



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**  
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**



**VITO ALEXANDRE ARAÚJO PALMEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE**  
**ECOINDICADORES PARA INDÚSTRIAS QUÍMICAS**

**Maceió**

**2014**

**VITO ALEXANDRE ARAÚJO PALMEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE  
ECOINDICADORES PARA INDÚSTRIAS QUÍMICAS**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Química, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sandra Helena Vieira de Carvalho

Coorientador: Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto

**Maceió**

**2014**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecário: Maria Auxiliadora G. da Cunha**

P172d Palmeira, Vito Alexandre Araújo.  
Desenvolvimento de metodologia para cálculo de ecoindicadores para indústrias químicas / Vito Alexandre Araújo Palmeira. -- 2014.  
72 f. : il., tabs.

Orientadora: Sandra Helena Vieira de Carvalho  
Co-orientador: Júlio Inácio Holanda Tavares Neto.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.

Bibliografia: f. 65-68.

1. Ecoindicadores. 2. Indicadores de ecoeficiência. 3. Sustentabilidade. I.  
Título.

CDU: 66:504.062/.064.4

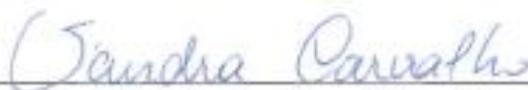
Vito Alexandre Araújo Palmeira

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE  
ECOINDICADORES PARA INDÚSTRIAS QUÍMICAS**

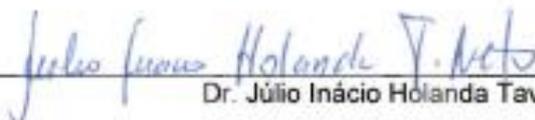
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em: Maceió, 28 de Abril de 2014.

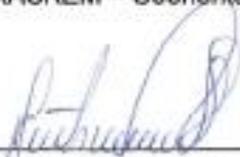
**BANCA EXAMINADORA**



Prof.ª. Dr.ª. Sandra Helena Vieira de Carvalho  
(PPGEQ/UFAL – Orientadora)



Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto  
(BRASKEM – Coorientador)



Prof. Dr. João Inácio Soletti  
(PPGEQ/UFAL)



Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves  
(UFCG - membro externo)

## RESUMO

Com a cobrança da sociedade quanto às questões ambientais e a exigência de se produzir mais utilizando cada vez menos recursos, surgiu a necessidade de elaborar uma maneira para que as empresas pudessem mensurar seus impactos ambientais. Um instrumento para análise da sustentabilidade da indústria que indica uma relação entre atividades econômicas e seu custo ou impacto ambiental é a utilização ecoindicadores, também conhecidos como indicadores de ecoeficiência. Os indicadores se baseiam em princípios, que lhes asseguram a relevância ambiental, a precisão e a utilidade em todos os negócios a nível mundial. O objetivo primordial é melhorar o desempenho do negócio e monitorá-lo com medições verificáveis e, conseqüentemente, relevantes, tanto para os gestores do negócio, como para as diversas partes interessadas. Os ecoindicadores se mostram uma ferramenta importante na gestão das empresas, auxiliando na identificação de desperdícios e impactos desnecessários, tanto ao meio ambiente quanto à economia do negócio. Com uma análise detalhada pode-se avaliar oportunidades de melhoria, acompanhar desempenho e traçar metas com base nos resultados. Atualmente muitas empresas do ramo industrial químico utilizam os ecoindicadores como uma maneira de acompanhar a evolução de sua eficiência ambiental com base em seu próprio histórico. O grande desafio é estabelecer um padrão no cálculo dos ecoindicadores para a empresa ou Unidade industrial que está sendo avaliada e que se torne possível obter números que representem a realidade da eficiência ambiental do negócio. Isso seria extremamente vantajoso para as empresas, pois valoriza as iniciativas para reduzir o consumo desnecessário e os impactos ambientais associados à produção, estimulando a competitividade e buscando uma melhor eficiência ambiental. Este trabalho tem como objetivo elaborar uma metodologia de cálculo para os ecoindicadores de indústrias químicas. Desta forma, foi feito um levantamento das equações e conceitos existentes na literatura, buscando as premissas necessárias para o cálculo. Houve dificuldade para determinar uma equação que represente de forma efetiva o consumo de recursos naturais e geração de rejeitos, relacionando ao custo de produção. No estudo de caso as equações propostas foram aplicadas em algumas unidades industriais de uma empresa produtora de resinas termoplásticas, sendo feito um comparativo com a prática de acompanhamento já existente. Os resultados se mostraram bastante positivos, pois a metodologia proposta apresenta um maior nível de detalhamento dos ecoindicadores, de acordo com a avaliação qualitativa realizada e sua aplicação, tornou possível uma análise do desempenho ambiental das unidades avaliadas. Além disso, algumas das premissas propostas já foram implementadas na empresa analisada, dando origem a um novo procedimento de cálculo.

**Palavras-chave:** Ecoindicadores. Indicadores de Ecoeficiência. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

With the pressure of the society on environmental issues and the requirement to produce more using fewer resources, became necessary to develop a way for companies to measure their environmental impacts. An instrument for examining the sustainability of the industry that indicates a relationship between economic activities and their cost or environmental impact is to use ecoindicators, also known as eco-efficiency indicators. The indicators are based on principles that ensure their environmental relevance, accuracy and usability in every business worldwide. The primary goal is to improve business performance and monitor it with verifiable measurements and thus relevant for both business managers and for the various stakeholders. The ecoindicators show themselves as been an important tool in the management of companies, assisting in the identification of waste and unnecessary, so the environment as the economy affects the business. With detailed analysis can assess opportunities for improvement, monitor performance and set goals based on the results. Currently many companies in the industrial chemical sector use the eco-indicators as a way to track the evolution of its environmental efficiency based on its own history. The challenge is to establish a standard for the calculation of ecoindicators for business or industrial unit and it becomes possible to obtain figures that represent the reality of the environmental efficiency of the business. That would be extremely advantageous to companies because it values the initiatives to reduce unnecessary consumption and environmental impacts associated with the production, stimulating competitiveness and seeking better environmental efficiency. This work aims to develop a methodology for calculating the eco-indicators of the chemical. Thus, a survey of existing equations and concepts in the literature was done by seeking the necessary assumptions for the calculation. It was difficult to determine an equation that represents effectively the consumption of natural resources and generation of waste, relating to the cost of production. In the case study the proposed equations were applied to some industrial units a producer of thermoplastic resins, being made a comparison with the existing practice of monitoring. The results were very positive, as the proposed methodology provides a higher level of detail of ecoindicators, according to the qualitative assessment conducted and its application has made possible an analysis of the environmental performance of the units. Moreover, some of the assumptions proposals have already been implemented in the company analyzed, yielding a new calculation procedure.

**Keywords:** Ecoindicators. Eco-efficiency Indicators. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Limite de controle estabelecido em um estudo realizado em uma indústria de alimentos e bebidas no Canadá.....	15
<b>Figura 2.</b> Exemplo de inventário de formas de energia consideradas no cálculo do ecoindicador.....	22
<b>Figura 3.</b> Visor de nível.....	24
<b>Figura 4.</b> Fluxograma para caracterização e classificação de resíduos.....	27
<b>Figura 5.</b> Níveis LCSP, mostrando de maneira ascendente o grau de abrangência do ecoindicador.....	39
<b>Figura 6.</b> Diagrama geral do processo da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas.....	41
<b>Figura 7.</b> Diagrama esquemático com os produtos da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas .....	43
<b>Figura 8.</b> Diagrama representando o consumo de água da Unidade Cloro Soda Alagoas.....	44
<b>Figura 9.</b> Diagrama representando a geração de efluentes líquidos da Cloro Soda Alagoas.	45
<b>Figura 10.</b> Diagrama representando o consumo de energia da Cloro Soda Alagoas .....	46
<b>Figura 11.</b> Diagrama do processo da produção da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia.	48
<b>Figura 12.</b> Diagrama com que com os produtos da Unidade de Produção da Cloro Soda Bahia.....	49
<b>Figura 13.</b> Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Cloro Soda Bahia.....	50
<b>Figura 14.</b> Diagrama de blocos do processo da Unidade de Produção PVC Alagoas .....	52
<b>Figura 15.</b> Diagrama com os produtos da Unidade de Produção PVC Alagoas .....	54
<b>Figura 16.</b> Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção PVC Alagoas.....	55
<b>Figura 17.</b> Diagrama representando a geração de resíduos da Unidade de Produção PVC Alagoas.....	56
<b>Figura 18.</b> Diagrama representando a geração de efluentes da Unidade de Produção PVC Alagoas.....	57

<b>Figura 19.</b> Diagrama representando o consumo de energia da Unidade de Produção PVC Alagoas.....	58
<b>Figura 20.</b> Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção PVC Bahia.....	60
<b>Figura 21.</b> Diagrama representando o consumo de energia da Unidade de Produção PVC Bahia.....	61
<b>Figura 22.</b> Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas.....	63
<b>Figura 23.</b> Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Bahia.....	64
<b>Figura 24.</b> Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de PVC da Braskem Alagoas.....	64
<b>Figura 25.</b> Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia.....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Tabela com os níveis de classificação dos ecoindicadores, baseada no modelo LCSP.....	38
<b>Tabela 2.</b> Resíduos da Unidade de Produção de Cloro Soda Alagoas que são enviados para tratamento em outras empresas.....	42
<b>Tabela 3.</b> Resíduos que são destinados fora do limite de controle da Unidade de Produção PVC Alagoas.....	53
<b>Tabela 4.</b> Classificação de acordo com os níveis do modelo de LCSP para cada ecoindicador.....	62

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
3.1 CONSUMO DE ENERGIA .....	18
3.2 CONSUMO DE ÁGUA .....	23
3.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	25
3.4 GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS .....	29
3.5 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS .....	31
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	33
4.1 PREMISAS PARA CÁLCULO DOS ECOINDICADORES .....	33
4.1.1 Ecoindicador de Água .....	35
4.1.2 Ecoindicador de Resíduos Sólidos .....	35
4.1.3 Ecoindicador de Efluentes Líquidos .....	36
4.1.4 Ecoindicador de Energia .....	37
4.2 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	38
<b>5 RESULTADOS</b> .....	40
5.1 ESTUDO DE CASO .....	40
5.1.1 Descrição do Processo da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Alagoas ..	40
5.1.2 Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Alagoas .....	43
5.1.3 Descrição do Processo da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Bahia .....	47
5.1.4 Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Bahia .....	49
5.1.5 Descrição do Processo da Unidade de Produção PVC da Braskem Alagoas .....	51
5.1.6 Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção PVC da Braskem Alagoas ....	54
5.1.7 Descrição do Processo da Unidade de Produção PVC da Braskem Bahia .....	58
5.1.8 Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção PVC da Braskem Bahia .....	59
5.2 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS PARA OS ECOINDICADORES UTILIZANDO O MODELO LCSP.....	62

<b>5.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS NÚMERICOS DOS ECOINDICADORES OBTIDOS NO ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>63</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>68</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos naturais estão se tornando escassos devido ao crescimento das atividades econômicas que visam atender a demanda por bens de consumo.

A sociedade cada vez mais preocupada com os aspectos ambientais e sua influência no setor produtivo trouxe à tona a vulnerabilidade das empresas em relação à crescente exigência do mercado quanto ao meio ambiente, fazendo com que diversos países começassem a se preocupar com as questões ambientais (PEREIRA, 2005).

Diante desse cenário, foi criado o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) introduzindo uma cooperação entre os governos, o mundo empresarial e todas as outras organizações preocupadas com o ambiente e o desenvolvimento sustentável. Para acompanhar a evolução nas questões ambientais, tornou-se necessário a criação de ferramentas de avaliação com base em ecoeficiência.

A ecoeficiência é um conceito empresarial que se exprime na linguagem dos negócios. Ela busca agregar valor, através da otimização da qualidade do produto ou serviço, utilizando menos recursos ambientais e gerando menos poluentes.

As atividades nas indústrias químicas e petroquímicas possuem várias interfaces com o meio ambiente. Para produzir são consumidos recursos naturais e energia elétrica, além do lançamento de poluentes na água, solo ou ar, de maneira direta ou indireta, através de processos industriais.

O desafio na construção de indicadores de ecoeficiência é a inexistência de regras acordadas ou padrões de reconhecimento, mensuração e divulgação ambiental de informações dentro da mesma indústria ou entre várias indústrias. Também não há regras para a consolidação de dados ambientais para uma empresa ou para um grupo de empresas, de modo que o padrão possa ser usado em conjunto e em linha com itens financeiros da empresa (UNITED NATIONS, 2004).

Para atingir a ecoeficiência as empresas necessitam ir além das ações internas, exigindo a existência de uma cooperação entre as diversas partes interessadas. A criação de condições favoráveis, através de algum sistema facilitador é essencial para que as empresas, de qualquer ramo, consigam tornar-se mais ecoeficientes.

Vários países e regiões promulgaram planos de ação nacional e regional, visando uma sociedade sustentável. Atingir um consenso alargado sobre os indicadores principais para a ecoeficiência e estabelecer objetivos precisos são aspectos cruciais que permitirão a transição para uma economia ecoeficiente (WBCSD, 2000).

O presente trabalho consiste na pesquisa das principais metodologias e equações para cálculo de ecoindicadores existentes e dos conceitos de cada um dos impactos ambientais ocasionados pelo processo produtivo de indústrias químicas.

Foi realizado um estudo de caso a partir de dados de algumas unidades industriais de produção da empresa Braskem. Essas unidades foram avaliadas aplicando-se premissas e equações seguindo um padrão, determinado durante o desenvolvimento deste trabalho, com o objetivo de quantificar a eficiência ambiental. Após a elaboração das equações para os ecoindicadores e aplicação nas unidades industriais, foi realizada uma verificação do resultado através de uma avaliação qualitativa das equações propostas e de análise dos resultados numéricos obtidos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. GERAL

Desenvolver uma metodologia adequada para o cálculo de ecoindicadores de indústrias químicas visando mensurar seu desempenho, aperfeiçoar sua gestão e atender aos desafios propostos pelo desenvolvimento sustentável.

### 2.2. ESPECÍFICO

- Estudar as principais metodologias e equações existentes para o cálculo de ecoindicadores;
- Avaliar o histórico de cálculo de ecoindicadores das indústrias químicas selecionadas;
- Analisar a padronização de cálculo e de representação do impacto ambiental do ecoindicador para as indústrias químicas;
- Desenvolver uma metodologia para o cálculo de ecoindicadores;
- Aplicar a metodologia nas indústrias químicas selecionadas para o estudo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A avaliação de desempenho ambiental envolve uma questão básica - não se pode gerir o que não é medido. Também é importante a seleção de indicadores que possam focar os principais aspectos ambientais de uma organização de forma vinculada aos critérios de sustentabilidade e de ecoeficiência.

O conceito de ecoeficiência considera a economia e a sustentabilidade como principais “ingredientes”. A sua implementação requer a mensuração do desempenho ambiental considerando-se essa “mistura”. Converter isto em números é um dos grandes desafios da sustentabilidade (PIOTO, 2003).

A transparência das informações de uma empresa que envolvam sustentabilidade é de interesse para uma vasta gama de partes interessadas, incluindo investidores, organizações governamentais e também outras empresas (GRI, 2006).

De acordo com NRTEE (2001), o primeiro passo para calcular qualquer um dos ecoindicadores é definir o seu limite de controle, que pode ser:

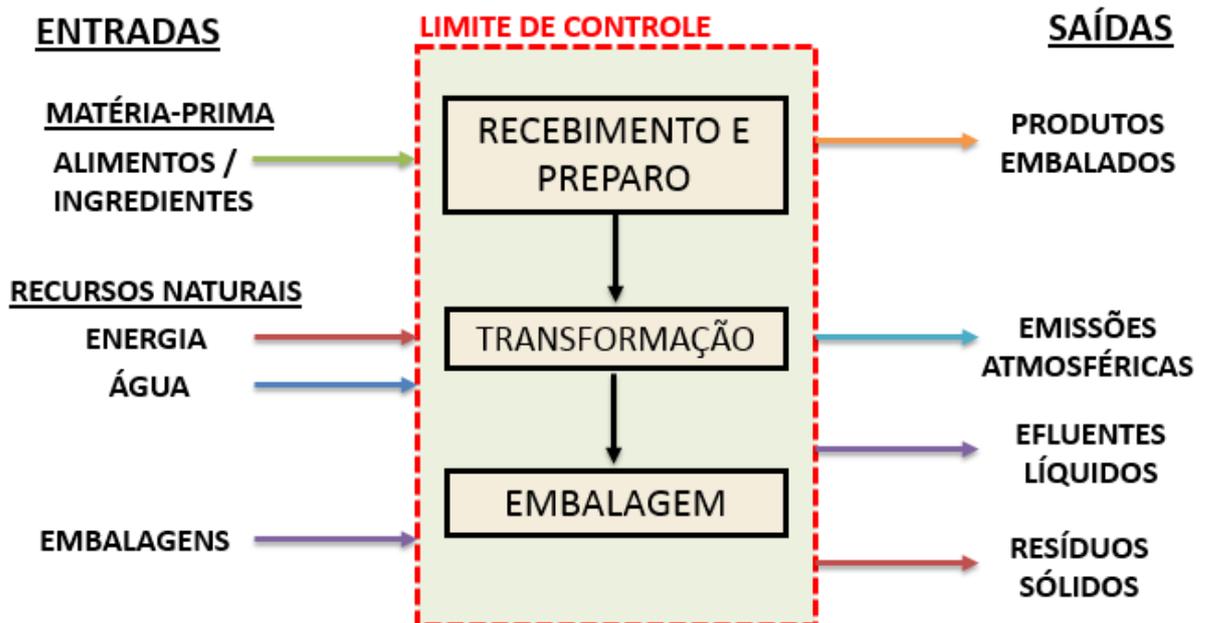
- Corporativo – envolve toda a empresa;
- Unidade de negócios – um determinado segmento de negócios dentro da corporação, o que pode incluir várias instalações diferentes e / ou produtos;
- Linha de produtos - uma linha de produtos especial dentro da corporação, que pode ser produzido em uma única ou em várias instalações;
- Instalação ou instalações - uma ou mais instalações (sites) operados pela empresa;
- Processos/áreas da unidade - uma ou mais unidades operações dentro de uma instalação.

A maioria das empresas que utilizam estes indicadores seleciona uma ou diversas instalações no seu projeto limite. Os dados geralmente ficam disponíveis para os trabalhadores na instalação ou no mesmo nível de site. As instalações estão geralmente sob a responsabilidade de um gerente, quem tem a autoridade para tomar decisões com apoio de sua equipe sobre como melhorar o desempenho.

Em um estudo similar realizado em uma indústria de alimentos e bebidas no Canadá foi escolhido como limite de controle a própria unidade industrial. Foi considerado no cálculo

o fornecimento de matérias-primas e insumos, saída do produto final e impactos ambientais como, por exemplo, efluentes e resíduos orgânicos, conforme mostrado na Figura 1 (MAXIME et al., 2006).

Figura 1 - Limite de controle estabelecido em um estudo realizado em uma indústria de alimentos e bebidas no Canadá.



Fonte: MAXIME et al., 2006.

Segundo o WBSCD (2000), apenas alguns ecoindicadores têm aplicação em todos os negócios. Isso ocorre devido a diferenças fundamentais entre as questões relacionadas com os valores e ambientes distintos encontrados nos diversos setores de uma empresa e nos produtos. Outros pontos que contribuem para dificultar a criação de um ecoindicador, que possa ser aplicado em qualquer negócio, são as faltas de métodos adequados para medir alguns parâmetros e as diferentes prioridades para as questões ambientais específicas presentes em determinadas regiões. Alguns indicadores poderão também medir parâmetros diferentes de acordo com o negócio, por exemplo, os efluentes líquidos provenientes de uma indústria de celulose são diferentes dos gerados por uma fábrica de produção de minério de ferro.

Existem indicadores que não possuem significado relevante em determinados negócios. O WBCSD utiliza o termo “aplicação genérica” para os indicadores que podem ser utilizados em praticamente todos os negócios, apesar de haver a possibilidade de

apresentarem valores de diferente importância, de acordo com o segmento. Para cada um destes indicadores, deve existir um acordo geral:

- Relevância significativa para todos os negócios;
- Os métodos de medição estabelecidos e as definições globalmente aceitas;
- Relação com uma preocupação ambiental global ou com um valor global para o mundo dos negócios.

Ainda de acordo com WBCSD (2000) todos os outros indicadores que não atendem a estes critérios são denominados como “específicos do negócio”, devendo ser definidos de acordo com o segmento em questão. Provavelmente existirá também uma diversidade de abordagens sobre a maneira de mensurar e definir, além de que a sua relevância e peso variam de um negócio para outro.

É importante citar que estas distinções não afirmam que os “indicadores de aplicação genérica” sejam mais importantes do que os “específicos do negócio”. Esta questão dependerá da natureza do negócio. Essa distinção serve apenas para identificar um pequeno conjunto de indicadores que pode ser utilizado por todos os negócios dentro de um leque mais vasto e relevante para cada organização (WBCSD, 2000).

Após a escolha do limite de controle deve-se selecionar um apropriado e significativo período de reporte, tais pontos devem ser considerados:

- Quantas vezes os resultados dos ecoindicadores devem ser avaliados?
- Quais são as frequências de faturamento e datas de recursos da empresa, por exemplo, energia elétrica, faturas de fornecedores de materiais, eliminação de resíduos?

Períodos mais curtos de informação geralmente são mais úteis para a pessoa diretamente responsável pelos resultados dos indicadores, porém eles exigem maior esforço do que os mais longos. Os envolvidos no dia-a-dia de gestão geralmente querem resultados mensais ou mais frequentes, especialmente durante os estágios iniciais de medição da ecoeficiência. Usuários que estão mais distantes do dia-a-dia da gestão, provavelmente, irão acordar um relatório trimestral ou anual adequado.

Segundo o NRTEE (2001), o cálculo do ecoindicador, Equação 1, o qual relaciona o produto com o impacto ambiental, pode ser obtido após a definição do limite de controle e da frequência de reporte dos resultados.

$$\text{Ecoindicador} = \frac{\text{Impacto Ambiental}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (1)$$

O principal objetivo dos ecoindicadores é avaliar a produtividade, considerando a eficiência ambiental das empresas ao longo do tempo.

O denominador da Equação 1 representa diretamente o retorno econômico da empresa, deve-se escolher o termo que será mais adequado, como as seguintes possibilidades:

- Peso de produto produzido;
- Unidades de produto produzido ou transportado;
- Vendas em valores de moeda.

A escolha do denominador dependerá, em parte, do tipo de negócio. Deve-se incluir no denominador a quantidade (em unidades apropriadas) apenas do produto desejado.

Isso significa que subprodutos ou resíduos gerados pelo processo que são comercializados ou para os quais a renda é recebida não deverão ser incluídos, a menos que sejam habitualmente desejados no processo. No entanto, dois ou mais produtos podem vir de uma instalação da empresa ou de fabricação do processo. Estes são considerados co-produtos e devem ser incluídos no denominador, ou seja, sua produção faz parte do negócio da empresa, diferente dos resíduos, que são eliminados ou doados para evitar sua liberação para o meio ambiente (NRTEE, 2001).

Um estudo sobre os ecoindicadores realizado na indústria de ferro no Nepal utilizou como referência as vendas líquidas contabilizadas em dólares, pois era desejado obter a relação do impacto ambiental diretamente em valores de moeda (KHAREL; CHARMONDUSIT, 2008).

Em uma pesquisa sobre a aplicação de ecoindicadores na produção de luvas de borracha na Tailândia, foi escolhido mensurar os produtos em unidades de massa, avaliando todo o fluxo de matéria para obtenção do produto (RATTANAPAN *et al.*, 2012).

De acordo com IHOBE (1999), as matérias-primas necessitam ser removidas do meio ambiente para que os produtos possam ser fabricados, distribuídos, embalados e finalmente vendidos. Durante e após a utilização do produto ocorre também impactos ambientais, uma vez que neste estágio há geração de resíduos. Assim, o numerador da Equação 1 representa o impacto ambiental e, sabe-se que todos os produtos confeccionados são prejudiciais ao meio ambiente.

Os impactos ambientais podem ocorrer através de diversas formas, entre elas: consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos sólidos, geração de efluentes líquidos e emissões atmosféricas.

Em um trabalho de ecoindicadores realizado por Vellani e Ribeiro (2009), retrata a possibilidade de criar indicadores físicos e monetários para as ações relacionadas ao meio ambiente e as operações de negócio. Além de visualizar o fluxo físico de entradas e saídas, seriam elaborados indicadores monetários para calcular o valor investido e confrontar com as reduções de custos e incremento de receitas devido às iniciativas ambientais.

### 3.1 CONSUMO DE ENERGIA

Energia é a capacidade que um sistema tem de realizar trabalho. Ela provoca modificações na matéria e em algumas vezes, de maneira irreversível. É possível encontrar a energia em diversas formas como energia térmica, mecânica, eólica e elétrica, sendo esta a forma mais visada no cenário mundial.

Os processos industriais demandam bastante energia para realizar a transformação de matéria prima em produto final. Portanto é fundamental possuir meios adequados de quantificação de energia.

Em indústrias a energia consumida é significativa em termos absolutos e representa uma parcela substancial do custo total do produto. As empresas, de uma forma estruturada, acompanham os temas associados com a energia, mostrando a preocupação de se posicionar no mercado que está cada vez mais competitivo (CEMIG, 2012). O consumo de energia nas unidades industriais ocorre na forma de energia térmica, mecânica e elétrica.

De acordo com Atkins e De Paula (2003), a energia térmica está diretamente associada à temperatura absoluta de um sistema.

Na maioria das aplicações, a energia térmica é gerada em um equipamento específico, como uma caldeira ou aquecedor e distribuída aos pontos de utilização através de um fluido de transporte, no caso, vapor de água ou fluido térmico. As tubulações de vapor ou fluido térmico devem que atender certos requisitos de operacionalidade, manutenção e eficiência térmica. A distribuição de vapor ou fluido térmico deve ser realizada através de tubulações especialmente montadas para tal (BAZZO, 2011).

A transferência de calor pode ocorrer de três formas diferentes que são: convecção, condução e radiação. É importante saber que o calor sempre flui de um ponto no qual a temperatura é mais alta para um ponto de temperatura mais baixa.

O vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Várias razões colaboraram para a geração de energia através do vapor. A água é o composto mais abundante da Terra e de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. As relações temperatura e pressão de saturação permitem utilização de vapor em diversos processos industriais, com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível.

A indústria química tem vapor como principal fonte de térmica. Diversos equipamentos como reatores, trocadores de calor, evaporadores, secadores, inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo em setores industriais, como metalúrgico, mecânico, eletrônico, entre outros, podem utilizar de vapor como fonte de aquecimento, gerando a energia necessária para o processo (BAZZO, 2011).

Outra forma de energia importante é a mecânica. De acordo com Walker (2006) a energia mecânica é aquela pode ser transferida por meio de força. É a energia capaz de produzir mudanças de posição, velocidade ou forma. A energia mecânica de um sistema é dada pela soma da energia potencial com a energia cinética, conforme a Equação 2:

$$E. \text{Mecânica} = E. \text{Cinética} + E. \text{Potencial} \quad (2)$$

A energia cinética é a energia associada ao movimento de um corpo e a energia potencial é a energia “armazenada”, podendo ser potencial gravitacional ou potencial elástica.

Nos processos industriais a energia mecânica geralmente é obtida através da transformação de outros tipos de energia.

A energia elétrica é baseada na diferença de potencial elétrico entre dois pontos, que permitem estabelecer uma corrente elétrica. Mediante transformações adequadas, pode-se obter outras formas finais de uso direto, como movimento ou calor, de acordo com os princípios da conservação da energia (WALKER, 2006). É uma das formas de energia que a humanidade mais utiliza na atualidade, graças a sua facilidade de transporte, baixo índice de perda energética durante conversões.

De acordo com Schneider e Ghilardi (2006), os processos industriais necessitam de bastante energia para realizar a transformação de matéria prima em produto final. Por isso, é fundamental possuir meios adequados de quantificação de energia. Se a empresa possuir uma medição por equipamento de produção é possível determinar o custo com energia dispendido na produção de cada produto.

A quantificação da energia elétrica geralmente é realizada pelo fornecedor de energia elétrica e a informação é passada através da fatura mensal, uma vez que a maioria das unidades industriais não gera sua própria energia. Caso a unidade seja geradora de energia é fundamental que seja utilizado um instrumento de medição de energia apropriado para que se torne possível a quantificação.

Para quantificar a quantidade de energia consumida, são utilizados alguns métodos, que podem ser:

- Medição: é um valor obtido através de um instrumento;
- Estimativa: é um valor baseado em uma prática comum e aplicado tecnologicamente, onde um nível médio de tecnologia é assumido;
- Cálculo: é baseado em algoritmos. As entradas da equação são valores de níveis diferentes, por exemplo, medido, estimado, e/ou fatores de conversão definidos;
- Valor Empírico: é um valor baseado em resultados de pesquisas ou estudos;
- Fator de Conversão: é um valor baseado em padrões, conceitos ou modelos científicos geralmente aceitos.

A instrumentação é associada ao estudo prático e teórico dos instrumentos e seus princípios científicos, utilizados para monitorar de forma contínua ou discreta, o

comportamento de variáveis que de alguma forma venham interessar ao homem nas diversas áreas do conhecimento humano aplicado, ou seja, não apenas nos processos industriais. É principalmente através da instrumentação que um operador faz o acompanhamento dos processos (CASTELETTI, 2010).

O totalizador de energia elétrica é um instrumento utilizado na medição e registro do consumo e demanda de energia elétrica, que possibilita às concessionárias de energia elétrica um conhecimento detalhado do consumo e demanda de energia ativa e reativa para efeitos de faturamento, em medições complexas, com mais de um ponto de medição.

De acordo com IHOBE (1999), o ecoindicador de energia refere-se à extração e produção de combustíveis, bem como à conversão de energia e geração de energia elétrica. Para mensurar a energia levam-se em conta os diferentes tipos de combustível usados.

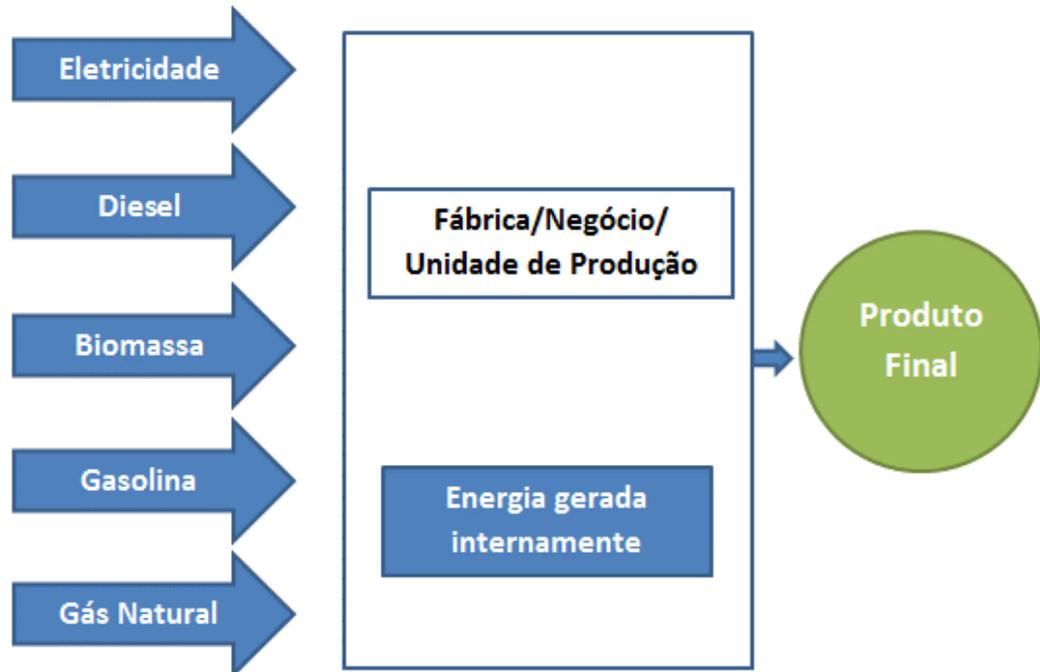
O ecoindicador de energia é dado pela Equação 3:

$$\text{Ecoindicador de Energia} = \frac{\text{Consumo Total de Energia}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (3)$$

Inicialmente deve-se elaborar um inventário com todas as formas de energia utilizadas na unidade, incluindo itens como vapor e combustíveis. O consumo total de energia será dado pela soma do consumo dessas formas de energia com o total de energia elétrica consumida naquele determinado período de tempo. Caso parte dessa energia tenha sido exportada, transferida ou vendida, esta deverá ser expurgada do cálculo, pois queremos contabilizar apenas o total consumido.

A Figura 2 mostra um exemplo de inventário contendo as formas de energia consideradas no cálculo do ecoindicador, incluindo a energia que entra no sistema (fábrica, negócio ou unidade de produção) e a energia gerada internamente:

Figura 2 - Exemplo de inventário de formas de energia consideradas no cálculo do ecoindicador.



Fonte: NRTEE, 2001.

Para realizar a soma dessas formas de energia é necessário quantificá-las e adotar uma mesma unidade. Usualmente usa-se Joule como unidade padrão para o cálculo do ecoindicador de energia.

O consumo de combustíveis deve ser considerado no cálculo. Usualmente combustíveis são mensurados em unidades de volume e por tipo de combustível, mas podem ser convertidos em unidades de energia através de cálculo, envolvendo o poder calorífico do combustível e algumas conversões de unidade.

Em um estudo realizado em uma indústria chinesa de papel e celulose, foram consideradas todas as possíveis fontes de energia incluindo carvão, petróleo, gasolina, diesel, calor e energia elétrica. Os valores foram mensurados em unidade de massa e depois convertido em unidades de energia (WANG et al., 2011).

### 3.2 CONSUMO DE ÁGUA

Atualmente a indústria está submetida a exigências da sociedade. De um lado, as imposições do comércio internacional pela melhoria da competitividade e, do outro, as questões ambientais e as recentes condicionantes legais de gestão de recursos hídricos, particularmente associadas à cobrança pelo uso da água.

Para se adaptar a este novo cenário, a indústria vem aprimorando seus processos e desenvolvendo sistemas de gestão ambiental para atender às especificações do mercado interno e externo. Em linha com esta tendência, existem bons exemplos de implantação de sistemas e procedimentos de gestão da demanda de água e de minimização da geração de efluentes (FIRJAN, 2006).

Dependendo da disponibilidade hídrica, além de iniciativas para a redução do consumo de água, a produção industrial fica condicionada à análise das seguintes opções:

- Manter a situação tradicional, utilizando água de sistemas públicos de distribuição e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos;
- Adquirir água de reuso ou água de utilidade, produzida por companhias de saneamento, através de tratamento complementar de seus efluentes secundários;
- Reutilizar, na medida do possível, os seus próprios efluentes, após tratamento adequado.

Segundo o NRTEE (2001), o ecoindicador de água pode ser utilizado para medir, monitorar e reportar o uso da mesma em empresas para as quais a água representa uma importante matéria prima. Este ecoindicador representa a quantidade de água utilizada por unidade de entrega do produto ou serviço.

O ecoindicador de água é dado pela Equação 4:

$$\text{Ecoindicador de Água} = \frac{\text{Consumo Total de Água}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (4)$$

O consumo total de água é dado pela Equação 5:

$$\text{Consumo Total de Água} = \text{Entradas Hídricas} - \text{Saídas Hídricas} \quad (5)$$

São exemplos de entradas hídricas: quantidade de água captada em rios, poços e chuva e a quantidade de água comprada, seja no estado líquido ou de vapor.

São exemplos de saídas hídricas: quantidade de água vendida/transferida e quantidade de vapor vendido/transferido.

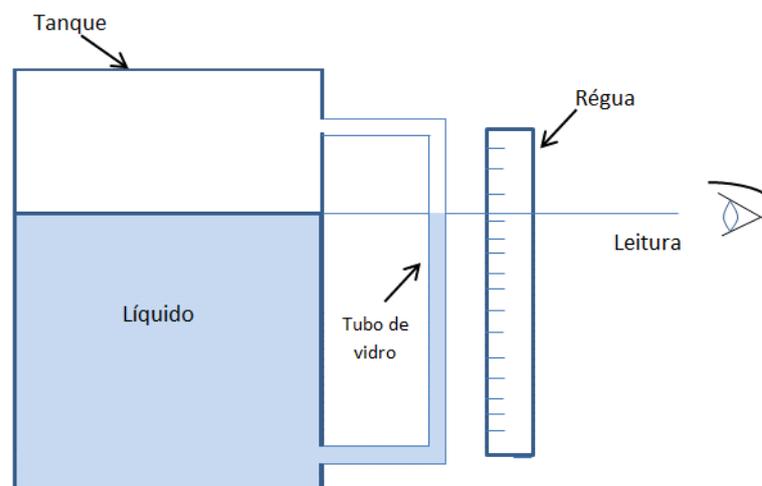
Para um melhor controle dos processos industriais são utilizados os métodos de quantificação de água. No setor industrial a quantificação é feita através de medidores de vazão ou de nível.

Os medidores de vazão são fundamentais nos processos industriais, pois são utilizados para o controle do processo, análise e garantia de qualidade, produtividade segurança, análise de eficiência, perdas e rendimento, balanço de massa, balanço de energia, transações comerciais e medições contábeis (GONÇALVES, 2004).

Os medidores de vazão mais utilizados no setor industrial são: rotâmetro, vórtex e magnético.

A medição de nível tem como objetivo definir a altura de um conteúdo de um reservatório. A medição pode ser direta, indireta ou descontínua. Para a medição direta utiliza-se como referência o plano superior da substância medida. Neste tipo de medição é utilizado uma régua ou gabarito, visor de nível (Figura 3), bóia ou flutuador.

Figura 3 - Visor de nível.



Fonte: Autor, 2013.

Na medição de nível indireta são usadas propriedades físicas ao nível como: pressão, empuxo, radiação e propriedades elétricas.

Para quantificar de maneira mais precisa a água utilizada, podem ser usados instrumentos de medição. Com ajuda de *softwares* pode-se obter os resultados totalizados para um determinado período de tempo e na unidade desejada. A água é usualmente mensurada em unidades de volume.

A ausência de instrumentos de medição implica em resultados menos precisos, sendo necessário o uso de cálculo e estimativas para obter resultados aproximados.

### 3.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A gestão de resíduos sólidos deve ser baseada em condições ambientais adequadas, considerando todos os aspectos envolvidos, desde a fonte geradora até a disposição final, assim como os aspectos de reciclagem dos resíduos, levando em consideração as mudanças dos padrões de produção e consumo (PAULELLA; SCAPIM, 1996).

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Ainda de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados em: I (Perigosos) e II (Não-Perigosos). Os resíduos não perigosos se dividem em: II A (Não-inertes) e II B (Inertes).

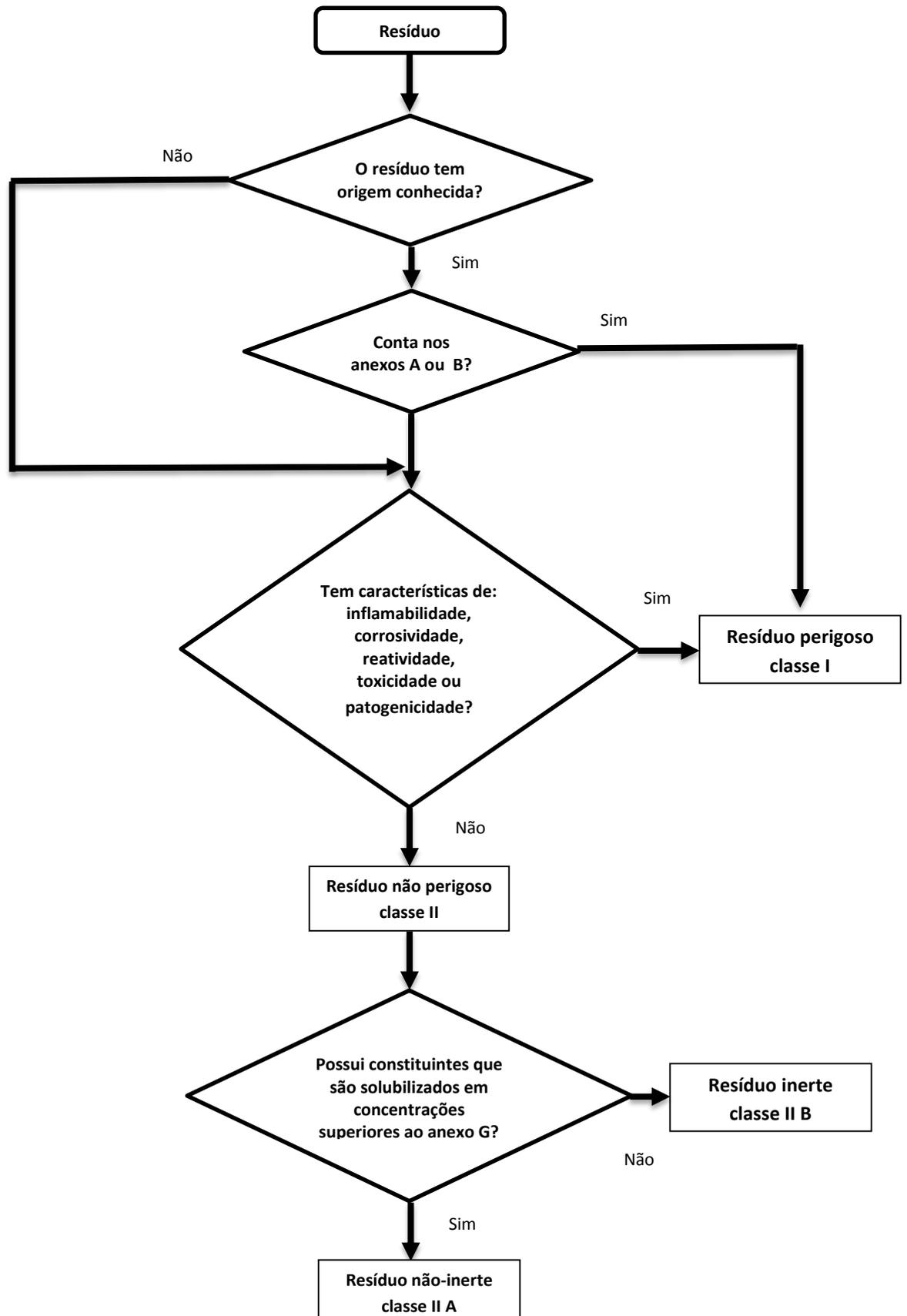
a) Classe I – Perigosos: são aqueles que apresentam periculosidade em função de suas propriedades físicas e químicas, infecto-contagiosa ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Pode apresentar riscos

à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices e riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

b) Classe IIA – Não Perigosos (Não-inertes): são resíduos que, por suas características, não se enquadram na classificação de resíduo classe I (Perigoso) ou classe IIB (Não Perigoso-Inerte). Esses resíduos podem apresentar propriedades como solubilidade em água, biodegradabilidade ou combustibilidade.

c) Classe IIB - Não Perigosos (Inertes): São os resíduos que submetidos ao teste de solubilidade (conforme NBR 10.006:2004 - Solubilização de Resíduos) não obter nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto o aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Figura 4 - Fluxograma para caracterização e classificação de resíduos.



As decisões técnicas e econômicas tomadas em todas as fases do resíduo, desde a sua geração, manuseio, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e a sua disposição final, devem basear-se na classificação do resíduo. A Figura 4 apresenta o diagrama utilizado para a caracterização de resíduos sólidos.

Os resíduos de origem desconhecida ou que não sejam caracterizados através das listagens devem ter sua periculosidade efetivamente avaliada através da amostragem e realização de exames e testes em laboratórios (LIMA, 2011).

A geração total de resíduos é dada pela Equação 6:

$$\text{Geração Total de Resíduos} = \text{Classe I} + \text{Classe IIA} + \text{Classe IIB} \quad (6)$$

O ecoindicador de resíduos é dado pela Equação 7:

$$\text{Ecoindicador de Resíduos Sólidos} = \frac{\text{Geração Total de Resíduos}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (7)$$

Para obter um controle adequado dos resíduos gerados é importante que as fontes de geração de resíduos estejam identificadas e que exista uma quantificação de todo o resíduo gerado.

De acordo com a resolução CONAMA 313 de 2002, Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais é o conjunto de informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país.

Este apresenta os caminhos do resíduo desde sua geração, caracterização, classificação, acondicionamento, transporte interno e externo, até sua destinação, considerando os critérios de segregação e as orientações de saúde e segurança, visando minimizar riscos e impactos.

O inventário de resíduos auxilia no diagnóstico da situação atual da geração de resíduos sólidos industriais e a sua destinação final, identificando sua tipologia, classificação, formas de armazenamento, tratamento e disposição final, assim como o levantamento de estoques existentes em suas instalações (MOROSINE et al., 2006).

Em termos de ecoindicador de resíduo, a unidade mais utilizada é a de massa. O processo de quantificação de resíduos sólidos normalmente é realizado através da pesagem, uma vez que grande parte dos resíduos é expedida da unidade industrial.

### 3.4 GERAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

Na indústria a água é utilizada de várias maneiras como, parte do próprio processo produtivo, lavagem de equipamentos entre outras formas. A água que não é assimilada ao produto, não é evaporada ou não é contaminada pelos resíduos do processo é a que forma os efluentes líquidos.

A poluição de águas é a adição de formas de energia ou substâncias que alteram diretamente a natureza do corpo d'água de maneira que prejudique a sua utilização. Dessa forma, o lançamento de efluentes industriais e domésticos sem tratamento adequado pode causar vários danos para o corpo receptor e também pode limitar os usos da água (SPERLING, 2005).

Poluentes presentes nos efluentes líquidos causam alteração da qualidade da área nos corpos receptores e sua conseqüente degradação. No passado costumava-se utilizar rios e lagos para disposição dos efluentes sem tratamento algum, porém com o passar tempo verificou-se que a degradação prejudicava o corpo hídrico, causando doenças nas pessoas que utilizavam da água e destruindo os ecossistemas presentes nos rios.

De acordo com a resolução CONAMA nº 430 (2011), efluente é o termo usado para caracterizar os despejos líquidos provenientes de diversas atividades ou processos.

Os processos industriais geram grande quantidade de efluentes líquidos que seguem para estações de tratamento antes de serem descartados em corpo receptor.

O ecoindicador de efluentes líquidos é dado pela Equação 8:

$$\text{Ecoindicador de Efluentes Líquidos} = \frac{\text{Geração Total de Efluentes}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (8)$$

A geração total de efluentes é dada pela Equação 9:

$$\text{Geração Total de Efluentes} = \text{Efluentes Orgânicos} + \text{Efluentes Inorgânicos} \quad (9)$$

Os efluentes orgânicos são aqueles provenientes de processos com produtos derivados de cadeia carbônica, como os organoclorados. Os efluentes inorgânicos são compostos por substâncias simples que não apresentam cadeia carbônica, como a água de chuva que escorre pela área industrial.

Para quantificação do volume de efluente gerado existem alguns dispositivos simples para vazões pequenas, como por exemplo, a cubagem. Anota-se o tempo que a água leva para encher um recipiente de volume conhecido. Como a vazão é o volume em função do tempo, é só dividir o volume do recipiente pelo tempo que se levou para enchê-lo. Se o volume do recipiente não for conhecido, faz-se uma marca no recipiente, anota-se o tempo e depois se afere o volume em outro local (CAMMAROTA, 2011).

Existem locais de difícil acesso, sendo praticamente impossível instalar um dispositivo para se medir a vazão. Ocorrem ainda casos em que os custos elevados para se instalar um vertedor para coletar uma amostra não compensam. Nestes casos, pode-se adotar o seguinte procedimento: fecha-se a entrada do reservatório, mede-se a altura e o tempo que leva para se ter um desnível; isto deve ser feito sem que se prejudique o processo de fabricação. Desse modo, deve-se ter conhecimento do processo de fabricação para saber a quantidade de água que se incorporou ao produto, e as águas que são evaporadas.

Outra maneira de medir é a utilização de hidrômetros para controlar o consumo de cada seção da indústria ou etapa do processo. Aproveitam-se as medições parciais obtidas por estes hidrômetros em cada ramal ou seção para se chegar à vazão total.

Para cada faixa de vazão deve-se adotar um tipo de vertedor, com o seu formato e equação específica. O vertedor retangular sem restrição ou contração se aplica a vazões acima de 20 m<sup>3</sup>/h (usado para grandes vazões). O vertedor triangular de Thompson é usado para vazões mais baixas, menores que 50 m<sup>3</sup>/h) e a Calha Parshall tem padrões pré-estabelecidos e é indicada para vazões acima de 50 m<sup>3</sup>/h.

Para quantificação dos efluentes além da utilização dos medidores de vazão, pode-se utilizar *softwares* específico como apoio, tornando possível totalizar o volume de efluente gerado para um determinado período. A ausência de alguns desses medidores pode impactar significativamente a precisão dos resultados.

### 3.5 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Os contaminantes atmosféricos dividem-se em dois grupos: os primários quando procedentes das fontes emissoras e os secundários, originados por transformação química entre os contaminantes primários. A contaminação atmosférica pode ser definida, como uma condição que é desenvolvida quando algumas substâncias presentes na atmosfera alcançam concentrações acima do seu nível normal. Estas substâncias pode ser um composto químico natural ou artificial, apresentado na natureza na forma de gases, gotas, ou partículas sólidas. (NAGAMATO et al., 2010).

Tratando-se de uma indústria, o tipo de emissão mais comum é a de fonte fixa. De acordo com a resolução CONAMA 436 (2011) fonte fixa de emissão é qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera. Na indústria alguns dos equipamentos que se encaixam nessa definição são os incineradores, as caldeiras e os fornos. Porém, no caso dos incineradores, temos uma legislação específica que é a resolução CONAMA 316 (2002).

Para o cálculo do ecoindicador de emissões são consideradas as substâncias que contribuem para o efeito estufa, como o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>.

O ecoindicador de emissões é dado pela Equação 10:

$$\text{Ecoindicador de Emissões Atmosféricas} = \frac{\text{Geração Total de Emissões}}{\text{Produção ou Serviço}} \quad (10)$$

De acordo com UNITED NATIONS (2004) a geração total de emissões é dada pela soma de todos os seguintes componentes: Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), Hexafluoreto enxofre (SF<sub>6</sub>), Perfluorcarbonos (PFCs) e Hidrofluorcarbonos (HFCs). São somados todos os tipos de emissões no processo que contenham estes componentes. A unidade padrão no cálculo do ecoindicador de emissões é o CO<sub>2</sub> equivalente.

A quantificação das emissões atmosféricas pode ser realizada através das seguintes formas: utilizando um instrumento de medição, através de cálculo ou de estimativa.

A medição através de instrumento é a maneira mais precisa e apresenta dados mais próximos da realidade. Ela pode ser feita de maneira contínua, através de monitoramento on-line, trazendo resultados de precisão ainda maior.

Nem sempre os instrumentos estão disponíveis, seja por motivos financeiros ou de manutenção, mas mesmo assim pode ser necessário mensurar o volume de efluente gerado. Desta forma pode-se recorrer aos cálculos e estimativas. Eles fornecem uma aproximação da realidade, porém com uma margem de erro maior do que utilizando instrumentos.

No cálculo de emissões, um método que é bastante usual na indústria é o cálculo de CO<sub>2</sub> gerado com base no consumo e tipo de combustível utilizado, tomando como referência seu poder calorífico uma vez que o instrumento de medição não esteja disponível.

## 4 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido através da pesquisa e análise das principais metodologias existentes para o cálculo de ecoindicadores, envolvendo conceitos e definições importantes, como métodos de quantificação e apresentação de resultados. Foram avaliados alguns dos ecoindicadores mais utilizados nas indústrias químicas e petroquímicas, a relevância e os seus impactos ambientais.

Os impactos ambientais avaliados foram: energia, água, resíduos sólidos e efluentes líquidos. Todos os produtos que foram produzidos no limite de controle da unidade analisada também foram considerados na avaliação.

Foi realizado um estudo de caso, onde foi utilizado como base da avaliação o processo produtivo de quatro indústrias químicas da Braskem (empresa produtora de resinas termoplásticas) buscando avaliar a aplicação das metodologias e equações propostas, comparando com a forma de cálculo existente.

O estudo de caso foi realizado nas unidades industriais de produção de Cloro Soda (CS) e PVC de Alagoas e nas unidades de produção de Cloro Soda e PVC da Bahia da empresa Braskem.

As unidades avaliadas já realizam o acompanhamento de ecoindicadores, porém atualmente não há um padrão de cálculo, fazendo com que os números obtidos não tenham a mesma representatividade entre elas, em termos de eficiência ambiental.

Os ecoindicadores possuem metas por unidade, sendo revisadas anualmente e cada vez mais rigorosas. No estudo foram avaliados os seguintes ecoindicadores: consumo de água, geração de resíduos sólidos, geração de efluentes líquidos e consumo de energia.

### 4.1. PREMISSAS PARA O CÁLCULO DOS ECOINDICADORES

Após a realização do estudo bibliográfico, foi proposta uma metodologia para o cálculo dos ecoindicadores de água, resíduos sólidos, efluentes líquidos e energia. Foram determinadas algumas premissas para o cálculo, de maneira que um padrão fosse seguido. As

equações utilizam como base a Equação 1, que é uma equação geral que relaciona o impacto ambiental (numerador) e o produto (denominador).

Durante o estudo foi observado que, para a elaboração de equações para o cálculo de ecoindicadores são seguidas algumas etapas. O primeiro passo foi estabelecer um limite de controle.

A determinação do limite de controle é importante para determinar a abrangência dos ecoindicadores. Sua escolha é feita de acordo com a estratégia de monitoramento, considerando as informações desejadas e os instrumentos de medição disponíveis. O limite de controle na metodologia proposta para os ecoindicadores são as próprias unidades industriais, não contemplando outras unidades ou instalações de outras empresas e nem se restringindo a uma determinada área da planta em questão. A escolha deste limite foi devido ao interesse em mensurar a performance ambiental de cada uma das unidades.

Nos resultados obtidos do cálculo do ecoindicador existe um erro associado em todos os parâmetros, devido à incerteza do instrumento utilizado na medição ou no cálculo utilizado. Este erro deve ser calculado para obter a margem de erro do ecoindicador.

No cálculo do termo produção iremos estabelecer o padrão de que será contabilizado o total de produto final que sai dos limites de controle estabelecidos. Portanto, não serão considerados os produtos intermediários, que são consumidos internamente. Todos os produtos devem ser considerados em base úmida.

Além disto, só serão considerados os produtos vendáveis que fazem portfólio de negócio da unidade industrial em questão (NRTEE, 2001). Assim, os resíduos e subprodutos que não são desejados no processo, não serão considerados na parcela de produtos, mesmo que estes sejam reciclados ou doados para outros fins. Os resíduos e subprodutos só devem ser contabilizados caso eles sejam vendidos, passando a fazer parte do negócio da empresa produzi-lo.

O padrão a ser adotado para mensurar os produtos produzidos no volume de controle no cálculo do ecoindicador será em unidades de massa.

#### 4.1.1. Ecoindicador de Água

Para o cálculo do ecoindicador de água a proposta é adotar o padrão do consumo de água em unidades de volume. A Equação 11 foi proposta para representar o ecoindicador de água:

$$E_{\text{ÁGUA}} = \frac{\sum EH - \sum SH}{P} \quad (11)$$

Onde

$E_{\text{ÁGUA}}$  = Ecoindicador de Consumo de Água [ $\text{m}^3/\text{t}$ ]

$EH$  = Entradas Hídricas [ $\text{m}^3$ ]

$SH$  = Saídas Hídricas [ $\text{m}^3$ ]

$P$  = Quantidade de Produtos Produzidos no Volume de Controle [t]

As entradas hídricas podem ser: quantidade de água bruta captada em rios, poços, da chuva ou adquirida de outros fornecedores; também deve ser considerado no cálculo o vapor. Na parcela de saídas hídricas devem ser consideradas a quantidade de água e de vapor fornecidos.

No caso de haver um reuso de água interno na unidade, o mesmo já impactará positivamente no ecoindicador pelo fato de haver uma necessidade menor de captar ou adquirir mais água. O reuso pode ser acompanhado paralelamente, não necessariamente, na mesma fórmula do ecoindicador de água (MAXIME et al., 2006).

#### 4.1.2. Ecoindicador de Resíduos Sólidos

No cálculo da geração de resíduos o padrão proposto é mensurar a quantidade gerada em unidades de massa. A soma da geração de todos os tipos de resíduo, conforme a classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004), representará a geração da indústria, subtraindo a parcela que é enviada para reciclagem externa. Os aterros industriais ou qualquer outro ambiente de destinação final, devem ser considerados fora dos limites de controle estabelecidos para o cálculo do ecoindicador de resíduos.

Diante do cenário global atual, é de grande importância minimizar a geração do resíduo classe I (resíduo perigoso), que representa um maior impacto ambiental em relação aos tipos de resíduo. Desta forma, a proposta é ponderar a equação, colocando um peso três vezes maior na parcela que representa o resíduo classe I.

A Equação 12 foi proposta para representar a geração de resíduos sólidos:

$$E_{\text{RESÍDUOS SÓLIDOS}} = \frac{3 \times (\text{Classe I}) + \text{Classe IIA} + \text{Classe IIB} - \text{Recicláveis}}{P} \quad (12)$$

$E_{\text{RESÍDUO SÓLIDOS}}$  = Indicador de Geração de Resíduos [kg/t]

Classe I = Geração de Resíduos Perigosos [kg]

Classe IIA = Geração de Resíduos Não Perigosos Não Inertes [kg]

Classe IIB = Geração de Resíduos Não Perigosos Inertes [kg]

Recicláveis = Resíduos enviados para reciclagem [kg]

P = Quantidade de Produtos Produzidos no Volume de Controle [t]

#### 4.1.3. Ecoindicador de Efluentes Líquidos

A proposta para o cálculo da geração de efluentes é considerar os efluentes do tipo orgânico, inorgânico e sanitário. Devem ser subtraídos na equação a água pluvial não contaminada e o efluente recebido de outras empresas. O corpo hídrico que recebe o efluente deve ser considerado fora do limite de controle no cálculo do ecoindicador, independentemente da localização física do mesmo. A Equação 13 foi proposta para representar a geração de efluentes líquidos:

$$E_{\text{EFLUENTES LÍQUIDOS}} = \frac{EO + EI + ES - AN - ER}{P} \quad (13)$$

Onde:

$E_{\text{EFLUENTES LÍQUIDOS}}$  = Ecoindicador de Geração de Efluentes Líquidos [m<sup>3</sup>/t]

EO = Geração de Efluente Orgânico [m<sup>3</sup>]

EI = Geração de Efluente Inorgânico [m<sup>3</sup>]

ES = Geração de Esgoto Sanitário [m<sup>3</sup>]

ER= Efluente recebido de outras empresas [m<sup>3</sup>]

AN = Águas Pluviais Não Contaminadas [m<sup>3</sup>]

P = Quantidade de Produtos Produzidos no Volume de Controle [t]

Caso o cálculo da parcela de água pluvial seja realizado utilizando a precipitação como base, deve ser considerada a água não contaminada que cai na área construída e canaletas, subtraindo a água que percola no solo.

#### 4.1.4. Ecoindicador de Energia

O ecoindicador de energia foi calculado pela diferença entre as entradas e saídas do limite de controle estabelecido. Na parcela de entrada devem ser considerados os consumos de energia em suas diversas formas, como: elétrica, combustíveis e vapor. Na parcela de saída deve ser considerada a energia elétrica, gás natural ou vapor que for vendido ou fornecido para outras unidades.

A unidade padrão será em termos de energia. Para os combustíveis que estão mensurados em unidades de volume ou massa deverá ser feita a conversão para Gigajoule, utilizando o poder calorífico do combustível. A Equação 14 foi proposta para o cálculo do ecoindicador de consumo de energia é a seguinte:

$$E_{\text{ENERGIA}} = \frac{\sum EE - \sum SE}{P} \quad (14)$$

$E_{\text{ENERGIA}}$  = Indicador de Consumo de Energia [GJ/t]

EE = Entrada de Energia [GJ]

SE = Saída de Energia [GJ]

P = Quantidade de Produtos Produzidos no Volume de Controle [t]

## 4.2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a elaboração da proposta de equações para os ecoindicadores e aplicá-las nas unidades industriais da Braskem, foi aplicado o modelo desenvolvido pelo *Lowell Center for Sustainable Production* (LCSP), utilizado por Veleva et al. (2003) em um estudo de ecoindicadores aplicado à indústria farmacêutica.

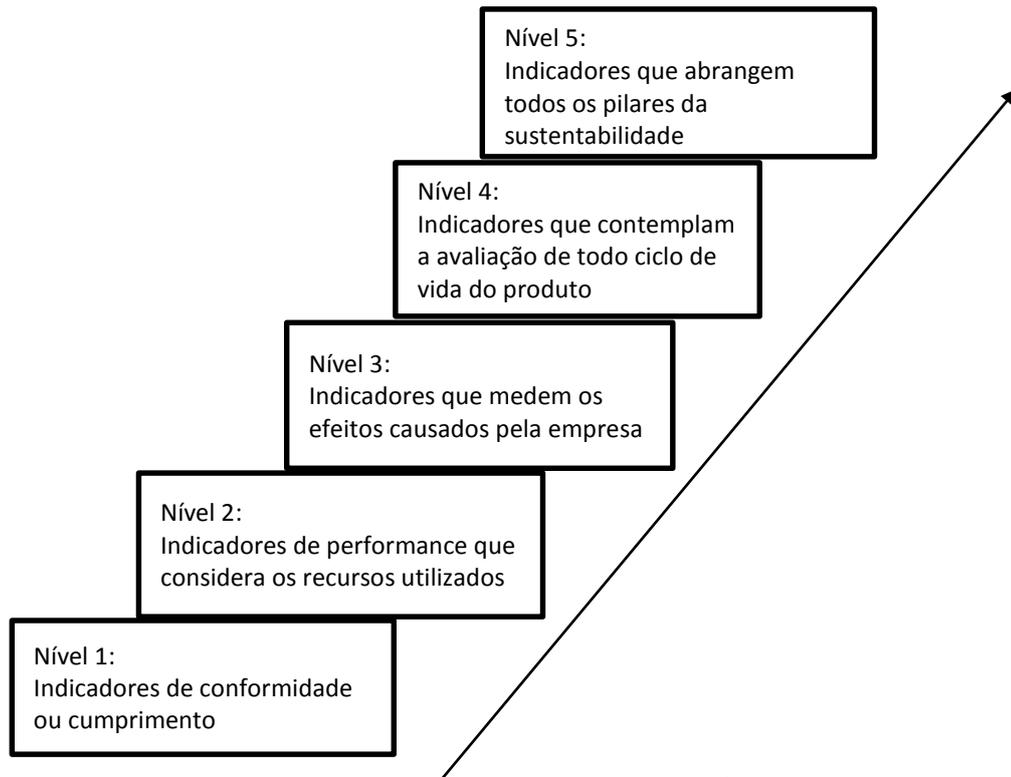
Este método consiste numa avaliação qualitativa do ecoindicador para auxiliar as empresas a verificar se os ecoindicadores utilizados possuem a abrangência desejada. Para avaliação é utilizado um quadro com cinco níveis, baseado no modelo LCSP para categorizar os ecoindicadores, tal como ilustrado na Figura 5 e explicado na Tabela 1:

Tabela 1. Tabela com os níveis de classificação dos ecoindicadores, baseada no modelo LCSP.

Nível LCSP	Descrição
1	Indicadores elaborados para cumprir com os regulamentos. Considera o mínimo de informações que a empresa precisa para atender a legislação.
2	Este nível mede o desempenho do processo de produção e utilização de materiais. São contabilizadas as entradas e saídas do limite de controle e já existe um padrão de cálculo. Os ecoindicadores utilizados estão relacionados com a redução de custos e, portanto, são amplamente utilizados por empresas.
3	Indicadores deste nível avaliam os efeitos gerados pelas atividades operacionais da empresa no ambiente. Por exemplo, o CO <sub>2</sub> emitido pela energia utilizada.
4	Ocorre análise da cadeia de abastecimento e ciclo de vida do produto. Esses tipos de indicadores medem o nível de reutilização, reciclagem e utilização de materiais renováveis. Por exemplo: CO <sub>2</sub> emitido no transporte além dos limites da unidade industrial.
5	Ecoindicadores que mostram a ação de empresas em termos de sustentabilidade para a sociedade. A produção sustentável não está sendo uma atividade isolada; as questões sociais, econômicas e ambientais devem ser consideradas. Os indicadores de nível 5 medem os efeitos da produção sobre a qualidade de vida, desenvolvimento humano e capacidade de assimilação dos impactos negativos sobre o meio ambiente.

Fonte: VELEVA et al., 2003.

Figura 5 – Níveis LCSP, mostrados de maneira ascendente o grau de abrangência do ecoindicador.



Fonte: Baseado em VELEVA et al., 2003.

De acordo com RESINA et al. (2012) apesar de o modelo de avaliação LCSP dos indicadores não ser quantitativo, ele ajuda na classificação dos ecoindicadores utilizados e ainda facilita na identificação de novos ecoindicadores que a empresa deseje monitorar.

Inicialmente é necessário conhecer de maneira sucinta o processo produtivo de cada unidade e seus impactos ambientais, para elaboração de uma proposta para cálculo dos ecoindicadores e posterior avaliação. De acordo com Samuel et al. (2012), não é o fato da empresa possuir ecoindicadores de níveis mais elevados que deva desprezar os de menores níveis. Estes devem ser considerados e fazer parte do acompanhamento empresarial. O quadro de classificação LCSP não determina se os indicadores são melhores que os outros, apenas indica se a empresa está monitorando o que deseja mensurar e melhorar (GREINER, 2001).

Após a avaliação qualitativa foi realizada uma análise dos resultados numéricos, representados através de gráficos, dos ecoindicadores obtidos.

## 5 RESULTADOS

Foi realizado um estudo de caso onde as metodologias de cálculo de ecoindicadores propostas foram avaliadas através da aplicação em unidades da Braskem. Foram consideradas as premissas para o cálculo, os conceitos adotados, os limites de controle, as unidades utilizadas, entre outros parâmetros presentes na consolidação dos ecoindicadores. As equações propostas foram avaliadas qualitativamente através do modelo LCSP e os resultados numéricos foram obtidos utilizando dados de processo fornecidos pela empresa.

### 5.1 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado em quatro unidades industriais da Braskem, empresa produtora de resinas termoplásticas. As Unidades avaliadas foram: Cloro Soda Alagoas e Bahia e PVC Alagoas e Bahia. Foram verificados os principais impactos ambientais no processo produtivo, assim como a forma de acompanhamento dos ecoindicadores atualmente utilizadas por essas indústrias. Após esta etapa de avaliação foi aplicada a metodologia proposta.

#### 5.1.1. Descrição do Processo da Unidade de Cloro Soda da Braskem Alagoas

O processo de produção da Unidade Cloro Soda da Braskem Alagoas inicia-se com a extração da salmoura na área de mineração. A salmoura é uma solução aquosa contendo cloreto de sódio. Após a extração, a salmoura é encaminhada através de tubulação para uma área de tratamento.

Durante o processo de tratamento, ocorre a formação da “lama de salmoura”, resíduo gerado em grande quantidade que é enviada à área de mineração, sendo injetada nas minas desativadas.

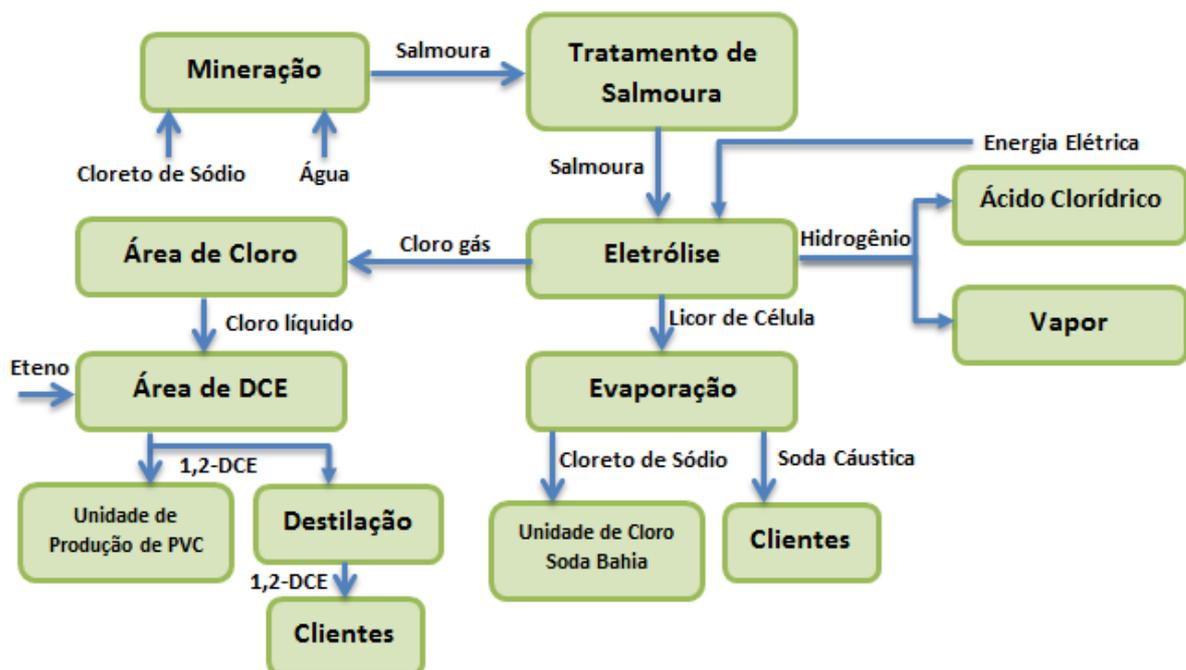
Posteriormente, a salmoura é encaminhada para o processo de eletrólise, onde são produzidos cloro, hidrogênio e licor de células, que através de processamento irá se transformar em soda cáustica. Esta etapa de eletrólise é a que demanda maior quantidade de energia elétrica para sua realização.

Após a etapa de eletrólise o cloro passa por etapas de resfriamento, secagem, compressão, liquefação e é encaminhado para área de produção de 1,2-dicloroetano (1,2-DCE). O eteno, proveniente de outra unidade da Braskem, é adicionado ao cloro, resultando em uma reação exotérmica. Esta reação, denominada de cloração direta, obtém como produto o 1,2-DCE. Outra parte do cloro é encaminhada para produção de ácido clorídrico (HCl) e hipoclorito de sódio.

O licor de células é enviado para área de evaporação onde passa por várias etapas de processo, resultando em soda cáustica.

O cloreto de sódio recuperado da concentração da soda, é fluidizado pela salmoura dos tanques de ressaturação. Este tem dois caminhos: um para o ciclone da plataforma de cloreto de sódio e o outro se subdivide alimentando os dois tanques de ressaturação. O cloreto de sódio separado no ciclone é recolhido e é transportado para a Unidade da Braskem Cloro Soda Bahia. A Figura 6 apresenta um esquema geral do processo da Cloro Soda (CS) Alagoas.

Figura 6 - Diagrama geral do processo da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

Durante todo o processo ocorrem diversos impactos ambientais de consumo de água, energia e geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos.

A Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas utiliza água captada de poços localizados na área de mineração e em outras áreas da própria unidade industrial em diversas etapas de seu processo. A água é consumida na área de mineração para remoção da salmoura do subsolo, nas caldeiras para geração de vapor, no abastecimento do sistema de combate a incêndio, nas torres de resfriamento, entre outros processos.

Ocorre também alguns casos de reuso, em um deles a água utilizada no processo de produção de cloro retorna para o processo. No outro caso a água utilizada na evaporação (na etapa de concentração de soda) é condensada e retorna para as caldeiras.

Os resíduos gerados na unidade são segregados em Classe I, IIA e IIB, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004). A maior parte dos resíduos gerados é destinada para o aterro industrial da área de utilidades da Unidade de PVC da Braskem Alagoas. Outros resíduos são enviados para outras empresas para receber um tratamento específico. O resíduo de lama de salmoura é injetado novamente nas minas de sal da área de mineração. Existe um controle detalhado com as quantidades e dos destinos específicos para cada um dos tipos de resíduo.

A Tabela 2 apresenta a destinação dos principais resíduos sólidos gerados no processo da Unidade de Cloro Soda Alagoas.

Tabela 2. Resíduos da Unidade de Produção de Cloro Soda Alagoas que são enviados para tratamento em outras empresas.

Resíduo	Destinação
Tambores contendo clorofórmio e lama ferrosa	Incineração
Papel, Papelão, Plástico, Lâmpadas, Madeira	Reciclagem
Ambulatorial	Incineração
Sucata	Reaproveitamento

Fonte: Autor, 2013.

Na Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas o efluente gerado no processo é classificado como inorgânico. Esse efluente é encaminhado para uma bacia de tratamento de tratamento de efluentes na própria unidade. Já o esgoto doméstico é direcionado para a rede de tratamento do município.

A Unidade de Produção consome energia elétrica principalmente no processo de eletrólise que requer uma quantidade considerável de energia, possuindo um valor fixo

necessário. Caso esse valor não seja atingido são verificados os pontos onde pode estar havendo alguma perda.

Outro ponto é que existe um acordo com a concessionária de energia elétrica de consumo, onde um determinado valor é acertado e considerado na fatura de energia da unidade, mesmo que o consumo não seja atingido.

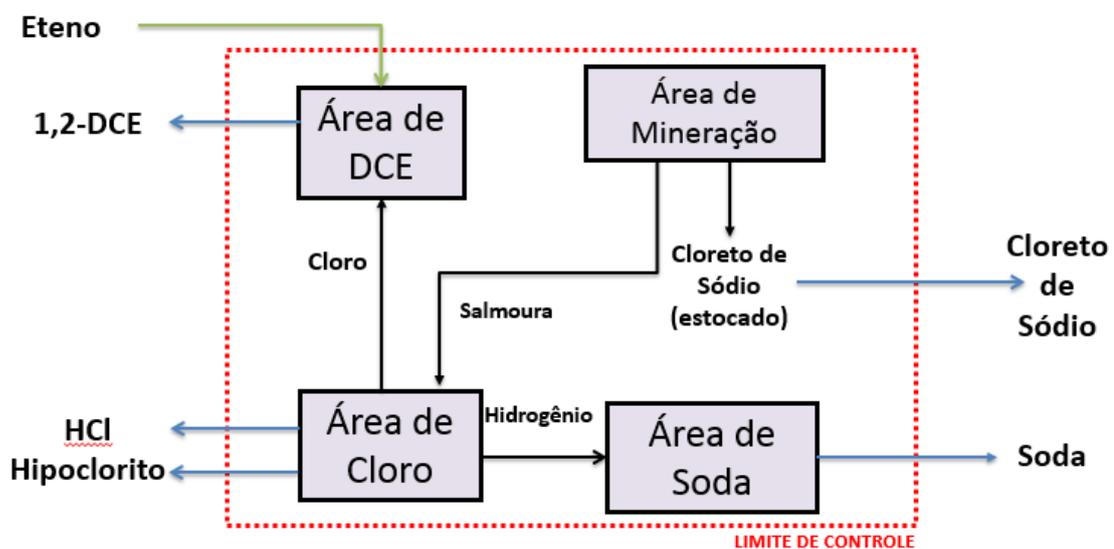
O consumo de gás natural também é bastante expressivo, principalmente quando a produção de hidrogênio é baixa. Isso ocorre quando há alguma parada nas casas de células.

### 5.1.2. Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Alagoas

A Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas produz diversos produtos através de matérias-primas como o Eteno (Figura 7). Alguns produtos são consumidos por outras unidades da empresa, enquanto outros são vendidos.

A Unidade de Produção de Cloro Soda produz os seguintes produtos: soda, cloro, 1,2-dicloroetano, ácido clorídrico, hipoclorito de sódio, hidrogênio e cloreto de sódio. Atualmente são considerados todos esses produtos na parcela de produção do cálculo do ecoindicador, porém seguindo as premissas propostas devem considerados apenas os produtos finais, que saem do limite de controle da unidade.

Figura 7 – Diagrama esquemático com os produtos da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas.

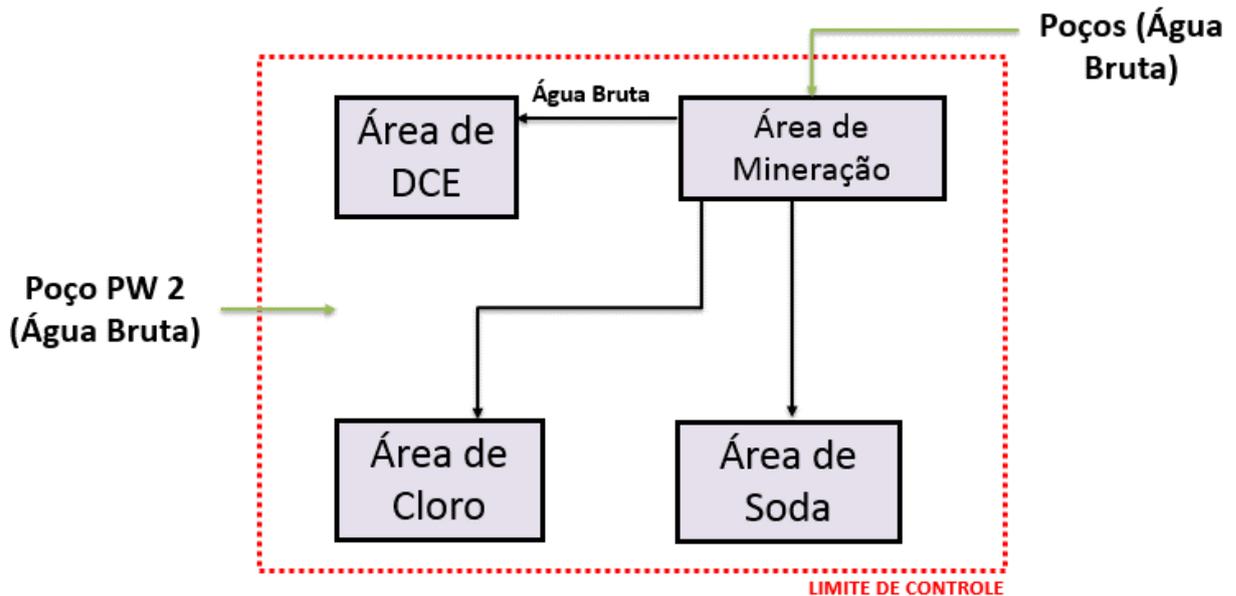


$$\text{Produção} = \text{Soda} + 1,2\text{-Dicloetano} + \text{Ácido Clorídrico} + \text{Hipoclorito de Sódio} + \text{Cloreto de Sódio} \quad (15)$$

A água proveniente de poços localizados na área de mineração e na própria unidade industrial em diversas etapas de seu processo devem ser consideradas no cálculo, conforme ilustrado na Figura 8.

Ocorre também alguns casos de reuso, em um deles a água utilizada no processo de produção de cloro retorna para o processo. No outro caso a água utilizada na evaporação (na etapa de concentração de soda) é condensada e retorna para as caldeiras. Como se trata de uma reutilização interna, essa parcela não será contemplada no ecoindicador.

Figura 8 - Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 16 foi proposta para representar o consumo de água da Unidade de Produção de Cloro Soda:

$$\text{Consumo de Água} = \text{Água da Área de Mineração} + \text{Água Captada na Planta} \quad (16)$$

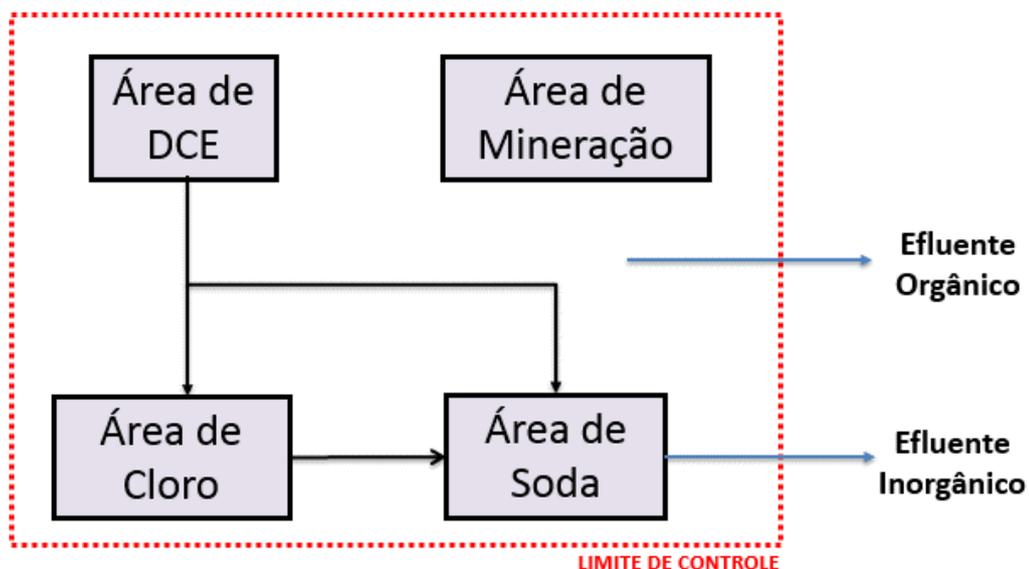
A Unidade de Cloro Soda Alagoas destina a maior parte de seus resíduos para o aterro industrial da Unidade de PVC Alagoas. Seguindo a premissa adotada essa parcela deve ser considerada no cálculo, assim como os resíduos que são enviados para tratamento externo.

A Equação 17 foi proposta para representar a geração de resíduos sólidos da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas:

$$\text{Resíduos sólidos} = 3 \times (\text{Classe I}) + \text{Classe II A} + \text{Classe II B} - \text{Recicláveis} \quad (17)$$

No cálculo do ecoindicador de efluentes líquidos da Unidade de Cloro Soda Alagoas, todo efluente gerado no processo que sai da bacia de tratamento de tratamento de efluentes para descarte no corpo hídrico deve ser contabilizado. Apesar de não se tratar de um efluente gerado diretamente no processo, a parcela do esgoto doméstico que atualmente não está sendo considerada no ecoindicador, deve fazer parte do cálculo, de acordo com o padrão adotado. A Figura 9 apresenta o processo de geração de efluentes líquidos na Unidade de Cloro Soda Alagoas. No cálculo de efluentes deve ser subtraído o valor decorrente da água de chuva não contaminada. Esse valor é obtido através de uma estimativa utilizando o valor de precipitação pluviométrica e da área construída na unidade.

Figura 9 - Diagrama representando a geração de efluentes líquidos da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

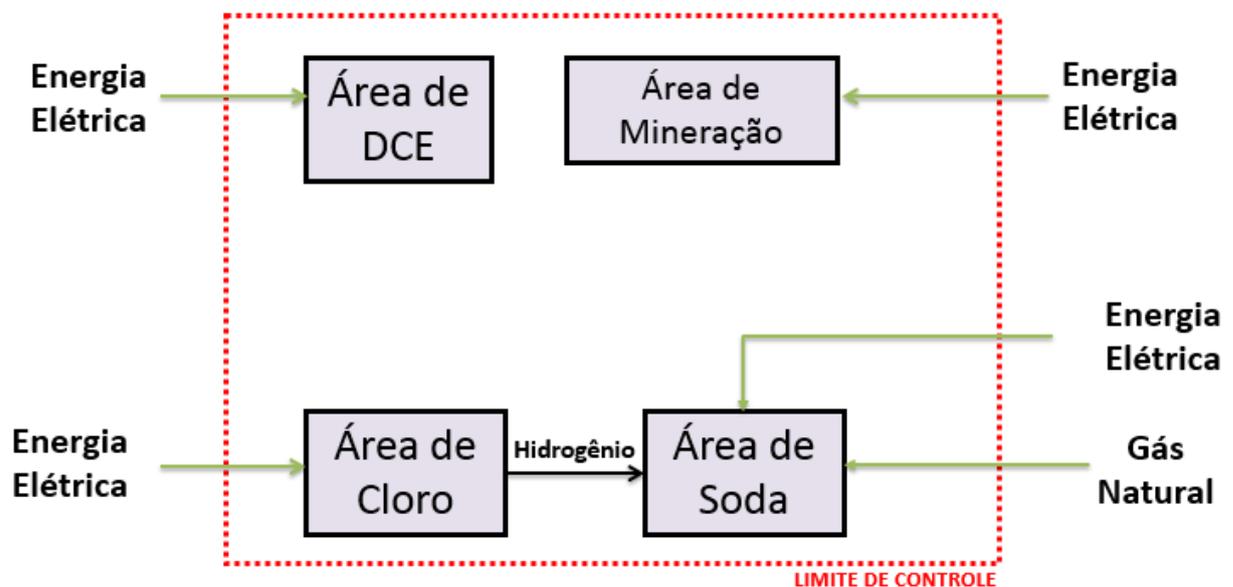
A Equação 18 representa a geração de efluentes líquidos da unidade:

$$\text{Efluentes Líquidos} = \text{Efluente Orgânico} + \text{Efluente Inorgânico} - \text{Água de Chuva Não Contaminada} \quad (18)$$

No cálculo do ecoindicador de energia da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas, deve ser considerado todo o consumo de energia elétrica da eletrólise e dos equipamentos industriais. Também deve ser considerada o consumo da área de mineração, que pertence a uma fatura de energia diferente.

O gás natural deve compor o cálculo do ecoindicador, porém o hidrogênio que é gerado e consumido internamente não terá necessidade de fazer parte do cálculo. Durante o estudo foi possível observar a variação do consumo de gás natural em função da produção de hidrogênio. O consumo de diesel, não considerado no formato de cálculo atual, de acordo com as premissas da proposta deverá fazer parte do cálculo. A Figura 10 ilustra as entradas de energia no limite de controle da Unidade de Produção de Cloro Soda Alagoas:

Figura 10 - Diagrama representando o consumo de energia da Unidade de Produção Cloro Soda Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 19 foi proposta para representar o consumo de energia da Unidade de Produção de Cloro Soda Alagoas:

$$\text{Consumo de Energia} = \text{Consumo de Energia Elétrica} + \text{Consumo de Gás Natural} + \text{Consumo de Diesel} \quad (19)$$

### 5.1.3. Descrição do Processo da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Bahia

O processo eletrolítico para produção de soda cáustica, cloro e hidrogênio, é uma operação contínua que ocorre em um sistema fechado na Unidade de Produção Cloro Soda Bahia.

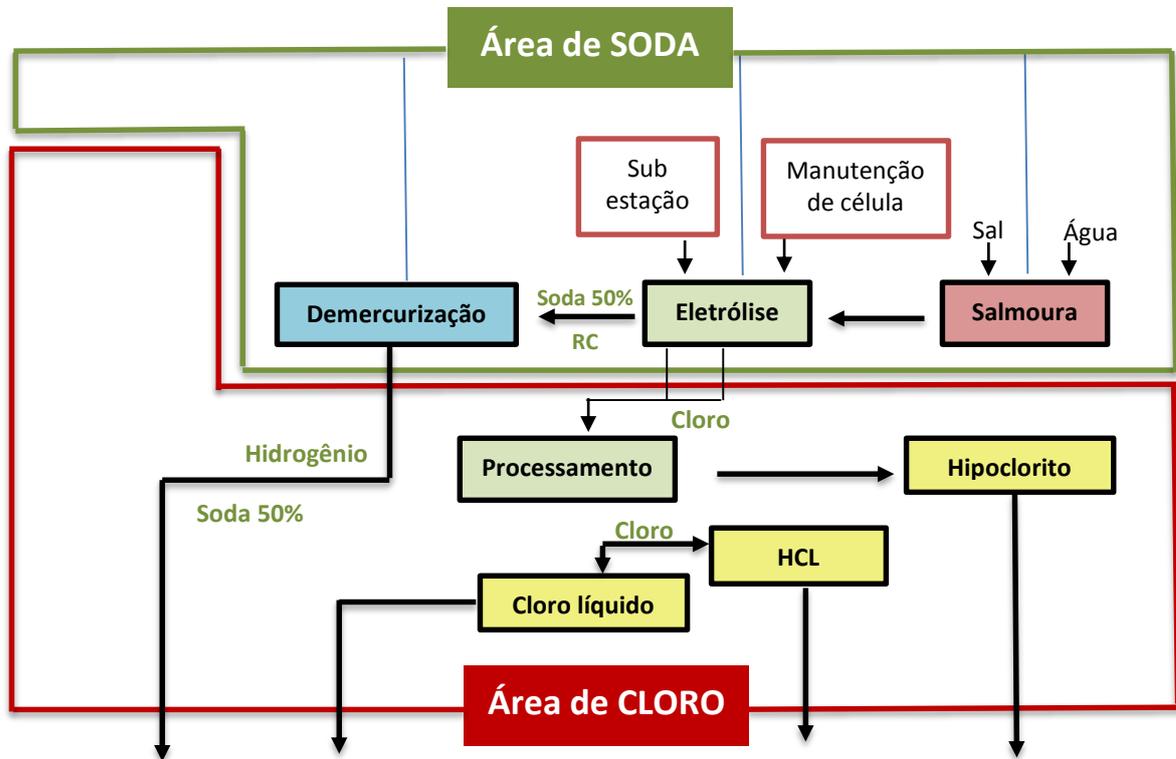
A salmoura, diferente do que ocorre na Unidade de Cloro Soda Alagoas, é preparada a partir do cloreto de sódio recebido. Após esta etapa ocorre um processo de tratamento para finalmente ser bombeada para a célula, circulando entre um ânodo de titânio e um cátodo de mercúrio. A passagem da corrente elétrica direta entre o ânodo e o cátodo resulta na eletrólise da salmoura, produzindo cloro gás.

O cloro gás passa pelos processos de resfriamento, secagem, compressão, liquefação e depois é estocado em tanques. Os íons sódio formam uma amálgama com mercúrio no decompositor de uma célula, e através da passagem de água, ocorre à formação do hidróxido de sódio (soda cáustica) e a regeneração do mercúrio que retorna ao processo inicial.

A soda cáustica é resfriada e passa pelo processo de tratamento com carvão ativado para remoção do mercúrio e depois é transferida para a estocagem. O hidrogênio é resfriado, passando também pelo processo de tratamento com carvão ativado para remoção do mercúrio, seguindo para o gasômetro. O ácido clorídrico é produzido através da queima direta do cloro gás com o hidrogênio. O hipoclorito de sódio é produzido através da reação de uma solução de soda cáustica com o cloro gás.

A Figura 11 apresenta o processo produtivo da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia.

Figura 11 – Diagrama do processo da produção da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia.



Fonte: Autor, 2013.

Toda água utilizada no processo produtivo da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia é adquirida de outras empresas. A água já vem tratada e especificada, sendo utilizada água clarificada e potável. Também é adquirido vapor sob pressão para utilização no processo.

A Unidade de Produção Cloro Soda Bahia encaminha todos os seus resíduos para tratamento ou destinação em outras empresas. A maior parte desse resíduo vai para aterro industrial ou é enviada para reciclagem.

Na unidade industrial grande parte do efluente gerado é do tipo inorgânico. Todo efluente gerado é encaminhado para tratamento em estação de tratamento em outras empresas.

O consumo de energia elétrica é maior no processo de eletrólise, sendo essa energia fornecida pela concessionária do governo. A outra forma de energia adquirida é o vapor pressurizado de 15 kgf/cm<sup>2</sup>, proveniente de outra empresa.

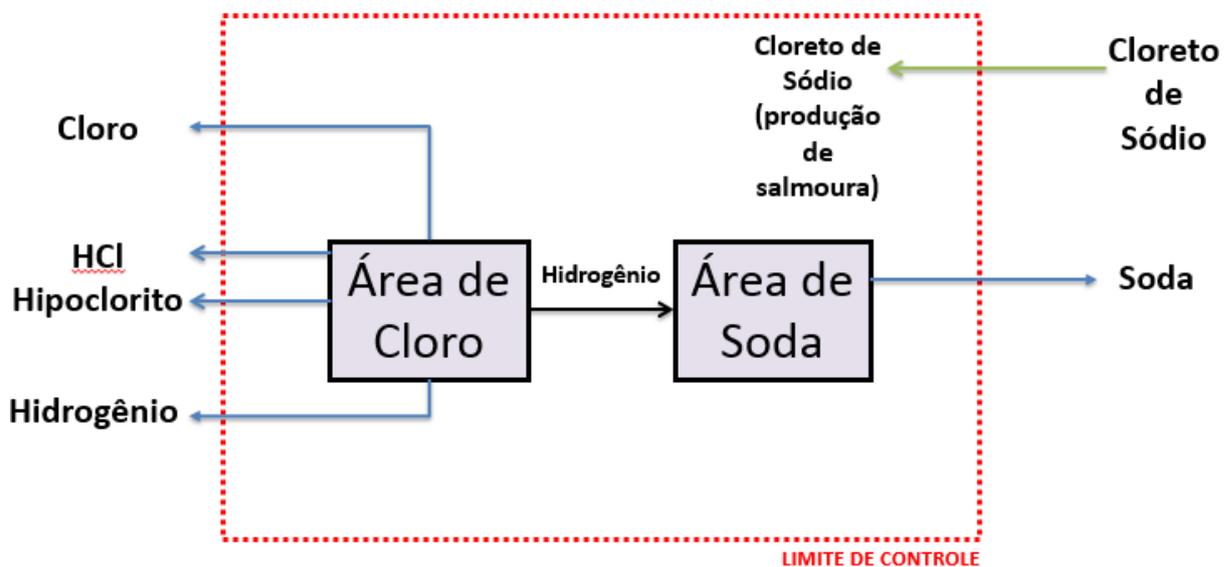
Nesta unidade industrial não há utilização do gás natural, pois não possui equipamentos como caldeiras ou incineradores.

#### 5.1.4. Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção Cloro Soda da Braskem Bahia

A Unidade de Cloro Soda Bahia recebe o cloreto de sódio proveniente da Unidade de Cloro Soda de Alagoas e produz a salmoura, matéria-prima necessária para o processo.

A Unidade produz os seguintes produtos: Soda, Cloro, Ácido Clorídrico, Hipoclorito de Sódio e Hidrogênio. No cálculo do ecoindicador, são considerados apenas os produtos finais, que saem do limite de controle da unidade, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Diagrama com os produtos da Unidade de Produção da Cloro Soda Bahia.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 20 foi proposta para representar o total da produção da Unidade de Cloro Soda Bahia:

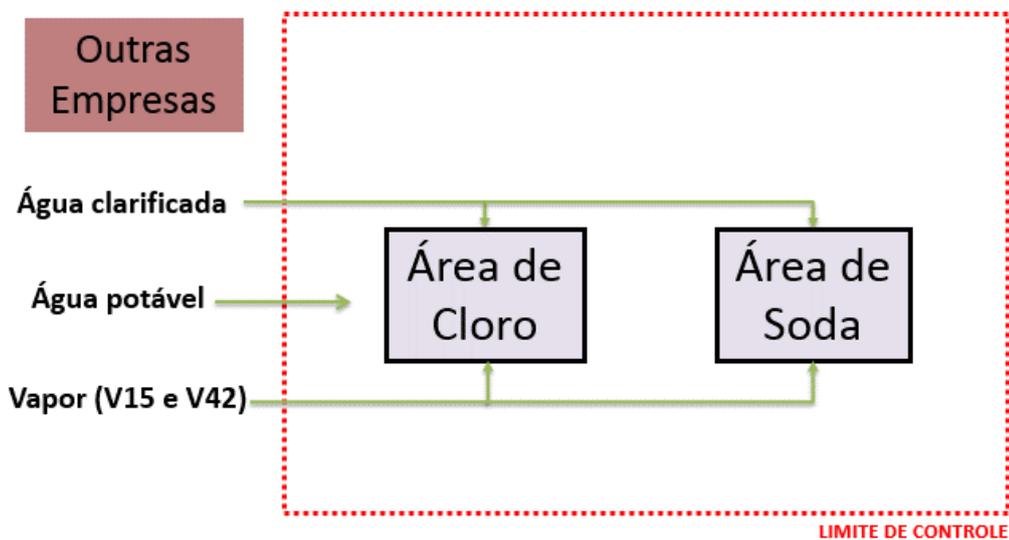
$$\text{Produção} = \text{Soda} + \text{Ácido Clorídrico} + \text{Hipoclorito de Sódio} + \text{Hidrogênio} + \text{Cloro} \quad (20)$$

Assim como na Unidade de Produção de Cloro Soda de Alagoas, o hipoclorito de sódio, a soda cáustica e o ácido clorídrico são mensurados em base seca e convertidos em base úmida através de um cálculo envolvendo a concentração do produto. Porém a concentração utilizada na unidade industrial da Bahia é fixa, diferente da unidade industrial de Alagoas que mensalmente realiza análises e considera o valor obtido no cálculo. Neste caso a proposta é

utilizar como padrão a concentração real, para que os números obtidos sejam mais representativos.

A Unidade de Produção Cloro Soda Bahia não realiza captação de água. Desta forma, no cálculo do ecoindicador é considerada a água adquirida de outras empresas, nas formas de água potável, clarificada, desmineralizada e vapor (Figura 13). Nesta figura V15 e V42 representam, respectivamente, vapor sob pressão de 15 kgf/cm<sup>2</sup> e vapor sob pressão de 42 kgf/cm<sup>2</sup>.

Figura 13 - Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 21 foi proposta para representar o consumo de água da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia:

$$\text{Consumo de Água} = \text{Água Clarificada} + \text{Água Potável} + \text{Vapor Adquirido} \quad (21)$$

Os resíduos da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia são destinados para tratamento ou disposição em outras empresas. Portanto, deve ser considerado no cálculo ecoindicador, todo o resíduo que é exportado, subtraindo a parcela de resíduos enviados para reciclagem.

A Equação 22 foi proposta para representar a geração de resíduos sólidos da Unidade produção de Cloro Soda da Braskem Bahia:

$$\text{Resíduos Sólidos} = 3 \times (\text{Classe I}) + \text{Classe II A} + \text{Classe II B} - \text{Recicláveis} \quad (22)$$

Os efluentes líquidos gerados na Unidade de Produção Cloro Soda Bahia são enviados para tratamento externo em outras empresas. Todo esse volume deve ser contabilizado no ecoindicador. A água de chuva não contaminada também deve ser descontada do valor total, prática que já foi adotada pela Unidade, mas atualmente não está mais sendo realizada.

Seguindo as premissas de cálculo, a Equação 23 foi utilizada para representar a geração de efluentes líquidos da unidade.

$$\text{Efluentes Líquidos} = \text{Efluente Orgânico} + \text{Efluente Inorgânico} - \text{Água de Chuva Não Contaminada} \quad (23)$$

O consumo de energia da Unidade de Produção Cloro Soda Bahia se dá através das formas de energia elétrica e de vapor. A energia elétrica é proveniente da concessionária pública de energia, enquanto o vapor é proveniente de outra empresa. O consumo de diesel não está compondo o cálculo atual, mas de acordo com as premissas deverá ser considerado.

A proposta para representar o consumo de energia elétrica da Unidade é dada pela Equação 24.

$$\text{Consumo de Energia} = \text{Consumo de Energia Elétrica} + \text{Vapor Adquirido} + \text{Consumo de Diesel} \quad (24)$$

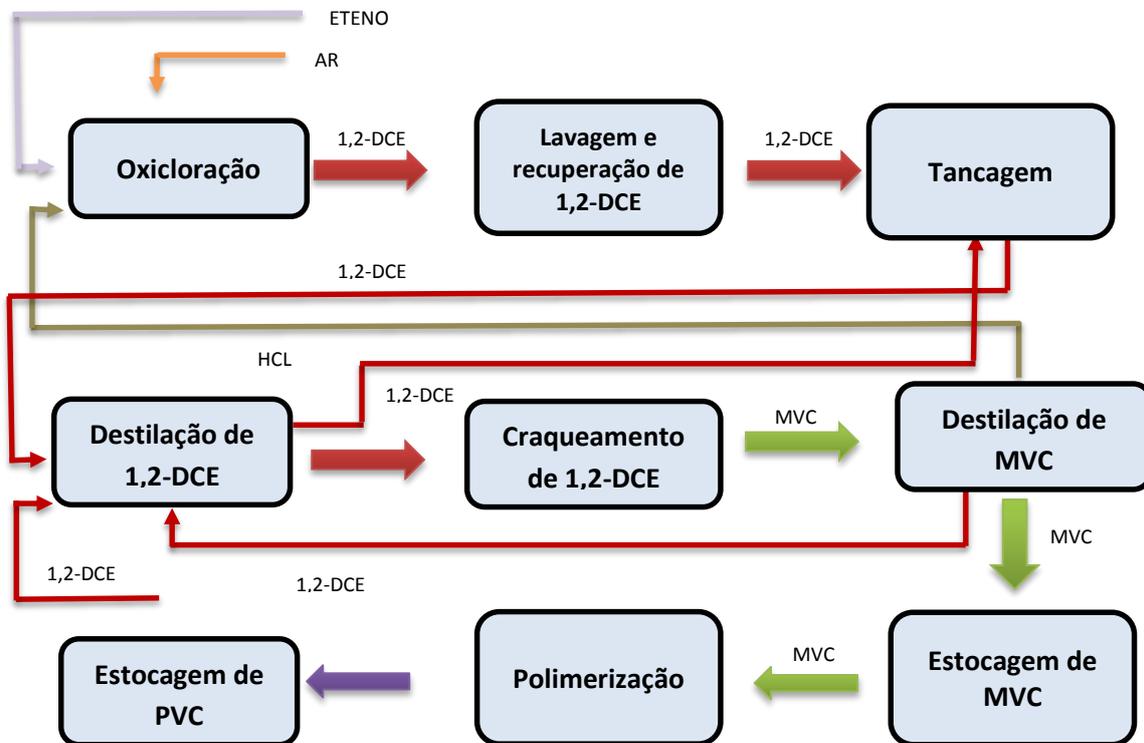
#### 5.1.5. Descrição do Processo da Unidade de Produção PVC da Braskem Alagoas

O processo da Unidade de Produção PVC Alagoas inicia-se na área de produção do monocloreto de vinila (MVC), quando o eteno proveniente de outra unidade industrial da Braskem é encaminhado para o reator de oxicloração para produção de 1,2-DCE. Este passa por um processo de destilação e depois de craqueamento nos fornos, que resulta no MVC.

Após esta etapa o MVC é encaminhado para os reatores de polimerização, formando o Policloreto de Vinila (PVC). A parcela do MVC não reagido é recuperado e retorna ao processo. O PVC resultante ainda passa por um processo de secagem, com objetivo de remover o percentual de umidade residual. Após secagem, o PVC (na forma de pó fino) é transferido (por processo pneumático, em circuito fechado, dentro de tubulações) para os silos de estocagem, situados na área de armazenamento de produto acabado.

A Figura 14 apresenta um Diagrama do processo da Unidade PVC Alagoas.

Figura 14 - Diagrama de blocos do processo da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Unidade de Produção PVC Alagoas passou por um processo de ampliação das áreas de produção de MVC e PVC. A expansão da área de MVC aumentou a produção dos produtos intermediários: MVC, 1,2-DCE e ácido clorídrico. Sendo também aumentado consideravelmente a geração de efluente organoclorado.

A ampliação da área de produção de PVC fez com que a quantidade de produto final aumentasse, porém também houve um aumento no consumo água destilada e aditivos para realização do processo de polimerização, além do aumento na demanda de energia e geração de efluente líquido.

Outra área fundamental da Unidade de PVC da Braskem Alagoas é a de utilidades. Ela é constituída pelos processos de tratamento de efluentes, de incineração, tratamento de água, geração de vapor e tratamento de resíduos sólidos. A área de utilidades fornece parte dos recursos necessários do processo, além de apoiar na destinação de rejeitos das áreas de PVC e MVC.

A água é essencial para a geração de vapor na área de utilidades e no processo de polimerização. A água bruta é captada do Rio dos Remédios. Esta passa por alguns processos de tratamento para se produzir água potável, clarificada e desmineralizada. Existe também o recebimento de água bruta oriunda de um processo de outra empresa que reutiliza a água de poços de tratamento, enviando para a torre de resfriamento da área de MVC da PVC AL. Diferente das outras unidades do estudo, a Unidade de PVC Alagoas também fornece água clarificada para outras empresas.

A maior parte dos resíduos gerados na unidade industrial é destinada atualmente no aterro industrial da área de utilidades. Na própria unidade industrial os resíduos são segregados em Classe I, IIA e IIB, conforme a NBR 10.004. Outros resíduos possuem uma destinação diferente por possuir a necessidade de um tratamento específico. Os resíduos que são enviados para reciclagem ou reaproveitamento são contabilizados a parte.

A Tabela 3 apresenta a destinação de alguns dos resíduos sólidos gerados no processo de produção da unidade.

Tabela 3 – Resíduos que são destinados fora do limite de controle da Unidade de Produção PVC Alagoas.

Resíduo	Destinação
Papel, Papelão, Plástico, Lâmpadas, Madeira	Reciclagem
Ambulatorial	Incineração
Sucata	Reaproveitamento
Resíduo de coque	Incineração

Fonte: Autor, 2013.

Com a incorporação da área de Utilidades, a Unidade de Produção PVC Alagoas passou a tratar os efluentes internamente. Os efluentes gerados são segregados em orgânico e inorgânico. Todo efluente inorgânico é tratado internamente na lagoa de estabilização.

O efluente orgânico é encaminhado para a área de tratamento de efluentes e após todo o processo de tratamento é descartado em corpo hídrico. A Unidade de tratamento além de receber os efluentes da unidade, recebe efluentes de outras empresas.

A Unidade de Produção PVC Alagoas adquire de fornecedores externos energia elétrica e gás natural. O gás natural é essencial para a operação de equipamentos como as caldeiras, fornos e incineradores. Na área de Utilidades também é gerado vapor sob pressão

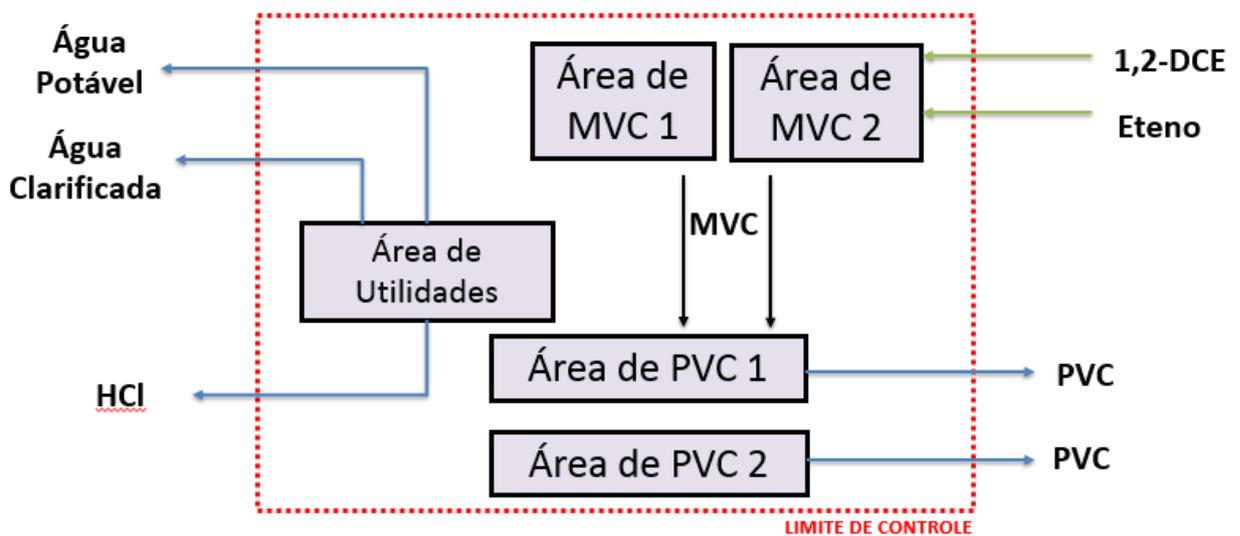
de 15 kgf/cm<sup>2</sup> e de 42 kgf/cm<sup>2</sup> sendo consumido internamente pelo processo. Existe uma pequena parcela da energia que é gerada e consumida internamente na área de Utilidades.

#### 5.1.6. Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de Produção de PVC Alagoas

A Unidade de Produção PVC Alagoas foi ampliada através de um projeto de duplicação da área de produção de monocloreto de vinila e de polimerização, ocasionando a geração de PVC em mais de uma área. Houve também a aquisição da empresa CINAL, fazendo com que a área de utilidades passasse a fazer parte da Unidade.

A Unidade comercializa os seguintes produtos: PVC, o ácido clorídrico, água clarificada e potável, porém são considerados no ecoindicador apenas os produtos que fazem parte do negócio da empresa, seguindo a metodologia proposta para o cálculo de produção. A Figura 15 mostra o diagrama de produção da unidade.

Figura 15 - Diagrama com os produtos da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 25 representa o total da produção da Unidade de Produção PVC Alagoas:

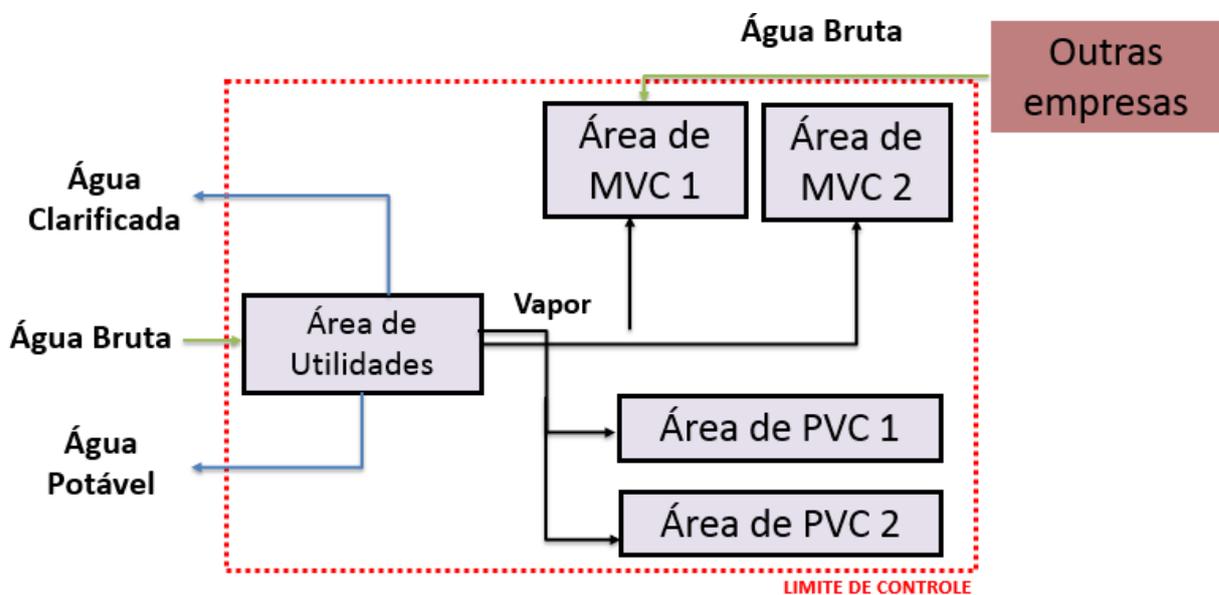
$$\text{Produção} = \text{PVC produzido na Planta 1} + \text{PVC produzido na Planta 2} + \text{Ácido Clorídrico produzido na Área de Utilidades} \quad (25)$$

No ecoindicador de água da Unidade de Produção PVC Alagoas, deve ser considerado como entrada a água bruta captada no Rio dos Remédios e adquirida na torre de resfriamento.

A água bruta é tratada internamente na área de utilidades para produção de água potável, clarificada e desmineralizada.

A Unidade de Produção PVC Alagoas também fornece água, do tipo clarificada para outras empresas e potável para uma comunidade próxima. Durante o estudo foi verificado que essa parcela de água potável não estava fazendo parte do cálculo, porém seguindo o padrão proposto também deve ser considerada no cálculo. A Figura 16 ilustra o processo de consumo de água da unidade.

Figura 16 - Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 26 foi proposta para representar o consumo de água da Unidade de Produção de PVC da Braskem Alagoas:

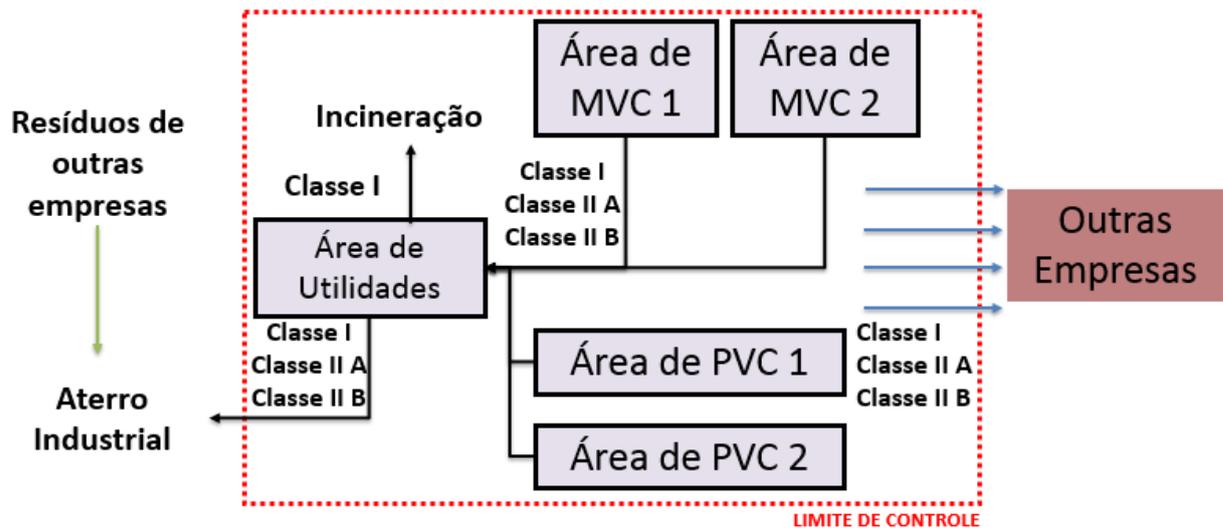
$$\text{Consumo de Água} = \text{Água Bruta Captada} + \text{Água Bruta Recebida} - \text{Água Clarificada Fornecida} - \text{Água Potável Fornecida} \quad (26)$$

Os resíduos sólidos gerados na Unidade de Produção de PVC Alagoas possuem como destino em sua maior parte o aterro sanitário. Todo esse resíduo deve ser contabilizado no cálculo do ecoindicador, assim como o resíduo que é enviado para destinação externa. No cálculo deve ser subtraído a parcela de resíduos que é enviada para a reciclagem.

Os resíduos que são gerados e incinerado internamente, como o resíduo contendo hidrocarbonetos clorados não devem ser contabilizados de acordo com o padrão proposto.

A Figura 17 mostra o fluxo de resíduos da Unidade de Produção de PVC Alagoas.

Figura 17 - Diagrama representando a geração de resíduos da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 27 foi proposta para representar a geração de resíduos sólidos da Unidade de Produção de PVC da Braskem Alagoas:

$$\text{Resíduos sólidos} = 3 \times (\text{Classe I}) + \text{Classe II A} + \text{Classe II B} - \text{Recicláveis} \quad (27)$$

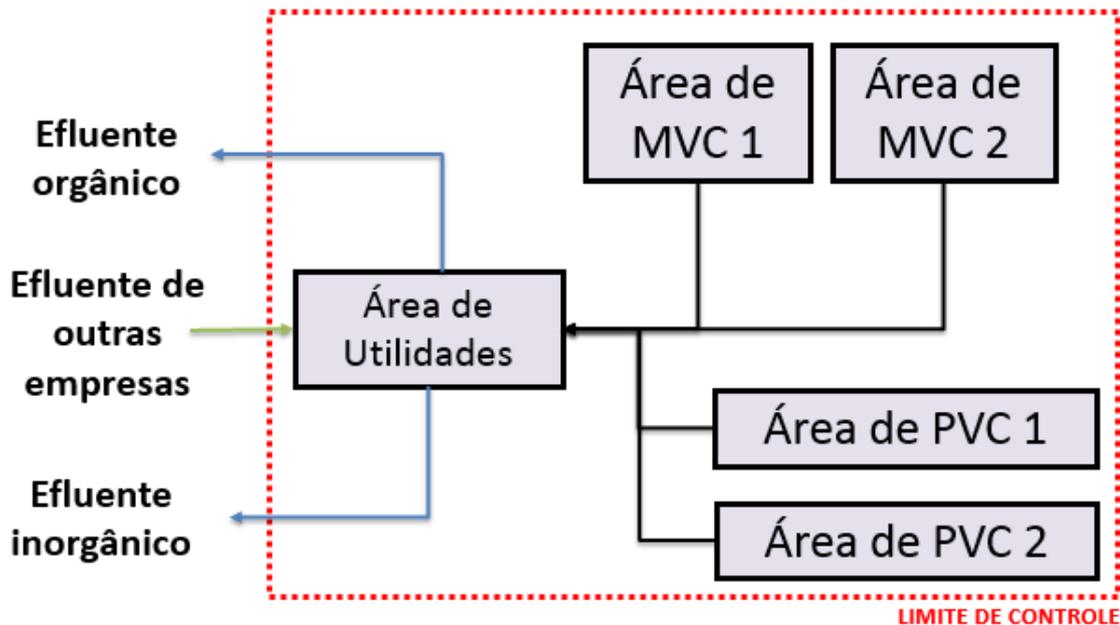
Para o cálculo do ecoindicador de efluentes líquidos, deve ser considerada a geração dos efluentes orgânico e inorgânico. Atualmente não está sendo considerada a geração do efluente inorgânico, porém de acordo com a premissa adotada, mesmo sabendo que o corpo hídrico receptor encontra-se dentro dos limites da unidade, essa parcela do efluente inorgânico deverá fazer parte do cálculo.

A Unidade de Produção PVC Alagoas recebe efluente externo e esse volume deverá ser abatido do cálculo, pois representa um valor não gerado pela Unidade.

No estudo também foi verificado que não estava sendo acompanhando o volume de água pluvial não contaminada. A proposta é que esse valor seja incluído no cálculo, pois em meses de chuva intensa ele atinge valores elevados, ocultando a real geração de efluentes líquidos.

O esquema de geração de efluentes líquidos é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Diagrama representando a geração de efluentes da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 28 apresenta uma proposta para representar a geração de efluentes líquidos da unidade:

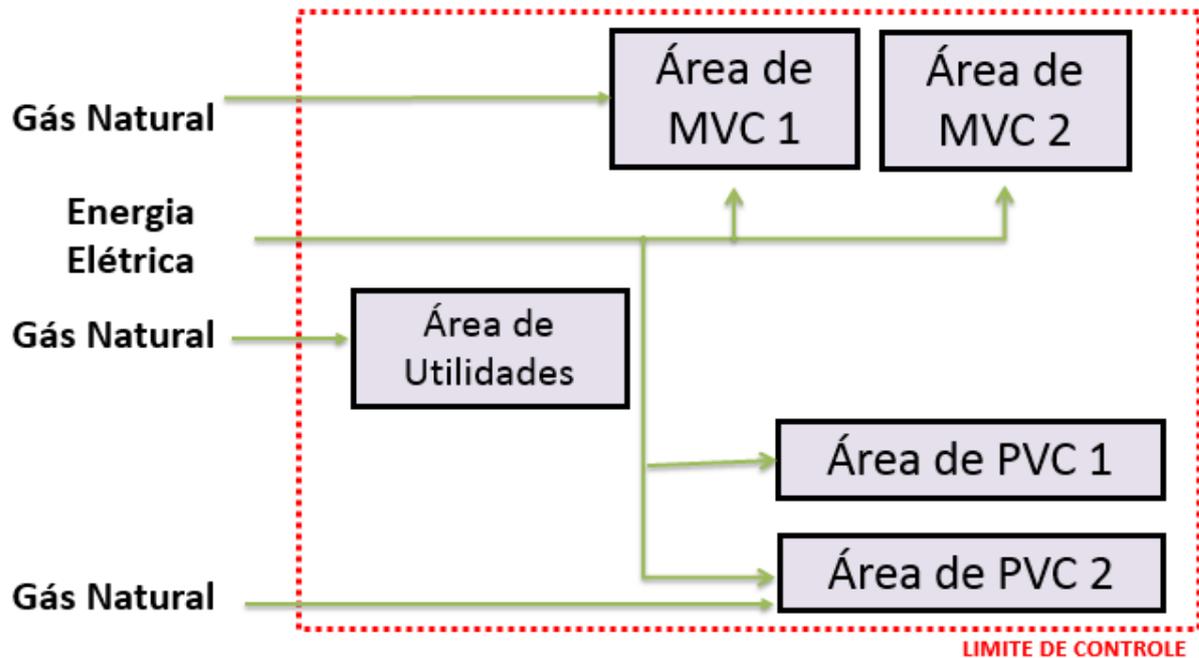
$$\text{Efluentes Líquidos} = \text{Efluente Orgânico} - \text{Efluente Recebido de Outras Empresas} - \text{Água Pluvial Não Contaminada} \quad (28)$$

A energia elétrica e o gás natural consumidos devem ser considerados no cálculo da unidade. Durante o estudo foi verificado que a parcela referente ao consumo de energia do aterro sanitário industrial da área de utilidades deveria ser incluída no cálculo, mesmo sendo o consumo registrado em uma fatura diferente das demais áreas da planta.

O gás natural e o diesel consumido nos equipamentos devem ser convertidos para unidade de energia, utilizando o poder calorífico para tornar possível o cálculo do ecoindicador.

A Figura 19 apresenta o Diagrama do consumo de energia realizado pela Unidade de Produção de PVC Alagoas.

Figura 19 - Diagrama representando o consumo de energia da Unidade de Produção PVC Alagoas.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 29 foi proposta para representar o consumo de energia da Unidade de Produção:

$$\text{Consumo de Energia} = \text{Energia Elétrica} + \text{Gás Natural} + \text{Consumo de Diesel} \quad (29)$$

#### 5.1.7. Descrição do Processo da Unidade de Produção PVC da Braskem Bahia

A Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia produz como produto final o Policloreto de Vinila (PVC). O PVC é o resultado de várias reações físico-químicas envolvendo outras substâncias químicas, formas de energia e operações unitárias, como a destilação, craqueamento, secagem, entre outras. As principais substâncias químicas envolvidas são o 1,2-dicloroetano (1,2-DCE), o ácido clorídrico (HCl) e o cloreto de vinila (MVC). Pode-se dizer de forma simplificada que o 1,2-DCE é transformado em MVC, que passa por um processo de polimerização, para que surja o PVC.

O processo de produção de PVC ocorre em equipamentos do tipo vasos de reação química (reatores) em sistema de produção denominado por “bateladas”. Após a adição dos iniciadores de reação de polimerização (peróxidos orgânicos) e dos insumos, o reator é fechado e é efetuado vácuo. Na sequência é iniciada a agitação dos produtos que estão dentro

do equipamento. Após a realização da polimerização, obtém-se o PVC, ainda diluído em água. O PVC é levado em sistema fechado, para o processo de secagem e é transferido para os silos de estocagem, situados na área de armazenamento de produto acabado.

A unidade industrial consome recursos naturais e gera rejeitos nas etapas de processo produtivo. O consumo de água acontece principalmente na área de produção de PVC.

A água consumida na Unidade de Produção PVC Bahia é adquirida de outras empresas. A unidade industrial consome água clarificada, potável e desmineralizada. Também é adquirido vapor sob pressão de 15 kgf/cm<sup>2</sup> e de 42 kgf/cm<sup>2</sup> para utilização no processo.

Quanto aos resíduos a Unidade de Produção PVC Bahia, gera em sua maior parcela resíduos sólidos perigosos (Classe I). Esses resíduos são encaminhados para incineração em outras empresas. Os resíduos não perigosos são encaminhados para processos de reciclagem e quando não for possível são enviados para aterro industrial. Todos esses resíduos são destinados para outras empresas.

Na Unidade de Produção PVC Bahia os efluentes são segregados em orgânico e inorgânico e enviados para tratamento externo em outras empresas. Diferente da unidade industrial de Alagoas, não há uma área tratamento de efluentes nas próprias instalações.

A energia elétrica utilizada é adquirida da concessionária de energia do governo. Já o vapor e o gás natural são adquiridos de outras empresas.

#### 5.1.8. Cálculo dos Ecoindicadores da Unidade de PVC da Braskem Bahia

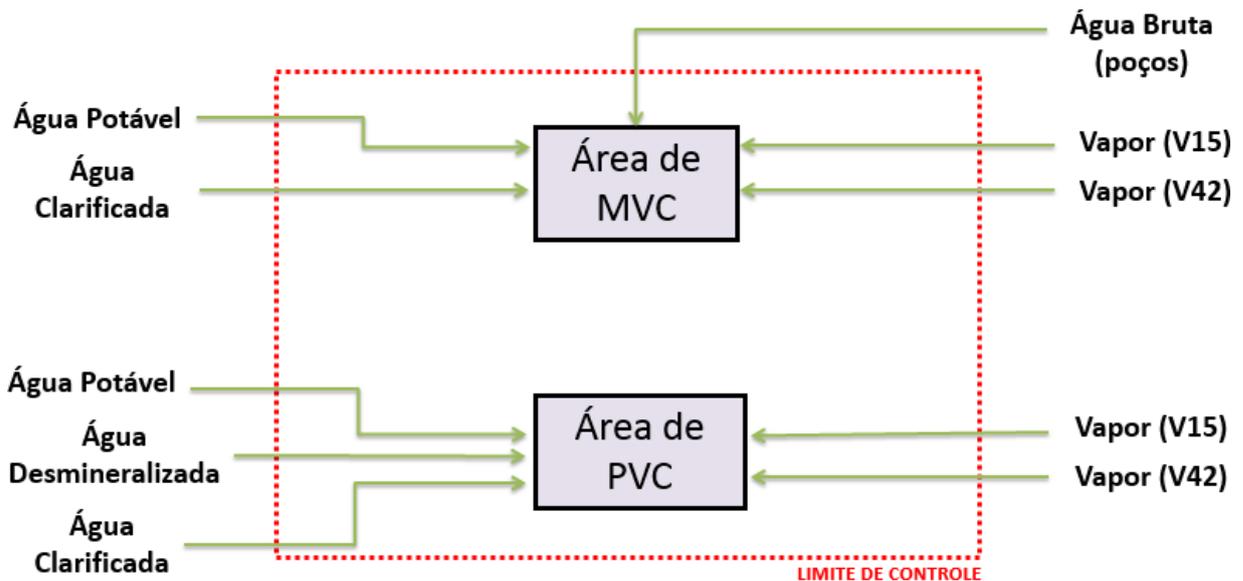
A Unidade de Produção PVC Bahia possui como produto final o PVC. Produtos intermediários como o 1,2-DCE e o MVC, são consumidos dentro do limite de controle para produzir o PVC, por isso não são considerados no cálculo.

Portanto a produção total da Unidade de Produção PVC Bahia é equivalente a sua produção de PVC, conforme equação 30:

$$\text{Produção} = \text{PVC produzido} \quad (30)$$

A Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia consome água de fornecedor externo, ocorrendo eventualmente a captação através de poços. Ocorre também a aquisição da água na forma de vapor. A Figura 20 apresenta o consumo de água das áreas de MVC e PVC. Nesta figura V15 e V42 representam, respectivamente, vapor sob pressão de 15 kgf/cm<sup>2</sup> e vapor sob pressão de 42 kgf/cm<sup>2</sup>.

Figura 20 - Diagrama representando o consumo de água da Unidade de Produção PVC Bahia.



Fonte: Autor, 2013.

A Equação 31 foi proposta para representar o consumo de água da Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia:

$$\text{Consumo de Água} = \text{Água Bruta Captada} + \text{Água Clarificada} + \text{Água Potável} + \text{Água Desmineralizada} + \text{Vapor Adquirido} \quad (31)$$

Todos os resíduos gerados na PVC Bahia são encaminhados para processos de tratamento externo e devem portanto, ser contabilizados no cálculo do ecoindicador. O resíduo enviado para reciclagem deverá ser subtraído do total.

A Equação 32, representa a proposta para representar a geração de resíduos sólidos da unidade:

$$\text{Resíduos sólidos} = 3 \times (\text{Classe I}) + \text{Classe II A} + \text{Classe II B} - \text{Recicláveis} \quad (32)$$

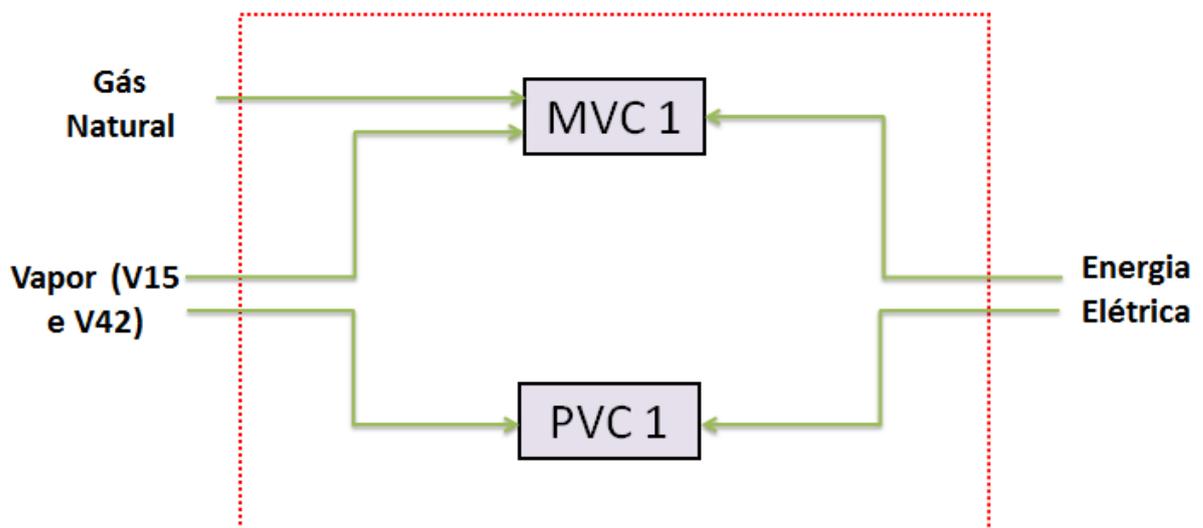
Na PVC Bahia os efluentes são segregados em orgânico e inorgânico e enviados para tratamento externo em outras empresas.

A Equação 33 foi proposta para representar a geração de efluentes líquidos da Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia:

$$\text{Efluentes Líquidos} = \text{Efluente Orgânico} + \text{Efluente Inorgânico} - \text{Água de Chuva Não Contaminada} \quad (33)$$

A energia elétrica utilizada pela PVC Bahia é adquirida da concessionária de energia do governo. Já o vapor, o gás natural e o diesel são adquiridos de outras empresas, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama representando o consumo de energia da Unidade de Produção PVC Bahia.



Fonte: Autor, 2013.

A proposta para representar o consumo de energia da unidade industrial é dada pela Equação 34.

$$\text{Consumo de Energia} = \text{Energia Elétrica} + \text{Vapor Adquirido} + \text{Gás Natural Consumido} + \text{Consumo de Diesel} \quad (34)$$

## 5.2. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS PARA OS ECOINDICADORES UTILIZANDO O MODELO LCSP

Considerando as premissas apresentadas na proposta, podemos classificar qualitativamente de acordo com a descrição de cada nível do modelo LCSP, mostrada na Tabela 1, cada uma das equações de ecoindicadores. Os ecoindicadores avaliados foram consumo de água, geração de resíduos sólidos, geração de efluentes líquidos e consumo de energia.

A Tabela 4 apresenta a classificação dos ecoindicadores que foram avaliados no estudo de caso, antes e após a aplicação da metodologia proposta.

Tabela 4 – Classificação de acordo com os níveis do modelo de LCSP para cada ecoindicador.

Ecoindicador	Unidade métrica utilizada na proposta	Nível LCSP antes da aplicação da nova metodologia	Nível LCSP após aplicação da nova metodologia
Consumo de água	m <sup>3</sup> de água / ton. de produto final	1	2
Geração de resíduos sólidos	kg de resíduo sólido / ton. de produto final	1	3
Geração de efluentes líquidos	m <sup>3</sup> de efluente líquido / ton. de produto final	1	2
Consumo de energia	GJ de energia / ton. de produto final	1	2

Fonte: Autor, 2014.

As equações propostas na nova metodologia apresentam um padrão de cálculo, e são consideradas no cálculo de cada ecoindicador as entradas e saídas do limite de controle. Não foram considerados os efeitos ao meio ambiente e nem houve uma análise do ciclo de vida, de forma que o limite de controle fosse extrapolado. Sendo assim, os ecoindicadores de consumo de água, geração de efluentes líquidos e consumo de energia apresentaram características de nível 2 LCSP. O ecoindicador de geração de resíduos sólidos foi classificado como nível 3, pois este apresenta uma ponderação na equação, considerando o maior impacto ambiental causado pelo resíduo perigoso do tipo classe I.

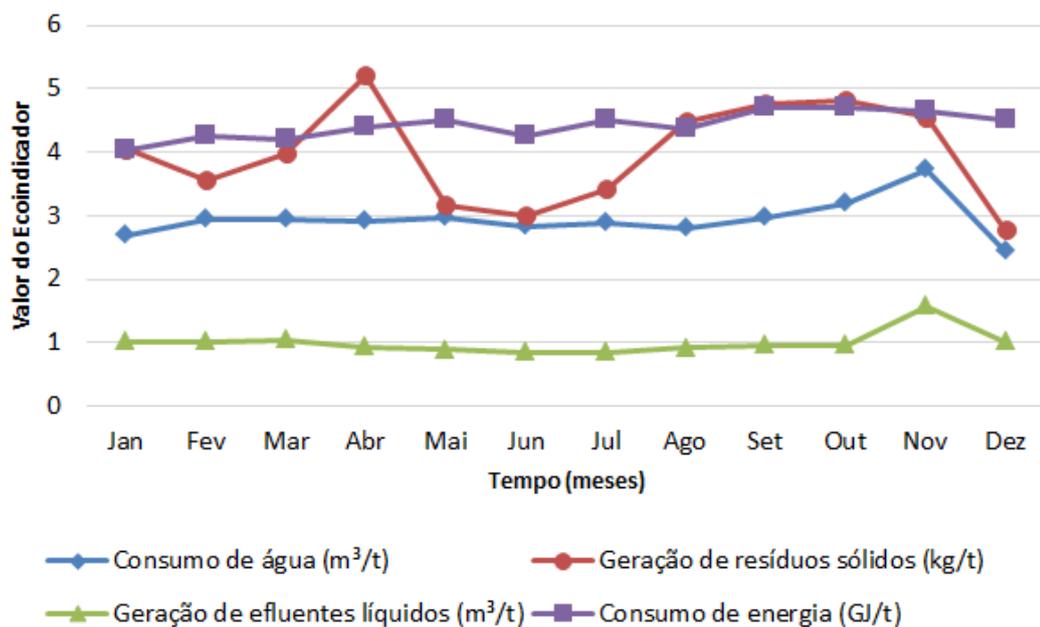
### 5.3 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS NÚMERICOS DOS ECOINDICADORES OBTIDOS NO ESTUDO DE CASO

Para aplicação das equações propostas foram utilizados os dados de processo de cada uma das quatro unidades avaliadas no estudo de caso: unidades industriais de produção de Cloro Soda e PVC de Alagoas e unidades de produção de Cloro Soda e PVC da Bahia.

Na realização do cálculo dos ecoindicadores foram consideradas todas as premissas apresentadas neste trabalho. O período de avaliação escolhido foi ano 2013, com os resultados reportados em cada um dos meses. As etapas do cálculo não foram abordadas, devido à restrição de informações da empresa. As principais causas de oscilação nos ecoindicadores das unidades identificadas durante a análise dos resultados ocorreram principalmente em situações como parada geral de manutenção ou saída de resíduos que estavam estocados.

A Figura 22 apresenta os resultados de cada um dos ecoindicadores no período de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas. Foi possível observar que o ecoindicador de geração de resíduos sólidos apresentou uma maior instabilidade no período, enquanto os demais apresentaram estabilidade. Também pode-se verificar que o ecoindicador de geração de efluentes líquidos apresentou um perfil similar ao de consumo de água.

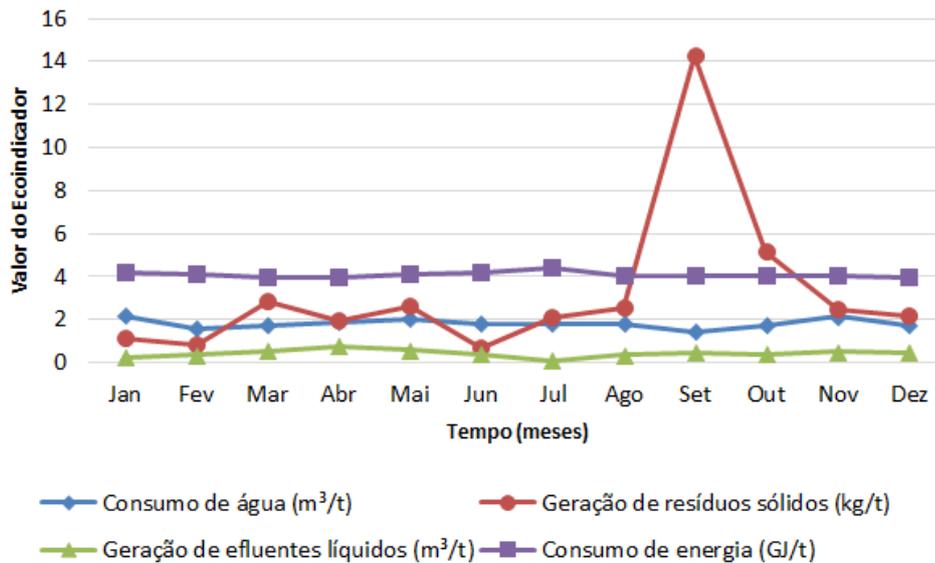
Figura 22 – Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Alagoas.



Fonte: Autor, 2014.

Na Figura 23 foram expostos os resultados dos ecoindicadores no período de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Bahia. Verificou-se um pico no ecoindicador de resíduos sólidos no mês de setembro, enquanto os demais apresentaram valores semelhantes no decorrer do ano.

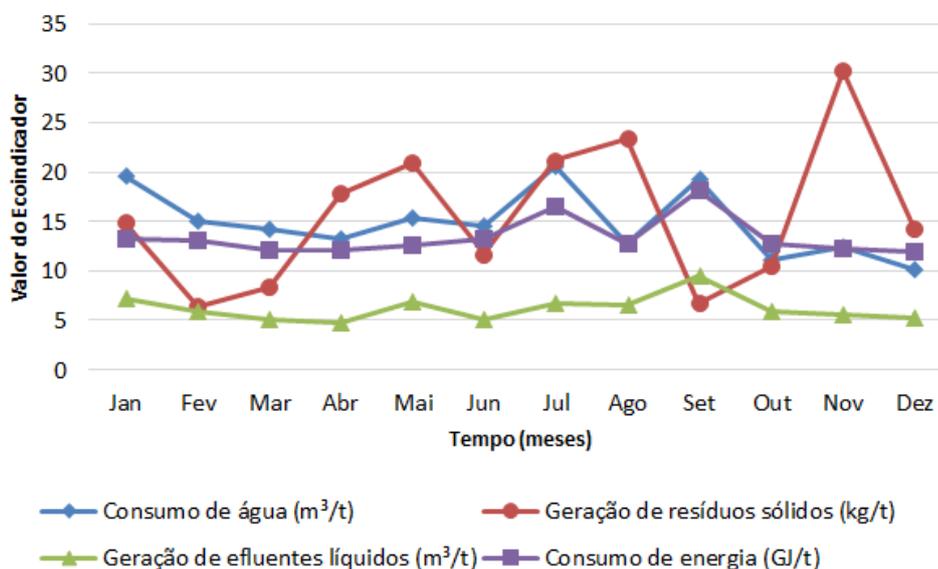
Figura 23 – Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de Cloro Soda da Braskem Bahia.



Fonte: Autor, 2014.

Os resultados dos ecoindicadores da Unidade de Produção de PVC da Braskem Alagoas, representado pela Figura 24, apresentaram oscilação em alguns meses.

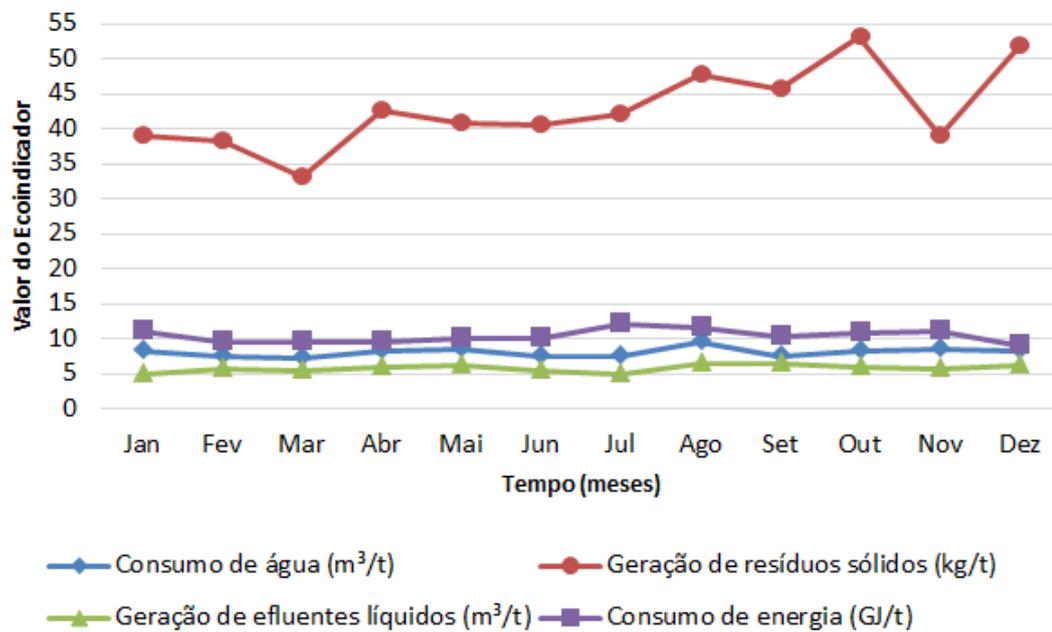
Figura 24 – Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de PVC da Braskem Alagoas.



Fonte: Autor, 2014.

Na Figura 25 são apresentados os resultados dos ecoindicadores no período de 2013 da Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia. O ecoindicador de resíduos apresentou valores elevados devido à ponderação atribuída na equação para o resíduo classe I. Como esse resíduo é enviado para ser incinerado externamente ele sai do limite de controle, sendo contabilizado no ecoindicador.

Figura 25 – Resultados numéricos dos ecoindicadores no ano de 2013 da Unidade de Produção de PVC da Braskem Bahia.



Fonte: Autor, 2014.

A comparação entre os resultados obtidos nas Unidades não foi muito significativa, devido às diferenças nos processos produtivos. Apesar de produzir produtos similares e pertencer a mesma empresa, as unidades industriais avaliadas possuem algumas particularidades que dificultaram essa comparação, como por exemplo, a tecnologia e equipamentos diferentes utilizados no processo. A ferramenta se mostrou indicada para acompanhar a evolução do desempenho ambiental das Unidades.

## 6. CONCLUSÃO

Os ecoindicadores são uma ferramenta extremamente útil para gestão de empresas, contribuindo para a redução de desperdícios e impactos desnecessários, tanto ao meio ambiente quanto à economia do negócio, através do auto monitoramento da performance ambiental associada aos produtos de valor comercial.

A padronização no cálculo dos ecoindicadores é importante para obtenção de números mais representativos para a empresa ou unidade industrial que está sendo avaliada, algo que é relevante para as empresas, pois valoriza as iniciativas ambientais e estimula competitividade, buscando aprimorar o desempenho ambiental. Através da padronização os ecoindicadores se tornam mais eficientes para *benchmarking* com unidades industriais similares.

Com uma análise detalhada dos ecoindicadores pode-se, também, identificar oportunidades de melhoria, acompanhar a evolução de desempenho e traçar metas, com base nos resultados apresentados.

Neste trabalho foram propostas formas de cálculo para os ecoindicadores de água, resíduos sólidos, efluentes líquidos e consumo de energia. As equações propostas foram aplicadas em cada uma das quatro unidades industriais da empresa Braskem. Foi observado que não havia um padrão de cálculo entre as unidades avaliadas e que o tema ainda é um assunto novo nas indústrias. Para solucionar este problema foram elaboradas equações de acordo com algumas premissas que foram abordadas durante a etapa de pesquisa bibliográfica, como por exemplo, o limite de controle estabelecido, levando-se em conta as entradas e saídas deste limite.

Após a aplicação das equações nas unidades industriais foi possível estabelecer um padrão a partir de equações gerais. Foram considerados os termos e premissas necessárias para o cálculo de cada um dos ecoindicadores estudados, de modo que seja possível sua aplicação nas unidades avaliadas ou em qualquer outra similar.

As equações foram classificadas qualitativamente e mostraram um avanço para o nível 2 nos ecoindicadores de consumo de água, geração de efluentes líquidos e consumo de energia e para o nível 3 no ecoindicador de geração de resíduos sólidos, de acordo com o modelo LCSP. Isto representou uma evolução em termos de detalhamento no ecoindicador

para as indústrias químicas avaliadas no estudo de caso e atende ao que foi proposto para este trabalho.

Os resultados numéricos obtidos no estudo de caso permitiram avaliar o avanço de cada uma das unidades industriais. Desta forma, a ferramenta se mostrou muito útil no acompanhamento do desempenho ambiental e na identificação de oportunidades de melhoria.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de ecoindicadores que envolvam todo o ciclo de vida do produto e a sociedade, considerando seus efeitos ao meio ambiente e não se limitando à unidade industrial em questão, certamente seria um avanço para análise ambiental das empresas. Isso traria indicadores de níveis diferentes conforme a classificação LCSP, de forma a garantir uma análise ambiental abrangente.

A implementação de um ecoindicador envolvendo emissões atmosféricas também traria ganhos significativos para a indústria, uma vez que este ecoindicador pode indicar um status da eficiência do processo, além do fato de que emissões sem o controle adequado podem ser prejudiciais ao meio ambiente e a sociedade.

Outro benefício proveniente do estudo do ecoindicador de emissões seria quanto ao atendimento dos aspectos legais. As emissões atmosféricas possuem parâmetros que são limitados através de normas e condicionantes de licenças ambientais e um monitoramento adequado desses parâmetros tornaria mais fácil o enquadramento.

A criação de um ecoindicador mais voltado para as questões financeiras também seria outro estudo válido para trabalhos futuros. O cálculo de ecoindicadores envolvendo o capital investido em iniciativas ambientais e o ganho financeiro obtido devido à aplicação de medidas sustentáveis, certamente traria à tona mais oportunidades nos aspectos econômico e ambiental para a indústria química.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NORMA BRASILEIRA (NBR) 10.004 – Classificação de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NORMA BRASILEIRA (NBR) 10.006 – Solubilização de resíduos, Rio de Janeiro, 2004.

ATKINS, P.; DE PAULA, J. Físico-química, Editora LTC, Volume 1, 7ª edição, Rio de Janeiro 2003.

BAZZO, W. A. Ciência, Tecnologia e Sociedade e o contexto da educação tecnológica. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2011.

CASTELETTI, L. F. Instrumentação industrial, São Paulo. Disponível em: <<http://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2010/09/instrumentacao.pdf>> Acessado em 14 de Abril de 2013.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). Manual de conservação e reuso de água na indústria, Rio de Janeiro, 2006.

GONÇALVES, G. M. Seleção de medidores de vazão, uma ótica de engenharia e aplicações. Disponível em: <<http://yokogawa.com.br/images/142-ARTIGOYOKOGAWA.pdf>> Acessado em 14 de Abril de 2013.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI), Sustainability Reporting Guidelines, Version 3, Amsterdam, 2006.

GREINER, T.J. Indicators of Sustainable Production: A Case Study on Measuring Eco-sustainability at Guilford of Maine, Inc. Lowell Centre for Sustainable Production, University of Massachusetts, Lowell, 2001.

KHAREL, G. P.; CHARMONDUSIT, K. Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal, Journal of Cleaner Production, vol. 16, pp. 1379-1387, 2008.

LIMA, M. O. B. L. Prevenção da poluição: uma gestão pró ativa e sustentável na redução de resíduos sólidos. Estudo de caso de uma indústria química brasileira, Maceió, 2011.

LOWELL CENTER FOR SUSTAINABLE PRODUCTION (LCSP) Sustainable Production: A Working Definition, Informal Meeting of the Committee Members, Massachusetts, 1998.

MAXIME, D.; MARCOTTE; M.; ARCAND, Y. Development of eco-efficiency indicators for the Canadian food and beverage industry, *Journal of Cleaner Production* vol. 14, pp 636-648, 2006.

MÍNGUEZ, A. Medidores de energia ativa: funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns, Rio de Janeiro, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA, nº 313 - Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais, Brasília, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 316 - Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, Brasília, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 430 – Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, Brasília, 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 436 – Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, Brasília, 2011.

MOROSINE, F., OLIVEIRA, A.G., SANTANA, T.N., MACIEL, M., BERTASOLE, M., LIMA, R.M. Inventário dos resíduos industriais do município de Campina Grande, Anais do 23º Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campina Grande, 2006.

NAGAMATO, R. J.; NETO, G. K.; WASZCZYNSKYJ, N.; CÓRDOVA, K. R. V. Tratamento de compostos orgânicos voláteis pela técnica da incineração catalítica, Salvador, 2010.

PAULELLA, E. D.; SCAPIM, C.O. Campinas: a gestão dos resíduos sólidos urbanos, Campinas, 1996.

PEREIRA, L. F. R. Aspectos Conceituais da eco-eficiência no Contexto do Desenvolvimento Sustentável, Niterói RJ, 2005.

PIOTO, Z. C. Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel – Estudo de Caso, São Paulo, 2003.

RATTANAPAN, C.; SUKSAROJ, T.T.; OUNSAHEHA, W. Development of Eco-efficiency Indicators for Rubber Glove Product by Material Flow Analysis. *Procedia Soc. Behav.*, vol. 40, pp. 99-106, 2012.

RESINA, R. A.; MENDES, J. V.; MORIS, V. A. S. Application of a framework to assess the level of sustainability of a company, *Internacional Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 9-11, São Carlos, 2012.

SAMUEL, V.B.; AGAMUTHU, P.; HASHIM, M.A. Indicators for assessment of sustainable production: A case study of the petrochemical industry in Malaysia. *Ecological Indicators*, vol. 24, p. 392-402, 2012.

SCHNEIDER, V. R.; GHILARDI, W. J. Eficientização energética: uma maneira de reduzir custos com energia elétrica, Santa Maria, 2006.

SOCIEDAD PÚBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL (IHOBE). *Manual Practico – Ecoindicador '99*, Bilbao, 1999.

THE NATIONAL ROUND TABLE OF ENVIRONMENT AND THE ECONOMY (NRTEE). *Eco-efficiency Indicators: a workbook for industry*, Ottawa, 2001.

UNITED NATIONS. *A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators*, Nova York e Geneva, 2004.

VELEVA, V., ELLENBECKER, M. Indicators for sustainable production: framework and methodology, *Journal Clean Prod.*, vol. 9, p. 519–549, 2001.

VELEVA, V., HART, M., GREINER, T., CRUMBLEY, C., Indicators for measuring environmental sustainability: a case of the pharmaceutical industry, *Benchmark. Int. J.* 10, p. 107–119, 2003.

VELLANI, C. L; RIBEIRO, M. S. Sistema contábil para gestão da ecoeficiência empresarial. *Revista Contabilidade & Finanças*, v. 20, n. 49, jan./abr. 2009.

WALKER, H. R. *Fundamentos de física – Mecânica*, Rio de Janeiro, 7ª edição, 2006.

WANG, Y.; LIU, J.; HANSSON, L.; ZHANG, K.; WANG, R. Implementing stricter environmental regulation to enhance eco-efficiency and sustainability: A case study of Shandong Province's pulp and paper industry, China. *Journal of Cleaner Production* vol. 19, pp 303-310, 2011.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). A eco-eficiência, criar mais valor com menos impacto, Lisboa, 2000.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). Medir a eco-eficiência, um guia para comunicar o desempenho da empresa, Lisboa, 2000.