layer Deplet. Pot (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,09E-12	1,61E-16	6,33E-10	5,14E-12
Photochem. Ozone Creation Pot. (POCP) [kg Ethene-Equiv.]	2,33E-03	6,16E+00	1,60E-03	0,00E+00	8,65E-06	4,24E-09	3,11E-06	1,64E-06
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	4,89E-06	1,00E-04	4,41E-07	6,80E-04	1,77E-05	3,69E-09	3,17E-06	1,03E-05

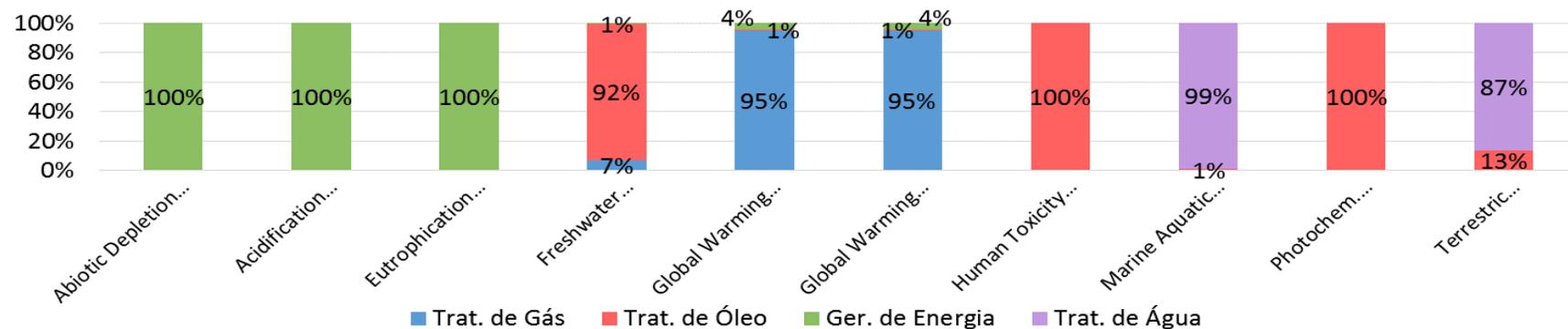


Figura 38 - Ilustração do comparativo percentual das categorias de impacto dentro dos Processos Internos.

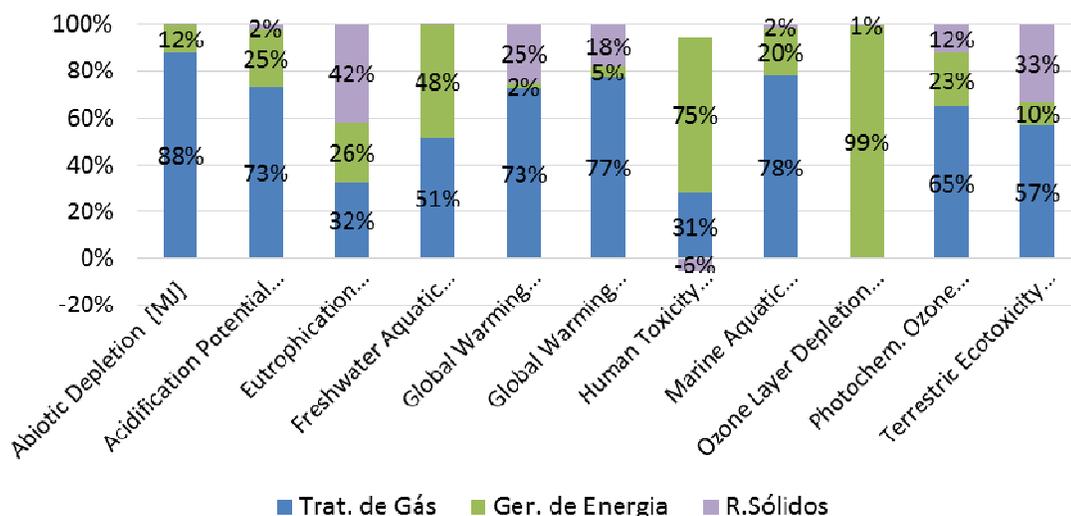


Figura 39 - Ilustração do comparativo percentual das categorias de impacto dos Processos Externos.

### 4.3 ANÁLISE DOS PROCESSOS AUXILIARES

No diagnóstico ambiental efetuado entre os processos internos e externos da planta de processamento da unidade de produção foi evidenciado uma contribuição expressiva dos processos externos dentro de cada sistema de tratamento. Esse fato motivou uma análise detalhada dos processos externos de forma a identificar quais os fluxos que mais contribuem para tal destaque.

Dentro da planta de processamento os processos externos se limitam aos produtos químicos utilizados para a elaboração dos componentes químicos usados no processamento de óleo e gás (desemulsificante, antiespumante, anti-incrustante e anti corrosivo) e aos combustíveis utilizados na planta de geração de energia (Gasolina, Óleo Combustível Pesado e Diesel). Um comparativo quantitativo de emissão dos parâmetros já escolhidos anteriormente para cada componente químico e combustível foi realizada. Os componentes químicos e seu respectivo fluxo associados no Software Gabi analisados foram:

- Sulfato de Amônio (*DE: Ammonium sulphate mix (by-product) PE*);
- Metanol (*EU-27: Methanol mix PE*);
- Dietileno Glicol (*DE: Diethylene glycol by product ethylene ... PE*);

- Água para processamento (EU-27: Process water PE);
- Etanol (DE: Ethanol PE);
- Etileno Glicol (DE: Ethylene glycol PE);
- Xileno (DE: o-Xylene PE).

Os combustíveis foram:

- Gasolina (BR: Gasoline mix (regular) at refinery PE);
- Diesel (BR: Diesel mix at refinery PE);
- Óleo Combustível pesado (BR: Heavy fuel oil at refinery (1.0 wt. % S) PE).

#### 4.3.1 PRODUTOS QUÍMICOS

A quantificação dos resultados da para determinados parâmetros e para as emissões atmosféricas dos componentes químicos está na Tabela 22. Em relação ao Tratamento de Gás, os dois químicos mais relevantes foram o Dietileno Glicol e o Metanol tanto para os parâmetros ilustrados na Figura 40 quanto para as emissões atmosféricas na Figura 42 como já observado anteriormente nas outras análises.

No Tratamento de Óleo os químicos com maior representatividade foram o Etileno Glicol e o Sulfato de Amônio como pode ser observado na Figura 41 e na Figura 43.

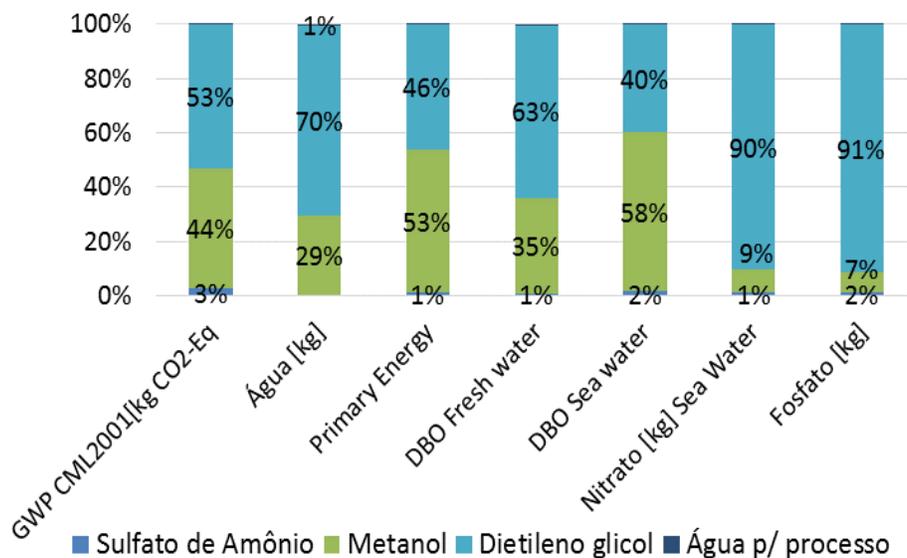


Figura 40 - Parâmetros escolhidos para análise dos potenciais de impactos no Tratamento de Gás.

Tabela 22 - Quantitativo de emissões atmosféricas e parâmetros escolhidos para os produtos químicos usados no Tratamento de Óleo e Gás.

	Tratamento de Gás				Tratamento de Óleo					
	Sulfato de Amônio	Metanol	Dietileno Glicol	Água p/ processo	Sulfato de Amônio	Etanol	Etileno Glicol	Xileno	Metanol	Água p/ processo
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Eq]	8,29E-04	1,33E-02	1,61E-02	1,26E-05	2,11E-06	6,42E-07	2,73E-06	9,08E-07	1,36E-06	2,63E-08
Água [kg]	1,59E-03	1,43E-01	3,44E-01	3,19E-03	4,05E-06	2,03E-06	1,88E-05	2,46E-06	1,46E-05	6,69E-06
Primary Energy	1,88E-02	7,96E-01	7,00E-01	2,41E-04	4,82E-05	1,98E-05	1,02E-04	2,97E-05	8,18E-05	5,03E-07
DBO Fresh water	5,40E-09	2,04E-07	3,67E-07	2,31E-09	1,42E-11	1,19E-11	3,02E-10	4,76E-12	2,11E-11	4,89E-12
DBO Sea water	2,41E-10	8,47E-09	5,79E-09	1,37E-12	5,88E-13	2,53E-13	8,60E-13	4,08E-13	8,64E-13	2,84E-15
Nitrato [kg] Sea Water	1,49E-10	9,49E-10	1,00E-08	1,62E-11	3,50E-13	1,27E-13	1,22E-12	1,69E-13	8,53E-14	2,96E-14
Fosfato [kg]	7,37E-10	3,48E-09	4,43E-08	4,04E-11	1,24E-12	3,97E-13	3,35E-12	6,21E-13	7,78E-14	2,14E-14
CO <sub>2</sub>	7,64E-04	1,24E-02	1,43E-02	1,09E-05	1,95E-06	5,78E-07	2,44E-06	8,21E-07	1,27E-06	2,29E-08
CO	2,35E-07	2,69E-06	1,02E-05	1,08E-08	5,94E-10	2,02E-10	1,49E-09	2,67E-10	2,66E-10	2,36E-11
NOx	7,38E-10	9,48E-09	6,42E-08	9,83E-11	2,24E-12	6,24E-13	1,81E-11	7,30E-13	9,64E-13	2,35E-13
N <sub>2</sub> O	4,76E-08	5,80E-08	3,93E-07	3,32E-10	1,22E-10	1,55E-11	5,97E-11	1,29E-11	5,82E-12	7,13E-13
SO <sub>2</sub>	6,82E-07	4,00E-06	2,29E-05	1,72E-08	2,23E-09	6,90E-10	4,15E-09	9,36E-10	5,89E-10	3,67E-11
COV	2,38E-06	3,68E-05	7,96E-05	2,81E-08	5,90E-09	2,85E-09	1,82E-08	3,90E-09	3,64E-09	6,11E-11
THC	5,39E-09	1,81E-09	1,60E-07	2,43E-11	4,62E-12	1,35E-12	9,40E-12	2,41E-12	9,93E-14	2,57E-14
CH <sub>4</sub>	1,98E-06	3,26E-05	6,37E-05	2,49E-08	4,92E-09	2,36E-09	1,02E-08	3,30E-09	3,24E-09	5,44E-11
MP	3,73E-08	4,83E-07	2,74E-06	2,72E-09	9,27E-11	3,47E-11	3,65E-10	3,41E-11	4,88E-11	5,59E-12

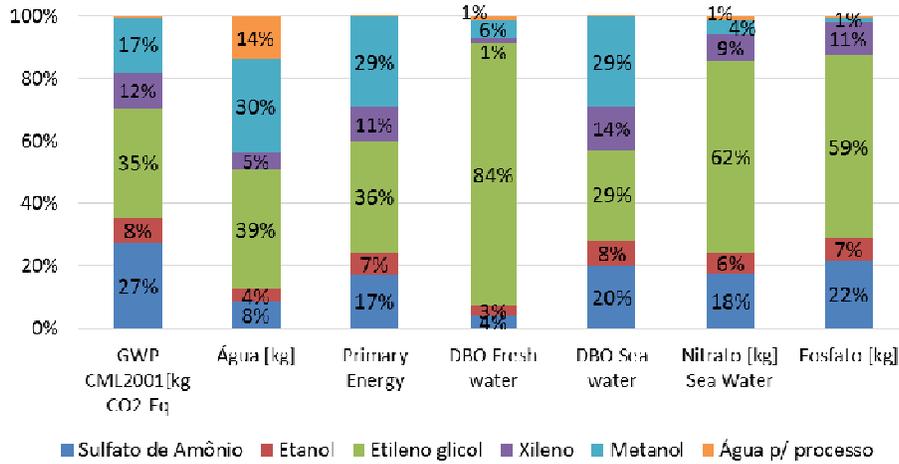


Figura 41 - Parâmetros escolhidos para análise dos potenciais de impactos no Tratamento de Óleo.

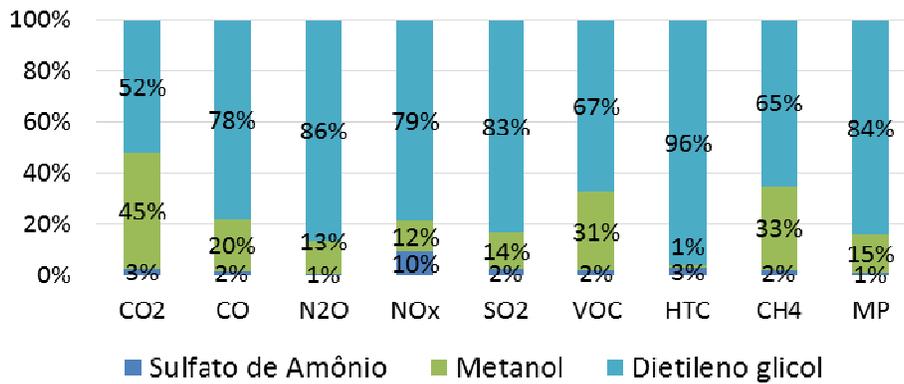


Figura 42 - Ilustração do comparativo percentual das emissões atmosféricas das cadeias de produção dos produtos químicos utilizados no Tratamento de Gás.

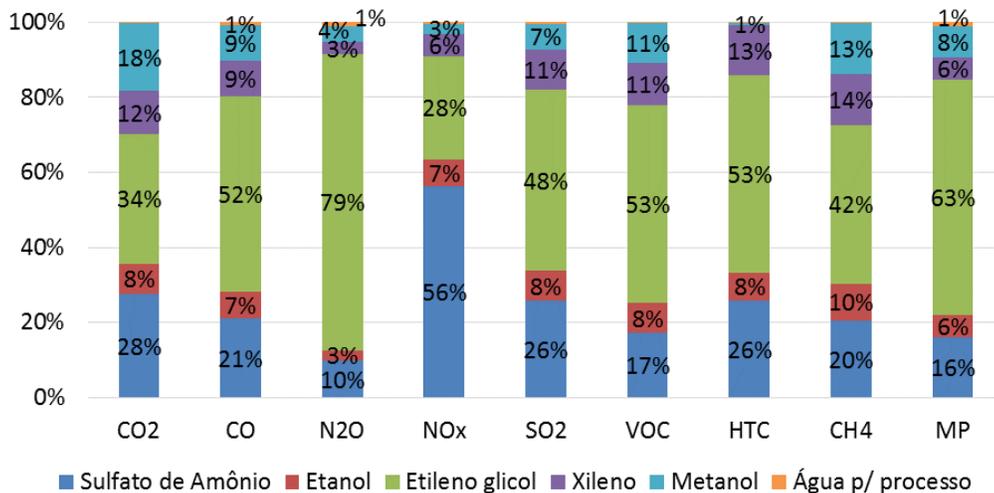


Figura 43 - Ilustração do comparativo percentual das emissões atmosféricas das cadeias de produção dos produtos químicos utilizados no Tratamento de Óleo.

## 6.6.2 COMBUSTÍVEIS

Tabela 23 - Quantitativo de emissões atmosféricas e parâmetros escolhidos para os combustíveis usados na Planta de Geração de Energia.

	Diesel	Gasolina	Óleo Combustível Pesado
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Eq]	5,54E-04	-1,67E-04	5,19E-04
Água [kg]	2,63E-01	4,60E-01	1,94E-03
Primary Energy	9,90E-02	5,03E-02	7,15E-02
DBO Fresh water	1,59E+02	1,59E+02	1,59E+02
DBO Sea water	1,43E-09	4,43E-10	1,05E-09
Nitrato [kg] Sea Water	1,60E-09	4,99E-10	1,18E-09
Fosfato [kg]	7,97E-08	8,14E-08	1,81E-09
CO <sub>2</sub>	6,16E-04	2,69E-04	3,90E-04
CO	1,06E-06	3,53E-05	6,63E-07
NO <sub>x</sub>	3,47E-09	4,11E-08	1,08E-10
N <sub>2</sub> O	2,67E-08	1,21E-07	7,21E-09
SO <sub>2</sub>	3,23E-06	3,20E-06	2,13E-06
COV	6,83E-09	1,48E-09	1,04E-10
THC	7,24E-06	4,27E-06	5,05E-06
CH <sub>4</sub>	1,29E-07	8,97E-06	6,62E-08
MP	5,54E-04	-1,67E-04	5,19E-04

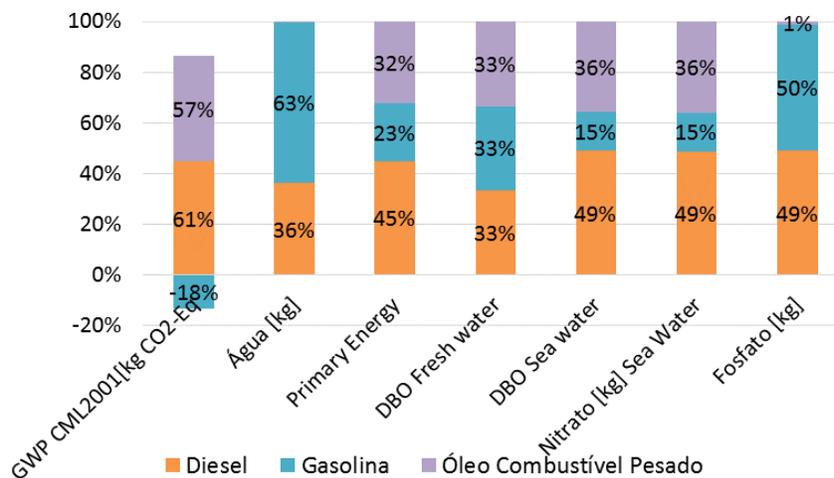


Figura 44 - Ilustração do comparativo percentual entre os parâmetros escolhidos para a análise dos combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia.

Observa-se na Figura 44 que para os parâmetros determinados para a análise, a Gasolina detém 63% do consumo de água e 50% da emissão de Fosfato. O Diesel aparece com 61% do potencial de Aquecimento Global e detém 50% das emissões de Fosfato e Nitrato.

Em relação às emissões atmosféricas, a Gasolina aparece como o combustível de maior impacto, dominando quase todas as emissões com exceção do CO, CH<sub>4</sub> e do THC. Em seguida aparece o Diesel e logo após o óleo combustível pesado.

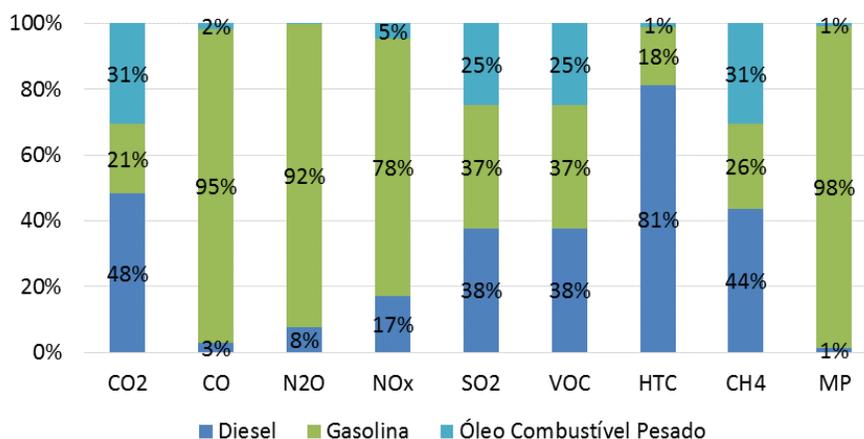


Figura 45 - Comparativo das emissões atmosféricas entre os combustíveis utilizados na Planta de Geração de Energia.

## 4.4 VARIAÇÃO DE CENÁRIOS

### 4.4.1 AVALIAÇÃO DA QUEIMA EM FLARE EM SISTEMAS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA

A análise do cenário de produção do estudo de caso para a queima em *flare* está ilustrado na Tabela 24 que compara os principais processos com a queima em *flare* e na

Tabela 25 que indica a contribuição da queima em *flare* em relação ao Total de emissões dos processos. A queima em *flare* no estudo em questão é utilizada apenas em situações de emergência e na queima de gás excedente. A contribuição do processo de queima em *flare* e considerada desprezível no cenário em que o gás natural é utilizado na cogeração de energia.

Tabela 24 - Quantitativo dos processos responsáveis pelas emissões atmosféricas e a Queima em *Flare*.

	Tratamento de Gás	Tratamento de Óleo	Geração de Energia	Queima em <i>Flare</i>
CO <sub>2</sub>	1,85E-07	8,04E-06	1,03E-02	8,46E-05
CO	0,00E+00	0,00E+00	1,88E-03	1,11E-08
NO <sub>x</sub>	0,00E+00	0,00E+00	5,29E-02	7,05E-08
N <sub>2</sub> O	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-03	1,53E-09
SO <sub>2</sub>	3,25E-08	0,00E+00	4,21E-07	4,26E-10
COV	9,87E-05	1,13E-01	1,61E-05	3,92E-09

THC	4,82E-06	6,06E-05	1,75E-04	7,76E-09
CH <sub>4</sub>	3,66E-04	1,80E-03	1,23E-04	1,62E-09
MP	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-05	1,11E-09

Tabela 25 - Comparativo do total de emissão atmosférica da planta de processamento e da contribuição da Queima em *Flare*.

	Total	Flare	Contribuição do Flare
CO <sub>2</sub>	5,00E-02	8,46E-05	0%
CO	1,93E-03	1,11E-08	0%
NO <sub>x</sub>	5,29E-02	7,05E-08	0%
N <sub>2</sub> O	1,22E-03	1,53E-09	0%
SO <sub>2</sub>	3,70E-05	4,26E-10	0%
COV	1,14E-01	3,92E-09	0%
THC	2,61E-04	7,76E-09	0%
CH <sub>4</sub>	3,38E-01	1,62E-09	0%
MP	3,02E-05	1,11E-09	0%

#### 4.4.2 CONTRIBUIÇÃO DOS TRANSPORTES

Ao comparar-se a produção considerando e sem considerar o transporte dos químicos e combustíveis para a FPSO e o transporte dos efluentes sólidos para a costa, observa-se que a contribuição é desprezível dentro das categorias de impacto da metodologia CML 2001.

Tabela 26 - Comparativo quantitativo das categorias de impacto entre os processos e o transporte.

CML2001 - Apr. 2013	Processos Internos	Processos Externos	Transporte
ADP elements [kg Sb-Equiv.]	0,00E+00	-7,96E-10	1,06E-11
ADP fóssil [MJ]	8,51E-01	1,51E+00	4,54E-03
Acidification Pot. [Kg SO <sub>2</sub> -Equiv.]	2,68E-02	6,86E-05	1,52E-06
Eutrophication P. [kg Phosphate-Eq.]	7,26E-03	1,73E-05	3,91E-07
Freshwater A.E.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	6,08E-04	3,83E-04	4,50E-06
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,84E+00	4,17E-02	2,70E-04
GWP- excl. b.c [kg CO <sub>2</sub> -Equiv.]	8,84E+00	3,90E-02	2,72E-04
Human Toxicity Pot. [kg DCB-Equiv.]	5,55E+03	3,29E-03	1,40E-05
Marine Aq. Eco. Pot. [Kg DCB-Equiv.]	9,87E-01	1,68E+00	8,08E-03
Ozone Lay. Depl. Pot. [Kg R11-Equiv.]	0,00E+00	6,39E-10	1,41E-16
Photo. Ozone C.P. [Kg Ethene-Equiv.]	6,17E+00	1,34E-05	-2,10E-07
Terrestrial Eco.Pot. [Kg DCB-Equiv.]	7,86E-04	3,11E-05	-1,76E-08

Analisando o comparativo das emissões atmosféricas identifica-se uma contribuição de 20% do total do material particulado para o ar proveniente do transporte de químicos e combustíveis para a plataforma e de efluentes sólidos para a costa.

Tabela 27 - Comparativo quantitativo das emissões atmosféricas entre os processos e o transporte.

CML2001 - Apr. 2013	Processos Internos	Processos Externos	Transporte
<b>Emissões para o ar</b>	1,29E+01	1,36E+00	1,00E-02
<b>Metais pesados para o ar</b>	0,00E+00	3,36E-08	7,65E-11
<b>Emissões inorgânicas para o ar</b>	7,50E-02	1,19E+00	1,00E-02
<b>CO<sub>2</sub></b>	1,90E-02	3,09E-02	7,29E-05
<b>CO</b>	1,88E-03	5,83E-05	9,60E-08
<b>N<sub>2</sub>O</b>	5,29E-02	4,03E-05	3,04E-07
<b>NO<sub>x</sub></b>	1,22E-03	6,66E-07	9,96E-10
<b>SO<sub>2</sub></b>	5,94E-07	3,63E-05	4,27E-08
<b>Emissões orgânicas para o ar</b>	1,28E+01	3,40E-04	1,21E-07
<b>Total de Hidrocarbonetos (THC)</b>	2,61E-04	1,76E-07	6,26E-11
<b>CH<sub>4</sub></b>	3,38E-01	3,13E-04	8,40E-08
<b>Outras emissões para o ar</b>	0,00E+00	1,66E-01	1,90E-04
<b>Material particulado</b>	1,03E-05	1,38E-05	<b>6,12E-06</b>

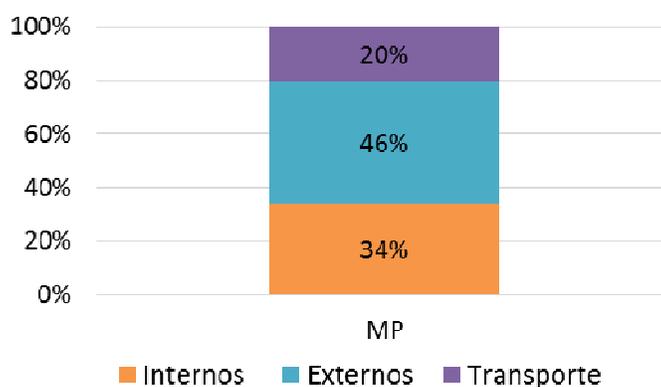


Figura 46 - Comparativo entre os processos e o transporte para o Material Particulado.

## 5. CONCLUSÕES

Os novos estímulos à E&P de petróleo *offshore* implicam na busca de novas formas de conhecimento sobre as fontes de impacto ambiental. Com o objetivo de acompanhar, avaliar e controlar as operações das unidades de produção offshore, a interpretação dos resultados obtidos e o desenvolvimento do inventário de ciclo de vida do processamento de óleo e gás natural nesse estudo demonstraram a capacidade da caracterização do diagnóstico e do monitoramento de processos através da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida.

A ACV permitiu, a partir da identificação das principais correntes mássicas e energéticas dos processos unitários de um modelo tecnológico genérico, uma visualização e identificação dentro do sistema de produção dos pontos críticos e impactantes dentro da cadeia. Com o software GaBi6.0 foi possível caracterizar as emissões atmosféricas e, através da metodologia CML 2001, obter os indicadores ambientais relativos a essas emissões e apontar as categorias de impacto mais relevantes dentro da atividade.

Em relação às emissões atmosféricas, analisado simultaneamente os Processos Interno e Externos do sistema, a Planta de Geração de Energia dominou o quadro de emissões com 100% das emissões de CO, N<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>, 81% de materiais particulados, 67% de THC e 23% de CO<sub>2</sub>. Esses valores são consequência do arranjo de equipamentos de combustão interna e da produção de seus combustíveis. O expressivo resultado para essas emissões se devem principalmente aos Processos Internos da Geração de Energia. Quando analisado em relação às categorias de impacto esse processo possui 100% dos potenciais de acidificação e eutrofização (os dois provenientes principalmente das emissões inorgânicas do motor a gás natural para o tratamento de óleo), 99% do potencial de depleção da camada de ozônio (devido ao Processo Externo de produção de gasolina) e 44% de depleção abiótica (resultantes dos processos externos de produção de combustíveis).

O Tratamento de Gás apresentou 73% das emissões de CO<sub>2</sub> e 99% das emissões de CH<sub>4</sub> devido principalmente ao Processo Interno *Venting*. Apresentou também 75% das emissões de SO<sub>2</sub> devido principalmente a cadeia de produção dos componentes químicos Metanol e Dietileno Glicol. Em relação as categorias de impacto, aparece com 95% do potencial de aquecimento global devido particularmente a liberação do metano no processo de *Venting*. Detém 56% da depleção abiótica e 49% do potencial de ecotoxicidade aquática

(marinha) devido principalmente aos dois Processos Externos de produção dos químicos Dietileno Glicol e Metanol respectivamente.

O Tratamento de Óleo tem seu destaque em relação as emissões orgânicas para a atmosfera devido ao Processo Interno de Armazenagem de Óleo que libera 99% das emissões de COV e 23% do THC. Analisado as categorias de impacto, esse tratamento aparece com 100% do potencial de ecotoxicidade humana e do potencial de criação fotoquímica de ozônio (as emissões de COV são o principal contribuinte para o potencial de criação fotoquímica de ozônio (POCP)) e com 56% do potencial de ecotoxicidade de aquática (água doce).

O Tratamento de Água aparece com 83% do potencial de ecotoxicidade terrestre e 36% do potencial de ecotoxicidade aquática (marinha) devido às emissões de compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados para o mar do Processo Interno de Descarte de Água utilizada nos processos. Os dados considerados são de efluentes tratados respeitando a legislação ambiental, logo os impactos ambientais referentes ao descarte da água de produção tratada no mar foram de menor relevância para a carga ambiental global dos processos.

Ao se analisar os processos externos observa-se que os processos mais expressivos para os produtos químicos foram o Dietileno Glicol e o Metanol, no Tratamento de Gás, e o Etileno Glicol e o Sulfato de Amônio no Tratamento de Óleo. Ao comparar-se os tratamentos, os químicos do Tratamento de Gás têm uma relevância muito mais expressiva. Dentro dos combustíveis o que se mais se destacou foi a Gasolina aparecendo com as maiores emissões atmosféricas e com o maior consumo de água para a produção.

No cenário em que o gás natural é utilizado na cogeração de energia, o processo de queima em Flare é utilizado apenas em situações de emergência e na queima de gás excedente sendo a sua contribuição desprezível ao comparada com os outros sistemas.

A inclusão da distribuição no modelo o torna mais amplo e completo. Em relação ao transporte de efluentes para a costa e de químicos e combustíveis para a FPSO, se for considerado uma média de 100 km tanto para o navio quanto para o caminhão, a variação com e sem a inclusão da distribuição é insignificante para as categorias de impacto analisadas. Observa-se uma relevância apenas na emissão de material particulado para o ar, contabilizando apenas 20% dessa.

A falta de trabalhos relacionados ao mesmo tema impede a comparação dos resultados com outros casos de estudo. Concluindo esta análise do desempenho ambiental do processo produtivo, salienta-se que a descrição mais precisa e completa a partir de dados primário

significaria uma maior precisão na caracterização dos impactos associados a cada um dos principais processos unitários, bem como a cada um dos principais produtos. Neste contexto, o modelo tecnológico estaria em condições de ser reproduzido em outras unidades de produção.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

- Realizar a coleta de dados primários de todos os processos pertencentes ao escopo do estudo;
- Utilizar o modelo tecnológico elaborado em unidades de produção existentes e compara-las em relação às tecnologias de exploração;
- Validar o modelo tecnológico elaborado a partir de dados primários;
- Construir um inventário de emissões de poluentes para as atividades de exploração e produção offshore nacional;
- Expandir a fronteira do estudo para as outras fases do segmento da E&P;
- Comparar os segmentos de *upstream* e *dowstream* dos produtos oriundos do petróleo;
- Aplicar práticas de gestão ambiental com base nos resultados apresentados;
- Atrelar questões sociais e econômicas ao estudo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCV. **História da ACV**. Disponível em: <<http://www.abcvbrasil.org.br/historia-acv.php>>. Acesso em: 20/9/2014.

ARGONNE. **Life-Cycle Thinking for the Oil and Gas Exploration and Production Industry**. , 2007.

BENJAMIN, A. K. **Desenvolvimento de modelo para avaliação de softwares de apoio à análise de ciclo de vida**. , 2002. SÃO PAULO.

BRASIL. **Lei N° 9.478, de 06 de Agosto**. , 1997. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 06 de Agosto.

CALDEIRA-PIRES, A.; RABELO, R.R.; XAVIER, J. H. . **Uso potencial da análise do ciclo de vida associada aos conceitos da produção orgânica aplicados à agricultura familiar**. Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 19, p. 149– 178, 2002.

CAMPOS, M. G. DE. **Abordagem de Ciclo de Vida da Avaliação de Impactos Ambientais no Processamento Primário Offshore** . , p. 127, 2012.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramentas gerencial da ISO 14000**. 1997.

CHEHEBE, J. R. . **Análise do Ciclo de Vida de Produtos - Ferramenta Gerencial da ISO 14.000**. Qualitymark, p. 104, 1998.

CURRAN, M. A. **Broad-based environmental life cycle assessment**. Environmental Science & Technology, v. 27, n. 3, p. 430–436, 1993.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. , p. 182, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. 2010.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de ciclo de vida dos produtos**. , 2004.

GALDIANO, G. P. **Inventário de ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil**. São Paulo. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 280, 2006.

GOEDKOOP ; SPRIENSMA. **The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Annex**. , 2001.

GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment - operational Guide to the ISO Standards. The International Journal of Life Cycle Assessment 6**, p. 255, 2001.

GUINÉE, J. B. (ED. . ET AL. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Kluwer Academic Publishers., 2002.

- GUINEÉ, J. & HEIJUNGS, R. **A proposal for classification of toxic substances within the framework of LCA of products.** , 1993a.
- GUINEÉ, J. & HEIJUNGS, R. **A proposal for classification of toxic substances within the framework of LCA of products.** , 1993b.
- HUIJBREGTS, M. A. J. ET AL. **Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA.** , 2000.
- ISO. 14040. **Gestão Ambiental - Avaliação de ciclo de vida - Gestão e Estrutura.** , 2009.
- ISO/TR. 14047 - **Environmental management — Life cycle assessment — Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations Management.** Genebra, 2012.
- KIPERSTOK, A. **Inovação e Meio Ambiente.** Salvador: Centro de Recursos Ambientais, 2003.
- KIPERSTOK, A. ET AL. **Inovação e Meio Ambiente.** Série Construindo os Recursos do Amanhã, v. 2, p. 298, 2003.
- KULAY, L. . **Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições brasileiras: Aplicação ao caso do superfosfato simples.** Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo., p. 143, 2000.
- KULAY, L. . **Uso da análise de ciclo de vida para comparação do desempenho ambiental das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados.** Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 314, 2004.
- LIMA, J. C. F.; RUTKOWSKI, E. W. **Evolução das Abordagens Industriais Ambientais.** , 2009.
- LINDFORS, V. ET AL. **Nordic guidelines on Life Cycle Assessment.** , 1995.
- MARTINS, A. A. B. **Estudo de Caso Aplicado ao Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Instalações Marítimas de Produção de Petróleo da Bacia de Campos.** Revista Perspectivas Online, v. 5, 2008.
- MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil.** , 2013.
- MONTEIRO, M. F. **Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo.** , 2008.
- OGX. **Desenvolvimento e Escoamento da Produção de Petróleo nos Blocos BM-C-39 e BM-C-40, Bacia de Campos.** , p. 112, 2011.
- OLIVEIRA, J. A. DE. **Otimização Ambiental de um Sistema de Produção de Petróleo Baseada em Critérios de Produção Mais Limpa – Estudo de Caso.** , 2006.
- OLIVEIRA, S. DE; HOMBEECK, M. **Exergy Analysis of Petroleum Separation Processes in Offshore Platforms.** Elsevier, Energy Convers, 1997.

- PETROBRAS. **Processamento Primário de Petróleo.** , p. 53, 2007.
- PETROBRAS. **Sistema de Produção e Escoamento de Óleo e Gás Natural nos Módulos 3 (P-55) e 4 (P-62) do Campo Roncador, Bacia de Campos.** , 2009.
- PETROBRAS. **Sistema de Produção e Escoamento de Óleo e Gás Natural nos Módulos 3 (P-55) e 4 (P-62) do Campo de Roncador, Bacia de Campos.** , p. 218, 2010a.
- PETROBRAS. **Sistema Piloto de Produção para Teste de Longa Duração no Reservatório Quissamã, Concessão BM-C-36, Bloco Exploratório Aruanã, Bacia de Campos.** , 2010b.
- PETROBRAS. **Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Polo Pré-Sal da Bacia de Santos - Etapa 2.** , 2013.
- REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; et al. **Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.** Environment international, v. 30, n. 5, p. 701–20, 2004.
- RIBEIRO, F. M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação.** Paulo. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 243, 2003.
- SALLABERRY, R. R. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em **Recursos Hídricos e Levantamento dos Desempenhos Ambientais do Biodiesel de Girassol e do Óleo Diesel.** , 2009.
- SANT'ANNA, A. A. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. **Simulação de Processamento de Gás Natural em Plataforma Offshore.** , 2005.
- SANTOS, L. M. M. DOS. **Avaliação Ambiental de Processos Industriais.** São Paulo: Signus Editora, 2006.
- SETAC. **Guidelines for Life-cycle Assessment: A Code of Practice.** Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), 1993.
- SETAC. **The road from analysis to practice.** , p. 89, 2005.
- SUPPEN, N. & ABITIA, A. R. **La evaluación del impacto de ciclo de vida: elementos de guía y algunas consideraciones metodológicas para México.** In: CALDEIRA-PIRES, A.; PAULA, M.C.S.; VILLAS-BÔAS, R.C. (Org.) A Avaliação do Ciclo de Vida: A ISO 14040 na America Latina. ISO 14040 na America Latina, 2005.
- TAKAHASHI, Sérgio. **Avaliação ambiental do setor de transporte de cargas: comparação de métodos.** 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- THOMAS, J.E. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** 20edição. Editora Interciência, 2001.
- TOSTA, C. S. Universidade Federal da Bahia. Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo **Inserção da análise de ciclo de vida no estado da Bahia através da atuação do órgão ambiental.** , p. 189, 2004.

VAZ, J. C. **Síntese de Controle e Análise de Cenários em Plantas Offshore de Óleo e Gás.** Escola de Química/ UFRJ, 2009.

VIGON, B.W. & JENSEN, A. A. **Life cycle assessment: Data quality and databases practitioner survey 135-141, 1995.** Journal of Cleaner Production., 1995.