

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA  
DA INDÚSTRIA VIDREIRA NO BRASIL PRODUTORA  
DE EMBALAGENS DE VIDRO BRANCO**

**Autor  
Ricardo Regi**

**Orientador  
Prof. Me. Guilherme Farias Cunha**

**2012  
1º semestre**

**2012**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA INDÚSTRIA VIDREIRA NO  
BRASIL PRODUTORA DE EMBALAGENS DE VIDRO BRANCO

RICARDO REGI

Trabalho submetido à Banca Examinadora  
como parte dos requisitos para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental-TCC II.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Me. Guilherme Farias Cunha  
(orientador)

Prof. Dr. Gil Anderi da Silva  
(co-orientador)

---

Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares  
(membro da banca)

---

Eng. Guilherme M. Zanghelini  
(membro da banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)  
AGOSTO/2012.

## **RESUMO**

A problemática dos impactos ambientais oriundos do setor industrial tornou-se muito importante, uma vez que, o mercado consumidor está exigindo produtos/serviços ambientalmente sustentáveis, as organizações estão atentas ao desempenho da sua cadeia de valor e as legislações estão cada vez mais restritivas. Nessa perspectiva, o presente projeto objetivou elaborar o inventário do ciclo de vida (ICV) da indústria de embalagens de vidro branco no Brasil, afim de suportar futuros projetos em ACV e oportunidades de melhoria de desempenho ambiental da produção vidreira. Para tanto, a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida será utilizada e fundamentada de acordo com diretrizes internacionalmente aceitas (ISO 14040 e 14044). Foi identificado que a reciclagem de vidro tem potencial de melhorar consideravelmente o desempenho ambiental do produto e a demanda de energia pelo processo de fusão do vidro representa um dos “hotspots” mais importantes do sistema devido a contribuição significativa nas emissões de GEE.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Inventário do Ciclo de Vida; Indústria Vidreira, Embalagem de vidro branco e Sustentabilidade.

# ÍNDICE GERAL

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>9</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1. O SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL ISO 14000</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1.1. O DESENVOLVIMENTO DA ISO 14000</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1.2. O ESCOPO DO TC 207</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1.3. ISO 14000: ASPECTOS GERAIS</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2.1. HISTÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2.2. DEFINIÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2.3. A ACV PELO MUNDO</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.4. OS USOS E APLICAÇÕES DA ACV NA INDÚSTRIA</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.5. DESCRIÇÃO GERAL DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2.6. DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.6.2. OBJETIVO DO ESTUDO</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2.6.3. ESCOPO DO ESTUDO</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.6.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.6.3.2. O SISTEMA DE PRODUTO A SER ESTUDADO</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2.6.3.3. FUNÇÃO E UNIDADE FUNCIONAL</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2.6.3.4. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2.6.3.5. A FRONTEIRA DO SISTEMA</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2.6.3.5.1. FLUXOGRAMA DE PROCESSO</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.6.3.5.2. CRITÉRIO DE CORTE “CUT-OFF”</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.6.3.6. PROCEDIMENTOS DE ALOCAÇÃO</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2.6.3.7. METODOLOGIA DA AICV E TIPOS DE IMPACTOS</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.6.3.8. REQUISITOS DE DADOS</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.6.3.9. REQUISITOS DE QUALIDADE DOS DADOS</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.6.3.10. REVISÃO CRÍTICA</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.6.3.11. LIMITAÇÕES</b> .....	<b>37</b>

3.2.6.3.12. PRESSUPOSTOS .....	37
3.2.6.3.13. TIPO E FORMATO DO RELATÓRIO REQUERIDO PARA O ESTUDO .	38
3.2.7. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV). .....	38
3.2.7.1. FLUXOGRAMA DO PROCESSO.....	38
3.2.7.2. COLETA DE DADOS .....	39
3.2.7.3. ALOCAÇÃO.....	40
3.2.7.4. DESENVOLVIMENTO DE QUESTIONÁRIOS .....	41
3.2.7.5. DADOS “BACKGROUND” .....	42
3.2.7.6. BASE DE DADOS ECOINVENT .....	42
3.2.8. AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA (AICV).....	43
3.2.9. SOFTWARES APLICADOS À ACV .....	44
3.2.10. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL SIMAPRO 7.....	45
3.2.11. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	46
3.2.12. COMUNICAÇÃO .....	46
3.3. VIDRO .....	47
3.3.1. HISTÓRIA DO VIDRO .....	47
3.3.2. DEFINIÇÃO.....	51
3.3.3. PRODUÇÃO DE VIDROS .....	53
3.3.3.1. MATÉRIAS-PRIMAS .....	53
3.3.3.1.1. CLASSIFICAÇÃO .....	54
3.3.3.2. COMPOSIÇÃO .....	58
3.3.3.2.1. COMPOSIÇÃO DE RECIPIENTES DE VIDRO BRANCO .....	59
3.3.3.3. FUSÃO .....	59
3.3.3.3.1. REFINO .....	60
3.3.3.3.2. HOMOGÊINIZAÇÃO .....	61
3.3.3.3.3. FORNOS .....	63
3.3.3.3.3.1. ENFORNADEIRA .....	63
3.3.3.3.3.2. TIPOS DE FORNOS.....	64
3.3.3.3.4. FEEDER.....	69
3.3.3.4. FABRICAÇÃO .....	70
3.3.3.4.1. CONFORMAÇÃO.....	70
3.3.3.4.2. RECOZIMENTO E TÊMPERA .....	71
3.3.3.5. QUALIDADE / EMBALAGEM / PALETIZAÇÃO .....	71

3.3.3.6. LOGÍSTICA / EXPEDIÇÃO .....	72
4. METODOLOGIA .....	73
4.1. OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO .....	74
4.1.1. OBJETIVO DO ESTUDO .....	74
4.1.2. ESCOPO DO ESTUDO .....	74
4.1.2.1. O SISTEMA DE PRODUTO A SER ESTUDADO E AS FRONTEIRAS DO SISTEMA.....	74
4.1.2.2. A(S) FUNÇÃO(ÕES) DO SISTEMA DE PRODUTO. ....	74
4.1.2.3. UNIDADE FUNCIONAL (U.F.).....	75
4.1.2.4. METODOLOGIA DE AICV E TIPOS DE IMPACTOS.....	75
4.1.2.5. REQUISITOS DOS DADOS.....	75
4.1.2.6. REQUISITOS DE QUALIDADE DOS DADOS; .....	75
4.2. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	76
4.2.1. FLUXOGRAMA.....	76
4.2.2. COLETA DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO.....	78
4.2.2.1. COMPOSIÇÃO PERCENTUAL DA MASSA VITRIFICADA.....	78
4.2.2.1.1. CACO .....	78
4.2.2.1.2. MATÉRIAS-PRIMAS .....	78
4.2.2.1.2.1. DECOMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS AO FOGO.....	78
4.2.2.1.2.2. PERDA AO FOGO .....	80
4.2.2.2. ENERGIA .....	81
4.2.2.3. EMISSÕES PARA A ATMOSFERA.....	82
4.2.2.4. OUTROS MATERIAIS.....	86
4.2.2.5. ÁGUA .....	87
4.2.3. TABELA DE DADOS DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA.....	87
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	89
6. RECOMENDAÇÕES .....	92
7. CONCLUSÕES .....	94
8. COMENTÁRIOS PESSOAIS .....	95
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria do vidro produz muitas variedades de produtos para fins industriais, bem como, para uso comercial e doméstico. Grandes quantidades de matéria-prima são extraídas e utilizadas, muita energia é demandada no processo de fabricação e consequentemente poluentes são gerados e liberados no meio ambiente. A indústria tem reconhecido por muito tempo sua influência sobre os ciclos de materiais e fluxos de energia através do sistema de economia – meio ambiente. O sistema econômico, considerado como um organismo vivo e complexo, não atua independentemente do sistema natural que lhe sustenta (Mueller, 2007). Ao contrário, o sistema econômico interage com o meio ambiente, extraindo recursos naturais e devolvendo resíduos (Andrade, 2008).

A indústria vidreira é responsável por grandes investimentos econômicos e sociais através da produção de bens e serviços. Este mesmo setor começa a reconhecer a necessidade de somar esforços para produzir seus produtos de forma ambientalmente correta.

Atualmente emerge um novo contexto econômico, caracterizado pela rígida postura dos clientes voltada à expectativa de interagir com organizações que sejam éticas, com boa imagem institucional no mercado, e que atuem de forma ecologicamente responsável. Pesquisa recente da Confederação Nacional da Indústria (CNI) e do Ibope revela que 68% dos consumidores brasileiros estariam dispostos a pagar mais por um produto que não agredisse o meio ambiente. Essa transformação promove a influência ecológica nos negócios de maneira crescente e com efeitos econômicos cada vez mais profundos.

Esta nova forma de atuar e criar um futuro, que se baseia nos princípios do desenvolvimento sustentável, está assumindo também um caráter estratégico nos setores produtivos, ajudando-lhes a conquistar novos mercados de uma economia cada dia mais globalizada.

Nessa perspectiva, para avaliar ambientalmente os produtos provenientes da indústria vidreira, requer o conhecimento e entendimento dos processos produtivos e suas variáveis, bem como, quantificar e qualificar os recursos utilizados e as emissões geradas nas etapas do sistema produtivo.

Existem diversas metodologias científicas que permitem apoiar a gestão ambiental de produtos, processos ou serviços. Entre estas metodologias está a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a qual tem demonstrado uma capacidade adequada para valorar e avaliar

os impactos potenciais ao meio ambiente ocorridos durante o seu ciclo de vida. Além de se apresentar como uma ferramenta efetiva de apoio à gestão dos aspectos ambientais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é elaborar o inventário da indústria de embalagens de vidro branco no Brasil, afim de suportar futuros projetos em Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e oportunidades de melhoria de desempenho ambiental da produção vidreira.

### **2.2. Objetivos Específicos**

1. Consolidar o objetivo e escopo do projeto juntamente com os colaboradores da indústria vidreira;
2. Compreender as principais etapas e as variáveis inerentes do processo de fabricação de embalagens de vidro branca;
3. Realizar a análise de inventário de ciclo de vida (ICV) da indústria vidreira, ou seja, coletar dados e quantificar as entradas e saídas relevantes do sistema de produto em estudo;
4. Interpretar os resultados obtidos na análise de inventário, fornecendo resultados consistentes com o objetivo e escopo definidos, que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações;
5. Formalizar o Inventário do Ciclo de Vida.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. O Sistema de Gestão Ambiental ISO 14000**

##### **3.1.1. O Desenvolvimento da ISO 14000**

A International Organization for Standardization - ISO é uma organização internacional não governamental com sede em Genebra na Suíça, cujos membros são entidades normativas de âmbito global provenientes de 111 países. A ISO foi fundada em 23 de fevereiro de 1946 para desenvolver normas de fabricação, comércio e comunicações.

O Brasil participa da ISO através da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que é uma sociedade privada, sem fins lucrativos, tendo como associados pessoas físicas e jurídicas. O governo brasileiro reconhece a ABNT, como Foro Nacional de Normalização.

De acordo com a norma ISO 14001, o objetivo principal da organização é ser uma referência consensual para a gestão ambiental, homogeneizando a linguagem das normas nacionais e regionais em nível internacional, agilizando as transações no mercado globalizado (MAIMON, 1996).

Todas as normas ISO são voluntárias, porém frequentemente alguns países adotam alguma ISO e as tornam compulsórias.

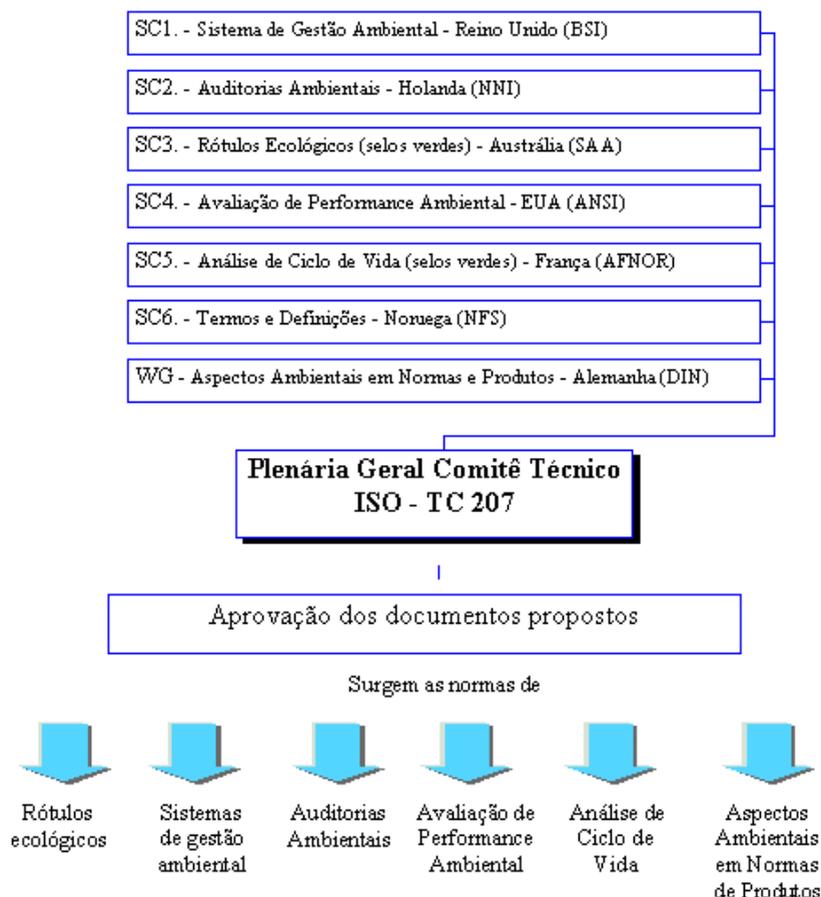
As nações-membros formam grupos técnicos de assessoramento (TAGs - Technical Advisory Groups) que contribuem com informações aos comitês técnicos como parte do processo de desenvolvimento de normas. A ISO recebe informações do governo, setores industriais e outras partes interessadas antes de promulgar uma norma. Depois que a versão preliminar de uma norma é votada por todos os países-membros, ela é publicada em forma de norma internacional. Nesse ponto, cada nação pode adotar uma versão da norma como padrão nacional (TIBOR, 1996).

Em 1991, o grupo SAGE (Strategic Action Group on the Environment) foi estabelecido pela ISO para realizar um estudo em relação às normas internacionais sobre o meio ambiente. Este grupo utilizou a norma BS 7750 como referência para o começo do trabalho e durante dois anos analisou este padrão normativo, bem como, outros padrões nacionais de Sistemas de Gerenciamento Ambiental. O resultado foi a formação do Technical Committee 207 (TC 207) e o início do desenvolvimento da série ISO 14000 (SANTOS, 2003).

### **3.1.2. O Escopo do TC 207**

As normas ISO 14000 focalizam a instituição de um sistema para alcançar internamente o estabelecimento de políticas, objetivos e alvos. Além disso, requerem que essas políticas incluam elementos que cumpram as leis e regulamentações e que evitem a poluição. Mas os padrões não estabelecem como a organização alcançará essas metas nem descrevem o tipo ou nível de desempenho exigido (SANTOS, 2003).

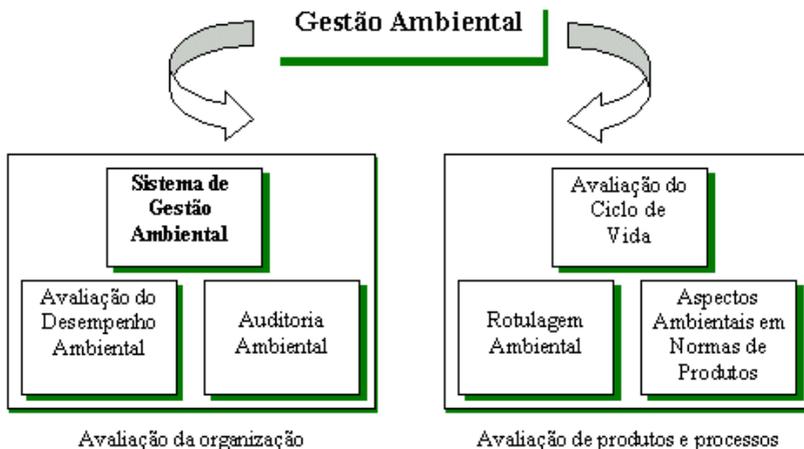
Tibor (1996) comenta que “o objetivo é aumentar a confiança de todos os interessados em que a organização possua um sistema que provavelmente levará a um melhor desempenho ambiental”.



**Figura 1: TC 207 e respectivos Subcomitês.  
Fonte: Maimon, 1996.**

### 3.1.3. ISO 14000: Aspectos Gerais

Basicamente a série ISO 14000 pode ser visualizada de duas maneiras, a primeira direcionada para a Organização e a outra para o Processo. A série engloba seis áreas, o Sistema de Gestão Ambiental; a Avaliação do Desempenho Ambiental; a Auditoria Ambiental da Organização; a Rotulagem Ambiental, a Análise do Ciclo de Vida e os Aspectos Ambientais nos Produtos.



**Figura 2: Gestão Ambiental - ISO 14000.**

**Fonte: Adaptado de Cajazeira, 1997.**

### 3.2. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Com o aumento da conscientização ambiental, as indústrias e as empresas estão avaliando a forma como suas atividades afetam o meio ambiente. A sociedade está cada vez mais preocupada com as questões do esgotamento dos recursos naturais e degradação ambiental. Muitas empresas têm respondido a essa conscientização, fornecendo produtos mais ecológicos e utilizando processos mais sustentáveis. O desempenho ambiental de produtos e processos tornou-se uma questão fundamental, e por isso algumas empresas estão estudando formas de minimizar seus efeitos sobre o meio ambiente. Muitas empresas descobriram que é vantajoso explorar maneiras de produzir além da conformidade com as estratégias de prevenção da poluição e sistemas de gestão ambiental para melhorar seu desempenho ambiental. Uma dessas técnicas é a

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Este conceito considera o ciclo de vida de um produto (Curran 1996).

### 3.2.1. Histórico

O termo Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), ou em inglês, “Life Cycle Assessment” (LCA) foi utilizado primeiramente nos Estados Unidos da América (EUA) em 1990. A designação histórica para estes estudos de ciclo de vida ambiental, utilizados no EUA desde 1970, era “Resource and Environmental Profile Analysis” (REPA), (HUNT & FRANKLIN, 1996).

Um dos primeiros estudos quantificando as necessidades de recursos, emissões e resíduos originados por diferentes embalagens de bebidas foi conduzido pelo “Midwest Research Institute” (MRI) para a Companhia Coca Cola em 1969. Este estudo nunca foi publicado devido ao caráter confidencial do seu conteúdo, sendo, no entanto utilizado pela companhia no início dos anos setenta, como um “input” nas suas decisões sobre embalagens (FERREIRA, 2004).

No final de 1972 o mesmo instituto (MRI) iniciou o estudo nas embalagens de cervejas e insumos, encomendado pela “U.S. Environmental Protection Agency” (USEPA), o qual marcou o início do desenvolvimento da ACV como se conhece hoje (GUINÉE, 1995). A intenção da USEPA era examinar as implicações ambientais da utilização de embalagens de vidro reutilizáveis em vez de latas e garrafas não reutilizáveis, porque na época as garrafas reutilizáveis estavam a ser rapidamente substituídas por embalagens não reutilizáveis. Esta foi de longe a mais ambiciosa REPA até à altura, tendo envolvido a indústria do vidro, aço, alumínio, papel e plástico e todos os fornecedores daquelas indústrias, tendo-se caracterizado mais de 40 materiais. Após o conhecimento dos resultados deste estudo, assumiu-se que uma garrafa reutilizável seria claramente superior (HUNT & FRANKLIN, 1996).

Em 1984, após um baixo interesse público em ACV, o Laboratório Federal Suíço para Teste e Investigação de Materiais (EMPA) publicou um importante relatório com base no estudo “Balanço Ecológico de Materiais de Embalagem” (OFEFP, 1984) iniciado pelo governo, que tinha como objetivo estabelecer uma base de dados para os materiais de embalagem mais importantes: alumínio, vidro, plástico, papel e chapas de lata. De acordo com Chehebe (1998), este estudo despertou a atenção mundial por introduzir um sistema de normalização e ponderação, conhecido como critério de volume crítico. Esta filosofia de avaliar impactos ambientais foi mais tarde desenvolvida e refinada por Ahbe,

Braunschweig e Muller-Wenk no relatório Metodologia dos Ecobalancos (Methodologie des Ecobilans sur la base de l'optimisation écologique), no qual é proposto o cálculo de ecopontos (Ahbe et al., 1991).

A Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) esteve também envolvida no aumento da sensibilização e compreensão do conceito de ACV. Em particular, no ano de 1993, em resposta à crescente necessidade de orientações e diretrizes em projetos de Análise de Ciclo de Vida, a SETAC europeia e norte americana, organizaram um workshop em Portugal. Os resultados do workshop foram resumidos em um folheto denominado "Diretrizes para a Avaliação do Ciclo de Vida: Código de Boas Práticas" (SETAC, 1993).

A Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou em 1992 um comitê técnico (TC 207/SC 5) tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV. Até ao momento foram publicadas as seguintes normas relacionadas com ACV:

- ISO 14040: 2009 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- ISO 14044: 2009 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- ISO/TR 14049: 2000 - Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis.
- ISO/TS 14048: 2002 - Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format.
- ISO/TR 14047: 2003 - Environmental management - Life cycle impact assessment - Examples of application of ISO 14042.

### **3.2.2. Definição**

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na sua fabricação quanto no consumo, têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com aqueles impactos. Uma das técnicas em desenvolvimento com esse objetivo é a avaliação do ciclo de vida (ACV) (ISO 14040, 2009).

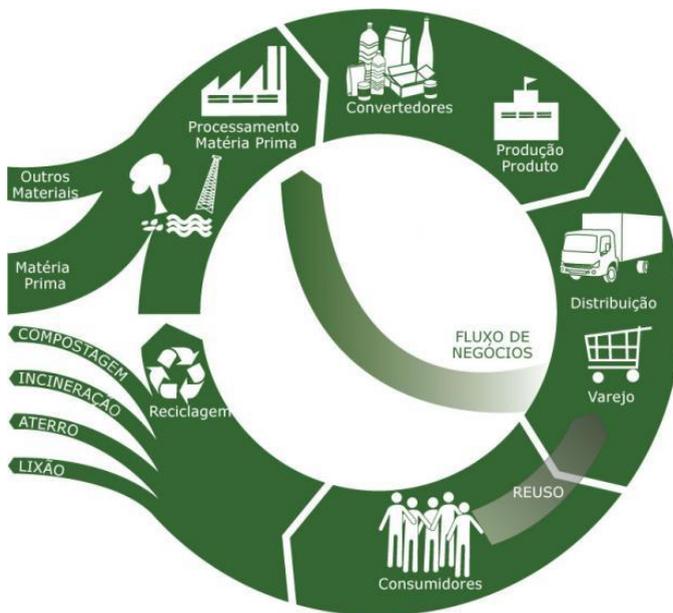
A Avaliação de Ciclo de Vida enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais (por exemplo, uso de recursos e as consequências de liberações para o meio ambiente) ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-

primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo) (ISO 14040, 2009).

Também conhecida como Abordagem do Ciclo de Vida ou Ecobalanço, a ACV é considerada um instrumento para o gerenciamento e a tomada de decisão da empresa (estratégia ambiental), englobando fundamentos para o desenvolvimento e a melhoria de produtos (identificação das oportunidades), para a seleção de indicadores de desempenho ambiental pertinentes, para o marketing ambiental e para a comparação de diferentes alternativas de produtos e/ou materiais (desde que os sistemas envolvidos apresentem funções similares) (SOARES, 2011).

Quando associado a um produto, a ACV realiza um inventário sistemático das entradas e saídas, avalia os potenciais impactos ambientais relacionados ao fluxo de massa e energia existente e interpreta os resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impacto em relação aos objetivos do estudo. O sistema total que engloba todos os processos e etapas envolvidos no ciclo de vida de um produto é chamado de "sistema de produto".

O conceito de ciclo de vida tem-se estendido para além de um simples método para comparar produtos, sendo atualmente visto como uma parte essencial para conseguir objetivos mais abrangentes, tais como sustentabilidade (CURRAN, 1999).



**Figura 3: ciclo de vida de um produto.**  
**Fonte: [www.ciclovivo.com.br](http://www.ciclovivo.com.br)**

### 3.2.3. A ACV pelo Mundo

Muitos países estão utilizando a técnica da ACV para traçar suas políticas governamentais, tais como: Áustria, Canadá, Finlândia, França, Alemanha, Japão, Holanda, Noruega, Suécia e Estados Unidos.

A Alemanha e a França estabeleceram políticas muito fortes de responsabilidade dos produtores no que se refere às embalagens. Recentemente, o governo alemão aprovou uma legislação chamada “Life-Cycle and Waste Management Act” habilitando-o a estabelecer metas e cronogramas para a indústria implementar, entre outras coisas, programas de ciclo de vida para outros produtos que não embalagens. A França concede o rótulo ambiental “NF-Environmental” baseado em critérios desenvolvidos a partir das informações dos inventários de ciclo de vida (SANTOS, 2003).

Dinamarca, Noruega, Suécia e Finlândia, iniciaram um projeto chamado LCA-Nordic para desenvolver um código de práticas para a ACV.

A USEPA - United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) realiza amplo programa de pesquisa com o objetivo de desenvolver metodologias de avaliação do ciclo de vida de produto e encorajar o uso de conceitos de ciclo de vida nos projetos de produtos e processos.

A SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry - é uma sociedade profissional de indivíduos e grupos para estudos de problemas ambientais. Essa organização tem contribuído significativamente no desenvolvimento da metodologia da ACV. Muitos conceitos desenvolvidos pela SETAC foram adotados pela ISO.

A UNEP - United Nations Environmental Program - estabeleceu um grupo de trabalho sobre desenvolvimento sustentável de produtos, para promover o uso mais racional dos recursos da produção. Esse grupo examinará o ciclo de vida dos produtos enfocando seus impactos sobre as nações em desenvolvimento.

A OECD - Organization for Economic Cooperation and Development, através de seu Grupo de Preservação e Controle da Poluição, desenvolveu um programa de trabalho para os próximos anos sobre gerenciamento do ciclo de vida como apoio às decisões de políticas públicas.

Além dos governos e das organizações mencionadas, existem muitas empresas que utilizam as técnicas da ACV para avaliar seus processos produtivos. Destacam-se nesse campo as seguintes companhias: Eastman Kodak, Proctor & Gamble, Unilever, Dow Química, Brasken e etc. Alguns setores industriais têm desenvolvidos estudos via associações de classe, como a Associação de Manufaturas de Plástico da Europa, O International Iron and Steel Institute e outras (CHEHEBE, 1998).

### **3.2.4. Os Usos e Aplicações da ACV na Indústria**

Atualmente, as novas pressões ambientais, sejam elas na forma do mercado consumidor mais exigente ou pelo rigor das leis de mercado, promoveram no setor industrial a busca de novas ferramentas técnicas que considerassem as questões ambientais como variáveis importantes nas decisões de investimento e desenvolvimento interno de produtos complexos. Nessa perspectiva, a ACV possibilita quantificar e comparar de uma forma integrada a performance ambiental relativa de produtos.

A Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos é, na realidade, uma técnica que pode ser utilizada em uma grande variedade de propósitos. As informações coletadas na ACV e os resultados de

suas análises e interpretações podem ser úteis para a avaliação da performance de projetos ou re-projetos de produtos ou processos e/ou planejamento estratégico (CHEHEBE, 1998).

Baseados na técnica de ACV as indústrias são encorajadas a considerar as questões ambientais associadas aos sistemas de produção (insumos, matérias-primas, manufaturas, distribuição, uso, disposição, reuso e reciclagem) que ajudam a melhorar o entendimento dos aspectos ambientais ligados aos processos produtivos de uma forma mais ampla, auxiliando na identificação de prioridades e afastando-se do enfoque tradicional end-of-pipe para a proteção ambiental.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite a identificação dos atributos positivos e negativos do produto em comparação com os padrões da empresa, com os concorrentes, com os critérios de rotulagem ou serviços alternativos e auxiliar a tomada de decisão pelos gestores da empresa. Os critérios geralmente utilizados para classificar as aplicações de ACV são distinguindo entre aplicações internas e externas:

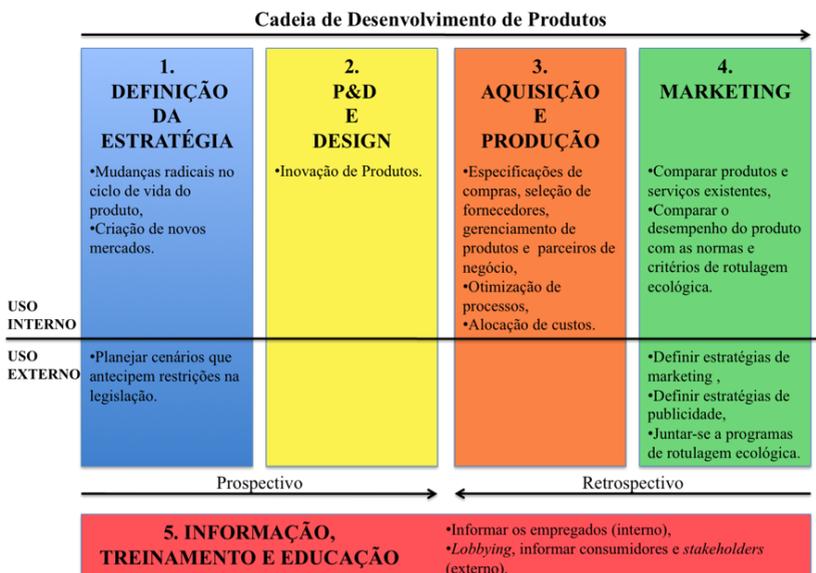
- para fins internos: ACV auxilia a gerência na melhoria da qualidade ambiental do produto e tomada de decisões estratégicas;
- para fins externos: ACV auxilia as estratégias de marketing através de sistemas de rotulagem e comunicação com os *stakeholders* (FRANKL & RUBIK, 2000).

A figura 4 mostra um ciclo simplificado de desenvolvimento de produtos que inclui quatro etapas: decisão estratégica, P&D e design, aquisição e produção, e marketing. Os quatro passos precisam ser considerados como uma sequência funcional, mas considera-se que todo o processo de desenvolvimento de produto tem vários *feedbacks*. Por exemplo: as demandas e expectativas de mercado podem significativamente influenciar as estratégias.



**Figura 4: cadeia de desenvolvimento de produtos.**  
**Fonte: Adaptado de Life Cycle Assessment in Industry and Business – P. Frankl and F. Rubik. Ed. Springer; 2000.**

A figura 5 detalha uma possível classificação das aplicações da ACV de acordo com a cadeia de desenvolvimento do produto e à direção de uso (interno vs. externo). A primeira distinção pode ser feita com relação à escala de tempo de utilização dos resultados da ACV. ACVs utilizadas na definição de estratégia e/ou em P&D, são estudos mais prospectivos, ou seja, estão focados com o desenvolvimento de novos produtos e na comparação dos produtos atuais com possíveis alternativas. Nestes casos, os resultados da ACV são destinados a serem utilizados em médio e longo prazo. Entretanto, a aplicação na etapa de comercialização e até certo ponto na etapa de aquisição pode ser imediata e mais retrospectiva.



**Figura 5: aplicações da ACV na cadeia de desenvolvimento do produto.**

**Fonte: Adaptado de Life Cycle Assessment in Industry and Business – P. Frankl and F. Rubik. Ed. Springer; 2000.**

Os dados de um estudo ACV em conjunto com outra informação, por exemplo, dados de custos e performance, podem ajudar os responsáveis pela tomada de decisão na seleção de produtos ou processos que resultem num menor impacto para o ambiente (FERREIRA, 2004).

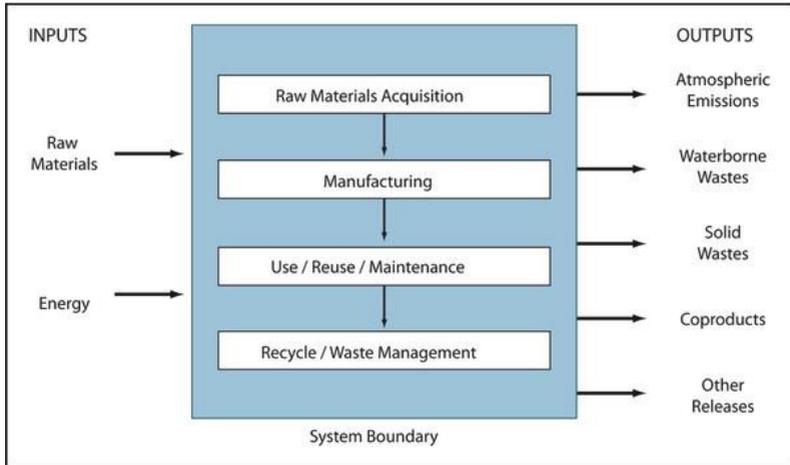
### **Limitações de um estudo ACV**

O estudo ACV não determina qual produto ou processo é o mais caro ou funciona melhor. Por isso, a informação desenvolvida num estudo ACV deve ser utilizada como uma componente de um processo de decisão que conta com outras componentes, como sejam, o custo e a performance (FERREIRA, 2004).

### **3.2.5. Descrição Geral da Avaliação de Ciclo de Vida**

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (FERREIRA, 2004).

O termo “ciclo de vida” refere-se à maioria das atividades no decurso da vida do produto desde a sua fabricação, utilização, manutenção, e deposição final; incluindo aquisição de matéria-prima necessária para a fabricação do produto. A Figura 6 ilustra os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados numa ACV e as típicas entradas/saídas medidas (USEPA, 2001).



**Figura 6: Estágios do ciclo de vida do produto.**

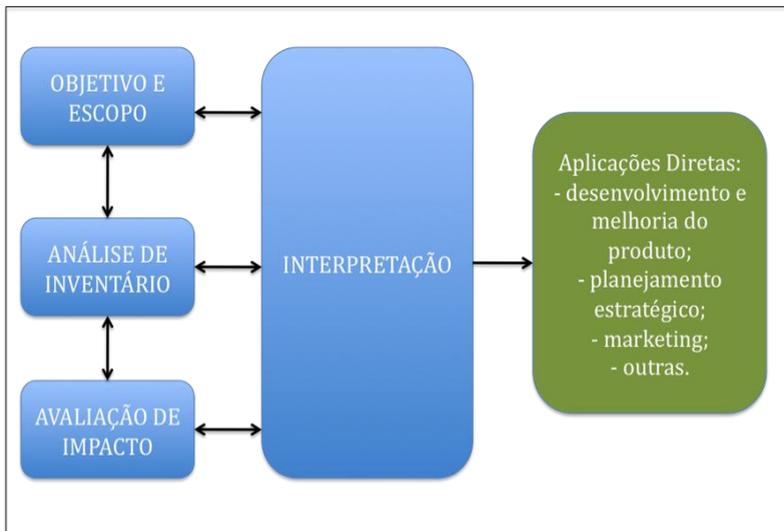
**Fonte: Life cycle assessment: principles and practice - USEPA 2001**

Em um projeto de avaliação de ciclo de vida de produtos ou serviços, todas as extrações de recursos e emissões para o ambiente são determinadas, quando possível, de maneira quantitativa considerando todo o ciclo de vida, ou seja, desde que “nasce” até que “morre” - “from cradle to grave”. É baseado nestes dados que são avaliados os potenciais impactos nos recursos naturais, no ambiente e na saúde humana.

Os procedimentos para a realização de uma ACV são uma sistemática abordagem faseada composta por quatro componentes: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e fase de interpretação.

- **Fase de definição de objetivo e escopo:** define e descreve o produto, processo ou atividade. Estabelece as fronteiras do sistema, o nível de detalhamento e o contexto no qual a avaliação deve ser feita. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo do objetivo do estudo em particular.

- **Fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV):** Trata-se de um inventário de entradas/saídas associados ao sistema em estudo, ou seja, identifica e quantifica a energia, água, materiais utilizados e descargas ambientais (p. ex: emissões para o ar, deposição de resíduos sólidos, descargas de efluentes líquidos e etc.). Essa fase envolve a coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo em questão.
- **Fase de avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV):** O objetivo da (AICV) é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados de análise de inventário de ciclo de vida (ICV) de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental, ou seja, analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, recursos naturais, água e etc., e das descargas ambientais identificadas na análise de inventário .
- **Fase de interpretação:** É a fase final da ACV, na qual os resultados de um ICV e/ou de uma AICV, ou de ambos, são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo. Os resultados devem ser descritos de maneira compreensiva, expondo as incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados.



**Figura 7: fases da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).**  
**Fonte: NBR ISO 14040 (2009) – Gestão Ambiental – Análise de Ciclo de Vida.**

## **Abordagem iterativa**

A ACV é uma técnica iterativa. As fases individuais de uma ACV utilizam os resultados das outras fases. Essa abordagem iterativa dentro e entre as fases contribui para a completude e consistência do estudo e dos resultados relatados (ISO 14040, 2009).

## **Prioridade da abordagem científica**

As decisões em uma ACV são preferencialmente embasadas nas ciências naturais. Se isto não for possível, outras abordagens científicas (derivadas, por exemplo, das ciências econômicas e sociais) podem ser utilizadas ou pode-se ainda recorrer a convenções internacionais. Caso não exista uma base científica, nem seja possível uma justificativa fundamentada em outras abordagens científicas ou convenções internacionais, as decisões podem, se apropriado, ser fundamentadas em escolha de valores (ISO 14040, 2009).

### **3.2.6. Definição de Objetivo e Escopo**

#### **3.2.6.1. Considerações iniciais**

A norma NBR ISO 14040 (2009) recomenda que na primeira etapa de uma ACV, o objetivo e o escopo do estudo devem ser claramente definidos e relacionados com as pretensões do projeto. Nessa perspectiva, o objetivo de uma ACV deve incluir: as motivações para o estudo, as aplicações previstas, a audiência pretendida, os requisitos iniciais de qualidade de dados e o tipo de análise crítica adotada.

Além disso, é importante definir o sistema em termos de aplicabilidade (serviço ou produto), de funcionalidade (comparação de produtos) e de seus limites. Esse é o assunto da fase de escopo, que também deve incluir o método de avaliação de impacto e interpretação posterior, os requisitos de dados, todas as suposições feitas e as limitações (se conhecido). Todos estes parâmetros são definidos de acordo com o objetivo declarado do estudo e devem ser claramente indicados, compreensíveis e transparentes. A representatividade do sistema (e de seus limites) deve ser caracterizada em termos de tecnologia, geografia, tempo, mercado, dados e fontes de dados. Em estudos comparativos, os sistemas objetos de comparação devem ser avaliados antes da interpretação dos resultados (FRANKL & RUBIK, 2000).

Portanto, é muito importante a definição apropriada do objetivo e escopo do projeto para a condução efetiva de toda a ACV.

O estabelecimento criterioso dos parâmetros iniciais torna o estudo gerenciável, prático, confiável e econômico. Mas segundo Chehebe (1998), “é importante ressaltar o caráter preliminar de tais definições pois a ACV é uma ferramenta iterativa e faz parte de sua metodologia a revisão, quando necessária, do planejamento inicial”.

### **3.2.6.2. Objetivo do estudo**

É óbvio que qualquer estudo ACV deve ter um objetivo. No entanto, na norma ISO 14044 (2009) existem alguns requisitos particulares para a definição do objetivo:

- A aplicação e o público-alvo devem ser descritos de forma não ambígua. Isso é importante pois um estudo que visa fornecer dados que são aplicados internamente pode ser estruturado de forma bastante diferente de um estudo que visa tornar públicas as comparações entre dois produtos;
- Os motivos para a realização do estudo devem ser claramente descritos. É o praticante tentando provar alguma coisa, é o encarregado pelo estudo com a intenção de fornecer apenas informações, etc.

Alguns estudos de ACV servem para mais de uma finalidade. Os resultados podem tanto ser utilizados interna e externamente. Nesse caso, as conseqüências de dupla finalidade devem ser claramente descritas. Por exemplo, pode ser que diferentes métodos de avaliação de impacto são utilizados para as versões internas ou externas do estudo.

#### **Aplicação Pretendida:**

A ACV é uma ferramenta versátil para a quantificação global (do berço ao túmulo) dos impactos ambientais de um produto, processo ou serviço. O objetivo principal é escolher o melhor produto, processo ou serviço com o menor efeito sobre a saúde humana e o meio ambiente. A realização de uma ACV também pode ajudar a orientar o desenvolvimento de novos produtos, processos ou atividades em direção a uma redução líquida de requisitos de recursos e emissões. Também pode haver objetivos secundários para a realização de uma ACV, que varia dependendo do tipo de projeto. A seguir estão exemplos de aplicações possíveis para os inventários do ciclo de vida, a maioria dos quais requerem certo

nível de avaliação de impacto para além do inventário (USEPA, 2006):

- Suporte para avaliações ambientais abrangentes;
- Estabelecer a informação de base para um processo;
- Classificar a contribuição relativa das etapas individuais ou processos;
- Identificar lacunas de dados;
- Suporte a políticas públicas;
- Suporte na certificação de produtos;
- Fornecer informações e orientação para os tomadores de decisão;
- Guia do produto e desenvolvimento de processos.

Weidema citado por Frischknecht (1996) propõe que as aplicações para ACV sejam divididas em aplicações específicas à empresa e aplicações genéricas e num nível operacional, tático e estratégico. Além disso, acrescenta ainda uma distinção entre aplicações informativas e aplicações que visam diretamente alterações, conforme se ilustra na Tabela 1.

<b>Aplicação da ACV</b>	<b>Específica à Empresa</b>	<b>Genérica</b>
<b>Operacional:</b>		
*Informação (informação do produto)	Declaração de produto	Informação do consumidor
*Alteração (melhoramento do produto)	Desenvolvimento do produto	Pesquisa orientada para o produto
<b>Tática:</b>		
*Informação (rotulagem do produto)	Marketing	Rotulagem ambiental
*Alteração (regulação do produto)	Fornecedor e/ou utilizador de necessidades e incentivos	Normas de produtos, taxas, e subsídios
<b>Estratégica:</b>		
*Informação (desempenho do produto)	Prioridades específicas da empresa	Prioridades genéricas
*Alteração (estrutural)	Ajustamento na gama de produto	Legislação do produto

**Tabela 1: Aplicações da ACV (Weidema) citado por Frischknecht (1996).**

### 3.2.6.3. Escopo do estudo

#### 3.2.6.3.1. Considerações Iniciais

O escopo do estudo descreve as escolhas metodológicas mais importantes, as premissas e as limitações. Ao se definir o escopo de uma ACV, os seguintes itens devem ser considerados e descritos de forma clara (ISO 14044, 2009):

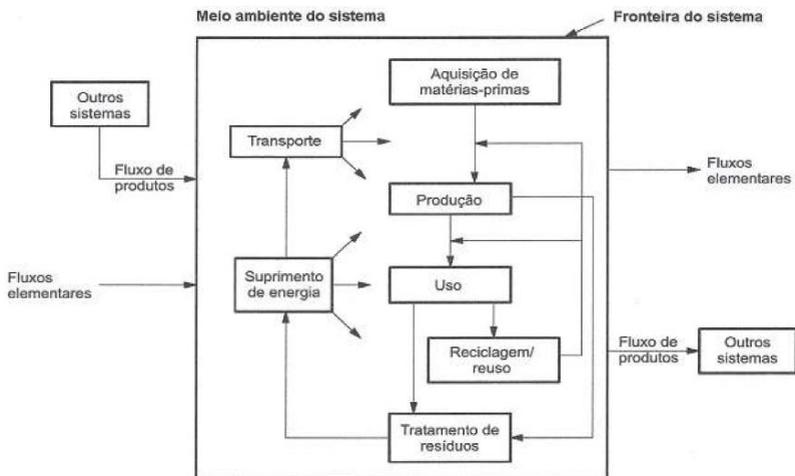
- o sistema de produto a ser estudado;
- as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- a unidade funcional;
- a fronteira do sistema;
- procedimentos de alocação;
- metodologia de AICV e tipos de impactos;
- interpretação a ser utilizada;
- requisitos de dados;
- requisitos de qualidade dos dados;
- tipo de revisão crítica, se aplicável;
- limitações;
- pressupostos;
- escolha de valores e elementos opcionais;
- tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

O escopo (âmbito) do estudo deve ser suficientemente bem definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes, para atingir os objetivos planejados (FERREIRA, 2004).

Durante a condução do projeto, à medida que se recolhem dados e informações adicionais, o escopo do estudo pode sofrer alterações devido ao caráter iterativo que a técnica da ACV possui.

### **3.2.6.3.2. O Sistema de Produto a Ser Estudado**

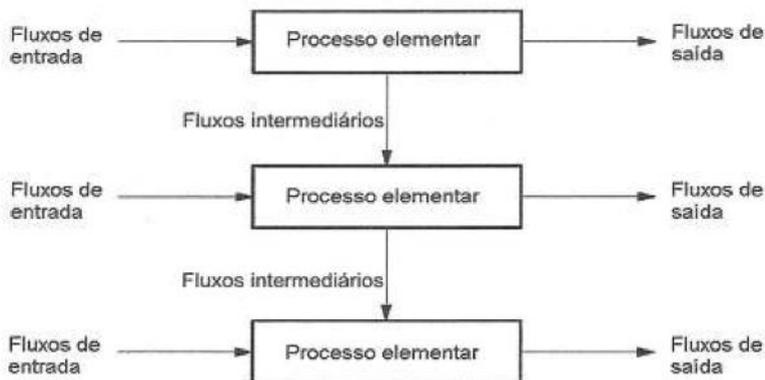
A ACV modela o ciclo de vida de um produto por meio de seu sistema de produto, que desempenha uma ou mais funções definidas. A propriedade essencial de um sistema de produto é caracterizada pela sua função e não pode ser definida somente em termos dos produtos finais (ISO 14044, 2009). A figura 8 mostra um exemplo de um sistema de produto.



**Figura 8: Exemplo de um sistema de produto para ACV.**  
**Fonte: ISO 14040 (2009) - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura.**

A subdivisão de um sistema de produto nos processos elementares que o compõem facilita a identificação das entradas e saídas do sistema de produto. Em muitos casos, algumas das entradas são utilizadas como componentes do produto de saída, enquanto outras (entradas auxiliares) são utilizadas dentro de um processo elementar, mas não são parte do produto de saída. Um processo elementar também gera outras saídas (fluxos elementares e/ou produtos) como resultado de suas atividades. O nível de detalhamento da modelagem, requerido para satisfazer o objetivo do estudo, determina as fronteiras de um processo elementar (ISO 14040, 2009).

Para descrever o sistema de produto estudado, o sistema global deve ser dividido em séries de subsistemas ligados entre si por fluxos de materiais ou energia. Quando identificadas todas as componentes do subsistema, cada uma delas pode ser vista como um sistema, pois receberá energia e materiais e emitirá poluentes para o ar e para a água, resíduos sólidos e outras descargas ambientais além dos produtos úteis. Exemplo na figura 9.



**Figura 9: Exemplo de um conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto.**

**Fonte: ISO 14040 (2009) - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura.**

As descargas ambientais associadas com a produção, utilização, transporte e disposição final dos materiais subsidiários utilizados no sistema de produto devem ser incluídos nos limites do sistema.

A necessidade total de matérias-primas e energia e as saídas totais de resíduos sólidos, líquidos e gasosos do sistema global é simplesmente a soma das entradas e saídas de todas as componentes dos subsistemas (FERREIRA, 2004).

### **3.2.6.3.3. Função e Unidade Funcional**

O escopo de uma ACV deve especificar claramente as funções (características de desempenho) do sistema em estudo. A unidade funcional deve ser consistente com o objetivo e escopo do estudo. Um dos propósitos principais de uma unidade funcional é fornecer uma referência em relação à qual os dados de entrada e saída são normalizados (no sentido matemático). A unidade funcional, portanto deve ser claramente definida e mensurável (ISO 14044, 2009). De acordo com Ferreira (2004), a unidade funcional é uma medida de desempenho das saídas funcionais do sistema de produto, que constitui referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar que a comparabilidade dos resultados ACV é feita numa base comum,

sendo particularmente crítica quando diferentes sistemas estão a ser avaliados.

A função de uma empresa que se dedica por exemplo, à pintura será executar pinturas. A unidade funcional para um sistema de pintura pode ser “uma unidade de superfície coberta”, se a função é deixar uma cobertura protetiva e decorativa numa superfície de madeira. Se a função é alterada para incluir durabilidade, a unidade funcional pode ser “uma unidade de superfície protegida por um período de tempo definido” (TIBOR, 1996).

#### **3.2.6.3.4. Comparação entre sistemas**

Em estudos comparativos, a ISO 14044 (2009) estipula que a equivalência dos sistemas a serem comparados deve ser avaliada antes da interpretação dos resultados. Consequentemente, o escopo do estudo deve ser definido de tal maneira que os sistemas possam ser comparados. Os sistemas devem ser comparados utilizando a mesma unidade funcional e considerações metodológicas equivalentes, tais como: desempenho, limites do sistema, qualidade dos dados, procedimentos de afetação, regras de decisão na avaliação de entradas e saídas e análise de impacto. Qualquer diferença entre sistemas relativamente a estes parâmetros deve ser identificada e relatada.

Para estudos de ACV que se pretende utilizar em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, uma avaliação de impacto de ciclo de vida deve ser realizada.

#### **3.2.6.3.5. A Fronteira do Sistema**

Quando se avalia um sistema de produto, os limites do sistema em estudo devem ser claramente definidos. Devem ser demarcados os limites entre o sistema de produto e o ambiente, e entre o sistema de produto investigado e outros sistemas de produto (ASSIES, 1992). De acordo com a ISO 14044 (2009), a seleção da fronteira do sistema deve ser consistente com o objetivo do estudo.

Os critérios aplicados no estabelecimento dos limites do sistema devem ser identificados e justificados no escopo do estudo. Vários fatores determinam os limites do sistema, incluindo a aplicação pretendida do estudo, as suposições feitas, critérios “cut-off”, restrições de dados, limitação de recursos financeiros e audiência pretendida.

Devem ser tomadas decisões com relação às quais processos elementares devem ser incluídos no estudo e o nível de

detalhamento com que esses processos elementares devem ser estudados (ISO 14044, 2009).

Ao se estabelecer a fronteira do sistema, convém que diversos estágios do ciclo de vida, processos elementares e fluxos sejam levados em consideração, tais como (ISO 14040, 2009):

- aquisição de matérias-primas;
- entradas e saídas na cadeia principal de manufatura ou processamento;
- distribuição/transporte;
- produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- uso e manutenção de produtos;
- disposição final de resíduos de processos e de produtos;
- recuperação de produtos usados (incluindo reuso, reciclagem e recuperação de energia);
- manufatura de materiais auxiliares;
- manufatura, manutenção e descomissionamento de equipamentos;
- operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

Em muitas situações, a fronteira do sistema definida inicialmente terá que ser refinada posteriormente.

A eliminação de processos, entradas ou saídas do ciclo de vida do projeto de ACV só é permitida se isso não provocar alterações significativas nas conclusões gerais do estudo. Essas alterações devem ser justificadas e registradas de forma clara e as razões e implicações de sua omissão devem ser explicadas.

No workshop de Leiden acordou-se que na generalidade, podem omitir-se componentes do sistema que contribuam com menos de 1% para a massa do produto total, especialmente se ele é inferior à certeza estatística do fator menos preciso (HUISINGH, 1992). Uma exceção a esta regra é o caso de substâncias altamente tóxicas ou persistentes ou recursos escassos. Nestes casos, mesmo assim, 1% da massa pode ainda ser significativo, devendo ser incluídas. Quanto à inclusão de “bens de capital” em ACVs, é consensual, que na comparação de dois processos estes devem ser incluídos na ACV, apenas nos casos em que os investimentos associados são significativamente diferentes (FERREIRA, 2004).

Conforme Frischknecht (1996), os bens de equipamento, emissões pessoais (utilização de energia, ar condicionado, sanitários), deposição imprópria de resíduos (lixeira ilegal), geralmente não são incluídos nos limites do sistema, porque se conclui terem um pequeno efeito nos resultados.

### 3.2.6.3.5.1. Fluxograma de processo.

A norma ISO 14044 (2009), recomenda a descrição do sistema de produto em estudo com a utilização de fluxograma de processo que caracterize os processos elementares e suas inter-relações. Convém que cada um dos processos elementares seja inicialmente descrito visando a definir:

- o início do processo elementar, em termos de entrada de matérias-primas ou produtos intermediários;
- a natureza das transformações e operações que ocorrem como parte do processo elementar, e;
- onde o processo elementar termina, em termos do destino dos produtos intermediários ou finais.

O objetivo é identificar as entradas significativas associadas a cada um dos processos elementares (ISO 14044, 2009).

Entradas e saídas de energia devem ser tratadas como qualquer outra entrada ou saída em uma ACV. Os diferentes tipos de entradas e saídas de energia devem incluir entradas e saídas relevantes para a produção e distribuição de combustíveis, energia associada a entradas não energéticas (feedstock energy) e energia de processo utilizadas dentro do sistema que está sendo modelado (ISO 14044, 2009).

### 3.2.6.3.5.2. Critério de corte “cut-off”

Existem muitos critérios de corte utilizados na prática de ACV para definir quais entradas serão incluídas na avaliação. A Norma ISO 14044 (2009) recomenda os critérios de massa, energia e significância ambiental, no entanto, basear a identificação preliminar de entradas somente na sua contribuição em massa pode resultar na omissão de entradas importantes para o estudo.

- **Massa:** uma decisão apropriada ao utilizar massa como critério requereria a inclusão no estudo de todas as entradas cuja contribuição cumulativa superasse uma porcentagem definida da entrada de massa do sistema de produto que está sendo modelado.
- **Energia:** de forma semelhante, uma decisão apropriada ao utilizar energia como critério requereria a inclusão no estudo daquelas entradas cuja contribuição cumulativa superasse uma

porcentagem definida da entrada de energia do sistema de produto.

- **Significância ambiental:** convém que decisões sobre critérios de corte sejam tomadas no sentido de incluir entradas que contribuam com mais do que uma parcela adicional definida da contribuição estimada de dados individuais do sistema de produto que são selecionados especificamente em função de sua relevância ambiental.

Critérios de corte semelhantes podem ser utilizados para identificar quais saídas deveriam ser rastreadas ao meio-ambiente.

Convém que todas as entradas e saídas caracterizadas através deste processo sejam modeladas como fluxos elementares.

Quando se pretende utilizar o estudo em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, a análise de sensibilidade final dos dados de entradas e saídas deve incluir os critérios de massa, energia e significância ambiental, de modo que todas as entradas que cumulativamente contribuam com mais do que uma quantidade definida para o total (por exemplo, porcentagem) sejam incluídas no estudo (ISO 14044, 2009).

É importante que o sistema em estudo seja descrito com nível de detalhamento e caracterização adequada, afim de, proporcionar a outro executante a reprodução da análise de inventário.

### **3.2.6.3.6. Procedimentos de Alocação**

Muitos processos geralmente realizam mais do que uma função ou saída. A carga ambiental do processo tem de ser atribuída ao longo das diferentes funções e saídas. Existem maneiras diferentes de fazer tal imputação. A ISO 14044 (2009) recomenda o seguinte procedimento, a fim de lidar com questões de alocação:

- Evitar alocação, dividindo o processo de tal maneira que ele pode ser descrito como dois processos separados, cada um com uma única saída. Muitas vezes isso não é possível, por exemplo, tábuas de madeira e serragem são ambos os resultados econômicos de uma serraria, mas não se pode dividir o processo de serragem, em uma parte que é responsável pelo pó de serra e outra que é responsável pelas pranchas.
- Outra maneira de evitar a alocação é estender os limites do sistema, incluindo processos que seriam necessários para fazer uma saída similar. Por exemplo, se uma quantidade utilizável de vapor, produzido como um subproduto, é usado de tal forma que

evite a produção de vapor por meios mais convencionais, pode-se subtrair a carga ambiental da produção de vapor evitada. Um problema prático, que muitas vezes nem sempre é fácil de dizer como o vapor seria produzido alternativamente.

- Se não for possível, para evitar alocação em qualquer forma, o padrão ISO 14044 (2009) sugere atribuição da carga ambiental com base em uma causalidade física, tal como a massa ou o conteúdo de energia das saídas. Por exemplo, se a serradura representa 40% da massa, pode-se atribuir 40% da carga ambiental para serradura. No caso de atribuição de vapor, acreditamos que a massa do vapor não é uma base relevante.
- Se este procedimento não pode ser aplicado, a ISO 14044 (2009) sugere o uso de uma base de alocação socioeconômica, tais como o valor econômico. Por exemplo, se a serradura representa 20% do valor gerado pelo moinho de serra pode-se alocar 20% da carga ambiental a essa saída.

Embora a ISO mencione a base socioeconômica como um último recurso, ele é usado com frequência. A vantagem é que o valor econômico é um bom meio para distinguir os resíduos (valor nulo ou negativo) a partir de uma saída, e que expressa a importância relativa de uma saída.

### 3.2.6.3.7. Metodologia da AICV e Tipos de Impactos

De acordo com a norma ISO 14044 (2009), devem ser determinadas quais categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização serão incluídos no estudo de ACV. A seleção de categorias de impacto, indicadores da categoria e modelos de caracterização utilizados na metodologia da AICV deve ser consistente com o objetivo do estudo.

- **Categoria de impacto:** classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise de inventário de ciclo de vida podem ser associados.
- **Indicador de categoria de impacto:** representação quantificável de uma categoria de impacto.
- **Modelo de caracterização:** é a abordagem que é aplicada para converter o resultado da análise do inventário do ciclo de vida na unidade comum do indicador de categoria.

Para melhor entendimento abaixo segue exemplo com aplicação dos termos.

TERMO	EXEMPLO
Categoria de Impacto	Mudança Climática
Resultados do ICV	Quantidade de Gás de Efeito Estufa por Unidade Funcional
Modelo de Caracterização	Modelo de linha de base para 100 anos do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas - IPCC
Indicador de Categoria	Forçamento Radiativo Infravermelho ( $W/m^2$ )
Fator de Caracterização	Potencial de aquecimento global para cada gás de efeito estufa (kg CO <sub>2</sub> equivalentes / kg gás)

**Tabela 2: exemplo de aplicação dos termos.**

**Fonte: ISO 14040 (2009) – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações.**

### 3.2.6.3.8. Requisitos de Dados

Os tipos e fontes de dados selecionados para uma ACV dependem do objetivo e escopo do estudo. De acordo com a ISO 14044 (2009), tais dados podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos elementares dentro da fronteira do sistema, ou podem ser obtidos ou calculados a partir de outras fontes. Na prática, todos os dados podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados.

As entradas podem incluir o uso de recursos minerais (por exemplo, metais provenientes de minérios ou de reciclagem), serviços como transporte ou suprimento de energia e o uso de materiais auxiliares como lubrificantes ou fertilizantes, mas não estão limitadas a esses aspectos.

As emissões atmosféricas que abrangem entre outras, as emissões de monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, podem ser identificadas separadamente.

Emissões atmosféricas e descargas para a água e para o solo frequentemente representam liberações a partir de fontes pontuais ou difusas, após passarem por dispositivos de controle de poluição. Convém que esses dados incluam também emissões fugitivas, quando significativas. Adicionalmente, podem ser coletados dados de ruído e vibração, uso de solo, radiação, odores e perda de calor.

Nessa fase descrevem-se as fontes, tipos e a característica dos dados coletados (medido, calculado e estimado) para a execução do projeto. No entanto, conforme o estudo avança, a obtenção de dados pode sofrer restrições e/ou alterações, essas modificações devem ser notificadas.

### **3.2.6.3.9. Requisitos de Qualidade dos Dados**

Os requisitos de qualidade dos dados especificam, em termos gerais, as características dos dados necessárias para o estudo. Requisitos de qualidade dos dados devem ser definidos para permitir atingir os objetivos e o âmbito do estudo ACV.

Convém que os requisitos de qualidade dos dados abranjam (ISO 14044, 2009):

- cobertura temporal: idade dos dados e período mínimo de tempo durante o qual os dados deveriam ser coletados;
- a cobertura geográfica: área geográfica a partir da qual deveriam ser coletados dados para processos elementares de modo a satisfazer o objetivo do estudo;
- a cobertura tecnológica: tecnologia específica ou conjunto de tecnologias;
- a precisão: medida da variabilidade dos valores de dados para cada dado expresso (por exemplo, variância);
- a completeza: porcentagem dos fluxos que é medida ou estimada;
- a representatividade: avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete a verdadeira população de interesse (por exemplo, cobertura geográfica, período de tempo e cobertura tecnológica);
- a consistência: avaliação qualitativa quanto à aplicação uniforme da metodologia do estudo aos diversos componentes da análise;
- reprodutibilidade: avaliação qualitativa do grau em que as informações sobre a metodologia e os valores dos dados permitiriam a um executante independente reproduzir os resultados relatados no estudo;
- as fontes dos dados;
- a incerteza da informação (por exemplo dados, modelos e pressupostos).

É importante que a qualidade da informação seja caracterizada qualitativamente e quantitativamente, bem como, os

meios e métodos utilizados para a obtenção e consolidação dos dados respectivamente.

#### **3.2.6.3.10. Revisão Crítica**

Os estudos ACV devem ser sujeitos a uma revisão especializada nos estágios críticos do desenvolvimento de modelos e antes de publicação. No entanto, quando o estudo é utilizado apenas para fins internos à empresa, a revisão especializada formal será opcional (SETAC, 1991).

O escopo de um estudo deve definir se uma revisão crítica é necessária e, caso seja, como conduzi-la, o tipo de revisão crítica necessária e quem deveria conduzir a revisão e seu nível de conhecimento especializado.

#### **3.2.6.3.11. Limitações**

A realização de uma ACV demanda tempo e recursos financeiros. Dependendo da abrangência do estudo de ACV que o usuário deseja realizar, a coleta de dados pode ser problemática e a disponibilidade de informações pode afetar a precisão dos resultados finais. Portanto, é importante balancear a acessibilidade/disponibilidade de dados, o tempo demandado para realizar o estudo e os recursos financeiros necessários, contra os benefícios projetados da ACV (USEPA, 2006).

Toda e qualquer limitação detectada previamente, bem como, no desenvolvimento do estudo de ACV, deve ser relatada de forma precisa e clara. Fornecendo explicações e as implicações que podem afetar o projeto.

De acordo com a norma ISO 14044 (2009) uma das etapas da fase de interpretação é identificar as limitações inerentes ao projeto de ACV.

#### **3.2.6.3.12. Pressupostos**

Todos os pressupostos ou as decisões tomadas durante todo o projeto devem ser relatados ao lado dos resultados finais da ACV. Se as premissas são omitidas, os resultados finais podem ser tomados fora de contexto ou facilmente mal interpretados. Conforme o processo de ACV avança de fase a fase, suposições e limitações adicionais para o alcance pode ser necessário para realizar o projeto com os recursos disponíveis (USEPA, 2006).

Convém que qualquer pressuposto ou conjectura atribuída ao estudo de ACV, deve ser descrita e explicada de forma clara e objetiva.

### **3.2.6.3.13. Tipo e formato do relatório requerido para o estudo**

A definição prévia de como os resultados finais devem ser documentados e exatamente o que deve ser incluído no relatório final ajuda a garantir que o produto final atenda as expectativas apropriadas. A comunicação dos resultados finais, ou reportar os resultados de uma fase particular de ACV, é importante para descrever minuciosamente a metodologia utilizada na análise. O relatório deve definir explicitamente os sistemas analisados e os limites que foram definidos. A apresentação dos resultados deve ser consistente com a finalidade do estudo (USEPA, 2006).

### **3.2.7. Inventário do Ciclo de Vida (ICV).**

Após o objetivo e âmbito do estudo estarem claramente definidos, a fase seguinte da metodologia ACV é a análise de inventário que identifica e quantifica as entradas e saídas de e para o ambiente, do sistema de produto investigado. O seu resultado essencial é muitas vezes chamado de “tabela de inventário” (Heijungs et al., 1992, Consoli et al., 1993).

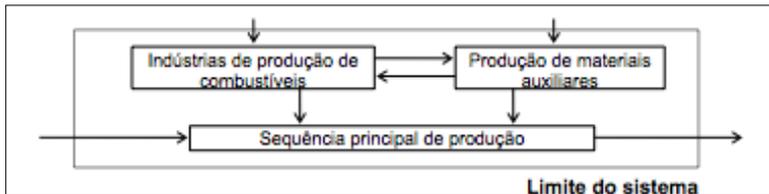
De acordo com a ISO 14044 (2009), o processo de condução de uma análise de inventário é iterativo. À medida que os dados são conhecidos e mais informação acerca do sistema é adquirida, novos requisitos de dados ou limitações podem ser identificados, requerendo uma alteração nos procedimentos de recolha de dados, para que os objetivos do estudo ainda sejam satisfeitos. Algumas vezes, pontos importantes podem ser identificados que requerem revisões dos objetivos ou âmbito do estudo.

A análise de inventário processa-se através das seguintes fases: construção do fluxograma; definição dos limites do sistema (de produto com o ambiente e de produto com outros sistemas de produto); finalização dos limites do sistema; recolha de dados; procedimentos de cálculos (procedimentos de afetação e procedimentos de construção da tabela de inventário) (FERREIRA, 2004).

#### **3.2.7.1. Fluxograma do Processo**

A melhor forma de representar as componentes de um sistema é de acordo com o “Code of Practice” (Consoli et al., 1993)

desenvolver um fluxograma, representando as interligações entre os subsistemas. Um fluxograma representativo da maioria dos sistemas industriais consiste de 3 grupos principais de operações, como ilustrado na Figura 10 (SETAC, 1991).



**Figura 10: Grupos dentro de um sistema industrial.**

**Fonte: SETAC, 1991.**

- **Sequência principal de produção:** aquelas operações responsáveis pela aquisição das matérias-primas, produção, utilização, transporte e deposição do produto.
- **Produção de materiais auxiliares:** tais como, embalagem e maquinaria necessárias para processar as matérias-primas que alimentam o processo principal, ou sequência de produção.
- **Indústrias de produção de combustíveis:** que fornecem a energia necessária para fazer funcionar o sistema.

Nos três grupos de operações, as entradas de material são matérias-primas do ambiente e, portanto, as operações necessárias para extrair estes materiais do ambiente devem ser incluídas dentro dos limites do sistema (FERREIRA, 2004).

### 3.2.7.2. Coleta de Dados

Para análise do inventário, e de acordo com a norma ISO 14040, devem ser recolhidos os dados qualitativos e quantitativos para cada processo unitário que esteja incluído dentro dos limites do sistema.

O sistema internacional de unidades, SI pode ser utilizado para exprimir todas as emissões e extrações (Heijungs et al., 1992): a maioria das emissões e recursos podem ser expressas em kg ou seus derivados (ton., mg,...); os dados de energia podem ser expressos em kw, MJ.

De acordo com o “Code of Practice” (Consoli et al., 1993) os dados devem ser obtidos das empresas que operam os processos específicos, a menos que algo em contrário seja referido nos objetivos e âmbito do estudo. Quando estes dados não estão

disponíveis, podem ser utilizados dados de outras fontes potenciais, tais como: dados de projeto dos processos; cálculos de engenharia baseados na química e tecnologia dos processos; estimativas de operações similares; e bases de dados publicadas.

Os dados devem ser baseados num período de tempo, que seja suficientemente longo, para atenuar comportamentos anormais, tais como paragens de máquinas ou perturbações no processo. O período de tempo equivalente a um ano fiscal, para o qual estão disponíveis a maioria dos dados dos processos de produção, é considerado suficiente, para contemplar todos os comportamentos anormais que possam existir ao nível dos processos (SETAC, 1991; Vigon et al., 1992).

Os dados são apresentados num formato normalizado, ou seja, são apresentados em relação a uma dada unidade de saída, para cada operação unitária do subsistema e, para a qual deve ser elaborado um balanço de massa e energético.

### 3.2.7.3. Alocação

De acordo com Ekvall (1994), quando o ciclo de vida do produto, material ou serviço estudado afeta outros ciclos de vida não incluídos no sistema em análise, é necessário aplicar regras de alocação. Alocar, é o ato de distribuir a cada função do processo a sua quota-parte de responsabilidade pelas cargas ambientais causadas pelos processos e transportes num ciclo de vida.

Os processos onde os problemas da alocação podem ser relevantes, são (Heijungs et al., 1992; Consoli et al., 1993).

- **Produção:** processos com multi-sistemas de saída;
- **Processamento de resíduo combinado:** processos com multi-sistemas de entrada;
- **Reciclagem em ciclo fechado ("closed loop"):** em que o produto/material volta ao mesmo sistema de produto;
- **Reciclagem em ciclo aberto ("open loop"):** em que o produto/material é utilizado noutra sistema de produto;
- **Reciclagem em cascata:** o produto/material é sucessivamente utilizado em vários sistemas de produto.

Na prática é difícil distinguir entre processos multi-saídas e reciclagem em ciclo aberto uma vez que o material reciclado, num produto secundário, pode ser visto como um co-produto (Heijungs et al., 1992).

### Reciclagem/Reuso

Baseado na ISO 14044 (2009), um procedimento de alocação em ciclo fechado se aplica a sistemas de produto em ciclo fechado. Também se aplica a sistemas de produto em ciclo aberto onde não ocorrem mudanças nas propriedades inerentes do material reciclado. Em tais casos, a necessidade de alocação é evitada, uma vez que o uso do material secundário substitui o uso de materiais primários (virgens). Exemplo: o uso de vidro reciclado em indústria vidreira, substitui a utilização de matérias-primas.

### 3.2.7.4. Desenvolvimento de Questionários

De acordo com PRè (2010), questionários são comumente utilizados como um meio de coleta de dados. Seu desenvolvimento deve se feito de maneira bem cuidadosa e dirigido ao grupo alvo pretendido. Portanto, não existe um questionário padrão e perfeito que sirva para todos os projetos. Abaixo segue um exemplo de questionário.

B1 Energy inputs Please specify the total energy mix you use for the total production department. If you have data in other units than the ones proposed below, please mark them clearly.  For the allocation of energy between building (climate control etc.) and processing you can use a percentage.		Why do we want to know this? Energy is of course an important factor in the environmental load. Using these columns we want to precisely allocate the energy inputs to the production process.			Data Source for total			
Total	Total use in year X	Unit	Alt. Unit	Used for climate control, and lighting, etc.	Used for production machines	Direct data (derived directly from administrative systems)	Indirect data (Based on some sort of calculation)	Estimated data
Electricity from public grid		kWh		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Natural gas		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Light Oil		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Heavy Oil		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coal		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Heat from other suppliers (for instance steam and hot water)		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Own electric power generation from other sources (wind, water, sun and biomass)		kWh		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Total energy consumption		MJ		%	%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Tabela 3: exemplo de questionário desenvolvido para ser aplicado em empresas.**

**Fonte: Introduction to LCA - SimaPro 7 - PRè - Product Ecology Consultants (2010).**

#### **3.2.7.5. Dados “Background”**

Dados “*background*” são dados genéricos de materiais, energias, transporte e de sistemas de gestão de resíduos. São dados tipicamente encontrados em base de dados e literatura.

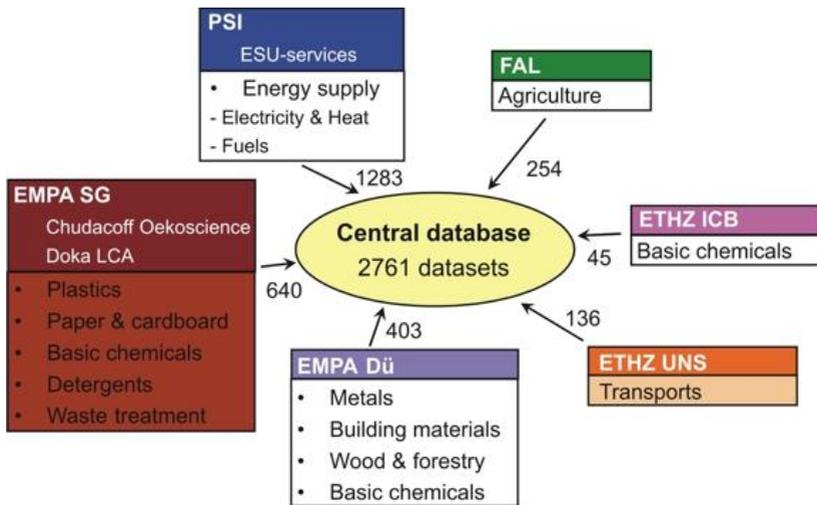
De acordo com PRè (2010), 80% dos dados requeridos pelo estudo de ACV são dados “background”, ou seja, não são coletados via questionário, mas sim disponíveis em base de dados, literatura e internet.

A utilização de dados “*background*” requer grande cuidado, uma vez que o dado não foi obtido pessoalmente. Isso significa que é necessário investigar a qualidade do dado e da base de dados e também a verificação quanto ao atendimento dos requisitos definidos no objetivo e escopo do projeto.

#### **3.2.7.6. Base de dados Ecoinvent**

A base de dados Ecoinvent representa a fonte de dados disponível mais importante da comunidade de ACV (PRè, 2010).

O software SimaPro possui toda a base de dados Ecoinvent v2.0 que cobre milhares de processos. Foi inicialmente disponibilizado em 2003. Esse banco de dados é resultado da atualização e integração promovida pelo Instituto Suíço.



**Figura 11: união de base de dados para a criação da base de dados Ecoinvent.**

**Fonte: Introduction to LCA - SimaPro 7 - PRè - Product Ecology Consultants (2010).**

Abaixo segue as características principais da base de dados Ecoinvent:

- Cobre uma ampla gama de dados;
- Disponível como processos unitários e sistemas de processos;
- Aplicação coerente com as fronteiras do sistema e alocação;
- Os relatórios dos dados “background” são bem documentados e podem ser acessados através do software SimaPro 7 e do site: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org);
- Especificações consistentes de dados de incerteza, como a distribuição lognormal com desvio padrão;
- As emissões são especificadas em sub-compartimentos, por exemplo: as emissões para o ar podem ser especificadas como emissões de alta e de baixa área de densamente povoadas;
- É atualizado regularmente pelo Centro Ecoinvent.

### 3.2.8. Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é definida como sendo um processo técnico, quantitativo, e/ou qualitativo, para

caracterizar e avaliar os efeitos das cargas ambientais identificadas na componente inventário (SETAC, 1991, Consoli et al., 1993).

Baseado na USEPA (2006), a fase de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) da ACV é a avaliação do potencial impacto ambiental e da saúde humana devido à utilização de recursos naturais e emissões/descargas identificadas durante a fase de inventário de ciclo de vida (ICV). A avaliação de impactos deveria apontar os efeitos humanos e ecológicos e deveria também sinalizar a depleção de recursos naturais.

A avaliação de impactos do ciclo de vida promove o estabelecimento de uma ligação entre o produto ou processo e o respectivo potencial impacto ambiental associado. Por exemplo: qual o impacto da emissão de 9.000 toneladas de dióxido de carbono ou 5.000 toneladas de metano na atmosfera? Qual é pior? Qual é o potencial impacto na camada de ozônio? Ou na mudança climática?

Portanto, para uma AICV, os impactos são definidos como as consequências causadas pelos fluxos de entrada e de saída de um sistema, na saúde humana, plantas e animais, ou a disponibilidade futura dos recursos naturais.

### 3.2.9. Softwares Aplicados à ACV

Na avaliação de ciclo de vida de um sistema ou produto, inclui-se a manipulação de grande quantidade de dados levantados no inventário, seguida por diversas operações de cálculos aplicadas aos fatores de caracterização, índices de categoria, etc. Estes aspectos serão mais viáveis com o suporte informatizado para facilitar a realização das tarefas (JOSA et al., 1999).

A tabela 4 abaixo mostra um resumo dos softwares para ACV mais utilizados (MENKE, D.M.; DAVIS, G.A. 1996).

Programa	Fabricante	Aplicação	País
SimaPro7	Pré Consultants B.V.	Análise de inventário e avaliação dos impactos	Holanda
Eco-it	Pré Consultants B.V.	Análise de inventário e avaliação dos impactos	Holanda

<b>Programa</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Aplicação</b>	<b>País</b>
Gabi 3.0	Universidade de Stutgard	Análise de inventário e avaliação dos impactos	Alemanha
KCL-Eco	The Finish Pulp e Paper Research Institute	Análise de inventário	Finlândia
LCAiT	Chalmers Industriteknik	Análise de inventário	Suécia
PEMS	Pira Internacional	Análise de inventário e avaliação dos impactos	Inglaterra
PIA	Pré Consultants	Análise de inventário e avaliação dos impactos	Holanda
TEAM	Ecobalance, Inc.	Análise de inventário	Estados Unidos

**Tabela 4: Softwares disponíveis no mercado para ACV de produtos ou sistemas genéricos.**

### **3.2.10. Descrição do Programa Computacional SIMAPRO 7**

Conforme a empresa fornecedora do programa, PRE (2012), explica em seu site, o programa SimaPro permite modelar produtos e sistemas através de uma perspectiva de ciclo de vida, ou seja, constrói modelos complexos de uma forma sistemática e transparente usando recursos exclusivos, tais como, os parâmetros e análise de Monte Carlo e a integração com o banco de dados Ecoinvent. O software é utilizado para uma variedade de aplicações, tais como:

- Cálculo da pegada de carbono;
- O design do produto e eco-design;

- Declarações Ambientais do Produto (EPD);
- Impacto ambiental dos produtos ou serviços;
- Os relatórios ambientais (GRI);
- Determinação de indicadores de desempenho.

Basicamente os procedimentos do programa é criar processos e sub-processos que venham a formar o fluxograma proposto inicialmente. Cada processo criado permite acrescentar entradas e saídas. Quanto mais rico e detalhado o levantamento de dados e informações, maior veracidade terá o resultado final. Após modelar todo o sistema de produto dentro do software Simapro, o programa calcula os impactos referentes às categorias ambientais escolhidas através do método utilizado. O software possui diversos métodos para calcular os resultados da avaliação de impactos. O tipo de método escolhido é de acordo com o objetivo e escopo do projeto proposto

### **3.2.11. Interpretação do ciclo de vida**

A interpretação é a fase da ACV em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto; no caso de estudos de ICV, somente as conclusões da análise de inventário serão consideradas. Convém que a fase de interpretação da ACV forneça resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações (ISO 14040, 2009).

A fase de interpretação pode envolver o processo iterativo de rever e revisar o escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma consistente com o objetivo definido. Convém que as conclusões da interpretação do ciclo de vida reflitam os resultados do elemento avaliação.

### **3.2.12. Comunicação**

Uma estratégia para comunicação é parte integral de uma ACV. Para ser efetivo, convém que um relatório se refira às diferentes fases do estudo sob consideração (ISO 14040, 2009).

Os resultados e conclusões da ACV são relatados de forma adequada para o público-alvo, enfocando os dados, métodos e pressupostos aplicados no estudo, assim como as limitações associadas.

Se o estudo se estender à fase de AICV e for relatado a uma terceira parte, convém que os seguintes aspectos sejam reportados (ISO 14040, 2009):

- a relação com os resultados do ICV;
- uma descrição da qualidade dos dados;
- os pontos finais de categoria a serem protegidos;
- a seleção das categorias de impacto;
- os modelos de caracterização;
- os fatores e mecanismos ambientais;
- o perfil dos resultados dos indicadores.

### **3.3. Vidro**

#### **3.3.1. História do Vidro**

A história do vidro se confunde muitas vezes com a história da civilização. É considerado por muitos historiadores como um dos materiais mais antigos feitos pelo homem, sendo utilizados desde o início dos primeiros registros históricos.

O homem nem sempre foi o responsável pela fabricação do vidro. Alguns tipos de rochas quando fundidas a elevadas temperaturas e, em seguida, solidificadas rapidamente, formam os chamados vidros naturais, denominados obsidian e tektites. Esse tipo de situação pode por exemplo acontecer em erupções vulcânicas, que permitiram aos humanos da Idade da Pedra a utilização do vidro natural como ferramenta de corte para uso doméstico e para a sua defesa.

Ao longo da história o vidro natural foi considerado como material precioso pelos Egípcios e eram frequentemente encontrados nas tumbas e engastados nas máscaras mortuárias de ouro dos antigos Faraós.

Plínio, o grande naturalista romano, nascido no ano 23 de nossa era, em sua enciclopédia *Naturalis historia* atribui aos fenícios a obtenção dos vidros. Segundo o relato, ao desembarcarem nas costas da Síria há cerca de 7000 anos a.C., os fenícios improvisaram fogões usando blocos de salitre sobre a areia. Observaram que, passado algum tempo de fogo vivo, escorria uma substância líquida e brilhante que se solidificava rapidamente. Admite-se que os fenícios dedicaram muito tempo à reprodução daquele fenômeno, chegando à obtenção de materiais utilizáveis (ALVES et. al. 2001).

Quando as cerâmicas eram queimadas no Egito antigo, a presença acidental de areias ricas em cálcio e ferro, combinadas com carbonato de sódio, poderia ter sido o resultado das coberturas vitrificadas, observadas nas peças daquela época. Foram encontradas também no Egito antigo, os primeiros vidros isentos de cerâmica e a adição de cobre e cobalto para originar as tonalidades azuladas.

Por volta de 200 a.C. houve um desenvolvimento fundamental na arte de fazer objetos de vidro. Artesãos sírios da região da Babilônia e Sidon desenvolveram a técnica de sopragem. Data desta época, também, a utilização de moldes de madeira para a produção de peças de vidro padronizadas.

Na Alexandria em 100 d.C., foram obtidos os primeiros vidros incolores, graças à introdução de óxido de manganês nas composições e de melhora na eficiência dos fornos, tais como: capacidade de atingir altas temperaturas e controle da atmosfera de combustão.

Desde o princípio os vidros tiveram caráter utilitário (ferramentas, vasos, e etc.). O império Romano foi marcado para o vidro como o a idade do luxo. Nesse período a arte do vidro foi refinada o que permitiu a elaboração de jóias e imitações perfeitas de pedras preciosas.

O século XV foi marcado pelos vitrais - pequenos pedaços de vidro polido, de até 15 cm de diâmetro, rejuntados com tiras de chumbo e fixados nas construções para a elaboração de janelas. Muito presente nas catedrais, igrejas e palácios da época.



**Figura 15: Pormenor de um vitral da igreja de Norfolk, Narborough, século XV.**

**Fonte: <http://www.flickr.com/photos/norfolkodyssey/272424119/>**

Ao nos confrontarmos com a história dos vidros, fica clara a importância dos povos que habitavam o Mediterrâneo e o Adriático. Neste particular, Veneza teve papel fundamental, sobretudo na Idade Média, por contar com um grande número de vidreiros, fortemente influenciados pela arte islâmica.

Na Renascença (século XVII), artesões venezianos imigraram para a Alemanha e radicando-se nas florestas da Bavária e da Bohemia, passaram a produzir vidro de cor esverdeada, denominado *Waldglas* (vidro da floresta).

Os séculos XVIII, XIX e XX marcaram importantes desenvolvimentos. O desenvolvimento das ciências químicas e físicas suportaram o entendimento e desenvolvimento da arte do vidro, ou seja, da sua fabricação e aplicação. A tabela 5 abaixo caracteriza os marcos desse período.

Na atualidade as pesquisas então concentradas nos vidros à base de óxidos utilizando processos tradicionais de fusão. De acordo com Alves et. AL. (2001), os 20 anos foram desenvolvidos novos processos de fabricação de vidros, como o processo sol-gel (totalmente químico em que não se usa a fusão) e os processos baseados na deposição química de vapor. No que diz respeito às outras famílias de vidros que não os óxidos, têm sido objeto de estudo os vidros haletos, calcogenetos e calcohaletos.

<b>ANO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
1765	Início da produção do vidro cristal
1787	Utilização de aparelhos de vidro para o estudo das propriedades físicas dos gases: Lei de Boyle e Charles
1800	Revolução industrial abre nova era na fabricação de vidros. Matérias-primas sintéticas são usadas pela primeira vez. Vidros com propriedades controladas são disponíveis
1840	Siemens desenvolve o forno do tipo tanque, para a produção de vidro em grande escala; produção de recipientes e vidro plano
1863	Processo "Solvay" reduz dramaticamente o preço da principal matéria-prima para fabricação de vidros: óxido de sódio
1875	Vidros especiais são desenvolvidos na Alemanha por Abbe, Schott e Carl Zeiss. A Universidade de Jena, na Alemanha, torna-se o maior centro de ciência e engenharia do vidro. A química do vidro está em sua infância
1876	Bauch & Lomb Optical Company é fundada em Rochester, Nova York. Tem início a fabricação de lentes e outros componentes ópticos
1881	Primeiros estudos sobre propriedade-composição de vidros para a construção de instrumentos ópticos, tais como o microscópio
1886	Desenvolvida por Ashley a primeira máquina para soprar vidro
1915	A Universidade de Sheffield, na Inglaterra, funda o Departamento de Tecnologia do Vidro, hoje chamado Centro para a Pesquisa do Vidro
1920	Griggith propõe a teoria que permite compreender a resistência dos bulbos de vidro, o que levou ao entendimento e aperfeiçoamento da resistência dos vidros
1926	Wood e Gray desenvolveram uma máquina que permitiu a fabricação de bulbos e invólucros de vidro em grande escala (1000 peças/minuto)

1932	Zachariasen publica seu famoso trabalho sobre a hipótese da rede aleatória e as regras para a formação de vidros no Journal of American Chemical Society
1950-1960	A companhia americana Ford Motor Co. funda o principal centro de pesquisa em vidro. A Ciência do Vidro torna-se sua maior área de pesquisa
1960	Turnbull e Cohen propõem modelo para a formação de vidros, baseado no controle da cristalização através da taxa de resfriamento
1970	A Corning Glass americana produz a primeira fibra óptica de sílica, usando técnicas de deposição de vapor químico para reduzir a atenuação e aumentar o sinal da transmissão
1984	Marcel e Michel Poulain e Jacques Lucas descobrem os primeiros vidros fluoretos em Rennes, na França

**Tabela 5: Principais estudos e desenvolvimentos dos vidros nos últimos 300 anos.**

**Fonte: Vidros – Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.**

### 3.3.2. Definição

Sob a perspectiva da viscosidade dos materiais, um sólido, é um material rígido que não escoar quando submetido a forças moderadas. Quantitativamente, um sólido pode ser definido como um material com viscosidade maior do que  $10^{15}$  P (poises).

Baseado nesse conceito, definiu-se vidro como “um material formado pelo resfriamento do estado líquido normal (ou fundido), o qual exhibe mudanças contínuas em qualquer temperatura, tornando-se mais ou menos rígido através de um progressivo aumento da viscosidade, acompanhado da redução da temperatura do fundido”. Tal definição poderia ser assim resumida: “vidro é um produto inorgânico fundido, que atinge por resfriamento uma condição rígida, sem que ocorra cristalização.” (ALVES et. al. 2001).

No entanto, pode-se formar um número quase ilimitado de vidros inorgânicos, os quais não contêm sílica. Tradicionalmente, a maioria dos vidros são formados por compostos inorgânicos, porém, atualmente, os vidros metálicos e os vidros orgânicos são bastante conhecidos. A natureza do material não pode ser usada como critério para definir vidro.

Em 1932, Zachariasen publicou o famoso artigo The Atomic Arrangement in Glass (O Arranjo Atômico em Vidros) e propôs que “o arranjo atômico em vidros era caracterizado por uma rede tridimensional estendida, a qual apresentava ausência de simetria e

periodicidade” e que “as forças interatômicas eram comparáveis àquelas do cristal correspondente”. Ainda segundo Zachariasen a presença ou ausência de periodicidade e simetria em uma rede tridimensional seria o fator de diferenciação entre um cristal e um vidro.

Na tabela 6 abaixo seguem definições tradicionais de livros-texto publicados na década de 90. Nessas definições identificam-se o uso freqüente das expressões sólido não-cristalino, sólido amorfo, material vítreo (ou simplesmente vidro). Tais expressões são usualmente utilizadas como sinônimas.

Autor	[Ano]	Definição
Elliott	[1990]	“Vidros são materiais amorfos que não possuem ordem translacional a longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfo e sólido não-cristalino são sinônimos nesta definição. Um vidro é um sólido amorfo que exhibe uma transição vítrea.”
Zarzycki	[1991]	“Um vidro é um sólido não-cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea.”
Doremus	[1994]	“Vidro é um sólido amorfo. Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância, isto é, quando não há uma regularidade no arranjo dos constituintes moleculares, em uma escala maior do que algumas vezes o tamanho desses grupos. Não é feita distinção entre as palavras vítreo e amorfo.”
Varshneya	[1994]	“Vidro é um sólido que tem a estrutura do tipo de um líquido, um sólido “não-cristalino” ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica, evidenciada pela técnica de difração de raios-X.”
Shelby	[1997]	“Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formado por qualquer técnica, que exhibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro.”

**Tabela 6: Definições de vidros encontradas em livro-texto publicados na década de 90.**

**Fonte: Vidros – Cadernos Temáticos de Química Nova na**

## **Escola.**

Em 1995, Gupta publicou o artigo denominado Non-Crystalline Solids: Glasses and Amorphous Solids (Sólidos Não-Cristalinos: Vidros e Sólidos Amorfos), no qual mostra que cada uma dessas expressões implica num conceito específico e, portanto, não podem ser tomadas como sinônimas. Sendo assim, um sólido não-cristalino pode ser dividido, do ponto de vista termodinâmico, em duas classes distintas: vidros e sólidos amorfos. Sólidos não-cristalinos seriam todos aqueles materiais que apresentassem uma rede tridimensional estendida e aleatória, isto é, com ausência de simetria e periodicidade translacional. Considerando-se o aspecto termodinâmico, um sólido não-cristalino seria um vidro quando este apresentasse o fenômeno de transição vítrea. Conseqüentemente, sólidos amorfos seriam sólidos não-cristalinos que não exibissem a transição vítrea.

Portanto os vidros e os sólidos amorfos seriam duas classes distintas de materiais não-cristalinos, uma vez que apresentam diferenças tanto do ponto de vista topológico como do termodinâmico.

Então, qual seria a definição do vidro? Segundo Alves et. al. (2001) “um vidro é um sólido não-cristalino, portanto, com ausência de simetria e periodicidade translacional, que exibe o fenômeno de transição vítrea (...), podendo ser obtido a partir de qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico e formado através de qualquer técnica de preparação”.

### **3.3.3. Produção de vidros**

Embora os vidros possam ser produzidos por uma grande variedade de métodos, a maioria continua sendo obtida pela fusão dos seus componentes, em elevadas temperaturas. Este procedimento sempre envolve a seleção de matérias-primas, cálculo das proporções relativas de cada componente, pesagem e mistura dos componentes para obtenção de um material de partida homogêneo (ALVES et. al. 2001).

#### **3.3.3.1. Matérias-Primas**

O processo de extração de matéria-prima é a etapa inicial da produção vidreira. Sua caracterização, especificação e controle de qualidade, são fundamentais para formulação do vidro, para que este seja constituído de propriedades exigidas pelos produtos que se constituirá e também pela composição dos processos que irão conformá-lo.

Toda matéria-prima é rotineiramente analisada química e granulometricamente e só são utilizadas se os resultados estiverem de acordo com as exigências e especificações acordadas entre os fabricante e o consumidor. Na análise dos componentes também avalia-se a presença de contaminantes que sejam infusíveis dentro dos fornos de fusão e que possam vir a constituir inclusões na massa. Nessa perspectiva, a análise laboratorial visa identificar impurezas e contaminantes químicos que descaracterizem a qualidade do produto.

As matérias-primas vitrificáveis (mpv), são representadas em boa parte por sólidos granulados que variam aproximadamente numa faixa granulométrica de tamanho de 0,1 a 2,0 mm. A granulometria é muito importante, pois está diretamente relacionada com os processos de mistura e fusão.

Na mistura, a granulometria das matérias-primas é fundamental para obter uma mistura homogênea que conseqüentemente produzirá um artigo de vidro de qualidade. Componentes com granulometrias muito diferentes dificulta o processo de mistura e conseqüentemente a homogeneização da composição.

Na fusão quanto mais fino os componentes, maior é a sua superfície específica, logo, mais eficiente se torna o processo de fusão que conseqüentemente demanda menos energia e portanto menos custo de produção. No entanto, materiais muito finos espalham-se facilmente no ambiente ocasionando perda de matéria. Idealmente a distribuição granulométrica controlada das matérias-primas é mais eficiente e esta deve estar diretamente relacionada com os processos e características do produto.

Os materiais constituintes de um vidro podem ser divididos em cinco categorias, tomando-se por base a função que desempenham no processo: formador, fundente, agente modificador, agente de cor e agente de refino. Cabe salientar que o mesmo composto pode ser classificado em diferentes categorias quando utilizado para diferentes propósitos. A alumina ( $Al_2O_3$ ), por exemplo, atua como formador em vidros aluminatos, mas é considerada um modificador na maioria dos vidros silicatos (ALVES et. al., 2001).

### **3.3.3.1.1. Classificação**

A classificação a seguir é baseada conforme a função que o componente desempenha na conformação do produto vidreiro.

#### **I) Formador**

Os formadores de vidro são os responsáveis pela formação da rede tridimensional estendida aleatória, ou seja, com ausência de simetria e periodicidade. Os principais formadores comerciais são:  $\text{SiO}_2$  (sílica),  $\text{B}_2\text{O}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ . A grande maioria dos vidros comerciais é baseada em sílica e esse será o formador do presente estudo.

## II) Fundentes

A sílica sozinha produz um vidro de excelente qualidade, porém demanda níveis de temperaturas extremamente altas (2000 °C) que resultam em altos custos de produção. De acordo com Akerman (2000), este problema é contornado adicionando matérias-primas fundentes, que apresentam características de se fundirem a temperaturas muito inferiores à sílica. O fundente em estado líquido, dissolve os grãos de areia, produzindo vidro a temperaturas tecnologicamente compatíveis.

O principal fundente é a barrilha que é um carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) produzido industrialmente a partir da salmoura ou pela purificação de um mineral chamado trona, conhecida também como barrilha natural. A principal característica da barrilha que embora presente em torno de 20% em peso na composição do vidro, seu custo é da ordem de 60% do custo total das matérias-primas. O Brasil não é auto-suficiente em barrilha que é importada da Europa e dos Estados Unidos (AKERMAN, 2000)

## III) Óxidos Estabilizantes

Em temperaturas razoáveis uma mistura de barrilha e areia é capaz de produzir vidro. No entanto são vidros solúveis, ou seja, se dissolvem em contato com a água. Para contornar esse problema, se acrescentam óxidos estabilizantes (modificadores de rede). O principal é óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) fornecido pelo calcário que, por sua vez, é extraído em forma de pedreiras e moída até a granulometria adequada.

Outros estabilizantes também são utilizados em conjunto com o cálcio. Os principais são o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) que provém da matéria-prima chamada dolomita, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou alumina, proveniente do feldspato e também alumina calcinada (bauxita), este último mais caro, no entanto com alta concentração de alumínio.

Curiosamente os nomes da família de vidros mais comum, empregado tanto para vidros planos como embalagens, são os sodo-cálcicos ou sílico-sodo-cálcicos. Recebem esta denominação devido a sílica da areia, o sódio da barrilha e o cálcio do calcário.

#### IV) Agentes de Refino

Durante a fusão as matérias-primas que fazem parte da composição do vidro, geram grandes quantidades de gases (descarbonatação). Esses gases dão origem a uma massa vítrea repleta de bolhas que não conseguem escapar do seu interior devido a viscosidade do vidro.

Para afinar, isto é, retirar as bolhas da massa, se acrescenta à composição pequenas quantidades de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) que possui a propriedade de se liquefazer, mas não de se misturar ao vidro, ficando acumulado em torno das bolhas. Quando se atinge um determinado valor de temperatura o sulfato se decompõe violentamente, gerando gás em grande quantidade que entra nas bolhas (diminuindo a força de arrasto das mesmas) e as fazem crescer para ter força suficiente para subir à superfície, arrastando consigo outras menores que se encontrem no seu caminho (AKERMAN, 2000).

De acordo com Alves et. al., os agentes de refino são utilizados em quantidades muito pequenas (<1%mol). Incluem-se aí os óxidos de antimônio e arsênio,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaF}$  e  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ .

#### V) Agentes de Cor

Na ausência de contaminantes o vidro se apresenta de forma incolor. Para se obter produto vidreiros coloridos, determinados óxidos ou elementos metálicos são acrescentados à composição para que fiquem dissolvidos na massa vítrea. Os colorantes mais comuns são: cobalto (azul), selênio (rosa), manganês (vinho), ferro (verde) vidro plano automóvel e cromo (verde) vidro garrafa de vinho.

Contudo, a cor final obtida depende do estado de oxidação do metal, da sua concentração, da composição do vidro e do tratamento térmico ao qual foi submetido. Alguns dos óxidos normalmente utilizados para dar cor aos vidros são apresentados na Tabela 7.

Agente de coloração	Estado de Oxidação	Coloração
Cobre	$\text{Cu}^{2+}$	Azul claro
Crômio	$\text{Cr}^{3+}$	Verde
	$\text{Cr}^{6+}$	Amarelo
Manganês	$\text{Mn}^{3+}$	Violeta
	$\text{Mn}^{4+}$	Preto
Ferro	$\text{Fe}^{3+}$	Marron-amarelado

	$\text{Fe}^{2+}$	Verde-azulado
Cobalto	$\text{Co}^{2+}$ $\text{Co}^{3+}$	Azul intenso ou rosa Verde
Níquel	$\text{Ni}^{2+}$	Marrom, amarelo, verde, azul a violeta, dependendo da matriz vítrea
Vanádio	$\text{V}^{3+}$	Verde, em vidros silicatos e Marrom, em vidros boratos
Titânio	$\text{Ti}^{3+}$	Violeta
Neodímio	$\text{Nd}^{3+}$	Violeta-avermelhado
Praseodímio	$\text{Pr}^{3+}$	Verde claro
Ouro	$\text{Au}^0$	Rubi (partículas coloidais dispersas na matriz vítrea)
Cádmio	$\text{CdS}$ , $\text{CdSe}$	Laranja

**Tabela 7: Elementos químicos (agentes de coloração) utilizados para dar cor aos vidros.**

**Fonte: Vidros – Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.**

## VI) Caco

Ao longo da fabricação do produto vidreiro, resíduos de massa vítrea são gerados ao longo do processo pelo descarte da produção devido a inconformidades e também pela própria produção em si que promove algumas perdas ao longo dos processos. Devido a capacidade do vidro ser 100% reciclável, esse resíduo vidreiro, comumente chamado de “caco” pode retornar ao forno para ser refundido.

Vidros de outros processos de fabricação podem ser adicionados à composição desde que sua composição química seja compatível com a do vidro em produção. Por exemplo, um vidro incolor pode ser empregado em um forno de vidro colorido bastando na composição ser adicionar os colorantes que faltam.

De acordo com Akerman (2000), o uso de caco como matéria-prima tem vantagens técnicas pois este requer menos energia do que uma composição nova para fusão, uma vez que, ele só necessita ser aquecido não havendo as reações que ocorrem na transformação de composição em vidro, possibilitando aumento de extração e/ou redução de consumo energético. O caco tem também um papel estratégico pois pode ser enformado em substituição às

matérias-primas, quer seja na falta delas ou durante uma pane no sistema de produção da composição.

De acordo com Gainez e Mintz (1994), a estimativa de caco utilizado na produção de recipientes de vidro foi de aproximadamente 30% do total de entradas necessárias para a produção da indústria vidreira norte-americana. A utilização de caco varia de planta para planta e depende do acesso a fornecedores de qualidade, abastecimentos regulares e requisitos de produção.

A reciclagem de vidros poderá contribuir para a matriz energética nacional através da economia de enormes quantidades de energia, visto que para produzir 1 kg de vidro novo são necessários 4500 kilojoules, enquanto que para produzir 1 kg de vidro reciclado necessita-se de 500 kilojoules (ALVES, et. al., 2001).

De acordo com Benny (1996) a produção de caco interno na indústria vidreira americana é estimado em 20%, variando de 10-50%. Isso depende da idade e da eficiência dos fornos e máquinas de conformação, e nível de demanda.

### **3.3.3.2. Composição**

A usina de composição é um conjunto de operações que visam a mistura ideal dos componentes, bem como, atendimento da demanda gerada pelos fornos, ou seja, é um processo intermediário entre os fornecedores de matérias-primas e os fornos de fusão de vidro. De maneira geral sua função é assegurar a junção entre um processo descontínuo (as entregas de matérias-primas) e um processo contínuo (a fusão).

Essa etapa é fundamental para a indústria vidreira, quando bem dirigida, evita a interrupção do abastecimento dos fornos, bem como, deve garantir a chegada de uma mistura cuja qualidade seja compatível com os padrões exigidos pelo vidro produzido. A mistura dos materiais com granulometrias e densidades diferentes representa um ponto crítico a ser analisado e acompanhado no processo.

As matérias-primas estocadas no armazém (em baias, tambores, bigbags e etc.) após receberem análises físico-químicas laboratoriais e observando-se conformidade com as exigências de qualidade, são transportadas para os silos da composição.

Armazenados nos silos da composição os componentes são “ensilados” e encaminhados por gravidade para os dosadores que alimentam as balanças responsáveis pela dosagem de cada matéria-prima de acordo com o cálculo de composição.

Os componentes depois de pesados e verificados quanto a conformidade com o cálculo da composição, são transportados

através de uma esteira de borracha vertical para o elevador SKIP.

No elevador SKIP, a composição é encaminhada para o misturador, que funciona basicamente como uma bateadeira doméstica, com a finalidade de misturar de maneira homogênea todas as matérias-primas e produzir a composição que efetivamente será enfiada para a produção vidreira. Um volume de água é adicionado aos componentes no misturador, que promoverá a agregação de alguns componentes e evitará a perda de material para o ar.

Terminado o processo de mistura, a composição é lançada em caçamba que é transportada por empilhadeira para o silo de caco. No silo de caco, o caco é dosado e pesado de acordo com o cálculo da composição e depois lançado na caçamba para compor a mistura final que está pronta para ser destinada para o silo do forno.

### **3.3.3.2.1. Composição de recipientes de vidro branco**

De acordo com Shelby (2005), a composição mais comum de recipientes de vidro branco é sílica-soda-cal, contendo 73% de sílica, 11% de cal, 14% óxido de sódio e 2% de alumina. Esses vidros também podem conter pequenas quantidades de MgO, K<sub>2</sub>O (modificadores de rede) e SO<sub>3</sub>, utilizados como agentes de refino.

### **3.3.3.3. Fusão**

As etapas de fusão e refino correspondem juntas por 50-68% da energia utilizada na produção de vidro (OTA, 1993).

Conforme Ruth & Dell'anno (1997), é necessário 1,17 toneladas de matérias-primas virgem para cada tonelada de massa vítrea extraída do forno. O excedente que corresponde a 0,17 (15%) toneladas é liberado principalmente como CO<sub>2</sub> durante o processo de fusão através da reação dos componentes.

De acordo com Wooley (1992), existem basicamente três etapas na fusão do vidro. A primeira é a fusão propriamente dita, ou seja, a composição (as matérias-primas misturadas homogêneas) submetida a elevadas temperaturas (acima de 1575 graus Celsius) é convertida em líquido homogêneo. O refino é a etapa subsequente caracterizada pela remoção das bolhas da mistura fundida. O estágio final é o da homogeneização que visa a eliminação das variações térmicas e químicas do vidro fundido.

Na produção de embalagens de vidro, a composição é constantemente "enfiada", ou seja, é enviada para um silo disposto anteriormente ao tanque de fusão que receberá a mistura conforme a necessidade de extração, bem como, o tempo

necessário para a afinagem e homogeneização do vidro fundido. Devido a baixa densidade, a composição flutua sobre o topo do vidro fundido onde é gradualmente derretido. Conforme a composição se desloca ao longo do tanque de fusão, as bolhas criadas através das reações químicas dos elementos gradualmente são eliminadas e/ou dissolvidas. Devido a formação de inúmeras pequenas bolhas, o refino é um processo demorado, que limita a taxa de extração do vidro fundido. As limitações na velocidade do processo afetam a melhoria na eficiência energética.

Após o refino, a massa de vidro é encaminhada para uma câmara de acondicionamento que promoverá a homegeinização do vidro fundido, objetivando a eliminação das variações da composição e temperatura. A homegeinização da massa vítrea pode ser promovida através de processos físicos (correntes de convecção) e de agitação mecânica.

A redução das variações de temperatura ocorre principalmente no feeder, um canal na extremidade do forno que transporta a composição fundida para o processo de conformação. Conforme a massa fundida percorre o feeder, ela perde temperatura, no entanto calor é aplicado para manter a temperatura uniforme e no padrão requerido pela etapa de conformação.

### **3.3.3.3.1. Refino**

A principal função de um forno de fusão é transformar a composição, que é uma mistura de materiais granulados, em um líquido homogêneo e com viscosidade ideal para o transporte e conformação. Quando a composição se funde ocorrem reações entre as partículas de matérias-primas resultando na geração de gases. Cerca de 15% em peso da composição é “perdida” na forma de gases que são emitidos para a atmosfera. Estes gases se desenvolvem em um líquido muito viscoso e portanto tem dificuldade de ascenderem à superfície. Para eliminar os gases retidos no banho de vidro, executa-se o processo de refino que constitui-se na redução do número e tamanho de bolhas até padrões aceitáveis para o produto.

O processo de refino envolve dois aspectos fundamentais. O primeiro aspecto é referente à introdução de agentes de refino (sulfato de sódio) na composição. O segundo aspecto do processo de refino, diz respeito à correta condução do forno de fusão, ou seja, fornecer energia suficiente para que o forno mantenha temperatura ideal, objetivando a diminuição da viscosidade da massa vítrea para que facilite a eliminação das bolhas e a homogeneização química.

### 3.3.3.3.2. Homogeneização

A processo de homogeneização objetiva eliminar as variações da composição e do gradiente de temperatura da massa fundida no interior da cuba de fusão.

O controle correto das correntes que agem no banho, são fundamentais para a homogeneização e a afinagem da massa vítrea, que refletem diretamente na qualidade do produto final. As correntes de vidro são causadas por três fatores:

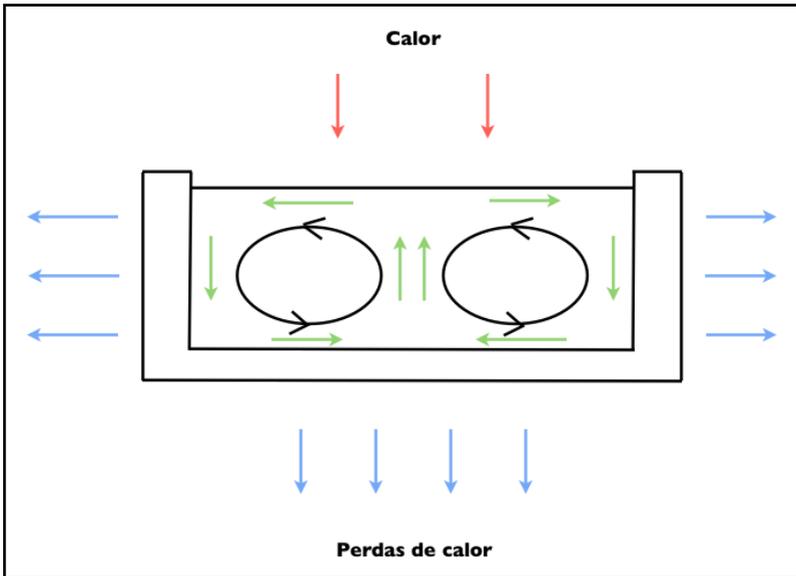
- **Extração:** Como se enforna a composição por uma extremidade e se extrai a massa fundida por outra, esse mecanismo cria correntes que vão da enforna em direção à saída do vidro;
- **Mecânicas:** Em alguns casos, podem ser empregados meios de agitação mecânica da massa vítrea;
- **Convecção:** São correntes geradas através de diferenças térmicas produzidas no interior do forno de fusão.

Para o presente projeto será abordado as correntes de convecção.

#### Correntes de Convecção

Convecção é um processo de transporte de massa caracterizado pelo movimento de um fluido devido à sua diferença de densidade, especialmente por meio de calor. A massa vítrea que está em contato com a cuba perde calor mais rápido do que aquele localizado no centro do forno. O vidro mais frio, possui uma densidade maior do que aquele que possui uma temperatura maior. Logo, a massa vítrea em contato com a cuba tende a afundar, como isto ocorre simetricamente no forno, a massa vítrea da extremidade empurra o vidro da sola para o centro. O vidro do centro tende a subir à superfície. Na superfície ele se aquece com o calor das chamas e caminha para a extremidade da cuba para ocupar o lugar daquele que afunda.

Este é um comportamento dinâmico que gera correntes contínuas de convecção. Estas correntes portanto deslocam-se da região quente para a fria na superfície e o inverso na base do forno.



**Figura 17: Correntes de convecção e trocas de calor em um forno da indústria vidreira.**

### **Gradiente Térmico**

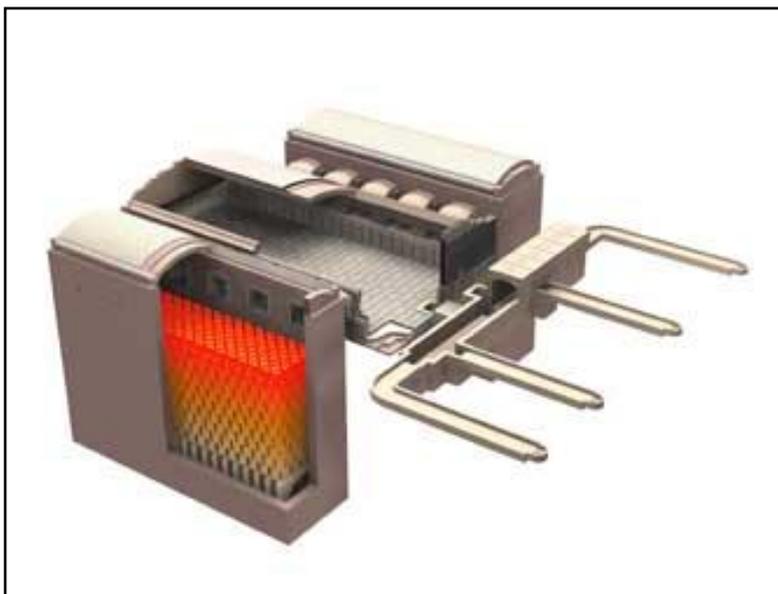
Provocar um gradiente térmico no forno é fundamental para a obtenção de uma massa vítrea de qualidade. Ao manter-se a enforna mais fria que o resto do forno, as correntes de convecção se interpõem às de extração, impedindo que o vidro recém fundido ou em fusão seja arrastado diretamente para a saída. Dessa forma, concede-se mais tempo para que a eliminação das bolhas (afinagem) e homogeneização química ocorram.

O gradiente térmico é ascendente desde a enforna até a garganta. Dessa forma, cria-se uma corrente superficial que impede o avanço da composição, logo evita-se que o vidro recém fundido ou em processo de fusão siga diretamente para a conformação.

A figura 18 caracteriza um forno com garganta. Os fornos com garganta são empregados para todos os tipos de vidro com exceção do vidro float que usa fornos sem garganta. A garganta faz o papel de um sifão que impede a composição recém enforada e/ou mal fundida, seja conformada.

A composição faz o papel de isolante térmico no interior da câmara de fusão, ou seja, é depositada sobre o banho de vidro impedindo a radiação da chama atingir diretamente a massa vítrea. No entanto, as correntes de convecção impedem o avanço da

composição no sentido da garganta (extração). Nessa região a radiação entra em contato direto com o banho aquecendo-o e garantindo a manutenção da temperatura ideal para que a massa vítrea extraída do forno seja homogênea.



**Figura 18: Imagem: forno com garganta e queimadores laterais.**  
**Fonte: [www.teco.com/products/sideport.html](http://www.teco.com/products/sideport.html)**

### **3.3.3.3.3. Fornos**

Usualmente encontram-se fornos para a produção de recipientes de vidro com áreas de 60-180 m<sup>2</sup>, com taxas de extrações 100-500 tons/dia (WOOLEY, 1992). Os fornos de fusão são equipamentos que tem a função de fundir a composição, objetivando a manutenção dos padrões de análise química, homogeneidade e afinagem para a sua conformação e qualidade do produto final.

#### **3.3.3.3.3.1. Enfornadeira**

A enfornadeira é uma mesa localizada abaixo do silo do forno (onde a composição é depositada) que se movimenta horizontalmente. Quando a mesa se movimenta na direção do forno, ela empurra a composição que já estava sobre o banho,

espalhando-a ao longo da sua superfície. As correntes de convecção agem no sentido contrário, ou seja, “empurram” a composição para o lado da mesa da enforadeira. De acordo com Akerman (2000), no mesmo tempo do avanço da mesa enforadeira, a composição deixa o silo e forma um “tapete” sobre a mesma. Quando a mesa retorna, o “tapete” de composição não pode retornar junto e então cai sobre o banho. Na próxima vinda da mesa esta vai empurrar a composição recém depositada no banho para o interior do forno.

A velocidade da mesa enforadeira está diretamente relacionada com a quantidade de material extraído pelas máquinas de conformação, ou seja, se a extração aumenta, o nível do banho diminui, o sensor detecta e informa à enforadeira para trabalhar mais rápido. Logo, se a extração diminui, o banho aumenta de nível, o sensor detecta e a enforadeira trabalha em ritmo mais lento.

#### **3.3.3.3.2. Tipos de fornos**

- **Diários:** compostos de um ou mais cadinhos onde a composição é fundida e de onde a extração é realizado através de ciclos que podem ser diários. Usualmente utilizados em pequenas vidrarias ou na produção de vidros especiais que demandam pequenas quantidades. Por exemplo: vidros óticos e oftálmicos.
- **Contínuos:** funcionam sem interrupção desde a partida até a parada para a manutenção. São empregados em indústrias vidreiras que demandam uma grande quantidade de extração diária.

Para o presente projeto os fornos contínuos serão objeto de estudo.

#### **1) Fornos Contínuos**

Os fornos são classificados de acordo com o sistema de alimentação de energia. Existem fornos que fazem uso conjunto de matrizes energéticas diferentes.

##### **a) Fornos a Combustão**

Os fornos a combustão são constituídos de uma cuba que contém o banho de vidro fundido. Sobre a cuba existe uma entrada onde ocorre a queima do combustível (gás natural ou óleo) e o calor produzido é irradiado ao longo do forno, para aquecer e fundir a composição enforada. Esta região chama-se de cuba de fusão.

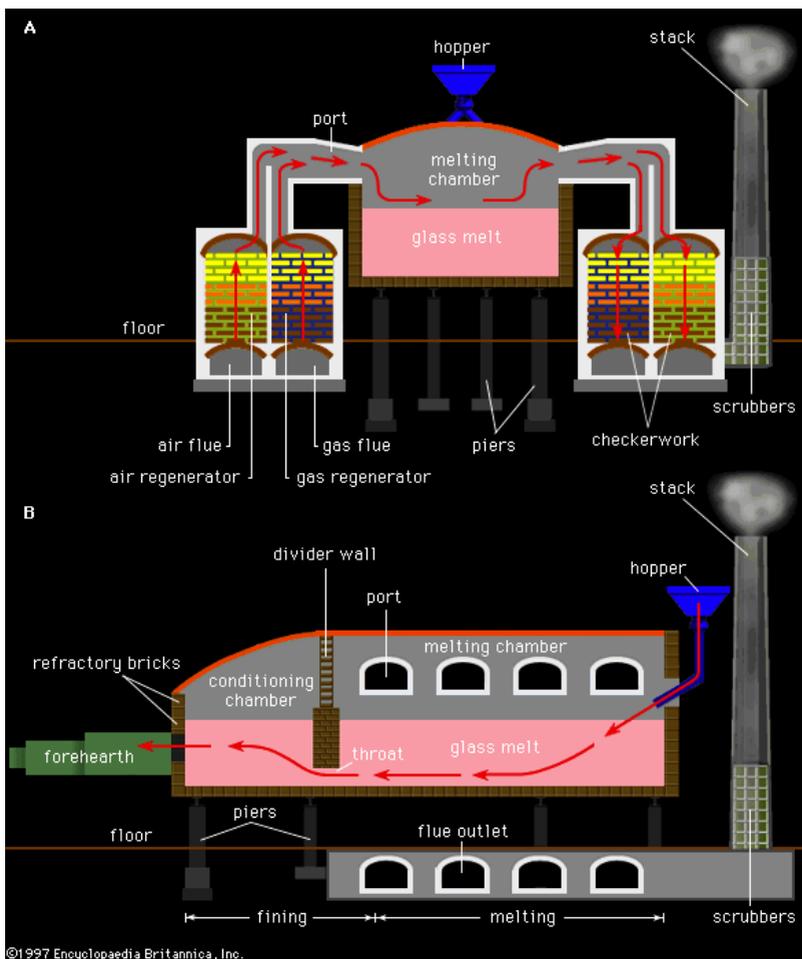
Os fornos a combustão subdividem-se de acordo com o sistema de combustão empregado:

- Regeneradores;
- Recuperadores;
- Óxicombustão.

### **a-1) Regeneradores**

Os regeneradores são câmaras fabricadas com materiais refratários de cerâmica, localizados em cada lado do tanque de fusão onde a troca de calor ocorre. Todo o calor necessário para a fusão da composição é proveniente da queima do combustível no cuba de fusão do forno. O forno constantemente perde calor com a saída de vidro fundido, na entrada de composição nova fria e também pelas paredes do forno.

Conforme a figura 16, a queima é executada pelo lado esquerdo e a eliminação das fumaças está sendo feita pelo lado direito. O ar de combustão que é captado por meio de um ventilador é forçado a passar através da câmara de regeneração, onde há uma empilhagem de material permeável. Esta câmara no ciclo anterior recebeu as fumaças emitidas pelo forno e conseqüentemente encontra-se com a temperatura elevada, devido a retenção de calor por parte do material empilhado. O ar ao passar por ela se aquece e conduz novamente o calor ao forno. Dentro do forno, na cuba de fusão, onde o ar aquecido é lançado, também é injetado o óleo (ou gás) e esta mistura origina a chama que vai se desenvolver e aquecer o banho de vidro. A fumaça resultante da combustão vai passar pela câmara oposta aquecendo-a e portanto perdendo calor antes de ser encaminhada ao sistema de filtro (Ex. precipitador eletrostático) e finalmente à atmosfera.



**Figura 16: corte das câmaras regenerativas e do forno de fusão da indústria vidreira.**

**Fonte: Encyclopaedia Britannica, Inc. 1997.**

Usualmente é estabelecido um tempo de 20 minutos para cada ciclo, ou seja, a queima do combustível e o fluxo de ar de combustão são provenientes de um único lado e é alternado no término do ciclo através da válvula de inversão, alterando o fluxo do ar de combustão para o sentido oposto. Os maçaricos (injetores de óleo e gás) são desligados e acionados imediatamente no lado oposto para compor a mistura.

## a-2) Recuperadores

Desde de 1940, as indústrias de vidro utilizavam fornos que empregavam trocadores de calor, ou recuperadores para recuperar calor. Nesses fornos, a entrada de ar proveniente do meio-ambiente é pré-aquecida indiretamente através de um trocador de calor metálico por onde passa uma corrente contínua de gás de descarga. A temperatura do ar pré-aquecido é limitada em 800°C e o metal utilizado nos recuperadores deve ser cuidadosamente selecionado para resistir ataques químicos.

Os queimadores são dispostos ao longo de cada lado do forno, transversal ao fluxo de vidro, e queimam continuamente a partir de ambos os lados, permitindo assim um melhor controle e estabilidade da temperatura interna do forno.

O forno recuperativo é usado em primeiro lugar para pequena capacidade instalada onde é necessária alta flexibilidade de operação com dispêndio de capital inicial reduzido. Esse tipo de forno é utilizado freqüentemente para a produção de fibra de vidro têxtil.

Embora um forno recuperador seja menos eficiente do que um forno regenerativo, ele recupera uma quantidade substancial de calor através do sistema de recuperador sob a forma de combustão operacional de ar a uma temperatura mais baixa do que para os fornos regenerativos. A capacidade específica de fusão dos fornos recuperadores é limitada. As temperaturas mais baixas do ar de combustão resultam em menores emissões de NOx. Os fabricantes têm melhorado a eficiência energética em fornos de recuperação, particularmente na Europa, através de borbulhamento, apoio elétrico, pré-aquecimento do gás e etc.

### **a-3) Óxicombustão**

Nos fornos a oxicombustão, ao invés de utilizar o ar como comburente, se emprega oxigênio puro. O ar é na realidade uma mistura contendo aproximadamente 21% de oxigênio e 78% de nitrogênio (AKERMAN, 2000). Quando se queima com o ar, quem efetivamente reage com o combustível são os 21% de oxigênio. O nitrogênio é aquecido com a energia gerada na combustão e carrega o calor consigo quando sai do forno de fusão.

Com a utilização do oxigênio puro, reduz em 80% o volume de fumaças geradas devido a ausência do nitrogênio e verifica-se o aumento considerável das temperaturas das chamas. Por produzir menos fumaça os fornos a oxicombustão exigem sistemas de filtragem menos dispendiosos. A fumaça proveniente da combustão geralmente é empregada para produzir vapor utilizado na fábrica.

O oxigênio não sofre pré-aquecimento, logo os fornos a oxicomustão dispensam as câmaras de regeneração. Como não há regeneração de calor não há inversões e portanto a combustão se realiza contínua e simetricamente nos dois lados do forno.

O forno a oxicomustão é um sistema termicamente eficiente e representa uma alternativa com custo-benefício favorável para o setor vidreiro enfrentar as regulações (restrições) das emissões de  $\text{NO}_x$ .

As vantagens da tecnologia a oxicomustão, além do aspecto ambiental são: a melhora na qualidade do vidro, aumento da produção e aprimoramento da operação. As desvantagens incluem a necessidade de modificar e adaptar o forno e os custos maiores de operação comparados com sistemas de combustão ar+gás. No entanto, esse custo adicional pode ser neutralizado com aumento de produção e qualidade do produto.

## **b) Forno elétrico**

O banho de vidro é aquecido através de eletrodos instalados na sola e/ou cuba de fusão do forno de fusão e fazem passar corrente elétrica no seu interior. A composição nova é depositada sobre o banho, cobrindo toda a sua superfície. O calor vindo do fundo do banho pelo eletrodos é transferido para todo o banho que funde a composição depositada na superfície. O vidro fundido, ao contrário do vidro frio é um bom condutor de energia elétrica.

O sensor de nível instalado no forno elétrico é igual ao dos fornos convencionais. Portanto, informa se a enforadeira deve trabalhar em ritmo mais acelerado ou não.

A potência dos eletrodos é regulada pela medida do nível intermediário (nível de altura entre composição e superfície do banho). Se o nível intermediário tende a baixar mais potência é necessário, pois observa-se um volume reduzido de banho e quantidade considerável de composição para ser fundida, que pode acarretar na extração de massa vítrea sem uniformidade e homogeneidade. Caso contrário, se o nível aumenta, menos potência é requerida.

A enforadeira do forno elétrico é uma esteira transportadora convencional, que pode caminhar para frente e para trás, para esquerda e direita. Consequentemente é capaz de distribuir a composição por toda a superfície do banho. A própria mistura isola termicamente o banho. O forno elétrico é também conhecido como forno de abóboda fria.

O forno elétrica não exige a instalação de equipamento para tratamento e filtragem de fumaça provenientes do processo de

fusão.

Fornos elétricos é comumente usado para a produção de cristal, vidro opalino e para produtos com alto valor agregado. Fusão elétrica também é usado em outros setores, incluindo o isolamento de lã e vidros especiais. Em geral, a fusão elétrica produz vidro homogêneo de alta qualidade.

### **c) Forno a oxidação com apoio elétrico**

A massa vítrea presente no forno de fusão é aquecida através da combustão do gás natural misturado com oxigênio puro e também pelo apoio elétrico dos eletrodos instalados na base do forno. De acordo com Wooley (1992), a energia elétrica fornece aproximadamente de 10 a 30% da energia total requerida para a fusão da massa vítrea através dos eletrodos imersos na base do forno. Os benefícios do apoio elétrico incluem o aumento da produção, a redução da utilização de gás e óleo que resulta na diminuição de emissões do local de fabricação (Gaines and Mintz, 1994).

Os processos de fusão e refinamento correspondem por 50 a 68% da energia utilizada na fabricação do artigo de vidro, conseqüentemente tornaram-se o foco dos esforços para a conservação de energia da indústria (OTA, 1993). A utilização de tecnologias como os eletrodos de corrente elétrica, refratários mais eficientes, combustão enriquecida com oxigênio puro e produtos químicos podem reduzir o consumo de energia em cerca de 38 - 63% (Energetics, 1990).

### **Demanda de energia para fusão da composição.**

De acordo com GMIC (2004), em 1970 a demanda média de energia necessária para a fusão de recipientes de vidro na Europa era de 8-9 GJ/tonelada de recipiente de vidro fundido.

#### **3.3.3.3.4. Feeder**

São canais de transporte de massa vítrea fundida em temperaturas plásticas (1050 °C - 1200 °C) que alimentam as máquinas do processo de conformação. Ao longo do canal a massa vítrea é mantida aquecida através de maçaricos para a manutenção da temperatura e conseqüentemente da viscosidade.

De acordo com Ruth e Dell'Anno (1997), o processo de conformação inicia-se com a formação das gotas de vidro que são cortadas por máquinas ligadas na extremidade final do feeder. O

feeder alimenta as máquinas com a massa vítrea fundida proveniente dos fornos de fusão.

### **3.3.3.4. Fabricação**

Usualmente a fabricação significa as operações executadas para conformar a massa vítrea no artigo desejado. Dependendo do produto, os métodos de conformação são bem distintos.

A fabricação também compreende o tratamento térmico e superficial a que o produto deve ser submetido antes de passar às etapas de controle de qualidade, embalagem, e/ou transformação.

De acordo com OTA (1993), a etapa de conformação é responsável por 12-33% da demanda de energia requerida para a produção de recipientes de vidro. Enquanto que o pós-conformação é responsável por 11-18%.

#### **3.3.3.4.1. Conformação**

Após a fase de fusão, os diversos artigos de vidro são moldados nas formas desejadas, com a utilização de tecnologias que são significativamente diferentes para cada produto de vidro. Existe atualmente dois métodos principais de fabricação de um recipiente de vidro. O método sopro-sopro (“blow and blow”) e o método prensa-sopro (“press and blow”). Em ambos os casos uma corrente de vidro fundido na temperatura plástica (1050 ° C - 1200 ° C) é cortada por uma lâmina de corte para formar as gotas de vidro. Essas gotas serão conformadas pelas máquinas para a obtenção do produto final.

#### **Método “sopro-sopro” (“*blow and blow*”)**

As gotas caem por gravidade através de uma calha para dentro de moldes onde recebem o primeiro sopro forçando-as para o fundo do molde em branco (duas metades unidas através de solda, selados por um defletor na superfície interna - de contato com a gota). Esse sopro inicial forma a parte superior do recipiente. Outro sopro é aplicado no centro da gota para formar o interior do recipiente. Essas gotas conformadas parcialmente, são direcionadas para os moldes finais onde serão re-aquecidas e receberão o sopro final para a conformação do recipiente.

#### **Método “prensa-sopro” (“*press and blow*”)**

Para a produção de recipientes com bocas maiores e com pesos mais leves o método de fabricação “prensa-sopro” é comumente utilizado. A gota lançada no molde em branco (“fêmea”) é prensada primeiramente através de um êmbulo (“macho”), depois encaminhada para outro molde que promoverá o sopro para a conformação final do produto.

#### **3.3.3.4.2. Recozimento e Têmpera**

##### **Recozimento**

Ao término da fase de conformação, o vidro sofre um resfriamento lento na forno de recozimento. Durante a conformação surgem tensões sobre o artigo de vidro e essas tensões são aliviadas com o processo de recozimento.

##### **Têmpera**

A tempera tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura que proporcione propriedades de dureza e resistência mecânica elevadas. A peça a ser temperada é aquecida à altas temperatura e em seguida é submetida a um resfriamento brusco, ocorrendo aumento de dureza. Durante o resfriamento, a queda de temperatura promove transformações estruturais que acarretam o surgimento de tensões residuais internas que promovem o aumento da resistência ao choque.

O artigo é submetido a um tratamento de superfície que modifica sua microestrutura com a indução de tensões térmicas de características de compressão.

#### **3.3.3.5. Qualidade / Embalagem / Paletização**

Os artigos de vidro são inspecionados tanto por pessoas treinadas para a função, como por máquinas controladas por computadores que, por meio de um sistema óptico de varredura a laser, identifica defeitos nos produtos. Caso haja defeito decorrente da produção, o artigo é refugado e posteriormente reciclado.

Os recipientes de vidro são embalados automaticamente e/ou manualmente e sofrem posterior paletização.

A paletização é realizada tanto automaticamente como manualmente. As embalagens são empilhadas em paletes e envoltas com plástico, ficando prontas para armazenamento e transporte.

### **3.3.3.6. Logística / Expedição**

A expedição e a logística é um processo que possui uma visão organizacional holística, onde esta planeja o armazenamento, o transporte e a distribuição dos produtos, monitorando as operações e gerenciando informações.

#### 4. METODOLOGIA

Este projeto enquadra-se no âmbito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II) da Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), orientado pelo Professor Me. Guilherme Farias Cunha (UFSC) e co-orientado pelo Professor Dr. Gil Anderi da Silva (Poli-USP).

Primeiramente formou-se um banco de dados da literatura existente relacionada à Avaliação de Ciclo de Vida, a Indústria Vidreira e os seus principais processos. Esta relação de literatura forneceu informações técnicas para o estudo, que quando necessários, estavam disponíveis com economia de tempo.

Em paralelo à pesquisa documental, elaboraram-se as primeiras definições do estudo, juntamente com os colaboradores da empresa e com base nas normas existentes ISO 14040 e ISO 14044, ambas de 2009. A primeira delas trata dos Princípios e Estrutura de um estudo de ACV, enquanto que a segunda especifica Requisitos e Orientações. Essas definições iniciais são relativas aos objetivos e escopo do estudo.

Com base nas definições de objetivo e escopo, procedeu-se então a etapa de coleta de dados, também seguindo as considerações normativas. Para melhor entendimento, elaborou-se o fluxograma do sistema de produto que abrange as etapas de “berço ao portão”, contemplando, além dos processos elementares, as entradas e as saídas de cada sistema. Essa etapa foi importante pois foi a partir do fluxograma construído que elaborou-se a estratégia de coleta de dados.

Os dados foram provenientes da literatura. Outra fonte de dados foi a base de dados Ecoinvent, do próprio software SimaPro, que disponibiliza informações de estudos de ACV por todo o mundo. O conjunto de dados coletados, relacionados a um sistema, em um estudo de ACV é o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e apresentou-se na forma de uma grande tabela construída no Microsoft Excel.

A fase seguinte foi a interpretação do ICV, ou seja, analisar os resultados alcançados e os critérios adotados durante a realização do ICV. Nesta etapa (interpretação de resultados) foram formuladas as conclusões consistentes com o objetivo e escopo do trabalho. E finalmente a comunicação dos resultados para o público-alvo pretendente.

## **4.1. Objetivo e Escopo do Estudo**

### **4.1.1. Objetivo do Estudo**

Objetivo do estudo é elaborar o Inventário da Indústria de embalagens de vidro branco no Brasil, afim de, fundamentar/suportar futuros projetos de Avaliação de Ciclo de Vida com vistas na oportunidade de melhoria de desempenho ambiental e desenvolvimento de produtos sob o ponto de vista sustentável.

O público-alvo é composto por acadêmicos e interessados na técnica da ACV e aos colaboradores da indústria vidreira.

A aplicabilidade principal do estudo possui caráter estratégico e estabelece o conhecimento e uma base de dados das práticas atuais do sistema de produção de embalagens de vidro branco. Essa base de informações consiste nas demandas de energia e de recursos e das cargas ambientais do sistema de produção analisado. Essas informações darão suporte para futuros projetos de avaliação de desempenho ambiental da indústria vidreira no Brasil.

Não existe a intenção de utilizar os resultados deste trabalho em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente. Os resultados deste estudo destinam-se a uma avaliação acadêmica, como requisito para a graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina.

### **4.1.2. Escopo do Estudo**

#### **4.1.2.1. O sistema de produto a ser estudado e as fronteiras do sistema.**

Fazem parte do ciclo de vida de embalagens de vidro quatro estágios: aquisição de matéria-prima; produção; uso e gestão de resíduos. Para o presente projeto, o âmbito do estudo ficará restrita à análise de “berço ao portão”, ou seja, aquisição de matérias-primas e produção.

**Aquisição de Matéria Prima:** o ciclo de vida de embalagens de vidro branca de vidro começa com a remoção de matérias-primas e fontes de energia a partir da terra.

**Produção:** durante a fase de produção, matérias-primas são transformadas em embalagens de vidro (garrafas, potes e etc.). A fase de produção consiste basicamente em 5 etapas: Composição, Fusão, Fabricação do produto, controle de qualidade/embalagem e logística/expedição.

#### **4.1.2.2. A(s) função(ões) do sistema de produto.**

Produzir embalagens de vidro branco para uso comercial e doméstico.

#### **4.1.2.3. Unidade Funcional (u.f.).**

A unidade funcional é representada pela produção líquida de 180 toneladas de embalagens de vidro branco.

#### **4.1.2.4. Metodologia de AICV e tipos de impactos.**

Não é objetivo do presente projeto realizar a fase de análise de impactos do ciclo de vida. Mas interpretar o inventário e reunir dados e informações consistentes para suportar futuros projetos de ACV de embalagens de vidro branco no Brasil.

#### **4.1.2.5. Requisitos dos dados.**

Os dados fundamentais do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) identificados com base em pesquisa bibliográfica, foram entradas que incluem o uso de recursos minerais, naturais, serviços como transporte ou suprimento de energia e o uso de materiais auxiliares como por exemplo: paletes de madeira.

As emissões atmosféricas que abrangem entre outras, as emissões de dióxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, também foram identificadas separadamente.

#### **4.1.2.6. Requisitos de qualidade dos dados;**

Devido a dificuldade de obtenção e sigilo dos dados junto às empresas nacionais fabricantes de artigos de vidro, foi necessária uma extensa e permanente pesquisa bibliográfica que permitisse a atualização e o preenchimento dos dados necessários para a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida do projeto.

Não é intenção deste projeto implantar a ISO 14040 na indústria de artigos de vidro, mas apenas estreitar o presente projeto à metodologia e requisitos internacionalmente aceitos.

Dados relativos aos processos do presente estudo foram obtidos através de base de dados comerciais e, portanto, são considerados secundários pois representam uma média das tecnologias dos respectivos processos. No entanto, foi realizado uma análise criteriosa dos dados com o intuito de estreitá-los à realidade da Indústria Vidreira no Brasil.

Para tanto a base de dados do software SimaPro 7, que

disponibiliza informações de estudos de ACV por todo o mundo foi utilizada. As informações relativas aos consumos e emissões dos processos foram obtidos através da base de dados Ecoinvent e pesquisa em materiais científicos. O conjunto de dados coletados relacionados ao sistema de produto estudado, é o Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

## **4.2. Inventário do Ciclo de Vida**

### **4.2.1. Fluxograma**

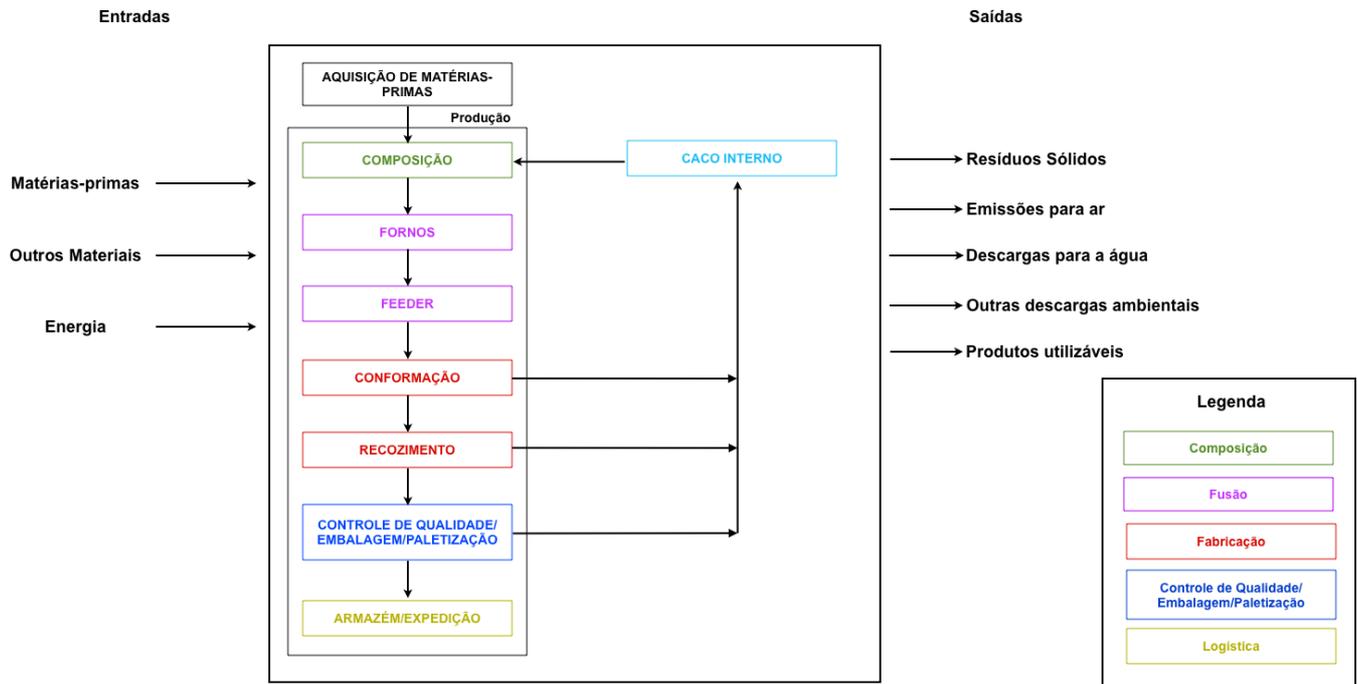


Figura 17: fluxograma do sistema de produto da indústria vidreira de embalagem de vidro branca.

## 4.2.2. Coleta de Dados e Procedimentos de Cálculo

### 4.2.2.1. Composição Percentual da Massa Vitrificada

Baseado em Shelby (2005), a composição mais comum de recipientes de vidro branco é sílica-soda-cal, contendo 73% de sílica, 11% de cal, 14% óxido de sódio e 2% de alumina.

Para o presente projeto foi considerado o percentual de geração de 10% em massa de caco de vidro interno e o consumo de 40 toneladas de caco para a produção de 200 toneladas líquidas, extraídas diariamente dos fornos de fusão da indústria vidreira.

De acordo com as considerações acima, seguem abaixo os cálculos das quantidades em peso das matérias-primas e caco para atender a composição desejada.

#### 4.2.2.1.1. Caco

Estabeleceu-se 180 toneladas de produção líquida de embalagens de vidro como unidade funcional do projeto. Para tanto 200 toneladas de massa vítrea incandescente são extraídas dos fornos de fusão e portanto considerou-se 90% de eficiência dos processos de produção. Dessas 200 toneladas, 20% (em peso) é a representatividade do caco, ou seja, 40 toneladas de caco/dia.

#### Pressuposto.

Considerou-se nenhuma perda de massa na fusão de caco e o caco possui a mesma composição química da composição estabelecida para a embalagem produzida. Portanto para 200 toneladas de extração líquida, 40 toneladas são provenientes do forno de caco. Então, 160 toneladas de extração líquidas diariamente referem-se ao forno de matérias-primas virgem.

#### 4.2.2.1.2. Matérias-Primas

##### 4.2.2.1.2.1. Decomposição Química das Matérias-Primas ao Fogo

###### I) Areia Industrial

$\text{SiO}_2$  – A sílica é um caso particular porque não ocorre a perda de massa, ocorre apenas sua fusão a altas temperaturas. Tem-se, portanto:  $\text{SiO}_{2(s)} \rightarrow \text{SiO}_{2(l)}$

Logo, 73% de 160 toneladas = 116,8 toneladas de areia industrial.

## II) Barrilha

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  – A decomposição do carbonato de sódio por reação endotérmica é a seguinte:  $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)} \rightarrow \text{Na}_2\text{O}_{(l)} + \text{CO}_{2(g)}$

De acordo com a composição estabelecida, necessita-se de de 14% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , ou seja, 22,4 toneladas. Então:



$$106u \rightarrow 62u + 44u$$

$$x \rightarrow 22,4t + y$$

$$x = (106 \cdot 22,4) / 62 = 38,3 \text{ toneladas de } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (barrilha)}$$

$$y = (44 \cdot 22,4) / 62 = 15,9 \text{ toneladas de } \text{CO}_{2(g)}$$

## III) Calcário

$\text{CaCO}_{3(s)}$  - A decomposição do carbonato de cálcio por reação endotérmica é a seguinte:  $\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{(l)} + \text{CO}_{2(g)}$

De acordo com a composição estabelecida, necessita-se de de 11% de  $\text{CaO}$ , ou seja, 17,6 toneladas. Então:



$$100u \rightarrow 56u + 44u$$

$$x \rightarrow 17,6t + y$$

$$x = (100 \cdot 17,6) / 56 = 31,4 \text{ toneladas de } \text{CaCO}_3 \text{ (calcário)}$$

$$y = (44 \cdot 17,6) / 56 = 13,8 \text{ toneladas de } \text{CO}_{2(g)}$$

## IV) Alumina Calcificada

$\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$  - A alumina calcificada possui comportamento análogo a sílica. Tem-se, portanto:  $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_{3(l)}$

Logo, 2% de 160 toneladas = 3,2 toneladas de alumina calcificada.

De acordo com os cálculos estequiométricos, o peso total de matérias-primas enforadas para a extração líquida de 200t/dia dos fornos foi de: 189,7 toneladas/dia.

Segue abaixo a tabela 8 identificando a quantidade total (em peso) das matérias-primas e caco para a extração líquida de 200t/dia, para a composição vitrificada contendo 73% de sílica, 11% de cal, 14% óxido de sódio e 2% de alumina.

<b>Composição</b>	<b>Principal Componente</b>	<b>Peso (toneladas)</b>
Areia Industrial	Sílica (SiO <sub>2</sub> )	116,8
Barrilha	Carbonato de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	38,3
Calcário	Óxido de Cálcio (CaO)	31,4
Alumina Calcinaada	Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,2
<b>SubTotal</b>		<b>189,7</b>
Caco	SiO <sub>2</sub> .Na <sub>2</sub> O.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40
<b>Total</b>		<b>229,7</b>

**Tabela 8: Composição em peso de matérias-primas virgem e caco da produção de embalagens de vidro branco.**

#### **4.2.2.1.2.2. Perda ao Fogo**

Como observado acima, no processo de fusão, acontecem reações químicas que causam perdas de matérias-primas, também conhecida como perda ao fogo.

Observou-se que das 38,3 toneladas de barrilha enforada, 22,4 toneladas transformaram-se em Na<sub>2</sub>O e o restante (15,90 toneladas) foi emitido como CO<sub>2</sub>.

Para o calcário, foram enforados 31,4 toneladas, das quais 17,6 toneladas correspondem a CaO, e 13,8 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos para a atmosfera.

Então a perda ao fogo total observada foi de 29,7 toneladas que correspondem à emissão de CO<sub>2</sub> de origem não-fóssil.

Portanto do total de 189,7 toneladas de matérias-primas virgem dispostas no forno de fusão diariamente, 160 toneladas correspondem a massa vítrea extraída diariamente dos fornos e a

diferença de 29,7 toneladas, correspondem a emissão de CO<sub>2</sub>, que representam 15,7% de perda ao fogo. Para completar as 200 toneladas de massa vítrea extraídas diariamente, enforam-se 40 toneladas de caco.

#### **4.2.2.2. Energia**

Baseado em GMIC (2004), a energia termodinâmica necessária para a fusão do vidro é de 8 GJ/tonelada de vidro fundido. De acordo com Wooley (1992), a energia elétrica fornece aproximadamente de 10 a 30% da energia total requerida para a fusão da massa vítrea através dos eletrodos imersos na base do forno. Para o presente projeto foi considerado 20% de apoio elétrico e o restante da energia requerida (80%) é proveniente da queima do gás natural misturado com ar.

Temos que: 8 GJ são necessários para a fusão de 1 tonelada de matérias-primas virgem. Portanto para a fusão de 200 toneladas/dia de composição serão necessários 1.600,00 GJ/dia.

#### **Ganho Energético**

Na prática, observa-se que a utilização de 10% de caco na composição promove uma economia de 10% na demanda de energia. Seguindo o mesmo raciocínio 20% de caco gera uma economia de 20% na demanda de energia requerida para a fusão da composição. Nessa perspectiva, a energia necessária para a extração de 200 toneladas líquidas de vidro é de 1.600,00 GJ/dia, com a redução de 20% demandam-se portanto, 1280,00 GJ/dia.

#### **I) Demanda de Energia Elétrica**

Considerou-se 20% de apoio elétrico, logo os eletrodos deverão fornecer 256,00 GJ/dia.

1 kwh é equivalente a  $3,60 \times 10^6$  joules, portanto  $320,00 \times 10^9$  joules/dia equivalem a aproximadamente  $71,11 \times 10^3$  kwh/dia.

#### **II) Demanda de Gás Natural**

A demanda de gás natural deve atender 80% da energia total requerida pelo forno para a extração de 200 toneladas de matérias-primas/dia. Se são necessários 1.280,00 GJ/dia, 80 % corresponde a 1.024,00 GJ/dia.

Tem-se que: 1 kwh é equivalente a  $3,60 \times 10^6$  joules e 1 m<sup>3</sup> de gás natural equivale a 0,0109 Mwh. Portanto 1.024,00 GJ/dia equivalem a  $284,44 \times 10^3$  kwh/dia. Então consomem-se 26.095,82

m<sup>3</sup>/dia.

De acordo com documento oficial da Comgás, o Poder Calorífico Superior (PCS) do gás natural, ou seja, a quantidade de calor produzida durante a combustão completa de uma unidade de volume combustível, deve ser assumido o valor de 9.430 kcal/m<sup>3</sup> a 20°C e 1 atm. Portanto são necessárias 246.083,59 Mcal/dia.

#### 4.2.2.3. Emissões para a atmosfera

##### I) CO<sub>2</sub>

De acordo com a Comgás, segue abaixo a composição típica do Gás Natural.

<b>Composição típica do Gás Natural (fonte Comgás)</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Percentual%</b>
Metano	89.
Etano	6.
Propano	1,80.
C4+	1,00.
CO <sub>2</sub>	1,50.
N <sub>2</sub>	0,70.

**Tabela 9: composição típica do gás natural.**

**Fonte: Comgás**

##### Pressuposto.

<b>Composição do Gás Natural</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Percentual%</b>
Metano	90,00
Etano	8,00
Propano	2,00

**Tabela 10: composição do gás natural considerada no presente estudo.**

## Cálculos Estequiométricos

Foi considerada a combustão completa do gás natural.

### EQUAÇÃO GLOBAL DO GÁS NATURAL

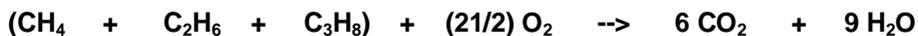


Tabela 11: equação global do gás natural.

### Combustão do Metano

$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$		
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$
Mol	1	1
Volume do componente ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	23.486,24	23.486,24

Tabela 12: Tabela de combustão do gás metano.

### Combustão do Etano

$\text{C}_2\text{H}_6 + (7/2) \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$		
	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{CO}_2$
Mol	1	2
Volume do componente ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	2.087,67	4.175,33

Tabela 13: Tabela de combustão do gás etano.

## Combustão do Propano

$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$		
	$C_3H_8$	$CO_2$
Mol	1	3
Volume do componente (m <sup>3</sup> /dia)	521,92	1.565,75

Tabela 14: Tabela de combustão do gás propano.

Volume de Gás Natural Total do Projeto (m <sup>3</sup> /dia)	Volume de CH <sub>4</sub> Total do projeto (m <sup>3</sup> /dia)	Volume de C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> Total do projeto (m <sup>3</sup> /dia)	Volume de C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> Total do projeto (m <sup>3</sup> /dia)	Volume Total de CO <sub>2</sub> Emitido (m <sup>3</sup> /dia)	Quantidade Total de CO <sub>2</sub> Emitido (kg/dia)	
26.095,82	23.486,24	2.087,67	521,92	29.227,32	57.870,09	
					Densidade do CO <sub>2</sub>	Kg/m <sup>3</sup> 1,98

Tabela 15: volume dos componentes do gás natural e volume total da emissão de CO<sub>2</sub>.

A vazão de gás natural é de 26.095,82 m<sup>3</sup>/dia, sua combustão gera a emissão de 57.870,09 kg CO<sub>2</sub>/dia.

Como a perda ao fogo foi de 29,70 t/dia, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelo processo de fusão das matérias-primas será de 29,70 ton. de CO<sub>2</sub> /dia de origem não fóssil.

Portanto, a geração total de CO<sub>2</sub> será a soma da parcela gerada pela combustão do gás natural com a parcela gerada pelas reações químicas que ocorrem durante o processo de fusão das matérias-primas.

A quantidade total de CO<sub>2</sub> de origem fóssil é de 57,87 ton. CO<sub>2</sub>/dia.

A quantidade total de CO<sub>2</sub> de origem não-fóssil é de 29,70 ton. CO<sub>2</sub>/dia.

Totalizando portanto a emissão de 87,57 toneladas CO<sub>2</sub>/dia.

## II) Determinação da vazão da chaminé

	A	B	C	D	E
Componente	Equivalentes de oxigênio	Equivalentes de gás combustão (CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O)	Composição (%)	Oxigênio necessário $(\frac{Ax C}{100})$	Gás de exaustão $(\frac{Bx C}{100})$
CH <sub>4</sub>	2	3	90	1,8	2,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,5	5	8	0,28	0,4
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5	7	2	0,1	0,14
		Total	100	2,18	3,24

**Tabela 16: cálculos estequiométricos para determinação da vazão da chaminé.**

Os gases de exaustão devem considerar os produtos da combustão ( CO<sub>2</sub> e a água) mais o nitrogênio que é admitido no ambiente com o ar de combustão. Assim o cálculo dos gases de exaustão é dado por:

$$\text{Vol. Gases} = 3,24 + (79/21)2,18 = 11,44*(26.095,82 \text{ m}^3) =$$

$$\text{Vol. Gases} = 298.536,18 \text{ m}^3$$

## III) SO<sub>2</sub> ; NO<sub>x</sub> e Material Particulado

Baseado na tabela abaixo foram estimados a quantidade de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e material particulado provenientes da combustão de gás natural.

Pollutant	Natural Gas	Oil	Coal
Carbon Dioxide	117,000	164,000	208,000
Carbon Monoxide	40	33	208
Nitrogen Oxides	92	448	457
Sulfur Dioxide	1	1,122	2,591
Particulates	7	84	2,744
Mercury	0.000	0.007	0.016

**Tabela 17: componentes emitidos na combustão de gás natural.  
Fonte: EIA - Natural Gas Issues and Trends 1998.**

### III-a) SO<sub>2</sub>

Tem-se que 1 pound equivale a 0,453 kg e 1 Joule equivale a 0,00094781712 BTU. O gás natural precisa fornecer 1.024,00 GJ/dia ou 970,56 milhões de BTU para a extração líquida de 200 toneladas de vidro. De acordo com a tabela é emitido 1pound/bilhão de BTU que equivale a  $0,453 \times 10^{-3} \text{kg}/10^6 \text{BTU}$ . Portanto serão emitidos 0,44 Kg de SO<sub>2</sub> por dia.

### III-b) NO<sub>x</sub>

A utilização de gás natural emite  $41,67 \times 10^{-3}$  kg de NO<sub>x</sub>/1 milhão de BTU. Portanto, 970,56 milhões de BTU, emitem: 40,45 kg de NO<sub>x</sub>.

### III-c) Materiais particulados

Para 1 bilhão de BTU emitem-se 3,17 kg de material particulado. Para 970,56 milhões de BTU são emitidos 3,08 Kg de material particulado.

## 4.2.2.4. Outros Materiais

### a) Plástico

O plástico é um material muito utilizado na indústria vidreira, sobretudo nos processos de embalagem/paletização e armazenamento de produtos acabados. Em pesquisa bibliográfica, não foi identificado nenhum estudo de ACV de indústria vidreira no Brasil que fornecesse uma estimativa da quantidade/característica de plástico utilizado. Abaixo segue uma estimativa, baseada em um estudo de ACV da indústria vidreira de embalagens brancas provenientes da Alemanha encontrado em pesquisa na base de dados Ecoinvent, caracterizado como: packaging glass, White, at plant, DE. (Verparckungsglas, Weiss, ab Werk). O sistema de produto desse estudo é equivalente ao sistema de produto adotado por este trabalho e praticado pelas indústria vidreiras de embalagens branca do território nacional.

Baseado no estudo tem-se que 0,0117 Kg de plástico/Kg de vidro branco acabado. De acordo com a unidade funcional desse projeto - 180 t/dia de embalagens de vidro acabado, utilizam-se 2.106,00 Kg de plástico/dia.

O plástico polietileno de alta densidade é um termoplástico derivado do petróleo e tem como característica a alta resistência.

#### **b) Papelão**

O valor abaixo foi obtida através de um estudo de ACV em indústrias de vidro de embalagem branca, no qual considerara processos equivalentes a este projeto. (packaging glass, White, at plant, DE. (Verparckungsglas, Weiss, ab Werk).

Tem-se 0,0176 Kg de papelão/Kg de vidro acabado. De acordo com a unidade funcional desse estudo são utilizados cerca 3.168,00 kg de papelão/dia; para 180 toneladas de embalagens de vidro branco acabado por dia.

#### **c) Paletes de Madeira**

Os paletes de madeira tem a função de otimizar o transporte de cargas, que é conseguido através da empilhadeira e a paleteira. As embalagens de vidro são dispostas sobre os paletes de madeira e sofrem posterior transporte/armazenamento.

A estimativa da quantidade de paletes utilizados de acordo com a unidade de funcional desse estudo, partiu de projeto de ICV equivalentes a este. De acordo com packaging glass, White, at plant, DE. (Verparckungsglas, Weiss, ab Werk) da base de dados Ecoinvent, utiliza-se 0.000716 unidade de palete/Kg de embalagem produzida. Devido a fabricação de 180 toneladas de embalagens dia, utilizam-se: 130 paletes de madeira por dia.

#### **4.2.2.5. Água**

De acordo com packaging glass, White, at plant, DE. (Verparckungsglas, Weiss, ab Werk) da base de dados Ecoinvent, utiliza-se 0.000212 m<sup>3</sup>/Kg de vidro de embalagem branca produzido. Portanto para o presente estudo demandam-se 38,16m<sup>3</sup> de água/dia ou 38.160 litros de água/dia.

#### **4.2.3. Tabela de Dados do Inventário do Ciclo de Vida**

<b>TABELA DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DA INDÚSTRIA VIDREIRA</b>				
<b>1. DADOS DA PRODUÇÃO</b>			<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
1.1 Total da matéria-prima			189,70	ton/dia
1.2 Produção bruta diária			229,70	ton/dia
1.3 Produção líquida diária			200,00	ton/dia
1.4 Caco refugado na produção			20,00	ton/dia
1.5 Unidade funcional do processo			200,00	ton/dia
<b>2. DADOS PARA O CÁLCULO DAS MASSAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS QUE COMPÕEM A MISTURA</b>				
<b>2.1. Composição percentual, em massa, dos óxidos que compõem os artigos de vidro</b>				
<b>Óxidos</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
%	73	14	11	2
<b>2.2. Quantidade total de matérias-primas utilizadas</b>				
<b>Matéria-Prima</b>	<b>Principal Componente</b>		<b>Quantidade (ton/dia)</b>	
Areia Industrial	SiO <sub>2</sub>		116,80	
Barrilha	Na <sub>2</sub> O		38,30	
Calcário	CaO		31,40	
Alumina Calcinada	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,20	
"CACO"	SiO <sub>2</sub> .Na <sub>2</sub> O.CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		40,00	
	<b>TOTAL</b>		<b>229,70</b>	
<b>3. ENERGIA</b>				
<b>Tipo de Energia</b>	<b>GJ/dia</b>	<b>m<sup>3</sup>/dia</b>	<b>Mwh/dia</b>	
Energia Elétrica	256,00	-	71,11	
Gás Natural	1.280,00	26.095,82	-	
<b>4. EMISSÕES PARA A ATMOSFERA</b>				
	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>		
<b>CO<sub>2</sub></b>	57.870,09	kg/dia		
<b>SO<sub>2</sub></b>	0,44	kg/dia		
<b>NO<sub>x</sub></b>	40,45	kg/dia		
<b>Material Particulado</b>	3,08	kg/dia		
<b>5. OUTROS MATERIAIS UTILIZADOS</b>				
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>		
Plástico	2.106,00	kg/dia		
Papelão	3.168,00	kg/dia		
Paletes Madeira	130	unidades/dia		
<b>6. CONSUMO DE ÁGUA</b>				
Consumo de água na produção		38.160	litros/dia	

Tabela 18: tabela de dados do inventário do ciclo de vida da indústria de embalagem de vidro branco.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Caco

Um dos resultados mais interessantes são os aspectos positivos que o uso do caco pode proporcionar em termos de consumo de energia e matérias-primas. Mesmo que sob pequenas taxas de utilização de caco na produção, este pode promover economias significativas na utilização de energia para a fusão, bem como a redução das matérias-primas para a produção.

O caco possui ponto de fusão menor que as composições das matérias-primas virgem, sendo necessária uma quantidade menor de calor para seu derretimento, que promove a redução do consumo energético e conseqüentemente a redução nos custos da produção.

Objetivando tornar a indústria vidreira cada vez mais sustentável, a promoção da reciclagem é apenas parte de uma estratégia que deve em longo prazo o desenvolvimento agressivo e implementação de tecnologias de energia altamente eficientes.

Com o aumento das pressões da sociedade para produtos e processos ecologicamente corretos, a reciclagem ganha força e a logística reversa é um dos principais motores deste movimento. Além de contribuir legitimamente para a redução dos impactos ao meio ambiente há um ganho de imagem para a empresa que o faz.

De acordo com os dados do projeto, seriam necessários a demanda de energia de 1600 GJ para a extração líquida de 200 toneladas de massa vítrea dos fornos de fusão. Com a utilização de 20% de caco na composição, a demanda do forno diminuiu para 1280 GJ. Se considerarmos que a utilização de caco possibilitou a diminuição na demanda de gás natural, portanto, 320 GJ representam uma economia de volume de gás natural de: 8.155,05 m<sup>3</sup> para a extração de 200 toneladas líquidas de massa vítrea do forno por dia.

Portanto, a reciclagem de embalagens de vidro promove a eficiência da produção e significativos benefícios ambientais: diminui a quantidade de matérias-primas utilizadas, diminui a demanda por energia, reduz as emissões de CO<sub>2</sub>, prolonga a vida útil do forno e reduz os custos globais de fabricação.

É importante ressaltar que as indústrias de embalagem de vidro branco recebem a utilização de caco externo, ou seja, caco proveniente de fora dos limites da indústria, pois estes são compostos por diversos tipos de vidro com composições diferentes da composição química do produto produzido e também por apresentarem diversos contaminantes que promovem a desqualificação do artigo fabricado. Portanto, a utilização de caco na

fabricação está intimamente ligada com o caco gerado internamente, o que acaba limitando a capacidade da indústria diminuir o consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de produto produzido.

### **Consumo de Energia Elétrica e Gás Natural**

O consumo de energia elétrica e gás natural representa tanto sob o ponto de vista ambiental como econômico um dos “hotspots” da indústria vidreira. Pequenos avanços na eficiência do sistema são capazes de promover ganhos substanciais no desempenho ambiental e econômico do produto.

Sob a perspectiva ambiental, o consumo de energia representa um dos gargalos da emissão de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NOx. portanto, para reduzir as emissões totais associados com a produção de vidro, requer uma atenção crescente à problemática de consumo energético na indústria de vidro de embalagem branca.

### **Política Nacional de Resíduos Sólidos**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos defende a instituição de instrumentos que obriguem as indústrias a mudarem seu padrão de produção no sentido de colocarem no mercado produtos efetivamente duráveis, por um lado. E por outro lado, reivindica-se o estabelecimento de normas para a redução do consumo de recursos naturais nos processos industriais e para que os produtos pós consumo sejam passíveis de aproveitamento integral.

Significa dizer, para se atingir um patamar de sustentabilidade é preciso responsabilizar toda a cadeia produtiva, do “berço ao túmulo”, ou seja, desde o momento da extração da matéria prima até o momento em que o produto torna-se resíduo (responsabilidade compartilhada).

Nessa perspectiva, a indústria de embalagem de vidro branca possui um diferencial competitivo com relação aos concorrentes, pois seu produto pode ser 100% reciclado e substituí integralmente a utilização de recursos naturais. A reciclagem de embalagens de vidro se dá através de um ciclo fechado, o que significa que um recipiente de vidro torna-se o mesmo produto outra vez. A reciclagem interminável de vidro de volta à sua utilização original, sem perda de qualidade ou pureza é a verdadeira definição de um material reciclável.

## **Política Nacional de Mudanças Climáticas**

A PNMC estabelece padrões ambientais e metas para a redução de emissões antrópicas por fontes e para as remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa (GEE : gás carbônico, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonetos, perfluorcarbonos, e hexafluorídrico sulfúrico). A indústria vidreira nos próximos anos terá de enfrentar o desafio de diminuir a escalada de suas emissões de GEE. Nessa perspectiva, a ACV, é capaz de fornecer o suporte adequado para a quantificação e monitoramento das emissões, identificando os “hotspots” do sistema em estudo e caracterizando os principais agentes. Essa técnica se mostra ideal para apoiar a tomada de decisão na indústria de vidro.

## **6. RECOMENDAÇÕES**

### **O<sub>2</sub>**

O presente estudo identificou que muitas indústrias vidreiras injetam O<sub>2</sub> puro no forno de fusão para se misturar e queimar com o gás natural.

A utilização do oxigênio puro, reduz em 80% o volume de fumaças geradas devido a ausência do nitrogênio e verifica-se o aumento considerável das temperaturas das chamas. Por produzir menos fumaça os fornos a oxícombustão exigem sistemas de filtragem menos dispendiosos.

Fornos de fusão de vidro foram convertidos para a queima de oxigênio puro primariamente em resposta as regulamentações ambientais. Fornos a óxícombustão são uma das maneiras mais eficientes termicamente e de baixo custo para permitir que os fabricantes de vidro atendam as restrições de emissões de NOx. O impacto líquido de fornos a óxícombustão nos custos globais da produção depende da oferta regional de energia, bem como, de O<sub>2</sub>. No entanto sua utilização geralmente inclui compensações devido a melhora na qualidade da produção.

### **Óleo Lubrificante**

Grande quantidade de óleo lubrificante é utilizado para a lubrificação das máquinas de conformação e pós-conformação e portanto representa uma entrada significativa do ICV e deve ser considerada em futuras avaliações de ciclo de vida de embalagens de vidro branco.

### **Transporte**

O transporte é outro processo fundamental para a ACV. Uma vez identificado a origem das matérias-primas é possível estimar a carga ambiental que esse processo acarreta para o projeto em análise. Uma matéria-prima proveniente do interior de São Paulo, gera um volume de emissões menor do que um recurso proveniente da China. Portanto é muito importante obter dados confiáveis da origem das matérias-primas para promover maior consistência nas análises.

O transporte interno realizado por tratores, empilhadeiras, veículos e etc. para o suporte e interação entre processos e/ou operações do próprio setor devem ser considerados, e estes variam de acordo com o perfil de operação e planta de cada indústria.

## **Outros Materiais**

Qualquer outro material identificado sob a perspectiva ambiental com potencial de carga ambiental relevante, deve ser caracterizado. A partir de critérios “cut-off” e através de análises de sensibilidade verifica-se a necessidade ou não da manutenção do material no projeto.

## 7. CONCLUSÕES

Primeiramente buscou-se consolidar o objetivo do trabalho juntamente com os colaboradores da indústria vidreira e informá-los de que não é pretensão do projeto a divulgação dos dados primários do setor. Mas sim, o entendimento e domínio do processo de fabricação de embalagens de vidro branco no Brasil.

Foram observadas e descritas as variáveis mais relevantes de cada processo elementar, ou seja, as entradas (matérias-primas, energia e outros materiais) e saídas (emissões) e buscou-se em base de dados secundários (literatura especializada, pesquisa em base de dados, trabalhos acadêmicos e etc.) os dados necessários para suportar os cálculos e a conseqüente elaboração do Inventário do Ciclo de Vida.

Nessa perspectiva, observa-se que em termos qualitativos os resultados do ICV podem carregar certo grau de incerteza, pois como mencionado, as informações foram coletadas de fontes externas e estreitadas para a realidade interna.

No entanto, o projeto proporciona um entendimento fiel e consistente da fabricação de embalagens de vidro e identifica sob a ótica ambiental os aspectos mais importantes para suportar futuros projetos de desempenho ambiental, avaliação de ciclo de vida, pegada de carbono, rotulagem ambiental e etc. Demonstrando consistência em termos quantitativos de dados.

Portanto, nota-se que este projeto possui caráter estratégico, pois visa estabelecer bases consistentes para criar oportunidades no desenvolvimento de trabalhos que promovam a sustentabilidade na indústria brasileira de embalagens de vidro.

## 8. COMENTÁRIOS PESSOAIS

Não é objetivo deste projeto abrir uma discussão acerca de qual embalagem agride menos o ambiente. No entanto, este tópico procura identificar os aspectos positivos que a embalagem de vidro branca possui, tornando-a sob a perspectiva ambiental um produto bastante competitivo no mercado de embalagens.

### Características positivas

- É um material inerte, ou seja, não reage nem química nem biologicamente com o meio;
- Retornabilidade (o uso do vidro para o mesmo fim várias vezes): a embalagem de vidro pode ser retornável o que substitui a fabricação de uma outra embalagem;
- A embalagem de vidro pode ser reutilizável: uso da embalagem de maneiras diferentes para a qual foi fabricada (ex. uma embalagem de vidro para o envase de requeijão pode ser reaproveitada como copo para uso doméstico);
- Total reciclabilidade: a embalagem de vidro é 100% reciclável e substitui integralmente a utilização de recursos naturais, sem perda de volume ou de propriedades do material;
- É impermeável;
- Não deixa sabor nem gosto no conteúdo.

A indústria vidreira do Brasil, tem grande potencial competitivo no mercado de embalagens, a utilização de caco na composição, atrelada a matriz energética brasileira proveniente majoritariamente de recursos renováveis, promovem o desempenho ambiental do produto, acirrando também a competição com indústrias vidreiras de outros países. Com o desenvolvimento de projetos/produtos de elevado desempenho ambiental, a indústria é capaz de suportar as exigências de mercado, sobretudo entre unidades de negócio; ou seja, grandes empresas preocupadas no estabelecimento de cadeias de valor dos seus produtos, buscam identificar parceiros no mercado que também promovam políticas ambientais semelhantes. Outro fator importante é as regulamentações cada vez mais restritivas, tanto do ponto de vista nacional, como internacional – e o atendimento desses requisitos proporciona uma maior conquista de mercado.

Portanto, o setor vidreiro ao negociar o seu produto, é capaz de listar entre seus recursos e capacidades, muito além de qualidade e preço, através de iniciativas ambientais, agrega valor ao

seu produto transmitindo esse valor para a cadeia de outras empresas.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERMAN, Mauro. A ELABORAÇÃO DO VIDRO. Saint Gobain – Vidros Brasil. CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro. Novembro. 25 p. 2000.

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidro. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição Especial. Maio. 24 p. 2001.

AHBE, S., Braunschweig, A., Muller-Wenk, R. Methodologie dès Ecobilans sur la base de l'optimisation écologique. Em L'Office federal de l'environnement, dès forêts et du paysage (OFEFP) (Eds.). Cahier de l'environnement, 133. Berne. 1991.

ANDRADE, D. A. Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica. Leituras de Economia Política, Campinas, (14): 1-31, ago.-dez. 2008.

ASDRUBALI, F.; BUTTOL, P.; CECCHINI, F.; CORTI, G.; NERI, P.; ROMBALDONI, F. Analisi Del Ciclo di Vita Del Vetro di un Tubo Catódico. Bologna, Italy: ENEA. 2002.

ASSIES, J. State of Art. Life-Cycle Assessment, (pp.1-20). Leiden, Netherlands: SETAC- Europe. 1992.

BECK, L., PEER, R., BRAVO, L. e YAN, Y. A data attribute rating system. Paper presented at AWMA conference, "The Emissions Inventory: Applications and Improvement". Raleigh: NC. 1994.

BENNY, J. Personal Communication. Glass Association of North America, August. 1996.

CAJAZEIRA, J.E.R. ISO 14000 - Manual de Implantação. Rio de Janeiro: Qualitymark. 1997.

CHEHEBE, José Ribamar B. Análise do Ciclo de Vida de Produtos. Rio de Janeiro, RJ. Qualitymark Editora. 104p. 1998.

CURRAN, M.A. (ed). *Environmental Life Cycle Assessment*. ISBN 0-07-015063-X, McGraw-Hill. 1996.

CURRAN, M. The Status of LCA in the USA. Int. J. LCA, vol.4 (3) 123-124. Landsberg, Germany: Ecomed. 1999.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS. Pesquisa Nacional sobre Gestão Ambiental. Relatório. Confederação Nacional das Indústrias (CNI), SEBRAE e BNDES, São Paulo. Disponível em: <www.cni.org.br>. 2012.

CONSOLI, F., ALLEN, D., BOUSTEAD, I., FAVA, J., FRANKLIN, W., JENSEN, A., OUDE, N., PARRISH, R., PERRIMAN, R., POSTLETHWAITE, D., QUAY, B., SÉGUIN, J., e VIGON B. (Eds.). SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"*. Sesimbra: Portugal. 1993.

HAES, H. Discussion of General Principles and Guidelines for Practical Use. Em de Haes, H. (Ed.). *Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment*, (pp.7-30). Brussels, Belgium: SETAC-Europe. 1996.

DOUGLAS, R. W. *A history of glassmaking*. Henley-on-Thames: G T Foulis & Co Ltd. ISBN 0-85429-117-2. 1972.

EKVALL, T. Principles for allocation at multi-output processes and cascade recycling. Em Huppes, G. e Schneider, F. (Eds.). *Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA*, (pp.91-101). Leiden, Netherlands: SETAC-Europe. 1994.

ENERGETICS. Industry; *Profiles: Glass*, prepared for the US Department of Energy. Office of Industrial Technologies, Report No DOE/RL/0(1830)-T60. 1990.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues. Análise de Ciclo de Vida dos Produtos. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu. 80 p. 2004.

FRANKL, Paolo; RUBIK, Frieder. *Life Cycle Assessment in Industry and Business: Adoption Patterns, Applications and Implications*. New York: Springer. 280 p. 2000.

FRISCHKNECHT, R. Draft Theme Report: Goal and Scope Definition and Inventory Analysis. 2012. Disponível em: <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/lacnet/ftheme2.htm>.

FUNTOWICZ, S. O. e RAVETZ, J. R. Uncertainty and Quality in Science for Policy. MA: Kluwer Academic Publishers. 1990.

GAINES L L and MINTZ, M., M. Energy Implications of Glass Container Recycling. Report ANL/ESD-18. Argonne National Laboratory, Argonne IL. 1994.

Glass: A Clear Vision for a Bright Future. Prepared by representatives of the glass industry. Idaho National Energy Laboratory, Idaho. 1996.

GUINÉE, J. Development of a Methodology for Environmental Life-Cycle Assessment of Products (with a case study on margarines). Tese (Ph.D). Universidade de Leiden, Leiden. 1995.

GUPTA, P.K. Non-crystalline solids: glasses and amorphous solids. J. Non-Cryst. Solids, v. 195, p. 158-164. 1996.

HEIJUNGS, R., GUINÉE, J. B., HUPPES, G., LANKREIJER, R. M., de HAES, H. e Sleeswijk, A. *Environmental Life Cycle Assessment of Products - Backgrounds and Guide LCA*. Leiden: CML- Centre of Environmental Science. 1992.

HUISINGH, D. Workshop Conclusions on Inventory Session. Life-Cycle Assessment (pp.71-72). Leiden, Netherlands: SETAC-Europe. 1992.

HUNT, R. E FRANKLIN, E. LCA – How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. Int. J. LCA, vol.1 (1) 4-7. Landsberg, Germany: Ecomed. 1996.

ISO 14040, (2009). Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. Genève: Switzerland.

ISO 14044, (2009). Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines. Genève: Switzerland.

ISO/TR 14049, (2000). Environmental management -- Life cycle assessment -- Examples of application of

ISO/TS 14048, (2002). Environmental management -- Life cycle assessment -- Data documentation format. Genève: Switzerland.

ISO/TR 14047, (2003). Environmental management -- Life cycle impact assessment -- Examples of application of ISO 14042. Genève: Switzerland.

JOSA, A.; CARDIM, A.; AGUADO, A.; GETTU, R. Considerations in the Life Assessment of Precast Concrete Products. In: 16th INTERNATIONAL CONGRESS OF PRECAST CONCRETE INDUSTRY, Venezia. Prefabrication on the Eve of the Third Millennium. Milano: Associazione Nazionale Industrie Manufatti Cementizi, 1999.

KENNEDY, D., MONTGOMERY, D. e QUAY, B. Stochastic Environmental Life Cycle Modeling: A Probabilistic Approach to Incorporating Variable Input Data Quality. Int. J. LCA, vol. 1 (4) 199-207. Landsberg, Germany: Ecomed. 1996.

LEE, R. The US-EC fuel cycle externalities study: the US research team's methodology, results, and conclusions, presented at the EC, IEA and OECD Workshop on The External Costs of Energy. Brussels: Belgium. 1995.

MAIMON, D. Passaporte Verde: Gerência Ambiental e Competitividade. Rio de Janeiro: Qualitymark. 1996.

MENKE, D.M.; DAVIS, G.A. Evaluation of Life Cycle Assessment Tools. Tennessee: The University of Tennessee, Center for Clean Products and Clean Technologies. 1996.

MUELLER, C. C. Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente. Brasília: Editora UnB, 2007.

OFEFP-Office Federal de L'environnement, dès Forêts et Du Paysage. Bilan Écologique dès Matériaux D'emballage. Cahiers de l'environnement, 24. Berne. 1984.

OTA. Industrial Energy Efficiency. Office of Technology Assessment. Government Printing Office, Washington, DC. 1993.

OUDE, N. de. Product Life Assessment: Developing a Methodology. In: JACKSON, T. Clean Production Strategies. Stockholm: Stockholm Environment Institute, Lewis Publ. p.207-223. 1993.

PRé Consultants. Introduction to LCA with Simapro 7. Report version 4.5. November 2010.

PRÉ, Product Ecology Consultants. Simapro LCA Software. Holanda. Disponível em <http://www.pre.nl/simapro/>. Acessado em 17/04/2012.

ROSS, P. C.; TINCHER, L. G.; RASMUSSEN, M. Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment – A project of the Glass Manufacturing Industry Council (GMIC). 2004.

RUTH, M.; DELL'ANNO, P. An industrial ecology of the US glass industry. Resources Policy. Vol. 23, No. 3, pp. 109-124. 1997.

SANTOS, Rose Maria Arantes. Implantação da Norma ISO 14040 numa Indústria de Vidro Plano. Universidade de Taubaté. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. 2003.

SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. A Technical Framework for Life- Cycle Assessment. Em Fava, J., Denison, R., Jones, B., Curran, M., Vigon, B., Selke, S. e Barnum, J. (Eds.). Workshop report from the Smugglers Notch. Vermont, USA. 1991.

SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice". Em Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Séguin, J., e Vigon B. (Eds.). Sesimbra: Portugal. 1993.

SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Integrating Impact Assessment Into LCA. Em de Haes, H., Jensen A., Klöpffer W. e Lindfors L., (Eds.). Proceedings of the LCA Symposium Held at the Fourth SETAC-Europe Congress. Brussels, Belgium: The Free University. 1994.

STEVEN, B.Y. Center for Technology and Social Development. Toronto, Canada: University of Toronto. 1995.

SHELBY, J. E. Introduction to Glass Science and Technology. 2nd Edition. Advancing the Chemical Sciences. The Royal Society of Chemistry. 2005.

SOARES, Sebastião Roberto. Apostila de Gestão e Planejamento Ambiental. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1 ° sem. 2011.

TIBOR T. e FELDMAN, I. ISO 14000: A Guide to the New Environmental Management Standards. USA: Times Mirror Higher Education Group. 1996.

USEPA. U. S. Environmental Protection Agency. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. Cincinnati. Ohio. 80 p. 2006.

USEPA. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess - LCA 101. 2001. Disponível em:  
<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/lca101.htm>.

USEPA-US Environmental Protection Agency. Guidelines for Assessing the Quality of Life-Cycle Inventory Data. Office of Solid Waste. Research Triangle Park, NC. 1995.

VIGON, B. W., TOLLE, D. A., CORNABY, B. W., LATHAM, H. C., ARRISON, C. L., BOGUSKI, T. L., HUNT, R. G., e SELLERS, J. D. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles. Washington D.C. & Cincinnati: Office of Research And Development, USEPA. 1992.

WEIDEMA, B. P. e WESNOES, M. S. Data Quality Management for life-cycle inventories - an example of using data quality indicators. Paper presented at the SETAC World Congress, Vancouver, Canada. 1995.

WEIDEMA, B. P. Qualitative and Quantitative Parameters in product Impact Assessment. Em de Haes, H., Jensen, A., Klöpffer, W. e Lindfors, L. (Eds.). Integrating Impact Assessment Into LCA, (pp.29-36). Brussels, Belgium: SETAC-Europe. 1994.

WOOLEY, E. Engineered Materials Handbook: Vol. 4 Ceramics and Glasses. Melting-Fining. ASM International, Materials Park, OH. 1992.

ZACHARIASEN, W.H. The atomic arrangement in glass. J. Am. Chem. Soc. v. 54, p. 3841-3851, 1932.