

Publicado como capítulo de livro:

SILVA, G.A. KULAY, L.A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JÚNIOR, A. e DEMAJOROVIC, J. (Org.). **Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental - Desafios e Perspectivas para as Organizações**. 1 ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2006.

# Avaliação do ciclo de vida

Gil Anderi da Silva  
Luiz Alexandre Kulay

## Introdução

A observação da evolução histórica da atitude das organizações diante da reação da sociedade à deterioração ambiental mostra duas fases distintas.

Uma fase inicial, na qual as organizações respondem reativamente aos clamores da sociedade, buscando minimizar os impactos ambientais negativos decorrentes de suas atividades – é a ação que pode ser chamada de *controle*. Essa fase pode ser caracterizada por uma pressão da sociedade sobre o Estado, o qual passa a exercer seu poder de polícia, regulando o exercício das atividades pelas organizações de forma a limitar os impactos ambientais por elas causados.

Em uma segunda fase, as organizações passam a ter uma atitude dita preventiva, caracterizada pela *prevenção* à ocorrência dos impactos. Em outras palavras, em vez de tratar os rejeitos gerados por suas atividades visando atender aos padrões estabelecidos pelas agências fiscalizadoras, elas buscam a não-geração dos rejeitos ou, no mínimo, a sua não-disposição no ambiente, por meio de diferentes formas de seu reaproveitamento.

Essas atitudes têm promovido benefícios significativos ao desempenho ambiental das organizações e, por consequência, têm contribuído para melhorar (ou piorar em velocidade menor) a qualidade do meio ambiente.

Pelo fato de essas atitudes considerarem em seu escopo apenas os limites de bateria de unidades individualizadas da organização, elas são, usualmente, referidas como atitudes com *foco sobre o processo*.

A reflexão da sociedade em relação à atitude preventiva trouxe a conscientização de um aspecto ligado ao desenvolvimento sustentável.

Os rejeitos, tanto materiais quanto energéticos, são gerados a partir da aquisição e transformação de recursos naturais, representando, portanto, o consumo desses recursos.

Ainda que em alguns casos a geração desses rejeitos seja inerente aos processos, em parcela significativa deles isso não ocorre, o que implica que nessa parcela seja possível, em princípio, a eliminação ou, no mínimo, a redução da geração de rejeitos. Assim, prevenir a disposição de rejeitos significa não só reduzir a poluição – entendida como lançamento no meio ambiente dos rejeitos gerados pelas atividades humanas – como também minimizar o consumo de recursos naturais materiais e energéticos.

Por outro lado, lembrando que a aquisição e o manuseio dos recursos que originam os rejeitos têm um custo, a redução da geração trará a redução do consumo de recursos, acrescida à eliminação dos custos decorrentes do tratamento, quase sempre obrigatório, dos rejeitos antes de sua disposição.

A evolução dessa linha de pensamento tornou cada vez mais evidente que mesmo a abordagem preventiva da questão ambiental carecia de uma ampliação de fronteiras para atender às necessidades da sociedade em relação ao desenvolvimento sustentável.

A globalização aponta para uma abordagem que amplie o foco de sua atuação para além dos limites de bateria de cada unidade da organização. Aqui está talvez a origem do *pensar ciclo de vida*, ou, em inglês, do *life cycle thinking* (LCT).

O LCT significa a consciência de que não basta que o desempenho ambiental de uma unidade isolada da cadeia produtiva seja adequado; o importante é que o desempenho ambiental de todos os elos dessa cadeia seja adequado. Nunca é demais enfatizar que no desempenho ambiental se considera não só a disposição de rejeitos como também o consumo de recursos naturais.

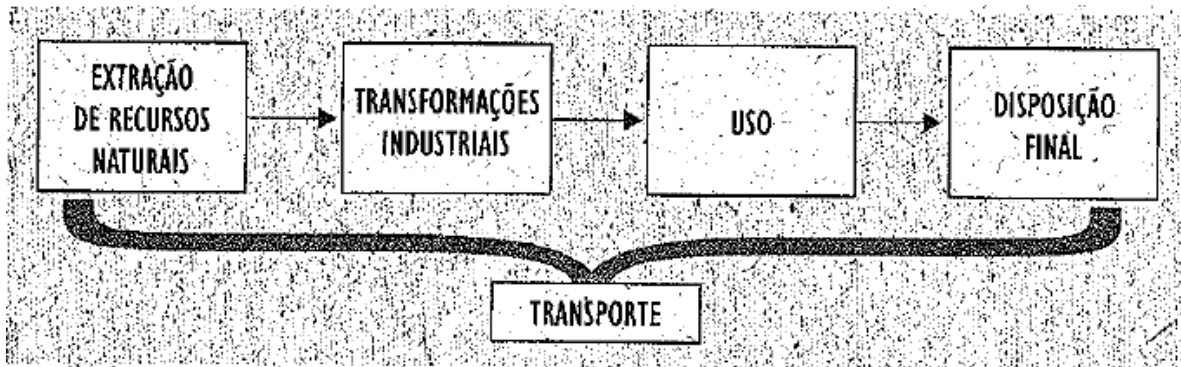
Segundo essa filosofia, a avaliação do desempenho ambiental deve passar a ser feita de uma forma sistêmica, abrangendo todas as atividades potencialmente impactantes ao meio ambiente, envolvidas na manufatura do produto. Esse espectro considera desde atividades de obtenção dos recursos naturais até a etapa de fabricação do produto, ao final de toda a sua cadeia produtiva. Estamos falando de *foco sobre o produto*.

Um olhar mais atento ao tema aqui abordado vislumbrará que a manufatura dos produtos não é, em si, um fim, mas um meio de atender a uma necessidade ou a um desejo da sociedade. Ou seja, os produtos são manufaturados com o objetivo de cumprir uma função. Isso implica que o seu potencial de impacto ao meio ambiente não se esgota ao final de sua manufatura. Pelo contrário: o caminho percorrido até o início do cumprimento de sua função; o próprio cumprimento dessa função; o seu destino após o cumprimento dessa função – seja sua disposição final no meio ambiente, seja alguma forma de seu reaproveitamento – são atividades que podem impactar significativamente o meio ambiente. Assim, esses potenciais impactos devem ser considerados na avaliação do desempenho ambiental do produto. Em resumo, deve-se evoluir para o *foco sobre o “exercício” da função pelo produto*.<sup>1</sup> Sob esse enfoque – o desempenho ambiental adequado deve ser o do exercício da função pelo produto – agregam-se às etapas acima citadas (até a manufatura do produto) as de sua distribuição, seu uso, reaproveitamento pós-uso e disposição final.

Esse é o conceito de *ciclo de vida*:<sup>2</sup> conjunto de etapas necessárias para que um produto cumpra sua função e que vão desde a obtenção dos recursos naturais até sua disposição final após o cumprimento da função.

O esquema 1 apresenta as cinco etapas que constituem, de maneira geral, o ciclo de vida de todos os produtos.

Esquema 1: **Etapas do Ciclo de Vida dos Produtos**



O transporte é incluído como uma etapa do ciclo de vida por ser uma atividade potencialmente geradora de impactos ambientais, que ocorre praticamente no ciclo de vida de todos os produtos.

Este capítulo apresenta a ferramenta da avaliação do ciclo de vida (ACV) e sua metodologia de execução, além de discutir suas limitações e perspectivas de consolidação.

## Avaliação do ciclo de vida: generalidades

Visando atender às necessidades das organizações no gerenciamento de sua relação com o meio ambiente, a gestão ambiental criou várias técnicas que têm sido de extrema utilidade.

A partir do surgimento do conceito de ciclo de vida foi desenvolvida uma técnica para avaliação de desempenho ambiental de produtos denominada *avaliação de ciclo de vida* (ACV),<sup>3</sup> que avalia o desempenho ambiental de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essa avaliação é feita por meio da identificação de *todas* as atividades humanas ocorridas no ciclo de vida do produto e pela avaliação dos impactos ambientais potencialmente associados a essas atividades.

## Evolução histórica da ACV

O primeiro estudo referido de forma geral na literatura, realizado com foco sobre o produto, foi conduzido na segunda metade da década de 1960 pelo **Midwest Research**

Institute, por solicitação da Coca-Cola Company. O responsável pelo setor de embalagens da empresa se preocupava com as conseqüências ambientais de suas embalagens, tanto do ponto de vista do consumo de energia e materiais quanto dos impactos ambientais de sua disposição. O projeto recebeu o nome de *Resource and Environmental Profile Analysis* (Repa) e seu relatório nunca foi publicado, por razões de confidencialidade. Uma de suas conclusões (ou, talvez, conseqüências) foi a adoção da viabilidade ambiental da mudança de vidro para plástico como material de manufatura das garrafas.<sup>4</sup>

A compilação de trabalhos elaborados sob esse enfoque forneceu, anos depois, a fundamentação teórica necessária à concepção da ACV. Os Repas desempenharam importante papel durante a primeira crise do petróleo. Particularmente entre os anos de 1973 e 1975 foram realizados, por encomenda de governos de diversos países industrializados, estudos detalhados avaliando o potencial energético do planeta que incluíam não apenas um diagnóstico situacional do problema, mas também propostas de alternativas ao uso dos combustíveis fósseis.

A grande diversidade de padrões e critérios para a aplicação da metodologia, aliada à falta de bancos de dados amplos e confiáveis e aos elevados custos envolvidos na realização de tais estudos, resultou na desconfiança sobre possível manipulação dos resultados obtidos. Por conta disso, tal forma de abordagem acabou caindo em descrédito junto à comunidade científica, ao que se seguiu seu temporário abandono.

A certeza de que uma abordagem sistêmica seria o melhor caminho para avaliar as interações entre um produto e o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida fez com que alguns centros de pesquisa seguissem investindo no sentido de aprimorar esses e outros pontos deficitários, a fim de criar um procedimento exequível e confiável. Dos progressos decorrentes desse esforço surge, no princípio da década de 1980, a metodologia de ACV. A maior prova de que a ACV tornara-se um instrumento consistente para a realização de avaliações ambientais ocorreu em 1985, quando a Comunidade Européia houve por bem recomendá-la como a técnica mais adequada para o automonitoramento dos consumos materiais e energéticos em quaisquer empresas instaladas naquele continente.

Embora a ACV encontre-se ainda em fase de evolução no que se refere a alguns de seus componentes, o interesse por ela tem aumentado em seus mais variados usos. Dentre as instituições dedicadas ao aprimoramento e à difusão dessa metodologia, a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (Setac) faz por merecer especial destaque pelo papel que desempenha. Na opinião de muitos praticantes, a Setac, que se ocupa da busca de uma base conceitual uniforme e consistente para a ACV há mais de uma década, constitui-se atualmente no principal fórum mundial de discussão para os muitos aspectos correlacionados à referida técnica.

A importância adquirida pela ACV nos contextos da gestão ambiental e da prevenção da poluição fez com que a estrutura conceitual que a compõe acabasse sendo padronizada pela International Organization for Standardization (ISO). Essa instituição reservou para a ACV a série 14040. Até 2000 foram lançadas as seguintes normas técnicas:

- ISO 14040: Environmental management – *Life Cycle Assessment – Principles and framework* (1997);
- ISO 14041: Environmental management – *Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and inventory analysis* (1998);
- ISO 14042: Environmental management – *Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment* (2000); e
- ISO 14043: Environmental management – *Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation* (2000).

Mais recentemente, em 2002, consolidou-se, por intermédio de uma parceria conjunta entre o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e a Setac, a Life Cycle Initiative (LCI). Baseada na filosofia conceitual da metodologia de avaliação de ciclo de vida, a LCI se propõe a tratar a ACV por meio de três programas de envergadura mundial. O primeiro de tais programas é conhecido como Life Cycle Inventory e se dedica ao desenvolvimento de metodologia de elaboração de inventários ambientais.

O segundo programa estabelecido pela Life Cycle Initiative é chamado de Life Cycle Impact Assessment e trata da consolidação da etapa de avaliação de impactos nos estudos de ACV.

A trilogia se completa com o programa de Life Cycle Management, por meio do qual busca-se estimular a agregação de uma perspectiva de ciclo de vida às ações inerentes à gestão empresarial com o objetivo de obter o aumento da eficiência ambiental de produtos e serviços.

## ACV no Brasil

A primeira atividade formal relacionada à ACV, no Brasil, foi a criação, em 1994, do Grupo de Apoio à Normalização (Gana)<sup>5</sup> junto à ABNT; esse grupo nasceu com a missão de viabilizar a colaboração do Brasil no ISO/TC 207, criado no ano anterior. A constituição do Gana, como um espelho do ISO/TC 207, incluiu o SC 05 – subcomitê de ACV. Desse trabalho pioneiro resultou a publicação, em 1998, do primeiro livro brasileiro sobre o tema.<sup>6</sup>

O primeiro estudo completo de ACV realizado no país, do qual se tem notícia, foi executado no Centro de Tecnologia de Embalagem (Cetea) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (Ital) em 1999 e avaliou diferentes materiais usados nas embalagens de alimentos.<sup>7</sup>

Em 1998 foi criado, junto ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP, o Grupo de Prevenção da Poluição (GP2) com o objetivo principal de contribuir para a consolidação do uso da ACV no Brasil. Até o presente momento, a contribuição intelectual do GP2 compreende sete dissertações de mestrado, uma tese de doutorado, além de catorze trabalhos publicados em periódicos e congressos nacionais e internacionais.

O Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (CB38), da ABNT, sucessor do Gana a partir de 1999, tem no SC 05 o grupo encarregado das normas relativas a ACV. O SC 05 editou até a presente data as normas:

- NBR ISO 14040: *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*;
- ABNT NBR ISO 14041: *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventário*; e
- ABNT NBR ISO 14042: *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida*.

Em 2002 foi fundada a Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV) com a missão de congregiar todos os interessados em ACV e coordenar as atividades de construção do banco de dados brasileiro, da formação de recursos humanos e de manutenção dos vínculos com a comunidade internacional envolvida com o tema.

Concluindo, cumpre ressaltar que é perceptível o interesse do setor empresarial brasileiro pelo uso da ACV, manifestado pela realização de estudos por organizações dos setores de cosméticos, veículos, celulose e papel, entre outras.

## Usos e aplicações

Em se tratando de uma metodologia de avaliação cujo foco se situa sobre a função do produto, a ACV proporciona informações sobre as interações que ocorrem entre as etapas que constituem o ciclo de vida deste e o meio ambiente. Por conta disso, em um dos primeiros simpósios organizados pela Setac ainda na primeira metade da década de 1990, com a missão de discutir os rumos da ACV, estabeleceu-se que a realização de um estudo dessa natureza tem por premissas:

- fornecer uma imagem, tão fiel quanto possível, de quaisquer interações existentes com o meio ambiente;
- contribuir para o entendimento da natureza global e interdependente de conseqüências ambientais das atividades humanas;
- gerar subsídios capazes de definir os efeitos ambientais dessas atividades; e
- identificar oportunidades para melhorias de desempenho ambiental.

Por conta disso, é possível subdividir as aplicações triviais a que se destina uma ACV em duas grandes vertentes:

- comparação do desempenho ambiental de produtos que cumprem uma mesma função; e
- identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental.

Com relação à primeira vertente, deve-se lembrar que a ACV é a única técnica da gestão ambiental que possibilita a comparação do desempenho ambiental de produtos,

por ser ela a única técnica que avalia o desempenho do cumprimento da função pelo produto.

A utilização da ACV com esse viés encontra maior apelo junto a organizações empresariais desejosas de demonstrar a supremacia ambiental de seus produtos sobre os de seus concorrentes diretos, com o intuito de conquistar novos mercados.

Entretanto, quando efetuada confrontando o desempenho ambiental de um ou mais produtos contra um padrão preestabelecido, a ACV serve para a elaboração de rótulos e declarações ambientais.

O fato de a ACV constituir-se em uma técnica eficiente para a elaboração de diagnósticos ambientais disponibiliza sua aplicação para atividades estratégicas de uma organização, tais como o projeto de novos produtos e a reavaliação de produtos já consagrados.

Nessa aplicação a ACV se presta à seleção de opções de projeto, em particular no que se refere à busca de novos materiais, formas de energia alternativas e implementação de melhorias de processo visando à minimização de perdas e à concepção de produtos menos agressivos ao meio ambiente.

Como exemplo pode-se citar um estudo realizado na Espanha, em 2000, com dois tipos de luminárias para vias urbanas. No caso em questão, comparou-se o produto existente – uma luminária cuja caixa era confeccionada em alumínio – com outro, então cogitado para tornar-se seu substituto – com caixa de polietileno. As conclusões obtidas em decorrência da ACV estabeleceram diretrizes fundamentais para o projeto de uma luminária que provocasse menores impactos no meio ambiente ao longo de todo seu ciclo de vida.<sup>8</sup>

Na segunda vertente, a ACV atua empreendendo a busca dos principais focos de impactos ambientais potencialmente provocados por um produto, ao longo de seu ciclo de vida. Ao término de sua aplicação, o praticante terá estabelecido a contribuição do sistema em estudo para as diversas categorias de impacto ambiental. De posse desse diagnóstico, planos de ação voltados à minimização desses impactos poderão ser estabelecidos.

O uso da ACV com essa finalidade pode ser ilustrado por meio de um estudo realizado conjuntamente por pesquisadores das multinacionais do ramo de telecomunicações NTT e NEC em 2002. O trabalho em questão relata a aplicação da ACV para a elaboração de um diagnóstico ambiental de equipamentos e facilidades que compõem uma rede de informação e de comunicação por cabo no Japão.<sup>9</sup>

Outro uso da ACV se dá junto a agências ambientais, e até mesmo a organizações não-governamentais, no que se refere à definição de políticas públicas visando à estruturação de sistemas sustentáveis.

Tal iniciativa pode ser exemplificada por meio de estudo realizado em 2002 por técnicos da Scottish Environment Protection Agency, com o objetivo de definir estratégias de âmbito nacional para o gerenciamento de resíduos sólidos. No presente caso a ACV foi usada como instrumento de seleção, dentro de um universo de seis

alternativas possíveis, do cenário mais adequado de gerenciamento de resíduos para cada uma das onze localidades do país selecionadas para esse fim.<sup>10</sup>

## Metodologia

A metodologia de execução de um estudo de ACV pode ser entendida como o conjunto de procedimentos necessários para que o estudo atinja os objetivos propostos. Por ser a ACV uma técnica muito nova, não existe ainda uma metodologia universalmente consolidada para sua execução. De maneira geral, pode-se dizer que os modelos praticados seguem uma estrutura básica comum, divergindo em algumas minúcias, como ordem de execução das diferentes etapas ou forma de apresentação dos resultados.

Com o objetivo de familiarizar o leitor com a metodologia de execução de estudos de ACV será apresentada aqui uma descrição dos principais passos para a elaboração de uma ACV. Essa descrição segue uma seqüência considerada mais lógica pelos autores, a qual difere daquela sugerida pela ABNT NBR ISO 14040.

De uma maneira simplista pode-se dizer que um estudo de ACV consiste de identificação das entradas de matéria e energia do meio ambiente para o sistema que constitui o ciclo de vida do objeto do estudo e das saídas de matéria e de energia desse sistema para o meio ambiente, e avaliação dos potenciais impactos ambientais associados a essas entradas e saídas.

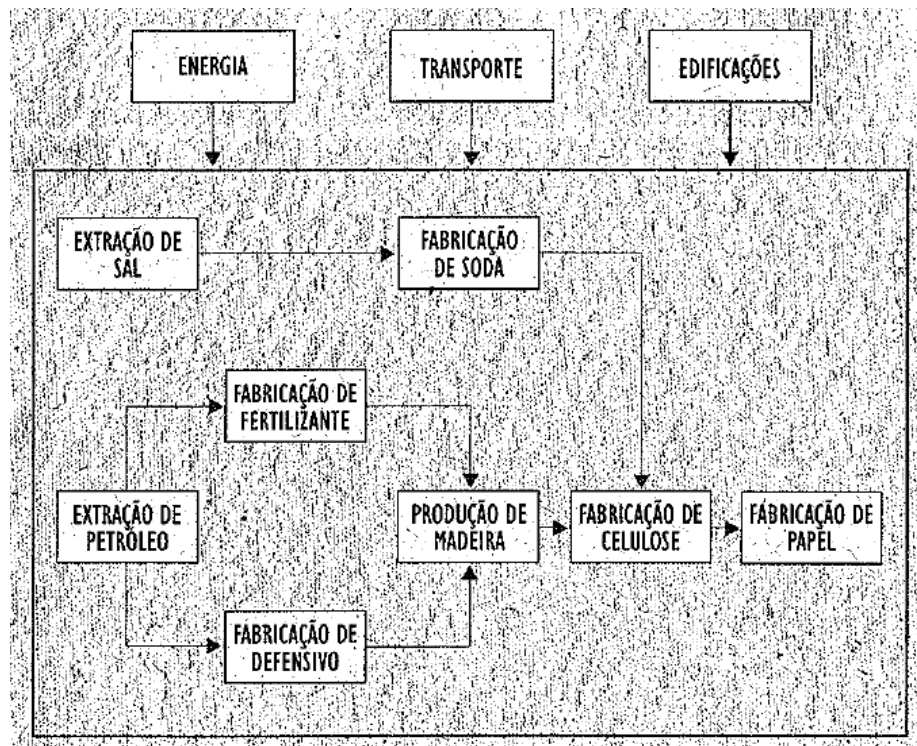
### Definição do sistema de produto

O primeiro passo para proceder à identificação das entradas e saídas consiste em definir o sistema a ser estudado ou, de acordo com a terminologia da ABNT NBR ISO 14040, definir o *sistema de produto*.<sup>11</sup> Essa definição consiste, em linhas gerais, na identificação dos subsistemas que irão compor o sistema de produto.

Para ilustrar a aplicação de tal procedimento, apresenta-se como exemplo a definição de sistema de produto para o caso do papel, indicado no esquema 2.



**Esquema 2: Sistema de produto para o papel**



Partindo-se do subsistema de manufatura do papel, deve-se inicialmente identificar as matérias-primas (materiais que ficam incorporados ao produto final) usadas em sua obtenção; no caso, tem-se a celulose, cujo subsistema é agregado ao sistema de produto. Seguindo o mesmo procedimento, incorporam-se os subsistemas da madeira e da soda, que são as matérias-primas usadas na fabricação da celulose, e, além desses, os subsistemas de fertilizantes, defensivos, extração de petróleo e de sal, ou seja, dos insumos necessários à obtenção das matérias-primas. Observe-se que esse exemplo é apresentado apenas com caráter ilustrativo, não tendo a intenção de esgotar a cadeia produtiva do papel.

Em seguida devem ser considerados os subsistemas dos materiais auxiliares (materiais necessários à obtenção do produto final, mas que não ficam incorporados ao mesmo), tais como embalagens, catalisadores, etc. Também para esses subsistemas deve-se partir dos respectivos recursos naturais.

Os subsistemas de energia (tanto elétrica quanto térmica) – insumo presente nos ciclos de vida de todos os produtos – não podem ser esquecidos.

Considerando que para a obtenção de todos os itens citados fez-se necessário o uso de bens de capital, tais como edificações e equipamentos, os quais potencialmente também geram impactos ambientais, eles também deverão ser considerados.

Partindo-se dessa abordagem é possível definir o que se poderia chamar de um *sistema de produto ideal* como aquele que troca matéria e energia apenas e tão-somente com o meio ambiente, e não com outros sistemas. No entanto, é fácil concluir que tal

sistema abrangeria todas as atividades humanas do planeta, o que obviamente tornaria inviável a realização do estudo de ACV.

Nessas condições, a efetiva definição dos sistemas de produto e de suas fronteiras é feita por meio da elaboração de modelos reduzidos representativos. É importante ressaltar que a elaboração de tais modelos deve obedecer a um compromisso entre a precisão dos resultados (quão mais abrangente o modelo, mais precisos os resultados) e a viabilidade prática de execução do estudo (quanto menos abrangente o modelo, mais viável a execução do estudo). Para a elaboração do modelo parte-se de uma descrição que inclui todos os subsistemas constituintes do ciclo de vida do produto e, em seguida, procede-se à exclusão de subsistemas, seguindo critérios bem-definidos, os quais devem ser explicitados no relatório final da ACV para garantir a transparência do estudo.

A norma ABNT NBR ISO 14041 sugere alguns critérios de exclusão, a saber: critérios de massa, energia e relevância ambiental. De maneira geral, pode-se dizer que os critérios de massa e de energia sugeridos consistem em excluir os subsistemas cuja contribuição acumulada à massa ou energia total do sistema seja inferior a uma dada porcentagem (em geral 1% ou 5%). O critério de relevância ambiental deve ser aplicado para evitar que seja excluída alguma entrada ou saída que, ainda que em pequena quantidade, possa resultar em alto potencial de impacto.

## Análise de inventário

A análise de inventário é a etapa da ACV na qual se quantificam as necessidades de matéria e de energia e as disposições de rejeitos materiais e energéticos associadas ao ciclo de vida do produto. Essa é a etapa cuja execução demanda maior tempo e maiores recursos.

A análise de inventário consta, basicamente, da coleta e do tratamento dos dados. Para sua execução deve ser preparado um fluxograma contendo todas as unidades de processo a serem modeladas, indicando as relações entre elas, ou seja, os fluxos de matéria e de energia que transitam entre as mesmas. A elaboração de balanços de massa e de energia facilita a execução dessa tarefa e contribui para evitar erros.

Os dados podem ser coletados diretamente nos locais de produção – dados primários (registros de produção, registros de compra e venda, atestados de agência ambiental, medidas e determinações locais, etc.) – ou, ainda, podem ser obtidos da literatura – dados secundários (relatórios setoriais de governo ou de associações, literatura técnica, etc.). Na prática, na grande maioria dos estudos são coletados os dois tipos de dados.

Após sua coleta, os dados devem ser tratados de forma a permitir sua operacionalização. Esse tratamento é necessário, uma vez que, via de regra, as bases em relação às quais são expressos os valores das correntes que entram e saem de cada subsistema são específicos do subsistema, fato que impede a agregação de dados de diferentes subsistemas.

O produto desse tratamento dos dados é uma **tabela contendo os valores agregados dos aspectos ambientais expressos em relação a determinada quantidade de produto denominada *unidade funcional***.<sup>12</sup>

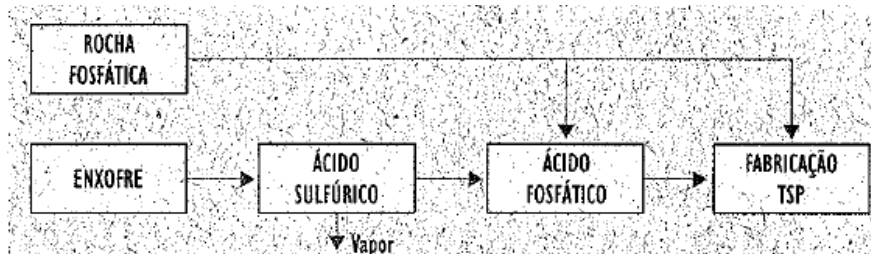
Na tabela 1 é apresentado como exemplo o extrato do inventário do ciclo de vida do fertilizante fosfatado superfosfato triplo (TSP). O sistema de produto para esse caso aparece ilustrado no esquema 3.

**Tabela 1: Inventário do ciclo de vida do superfosfato triplo (TSP)**

Aspecto ambiental	Unidade	(Unidade/1.000 kg TSP)
<b>Recursos</b>		
Rocha fosfática	Kg	9.950
Enxofre	Kg	331
Água	Kg	23.200
Energia elétrica	MJ	480
<b>Emissões</b>		
CO <sub>2</sub>	Kg	501
SO <sub>2</sub>	Kg	2,95
<b>Effluentes</b>		
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Kg	1,90
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Kg	0,106
<b>Resíduos</b>		
Enxofre	Kg	8,67
Catalisador (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Kg	48,3

Fonte: Gil Anderi da Silva & Luiz Alexandre Kulay, *Environmental Performance Comparison of Wet and Thermal Routes for Phosphate Fertilizer Production Using LCI – a Brazilian Experience*, cit.

**Esquema 3: Sistema de produto do superfosfato triplo (TSP)**



Fonte: Gil Anderi da Silva & Luiz Alexandre Kulay, *Environmental Performance Comparison of Wet and Thermal Routes for Phosphate Fertilizer Production Using LCI – a Brazilian Experience*, conferência Life Cycle Assessment/Life Cycle Management: a Bridge to a Sustainable Future, Seattle, 22-25 de setembro de 2003.

Outro tratamento dos dados que é relativamente freqüente nos estudos de ACV é a **alocação**. Esse procedimento é adotado em casos nos quais, de uma mesma unidade de processo, saia, além do produto principal, pelo menos mais um co-produto.

Para tais situações, a carga ambiental acumulada até esse ponto deve ser dividida e alocada entre os diversos produtos gerados.

No caso do exemplo do TSP, verifica-se que do subsistema *ácido sulfúrico* são obtidos os co-produtos ácido sulfúrico e vapor. Assim, faz-se necessário distribuir a carga ambiental acumulada até esse subsistema entre os dois co-produtos.

A escolha do critério a ser usado para fazer a alocação é uma definição subjetiva que deve ser feita quando da definição do escopo do estudo. Sempre que possível, devem ser usados critérios baseados em parâmetros físicos; caso isso não seja possível, pode ser usado um critério baseado no valor econômico.

Voltando ao exemplo do TSP, poder-se-ia adotar o critério de massa; ou seja, a carga ambiental acumulada seria distribuída entre o ácido sulfúrico e o vapor, em quantidades proporcionais às respectivas massas.

O produto final da etapa de análise de inventário é a relação dos aspectos ambientais quantificados, associados ao ciclo de vida do produto.

A partir dessa tabela pode ser realizada a avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a esse ciclo de vida.

## Avaliação de impactos do ciclo de vida

A etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)<sup>13</sup> consiste no exame do sistema de produto, do ponto de vista ambiental, a partir dos dados do inventário. Isso é feito por meio da análise dos potenciais impactos ambientais associados aos aspectos ambientais identificados na etapa de análise de inventário. O uso do termo *potencial* se deve ao caráter sistêmico da AICV, resultante da amplitude das faixas de variação espacial (geográfica) e temporal de ocorrência das interações entre o sistema de produto e o meio ambiente.

O primeiro passo para a realização da AICV é a **definição das categorias de impacto que serão consideradas**. As categorias usualmente selecionadas são as seguintes:

- **consumo de recursos naturais**: inclui recursos materiais e energéticos, tanto renováveis quanto não-renováveis;
- **aquecimento global** (também conhecido por **efeito estufa**): é provocado pelo acúmulo, na atmosfera, de determinados gases (por exemplo, gás carbônico e metano) que retêm parte da radiação infravermelha emitida pela Terra, provocando o aumento das temperaturas médias globais;
- **redução da camada de ozônio**: consiste na redução da quantidade de ozônio (O<sub>3</sub>) presente na estratosfera, por reação com alguns gases (como halocarbonos:

CFC11, CFC12, etc.), provocando a diminuição da capacidade que essa camada tem de filtração da radiação ultravioleta proveniente do Sol;

- *acidificação*: consiste no aumento do teor de acidez da atmosfera provocado pela emissão de gases ácidos, tais como óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, que são dissolvidos pela umidade atmosférica e retornam à crosta terrestre na forma de ácidos;
- *eutrofização* (ou *nutrificação*): consiste no acúmulo dos nutrientes nitrogênio e fósforo nos corpos d'água e nos solos, em decorrência da disposição de rejeitos que contêm esses elementos químicos;
- *formação fotoquímica de ozônio*: consiste na formação de ozônio nas camadas baixas da atmosfera por reações químicas entre óxidos de nitrogênio e alguns hidrocarbonetos leves (resultantes de emissões), em presença da radiação ultravioleta solar; e
- *toxicidade*: resultante da disposição de rejeitos tóxicos no meio ambiente; em geral, são consideradas em separado a toxicidade humana e a assim chamada *ecotoxicidade*, que pode ser aquática e terrestre.

Uma vez estabelecidas as categorias de impacto faz-se a *classificação*, que consiste em correlacionar os dados do inventário (aspectos ambientais) com os efeitos ambientais (categorias de impacto) para os quais cada aspecto pode, potencialmente, contribuir (como ilustrado na tabela 3). Assim, por exemplo, o aspecto ambiental *emissão de dióxido de enxofre* ( $SO_2$ ) é classificado como podendo contribuir potencialmente para categorias ambientais de acidificação e de toxicidade humana.

Com o objetivo de ilustrar a execução da etapa de AICV serão usados valores do inventário apresentados na tabela 2.

**Tabela 2: Inventário do ciclo de vida do superfosfato simples (SSP)**

Aspecto ambiental	Unidade	(Unidade/1.000 kg SSP)
<i>Emissões</i>		
Gás carbônico ( $CO_2$ )	kg	32,3
Monóxido de carbono (CO)	kg	0,020
Dióxido de enxofre ( $SO_2$ )	kg	0,526
Óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ )	kg	0,567

Fonte: Luiz Alexandre Kulay, Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições brasileiras – aplicação ao caso do superfosfato simples, dissertação de mestrado (São Paulo: Escola Politécnica-USP, 2000).

A tabela 3 mostra um exemplo de aplicação do procedimento de *classificação* em um estudo de ACV de um fertilizante fosfatado superfosfato simples (SSP), feita a partir dos dados da tabela 2.

**Tabela 3: Classificação de aspectos ambientais nas categorias de impacto**

Aspecto ambiental	Efeitos ambientais
CO <sub>2</sub>	PAG*
CO	PTH*
SO <sub>2</sub>	PAC*; PTH
NO <sub>2</sub>	PAC; PEu*

\* PAG (potencial de aquecimento global); PTH (potencial de toxicidade humana); PAC (potencial de acidificação); e PEu (potencial de eutrofização).

Na tabela 3 é possível constatar que um mesmo aspecto ambiental pode, potencialmente, contribuir para mais de um efeito. O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) exerce potencial contribuição tanto para a toxicidade humana quanto para a acidificação, assim como o óxido nitroso (NO<sub>2</sub>) pode contribuir para a acidificação e para a eutrofização.

Observa-se também que um mesmo efeito ambiental pode ter a contribuição de mais do que um aspecto ambiental. São os casos da acidificação, para a qual incidem as emissões atmosféricas de SO<sub>2</sub> e de NO<sub>2</sub>, e da toxicidade humana, que pode ter a contribuição do monóxido de carbono (CO) e do SO<sub>2</sub>.

Após a classificação é realizada a *caracterização*, procedimento que pode ser entendido como a quantificação dos resultados da etapa anterior da AICV.

Nessa fase é calculado, para cada uma das categorias de impacto selecionadas, um *indicador de categoria de impacto do ciclo de vida*<sup>14</sup> que mede a magnitude dos potenciais impactos ambientais decorrentes do ciclo de vida do produto.

Para calcular um indicador único de cada categoria de impacto é necessário converter os valores de todos os aspectos ambientais que contribuem para essa categoria a uma mesma base; isso é feito por meio da aplicação de *fatores de caracterização*.<sup>15</sup>

O estabelecimento dos fatores de caracterização é feito, sempre que possível, com base em modelos científicos que simulam os mecanismos por meio dos quais cada aspecto ambiental contribui para a categoria ambiental.

Elaborado o modelo, é definida para cada categoria uma substância-padrão em relação à qual são convertidas as quantidades equivalentes dos outros aspectos ambientais.

No caso, por exemplo, da categoria ambiental *acidificação*, o modelo adotado é baseado na capacidade de liberar prótons (H<sup>+</sup>) do aspecto ambiental em consideração. Assim, cada molécula de cloreto de hidrogênio (HCl) tem capacidade de liberar um próton enquanto cada molécula de SO<sub>2</sub> tem capacidade de gerar dois prótons. Isso significa que, do ponto de vista molar, o potencial de contribuição para a acidificação de 1 mol de SO<sub>2</sub> é o dobro do potencial de acidificação de 1 mol de HCl.

A substância adotada como padrão para a determinação dos fatores de caracterização, no caso da categoria ambiental acidificação, foi o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

Pela aplicação do modelo desenvolvido para essa categoria de efeito ambiental, foi determinado que 0,70 g de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) contribui para a acidificação tanto quanto 1 g de SO<sub>2</sub>, ou seja, o *fator de caracterização* do NO<sub>2</sub> é igual a 0,70 g de SO<sub>2</sub> equivalente/g de NO<sub>2</sub>.

Na tabela 4 são apresentados os fatores de caracterização para as categorias de efeitos ambientais associadas aos aspectos ambientais indicados na tabela 2.

**Tabela 4: Fatores de caracterização para algumas categorias de impacto ambiental**

Aspecto ambiental	PAG	PTH	PAC	PEu
CO <sub>2</sub>	1			
CO		0,1		
SO <sub>2</sub>		0,096	1	
NO <sub>2</sub>		1,20	0,50	0,13

Fonte: Centre of Environmental Science, Bosfine 2000, versão 2.02 (Leiden: Universidade de Leiden, 2001).

Conhecidos os fatores de caracterização é possível calcular, para cada categoria de impacto, as contribuições de cada um dos aspectos ambientais nela enquadrados, multiplicando-se o valor do aspecto pelo respectivo fator de caracterização. Dessa forma, as contribuições de todos os aspectos ambientais estarão expressas em uma mesma unidade (massa equivalente da substância-padrão) e sua soma corresponderá ao indicador de categoria de impacto. O conjunto dos indicadores de categoria de impacto é denominado *perfil ambiental* do produto. A tabela 5 mostra os valores dos indicadores de categoria de impacto e o perfil ambiental para o exemplo do SSP.

**Tabela 5: Indicadores de categoria de impacto de ciclo de vida do superfosfato simples**

Aspecto ambiental		PAG (kg CO <sub>2</sub> -eq/UF)	PTH (kg 40HB-eq/UF)	PAC (kg SO <sub>2</sub> -eq/UF)	PEu (kg 2D-47/UF)
	(kg ma/UF)				
CO <sub>2</sub>	32,3	32,3			
CO	0,020		0,002		
SO <sub>2</sub>	0,526		0,050	0,526	
NO <sub>2</sub>	0,567			0,283	0,074
Perfil ambiental		32,3	0,052	0,809	0,074

A análise do perfil ambiental poderia levar o leitor desavisado a concluir que a categoria de impacto ambiental mais afetada pelo ciclo de vida do SSP é o aquecimento global (corresponde ao maior valor do indicador de categoria). Essa comparação, no entanto, não pode ser feita, uma vez que os indicadores são medidos em unidades diferentes.

Para viabilizar a comparação entre os valores dos indicadores, pode ser feita a sua normalização, dividindo-se os valores indicadores por um valor de referência, que pode ser, por exemplo, o valor das emissões totais para uma dada área, que por sua vez pode ser global, regional ou local.<sup>16</sup> Observe-se que a escolha da referência a ser usada é subjetiva e não é feita em base científica. Como todas as outras decisões subjetivas feitas ao longo do estudo, a escolha deve ser apresentada de forma transparente no relatório final. A título apenas de ilustração, aparece indicado na tabela 6 a normalização realizada no estudo de ACV do SSP, usando como referência os valores globais das categorias ambientais, em 1990.<sup>17</sup>

Considerando-se os valores normalizados, é possível verificar que em termos relativos o principal efeito ambiental do ciclo de vida do SSP é a acidificação.

**Tabela 6: Normalização de valores**

Categoria	Valor global	Indicadores de categoria	Valor normalizado (ano*10 <sup>-12</sup> )
	Unidade	Unidade	
PAG	37,7*10 <sup>12</sup> kgCO <sub>2</sub> eq/ano	32,3kgCO <sub>2</sub> eq/UF	0,8567
PTH	1,67*10 <sup>11</sup> kg1,4DCBeq/ano	0,052kg1,4DCBeq/UF	0,0003
Pac	286*10 <sup>9</sup> kgSO <sub>2</sub> eq/ano	0,809kgSO <sub>2</sub> eq/UF	2,8286
PEu	149*10 <sup>9</sup> kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/ano	0,074kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/UF	0,4966

## Considerações finais

A ACV vem se tornando cada vez mais uma importante ferramenta da gestão ambiental talvez pelo fato de ser a única delas que permita, segundo uma abordagem sistêmica, tanto a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de um produto quanto a comparação ambiental de produtos que exerçam a mesma função.

A abordagem da ACV é feita de uma forma altamente estruturada, que envolve várias questões ambientais simultaneamente, além de ser baseada em sistemas quantificáveis, sendo, portanto, aparentemente uma técnica objetiva.

Apesar do potencial que representa para os tomadores de decisão, a ACV apresenta ainda algumas limitações que devem ser transpostas para que ela possa consolidar sua contribuição à sustentabilidade no planeta.



Houve época – meados da década de 1980 – em que a credibilidade da ACV foi posta em dúvida em razão, por exemplo, de diferentes estudos comparativos de mesmos produtos apresentarem resultados opostos. Ainda que houvesse acusações de má-fé, isso não necessariamente ocorria.

A preocupação surgida na comunidade da ACV levou a minuciosos estudos sobre a origem das diferenças, tendo sido constatado que, devido à complexidade da metodologia, os critérios adotados para definir os procedimentos de coleta de dados poderiam influir significativamente nos resultados finais.

Aliado a isso, verifica-se que a adoção desses critérios é ditada principalmente pelos objetivos e escopo do estudo. Ou seja, a definição sobre vários dos procedimentos a serem usados na execução dos estudos ainda é feita com base em critérios subjetivos e, como tais, sujeitos muitas vezes a inconsistências.

A solução paliativa usada atualmente como uma tentativa de contornar essa limitação encontra-se especificada na norma ABNT NBR ISO 14040, que dispõe como importante requisito a total e absoluta transparência na elaboração do relatório do estudo, o qual deve conter explicitamente todas as premissas e hipóteses adotadas ao longo da execução do estudo.

Nesse sentido, faz-se necessário um grande investimento intelectual no desenvolvimento e na consolidação de uma metodologia de execução de estudos de ACV que viabilize a obtenção de resultados consistentes e reproduzíveis, sem prejudicar o atingimento dos inúmeros e bastante distintos objetivos aos quais a ferramenta se presta.

Outro obstáculo que dificulta a maior difusão do uso da ACV é o ainda elevado custo de sua execução, o qual se deve, principalmente, ao número de dados a serem coletados.

Em muitos casos, o processo de coleta de informações acaba sendo inviabilizado por motivos diversos, tais como o desinteresse de algumas empresas ou de alguns setores produtivos, a preservação da confidencialidade do uso de determinados insumos e tecnologias, ou a reticência de muitas corporações com receio de despertar a atenção de agências ambientais e de organizações não-governamentais.

Uma solução proposta para atenuar a limitação relativa à coleta de dados e viabilizar a ACV é a disponibilização de *bancos de dados*. Esses bancos de dados são constituídos pelo inventário do ciclo de vida de elementos que são comuns aos ciclos de vida de muitos produtos. Como exemplos de elementos elegíveis para compor bancos de dados podem ser citados: energia (elétrica e térmica), materiais (aço, alumínio, polietileno, PVC, PET, cimento, vidro, papel) e transporte.

Ressalte-se que os bancos de dados têm que ter um caráter regional, uma vez que os inventários do ciclo de vida de um dado elemento constituinte de um banco de dados podem diferir significativamente de região para região.

Como exemplo, pode-se citar o caso da energia, elemento comum ao ciclo de vida de todos os produtos. Considerando-se as diferenças entre a matriz energética brasileira

e, por exemplo, a francesa, fica evidente que seria absurdo usar um banco de dados relativo à matriz energética francesa em estudos de ACV de produtos brasileiros.

A maioria dos *softwares* de apoio à execução de estudos de ACV disponíveis no mercado traz, incorporados, extensos bancos de dados. Dado o caráter regional dos bancos de dados, não é aconselhável o uso indiscriminado desses *softwares*.

Como ilustração e alerta a esse risco, vale citar um estudo de ACV de geração de hidreletricidade<sup>18</sup> no Brasil.

No referido trabalho foi adotado como modelo representativo do sistema de produto a usina de Itaipu e, dada a inexistência de bancos de dados brasileiros, empregou-se como recurso de suporte para a aquisição de dados um *software* de origem holandesa. A escolha desse *software* deveu-se, entre outros, ao fato de ele possibilitar, em certa medida, o acesso e a adaptação de alguns dos bancos de dados nele incorporados, visando assim à minimização das imprecisões decorrentes do uso de bancos de dados europeus.

Entre outras correções foi possível fazer a adaptação do banco de dados relativo ao inventário do aço (um dos principais materiais consumidos na construção da usina de Itaipu), substituindo o carvão mineral (que é o tipo de carvão usado para a fabricação do aço na Europa) pelo carvão vegetal (que é o usado no Brasil).

Esse exemplo ilustra a importância da questão da disponibilidade de bancos de dados regionais – e o quão crítica ela é – para a consolidação da ACV.

Como conclusão, fica a mensagem de que é bastante perceptível nos diversos segmentos da economia brasileira a intenção de incorporar a ACV na *caixa de ferramentas* de tomada de decisões estratégicas dos mais diversos setores. Uma das várias iniciativas (e talvez a mais significativa) que servem para comprovar essa afirmativa é a recente criação da Associação Brasileira do Ciclo de Vida. No entanto, para atingir esse importante objetivo devemos envidar uma coordenação de esforços no sentido de formar recursos humanos capacitados à execução de estudos de ACV e no sentido de construir o banco de dados brasileiro.