

# Revista de Graduação da Engenharia Química

ISSN 1516-5469

ANO VI No. 12 Jul-Dez 2003

## **Ecologia Industrial: Projeto para Meio Ambiente**

Milton Francisco Junior, Biagio F. Giannetti e Cecilia M. V. B. Almeida

Universidade Paulista

LaFTA – Laboratório de Físico-Química Teórica e Aplicada  
R. Dr. Bacelar, 1212, CEP 04026-002, São Paulo, Brasil

A Ecologia Industrial propõe uma nova abordagem ao projeto industrial de produtos e processos e a implantação de estratégias para a indústria visando otimizar o ciclo total de materiais, de material virgem, material acabado, componentes, sobras da fabricação e descarte final [1].

O Projeto para o Ambiente (Design for the Environment - DfE) é uma ferramenta da Ecologia Industrial e deve examinar todo o ciclo de vida do produto para propor alterações no projeto de forma a minimizar o impacto ambiental do produto desde sua fabricação até seu descarte. A incorporação do desenvolvimento do produto em seu ciclo de vida pode integrar a preocupação com o meio ambiente em cada etapa do ciclo de vida do produto, de forma a reduzir os impactos gerados durante este ciclo (Fig. 1). Desta forma, os projetistas, para estarem em posição de melhor contribuir com o surgimento de produtos ambientalmente amigáveis, devem conhecer o fluxo total dos materiais, desde a extração até a disposição final; desenvolver métodos e ferramentas para o projeto para o meio ambiente; pesquisar materiais que facilitem a reciclagem; desenvolver novas tecnologias e sistemas de produção. No caso dos processos, o projeto deve prever o impacto causado pela construção da planta, aquele devido à sua operação e, finalmente, o impacto relacionado à sua desativação.

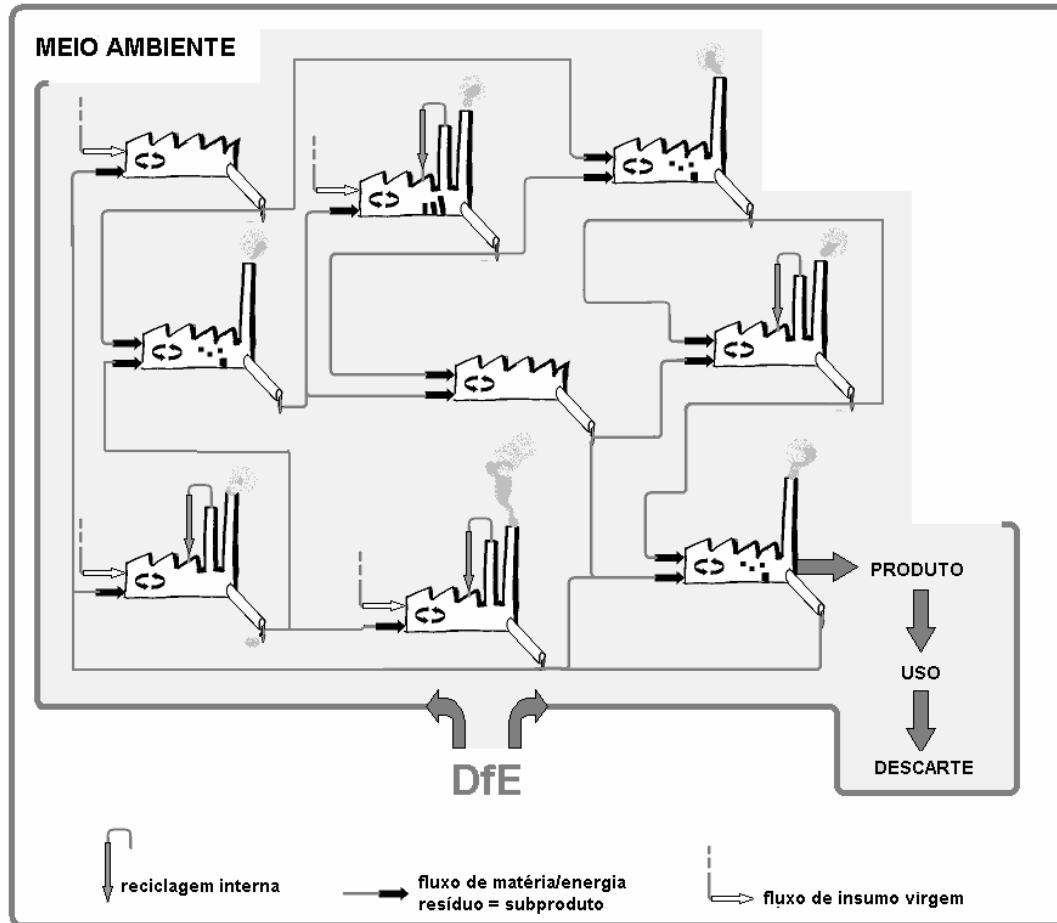


Figura 1. Representação de uma Eco-rede e a área de abrangência do Projeto para o Ambiente (DfE).

### Projeto de Processos

Os projetos de processos são mais abrangentes que os projetos de produtos e o sucesso de um processo bem planejado em geral tem grande importância para toda a indústria, já que deve operar por muitos anos. Também é comum que os processos interdependentes evoluam em conjunto. O processo, neste contexto, é definido como sendo muito mais do que o fluxo de sólidos, líquidos ou gases e energia numa instalação industrial. Uma vez que um processo é implementado em uma indústria, é difícil e caro mudá-lo e, às vezes, somente pequenas mudanças são possíveis [1].

Desta forma, além de levar em conta a instalação de um processo, sua operação deve ser cuidadosamente planejada de forma a utilizar tecnologias amigáveis ao meio ambiente. Como exemplo se pode citar o processo para obtenção do café descafeinado, que pode utilizar um processo aquoso com cloreto de metileno (processo tradicional) ou  $\text{CO}_2$  (processo que evita o uso de solvente) para extrair a cafeína dos grãos de café [2].

O processo convencional usa água quente para extrair a cafeína dos grãos (Fig. 2). A solubilidade da cafeína na água é baixa e não seletiva. Obtém-se, nesta primeira etapa um extrato que contém cafeína, mas também outros aromas do café. Desta forma, utiliza-se o cloreto de metileno para extrair a cafeína deste extrato e o restante dos aromas deve ser reincorporado aos grãos. Nesta operação, entretanto, ocorre inevitavelmente uma contaminação dos grãos com cloreto de metileno, o que é inaceitável e são necessárias etapas adicionais para purificar os grãos de café.

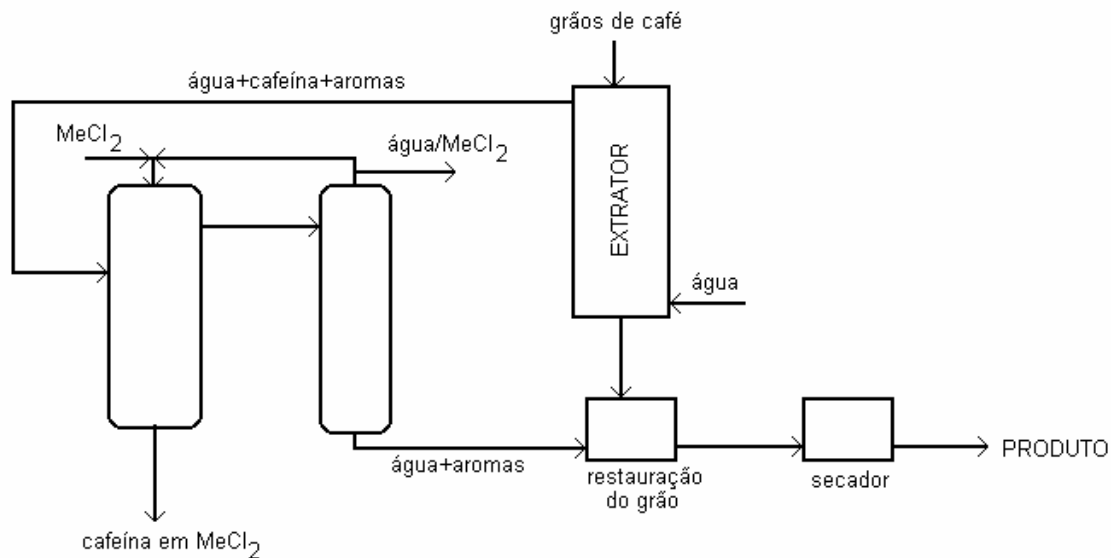


Fig. 2. Processo de extração da cafeína utilizando cloreto de metileno,  $\text{MeCl}_2$  [2].

A vantagem do processo que utiliza o  $\text{CO}_2$  é que este extrai seletivamente a cafeína (Fig. 3) sem alterar o aroma do café. O  $\text{CO}_2$  é retirado com água e pode ser reciclado à alta pressão. Este processo nada mais é do que uma lixiviação dos grãos de café por meio de um fluido super crítico, o  $\text{CO}_2$  a alta pressão. Também

não são necessárias etapas adicionais para purificação dos grãos o que torna este processo não só ambientalmente amigável, mas também, economicamente atrativo.

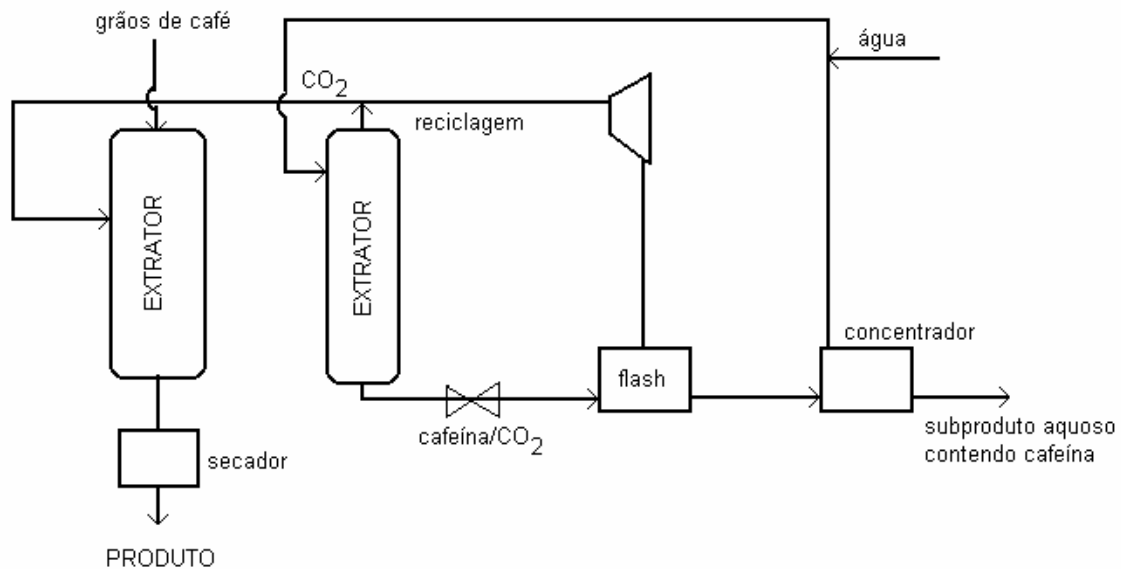


Fig. 3. Processo de extração da cafeína utilizando CO<sub>2</sub> [2].

### Projeto de Produtos

Os materiais fabricados nas plantas químicas são, muitas vezes, enviados para a manufatura de produtos, máquinas, equipamentos, etc. Nestes casos, o projetista pode escolher se vai usar madeira, plástico ou metal para o mesmo propósito e a decisão recai sobre várias questões, tais como custo, estética ou propriedade dos materiais utilizados. Os engenheiros de produto têm que considerar as interações entre a indústria e o meio ambiente na seleção de materiais, na escolha da embalagem, no impacto ambiental durante o uso do produto e na sua possível reciclagem da sua reciclagem.

Engenheiros de produto podem escolher combinações de processos existentes ou utilizar novos processos para o projeto de produto que minimizem o impacto ambiental e melhorem a relação industrial/meio ambiente. O ideal seria

desenvolver simultaneamente o processo e o produto, para que a oportunidade de integrar toda a cadeia industrial se torne maior.

O projeto tradicional de um produto visa satisfazer às necessidades de utilização do produto pelo consumidor e não leva em conta seu destino após o uso ou os impactos decorrentes de seu ciclo de vida. Pode, simplificada, incluir critérios como bom desempenho da sua função, fabricação eficiente e uso de técnicas e materiais apropriados, facilidade de uso e segurança, qualidades estéticas e visuais e boa relação custo/benefício.

A importância relativa desses critérios varia dependendo do tipo de produto e do consumidor ao qual este é direcionado. Sob este aspecto, o processo tradicional de desenvolvimento de produtos pode ser visualizado como constituída das seguintes etapas [3]:

- (1) identificação de oportunidades;
- (2) conceituação;
- (3) projeto preliminar ou ante-projeto e estudos de viabilidade;
- (4) desenvolvimento ou concepção, especificação e detalhamento;
- (5) qualificação técnica, econômica e de mercado.

Considerando-se o impacto ambiental que este produto pode causar durante seu ciclo de vida, o DfE pode contribuir com o surgimento de produtos ambientalmente melhores. Com base na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), pode-se iniciar o projeto de um produto com conhecimento do fluxo total dos materiais, desde a extração até a disposição final; pesquisar materiais que facilitem a reciclagem; desenvolver novas tecnologias e sistemas de produção, para que o produto seja amigável ao meio ambiente. O desenvolvimento do produto pode então ser direcionado com base nas seguintes considerações:

1. considerar ambientalmente todo o ciclo de vida do produto
2. escolher os materiais mais adequados, naturais ou não, com base na ACV
3. considerar o consumo de energia, maximizando o uso de fontes renováveis de energias
4. aumentar a vida do produto

5. usar o mínimo de material e evitar a utilização de materiais escassos
6. usar produtos recicláveis ou reutilizáveis, reduzindo ou eliminando o uso de materiais virgens
7. reduzir ou eliminar o uso de materiais tóxicos, inflamáveis e explosivos durante o ciclo de vida
8. reduzir ou eliminar o armazenamento e emissão de materiais perigosos
9. alcançar ou exceder as metas regulatórias
10. reduzir ou eliminar o uso de materiais ligados à degradação da camada de ozônio e às mudanças climáticas durante o ciclo de vida
11. melhorar a logística de distribuição minimizando a necessidade de transporte

O projeto para o ambiente inclui novas considerações no processo de desenvolvimento sem alterar, em princípio, sua estrutura. Essas considerações envolvem a busca de novos tipos de informação, como o impacto ambiental dos diferentes materiais, produtos e processos. A seleção de materiais deve considerar o uso de matéria prima renovável e as reservas disponíveis, dando-se ênfase à reciclagem. Considera-se aumentar o tempo de vida útil do produto, quão eficiente será o uso de energia e se, após o fim de seu ciclo de vida, o produto poderá ser reaproveitado. A tomadas de decisão são mais complexas já que consideram outros fatores como a opção entre atender requisitos ambientais ou outros requisitos do projeto, escolher estratégias adequadas para redução dos impactos ambientais do produto em detrimento de um possível aumento do custo, criar conceitos de produtos de baixo impacto ambiental [4].

O Projeto para o Ambiente deve ser visto como uma ferramenta que incorpora considerações ambientais no projeto de produtos, processos. Seu objetivo é prevenir a poluição e minimizar o uso de reservas e energia, já que durante o desenvolvimento do produto é possível prever e, possivelmente, evitar vários dos impactos ambientais negativos dos produtos.

Neste contexto há várias frentes para ação que podem ser classificadas como parte do DfX (Design for X), onde X é uma característica de um produto que deve

ser maximizada. Os DfX se caracterizam em buscar soluções que facilitem a montagem, desmontagem e reciclagem dos produtos, além das questões normalmente conhecidas em projeto, como a redução de custos, melhoria de eficiência, manutenção facilitada etc (Tab. 1). O DfE se integra neste conjunto de ações na busca de um melhor desempenho ambiental.

Tabela 1. Descrição dos DfX mais utilizados [1]

<b>Df</b>	<b>X</b>	<b>Dirigido a:</b>
<b>A</b>	Assembly (montagem)	facilitar a montagem, evitar erros de montagem, projetar peças multifuncionais, etc
<b>C</b>	Compliance (conformidade)	cumprir as normas necessárias para manufatura e uso, como por exemplo quantidade de substâncias tóxicas ou biodegradabilidade
<b>E</b>	Environment (ambiente)	diminuir as emissões e os resíduos do produto desde sua fabricação até seu descarte
<b>M</b>	Manufacturability (processabilidade)	integrar o design do produto com os processos de fabricação, como processamento e montagem
<b>O</b>	Orderability (ordenamento)	integrar o design no processo de manufatura e distribuição de forma a satisfazer às expectativas do consumidor
<b>R</b>	Reliability (resistência)	atender condições de operação em condições de ambiente agressivo, como meios corrosivos ou de descarga eletrostática
<b>SL</b>	Safety and Liability Prevention (segurança e prevenção de falhas)	atender aos padrões de segurança, evitar usos equivocados, prevenção de falhas e de ações legais delas decorrentes
<b>S</b>	Serviceability (utilização)	facilitar a instalação inicial, o reparo e a modificação em campo ou em uso
<b>T</b>	Testability (testabilidade)	facilitar testes tanto no processo de fabricação como em campo

A redução do uso de material é uma das principais estratégias do DfE. A redução do uso de recursos naturais incorporados no produto ou devido à sua utilização, a redução ou eliminação de resíduos gerados ao longo do seu ciclo de vida e no final da sua vida útil contribuem para a diminuição de impactos ambientais.

As estratégias mais usadas no desenvolvimento de produtos com esta finalidade incluem a extensão da vida útil do produto, de seus componentes e materiais e a redução do consumo de materiais e energia. A extensão da vida útil tem como objetivo prolongar o tempo de utilização do produto ou dos materiais nele incorporados. Para alcançar esse objetivo, o desenvolvimento do produto deve prever sua maior durabilidade, sua reutilização para a remanufatura, ou ainda, a reciclagem dos materiais o compõem. É importante observar que produtos duráveis não são necessariamente de baixo impacto ambiental. Grande parte do impacto ambiental gerado por um automóvel ocorre durante a sua vida útil e uma avaliação do ciclo de vida do veículo é sempre necessária para avaliar quais os pontos de maior impacto ambiental para estabelecer as prioridades do projeto. Entretanto, muitas partes dos veículos podem ser reutilizadas na fabricação de novos veículos ou recicladas para aproveitamento do material.

As estratégias de redução têm como objetivo minimizar o consumo de recursos naturais reduzindo o consumo de matérias-primas ou o consumo de energia ao longo do ciclo de vida do produto, ou ainda, reduzindo as emissões do produto que possam ser danosas para o meio ambiente. Quando não for possível reaproveitar o produto após seu uso, a incineração com recuperação de energia é uma das opções que pode ser aplicável desde que esgotadas as outras possibilidades economicamente viáveis de reaproveitamento. A contribuição do design nesta opção está limitada ao uso de materiais que não liberem poluentes tóxicos durante a queima. Finalmente, a última opção será o descarte do produto em um aterro sanitário e, neste caso, a contribuição do projetista será especificar o uso de materiais não tóxicos ou de rápida degradação.

A Ecologia industrial visa reduzir a utilização de recursos naturais por meio da desmaterialização, que é a redução relativa da quantidade de material por unidade de produto e do aumento da circulação de material no sistema antes do descarte final. O DfE pode contribuir nestes dois aspectos por meio de ações relativamente simples:

- (1) minimizar o uso de materiais nos produtos sem comprometer seu desempenho (ou de preferência melhorando o seu desempenho)



permite produzir com menor custo e aumentar a competitividade dos produtos no mercado;

- (2) a simplificação da estrutura e da forma do produto conduz com freqüência à redução do uso de materiais e pode ser obtida pela redução ou eliminação de características com funções somente estéticas desnecessárias para o funcionamento do produto;
- (3) a fabricação de produtos multifuncionais, como os computadores, pode contribuir para a redução do número de produtos e, conseqüentemente, para a redução da demanda por materiais e recursos naturais.

Uma outra forma de reduzir a demanda sobre os recursos naturais considerando o prolongamento do tempo de circulação dos materiais antes do descarte final é o reaproveitamento do produto ou dos materiais nele incorporados. Projetar para o reuso, a remanufatura e a reciclagem, nesta ordem de preferência, são escolhas que podem ser feitas durante o desenvolvimento do produto. Projetos para reuso e para remanufatura podem garantir que a maioria dos componentes será reutilizada. Neste caso, como se pretende que o produto e seus componentes manterão sua forma original, uma quantidade mínima de energia será consumida no processo.

O reuso pode implicar no prolongamento da vida útil do produto na sua função original, como por exemplo, o reuso de garrafas de vidro para cerveja que retornam ao fabricante, ou em seu aproveitamento em outras funções, como acontece com as embalagens de vidro na forma de copo, que são utilizados para o uso diário do consumidor.

A remanufatura ou reforma do produto prevê a desmontagem para separação e posterior utilização de peças e componentes. Estas peças e componentes poderão ser remontados em um novo produto, podendo desempenhar sua função original ou uma nova função. Quanto mais complexa for a montagem do produto, maior será o número de etapas para a desmontagem e conseqüentemente, mais difícil seu reaproveitamento. A facilidade de desmontagem pode ser prevista no

projeto, o que pode evitar o descarte total de um produto composto de vários componentes como opção preferencial [1].

Grandes empresas têm utilizado programas de DfE para projetar produtos e processos que facilitem o retorno do produto para a empresa, sua desmontagem para posterior remanufatura e reciclagem [5,6].

Estes programas de DfE têm como objetivo um produto totalmente reutilizável e/ou reciclável e que não produz resíduos durante o uso. Durante o projeto do produto devem ser criadas condições para que, na fase de manufatura, a quantidade de resíduos sólidos descartados em aterros seja reduzida. Da mesma forma, o uso de substâncias tóxicas pode ser evitado. A adesão a programas, como o Energy Star da EPA ou o Procel brasileiro, leva à diminuição de consumo de energia durante o uso do produto, assim como medidas tomadas durante o projeto podem evitar o uso de insumos na fase em que este se encontra em poder do consumidor. Por exemplo, um veículo pode ser projetado para operar com poucas trocas de óleo ou menor consumo de combustível.

Os programas de retorno de equipamento (takeback) para desmontagem e posterior remanufatura e reciclagem (Fig. 4), têm como objetivo o total reuso dos materiais para atingir o descarte zero com o fechamento do ciclo. Nestes programas considera-se ambientalmente preferível reutilizar praticamente todo o equipamento ou convertê-lo em novo equipamento com o mínimo possível de intervenções e substituições de partes. Posteriormente, se considera a reutilização de peças para a fabricação de novos equipamentos e, como última opção, a reciclagem de materiais para fabricação de novas peças.

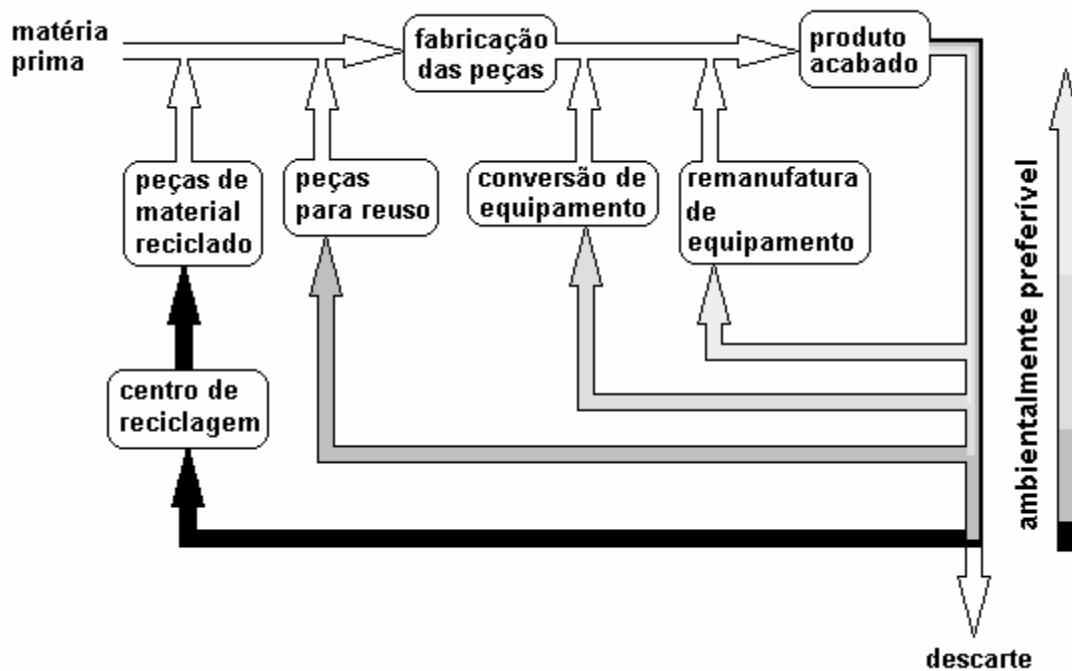


Fig. 4. Ações ambientalmente preferíveis para utilização de matérias primas na fabricação de produtos.

A reciclagem, como estratégia de projeto, procura escolher materiais que possam facilmente ser reinseridos nos ciclos produtivos após o seu uso em um determinado produto. A reciclagem exige a desmontagem dos produtos e a separação, limpeza e transformação dos componentes, sendo que o processo de fabricação de novos componentes a partir do material reciclado requer energia para a transformação e, em alguns casos, a adição de outros materiais. Todos esses fatores devem ser considerados no momento da concepção do produto juntamente com os custos para a reciclagem. O custo ambiental da reciclagem é, geralmente, maior que o de reuso ou da remanufatura, porém é menor que o da produção a partir de matérias-primas virgens.

Um exemplo de sucesso da reciclagem é o alumínio. O impacto ambiental da reciclagem do alumínio equivale a 10 % do impacto causado pela produção com materiais virgens, já que esta produção envolve a etapa da mineração que causa enormes danos ao ambiente [7]. Cabe ressaltar que nem todo material reciclável é necessariamente benéfico ao ambiente, pois transformação de alguns necessitar

grandes quantidades de energia para que se obtenha o nível de pureza desejada, como a separação dos materiais de componentes eletrônicos. Todos esses fatores devem ser considerados no momento da concepção do produto juntamente com os custos para a reciclagem.

Para que a reciclagem e a remanufatura sejam possíveis em produtos formados por muitos componentes, a separação dos materiais é muito importante para permitir o reuso e para evitar a mistura de materiais incompatíveis. O projeto para a desmontagem deve estar, também, vinculado à facilidade de manutenção do produto durante o uso, o que contribui para sua durabilidade. Consideram-se os custos da desmontagem como parte dos custos de reuso ou reciclagem e os custos e o impacto ambiental de descarte [8].

No desenvolvimento de um novo produto o DfE, que tem o objetivo de incorporar atributos ambientalmente amigáveis em todas as fases do processo, é de extrema importância. Para que o produto seja competitivo e vendável, estes atributos devem ser compatíveis com outros requerimentos como a manufacturabilidade e os custos. Muitas das inovações podem ser tanto economicamente como ambientalmente benéficas. A diminuição do consumo de energia, tanto na fase de fabricação como de uso, é exemplo de benefício econômico e ambiental. A diminuição no consumo de energia, ao contrário da crença comum que classifica a preocupação com o meio ambiente com um fator que aumenta o custo do produto, atua sinergicamente com outros fatores fundamentais do projeto como custos e desempenho durante o uso como os mostrados na tabela 2 [6].

Tab 2. Atributos considerados no projeto para o ambiente de um computador doméstico [6].

<b>Atributo</b>	<b>Projeto para o ambiente</b>
Conservação de energia	Consumo menor em acordo com o programa Energy Star ou Procel
Desmontagem	Sistemas simplificados que facilitam a desmontagem, minimizar o uso de parafusos e eliminar partes coladas
Separação	As peças de plástico maiores devem ser identificadas para separação, diminuir a quantidade de peças
Reuso	Considerar a reutilização de partes inteiras na manufatura de outro computador de mesmo modelo ou similar
Reciclabilidade	As peças de metal são recicláveis sem requerer a retirada de recobrimentos. O material plástico é reciclável com a utilização de tecnologias já existentes.
Upgrade	O projeto modular permite a inserção de placas de expansão e de memória adicional
Constituintes tóxicos	Recobrimentos a base de níquel devem ser eliminados. O plástico das partes externas não deve conter retardadores de chama e deve-se eliminar a necessidade de pintura, permitindo a reciclagem direta. Contaminantes como mercúrio e berílio devem ser eliminados
Conservação de reservas	Redução da massa de material utilizado, utilização de material reciclado especialmente nas partes internas

Dentre estes a conservação de energia, expressa como consumo de energia durante o uso do produto, é um importante indicador ambiental e tornou-se uma importante ferramenta de marketing (como a logomarca Energy Star utilizada em computadores ou o selo Procel utilizado no Brasil). Os benefícios da conservação são de fácil entendimento, pois reduz-se diretamente o custo de operação. De acordo com a EPA (Environmental Protection Agency – a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos) para cada kilowatt-hora de energia não usada evita-se a emissão de 680 g de CO<sub>2</sub>, 5.8 g de SO<sub>2</sub> e 2.5 g de NO<sub>x</sub>, o que resulta na redução de várias toneladas de emissões durante o ciclo de vida de um computador. Entretanto, deve-se sempre ressaltar que um produto eficiente quanto ao consumo de energia não é, necessariamente, um produto amigável ao meio ambiente. Há muitos outros aspectos que devem ser avaliados, incluindo os atributos mostrados na tabela 2.

A redução do consumo de energia tampouco se limita ao uso do produto. Com o conhecimento de todo o ciclo de vida do produto pode-se diminuir este consumo em várias etapas modificando o processo de fabricação, planejando a distribuição de forma a reduzir a energia gasta no transporte e utilizar fontes de energia alternativa, como a energia solar e a eólica [9].

Além disto, o projeto para o meio ambiente deve incluir considerações sistemáticas para o desenvolvimento de produtos e considerar a abrangência do possível impacto causado pelo produto (Tab. 3).

Tabela 3. Categorias de abrangência do impacto causados por produtos.

<b>Categorias</b>	<b>Exemplo de metas ambientais</b>
Empresa	<p>Reduzir ou eliminar o uso de materiais tóxicos, inflamáveis e explosivos durante o ciclo de vida.</p> <p>Reduzir ou eliminar o armazenamento e emissão de materiais perigosos.</p> <p>Alcançar ou exceder as metas regulatórias.</p> <p>Reduzir o consumo de energia durante o ciclo de vida</p>
Local	<p>Reduzir ou eliminar o uso de produtos químicos ligados à formação de fumaça, a descarga de produtos ligados à poluição das superfícies de água, a geração de resíduos sólidos e o uso de óleos durante o ciclo de vida.</p>
Regional	<p>Reduzir ou eliminar processos que envolvam descargas ácidas ou alcalinas, que disperse metais pesados, que use combustíveis que gere óxidos de enxofre e nitrogênio.</p> <p>Melhorar a logística minimizando a necessidade de transporte.</p>
Global	<p>Reduzir ou eliminar o uso de produtos químicos ligados à degradação da camada de ozônio durante o ciclo de vida.</p> <p>Reduzir ou eliminar a contribuição para as mudanças climáticas.</p> <p>Reduzir ou eliminar o uso de materiais de florestas virgens e regiões protegidas.</p> <p>Maximizar o uso de materiais e energias recuperadas, reduzir a utilização de materiais escassos e aumentar o uso de energia proveniente de combustíveis não-fósseis.</p>

## **Comentários**

O projeto para o ambiente é utilizado como ferramenta da Ecologia Industrial e deve examinar todo o ciclo de vida do produto para propor alterações no projeto de forma a minimizar o impacto ambiental do produto desde sua fabricação até seu descarte.

A interferência do projetista no ciclo de vida de um produto ou processo pode integrar a preocupação com o meio ambiente em cada etapa deste ciclo de vida, de forma a reduzir os impactos gerados. Durante o projeto muitas oportunidades poderão ser exploradas para controlar fluxos de matérias primas, emissões e materiais intermediários. As ações não serão restringidas à planta, mas também à manufatura, ao uso e ao descarte final de um produto. O resultado será um produto ambientalmente mais amigável, mas que ao mesmo tempo, atende às necessidades dos consumidores.

## **Referências**

- [1] T. E. Graedel e B. R. Allenby, "Industrial Ecology", Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [2] J. F. Brennecke e M. A. Stadtherr, *computer and Chem. Eng.*, 26 (2002) 307.
- [3] K. T. Ulrich e S. Eppinger, *Product Design Development*, McGraw-Hill Inc., USA, 1995.
- [4] UNEP, *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*. United Nations Environment Programme Industry and Environment, Paris, 1997, 41-42.
- [5] A. Stocum, Xerox Corporation, "Xerox Engineering Leadership" State of the Lakes Ecosystem Conference, p.12, Cleveland, EUA, 2000.
- [6] J. Fiksel, K. Cook, S. Roberts e Dani Tsuda, "Design for Environment at Apple Computer: A Case Study of the Power Macintosh 7200", *International Symposium on Electronics & the Environment*, Dallas, 1996.

[7] S. B. Billatos e N. A. Basaly, "Green technology and design for the environment", ed. Taylor & Francis, Washington, 1997.

[8] T. Harjula, "Design for disassembly and the environment", University of Rhode Island, USA, 1996, 109-114.

[9] P. Bural, "Green-ness is good for you", Design Council, London, 1994, 22-24.

[10] J. S. Cooper e B. Vigon, Life Cycle Engineering Guidelines, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory, Prepared by Battelle Memorial Institute, Contract No. CR822956, 1999.