

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ARMANDO RESENDE NETO

**Sustentabilidade, água virtual e pegada hídrica:
um estudo exploratório no setor bioenergético**

Porto Alegre

2011

ARMANDO RESENDE NETO

**Sustentabilidade, água virtual e pegada hídrica:
um estudo exploratório no setor bioenergético**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientador: Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2011

ARMANDO RESENDE NETO

Sustentabilidade, água virtual e pegada hídrica: um estudo exploratório no setor bioenergético

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Profa. Carla Schwengber. ten Caten, Dr.

Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora

Cláudia Viviane Viegas, Dr. (PRODOC/CAPES - UFRGS)

Istefani Carísio de Paula, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Marcelo Cortimiglia, Dr. (PDJ/CNPq - UFRGS)

Dedicatória

À Dra. Cristina Leite, pelo apoio sem o qual não teria concluído este trabalho.

Doubt whom you will, but never yourself.
Christine Bovee

AGRADECIMENTO

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

Desenvolvimento sustentável tem se tornado um dos termos mais populares na agenda de empresas e governos. Do relatório Brundtland de 1987 a 15ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – COP15 – em 2009, o tema tem recebido crescente atenção uma vez que os atuais padrões de consumo e produção são claramente insustentáveis dos pontos de vista social, econômico e ambiental. O presente trabalho revisou os principais conceitos, métodos e ferramentas ligados à inclusão de valores ecologicamente sustentáveis no projeto de produtos e em seu ciclo de vida. Além disso, buscou, com a aplicação de um método cada vez mais aceito na literatura, denominado Pegada Hídrica, investigar o impacto do setor de biocombustíveis sobre os recursos hídricos no Brasil. Ao estimar o conteúdo de água virtual presente nas fases agrícola e industrial do ciclo de vida dos biocombustíveis analisados, o presente trabalho também buscou contribuir com a produção de dados que poderão ser utilizados na construção de inventários de produtos que fazem uso de etanol e biodiesel em seu próprio ciclo de vida. Outra contribuição possível visa à economia de recursos naturais, já que dados quantitativos são necessários para permitir comparações e eventuais tomadas de decisão cujo objetivo resulta, em última análise, no aumento de produtividade e redução de custos para as empresas.

Palavras-chave: Sustentabilidade, água virtual, pegada hídrica, biocombustíveis

ABSTRACT

Sustainable development has become one of the most popular terms in the agenda of corporations and governments. From 1987's Brundtland report to the 15th United Nations Conference on Climate Change – COP15 – in 2009, the topic has received increasing attention since the current production and consumption patterns are clearly unsustainable from the social, economic and environmental point of views. This paper reviewed the main concepts, methods and tools for the inclusion of ecologically sustainable values in design and product life cycle. In addition, we attempted, by applying a method increasingly accepted in literature, called Water Footprint, to investigate the impact of the biofuels sector on water resources in Brazil. In estimating the virtual water content present in agricultural and industrial phases of the life cycle analysis of biofuels, this study also aimed to contribute to the production of data that could be used to build inventories of products that use ethanol and biodiesel in their own life cycle. Another possible contribution is aimed at saving natural resources, since quantitative data are needed to allow comparisons and possible decision-making aimed ultimately in increased productivity and reduced costs for businesses.

Keywords: Sustainability, virtual water, water footprint, biofuels

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
ARTIGO 1. A Inserção De Aspectos Ambientais No Desenvolvimento De Produtos: Conceitos, Metodologias E Ferramentas	18
ARTIGO 2. Avaliação Do Conteúdo De Água Virtual No Ciclo De Vida Do Biodiesel: Estudo Exploratório Em Uma Empresa Produtora Do Sul Do Brasil	38
ARTIGO 3. Bioenergia e água: uma comparação entre as Pegadas Hídricas do etanol e biodiesel produzidos no Brasil	58
CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a discussão acadêmica a respeito de desenvolvimento sustentável tem aumentado consideravelmente. Em grande parte, essa discussão se deve ao desordenado crescimento populacional, à escassez dos recursos naturais e à intensidade dos impactos ambientais provocados pelo homem. O tema tem recebido crescente atenção por parte de governos, empresas e organizações da sociedade civil, já que os atuais padrões de consumo e produção são claramente insustentáveis dos pontos de vista social, econômico e ecológico. Hoje existe consenso a respeito da impossibilidade de mudança nas regras pelas quais a natureza se guia e a importância da reformulação das atuais práticas ambientais.

A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro (WWF, 2011). Dessa forma, as três principais dimensões de sustentabilidade – ambiental, social e econômica – a partir da perspectiva da Engenharia de Produção, podem ser abordadas por meio do aumento da ecoeficiência, pelo desenvolvimento que estimule o trabalho humano e pela criação de modelos de negócio que promovam o desenvolvimento sustentável (SELINGER; MERTINS, 2007). Assim, produtos e serviços devem ser desenvolvidos de modo a contemplar as demandas ambientais, sociais e econômicas geradas durante todo seu ciclo de vida.

O ciclo de vida material de um produto hipotético, em sua forma ideal, é apresentado na Figura 1 com aplicação de estratégias de fim de vida que incluem, por exemplo, a reciclagem, a remanufatura e o reuso. Assim, são evidenciadas as interações das entradas e saídas entre o meio ambiente e as fases do ciclo de vida do produto (GUELERE FILHO et al., 2008).

O fluxo principal é composto pelas fases de extração da matéria-prima, processamento por indústrias de base, manufatura, uso e descarte, além dos fluxos de distribuição, logística e comercialização, não ilustrados. Cada uma dessas fases consome insumos e recursos, bem como energia e matérias-primas, gerando resíduos que devem ser devidamente tratados e dispostos ou, ainda, reaproveitados no processo produtivo, minimizando assim o impacto ambiental negativo tanto na disposição quanto no

consumo de novos recursos. Os impactos ambientais são gerados ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, da extração da matéria prima e manufatura à disposição final (NIELSEN; WENZEL, 2001; BAUMANN et al., 2002). A fase que apresenta o maior impacto ambiental ao longo do ciclo de vida depende do tipo de produto que está sendo analisado.

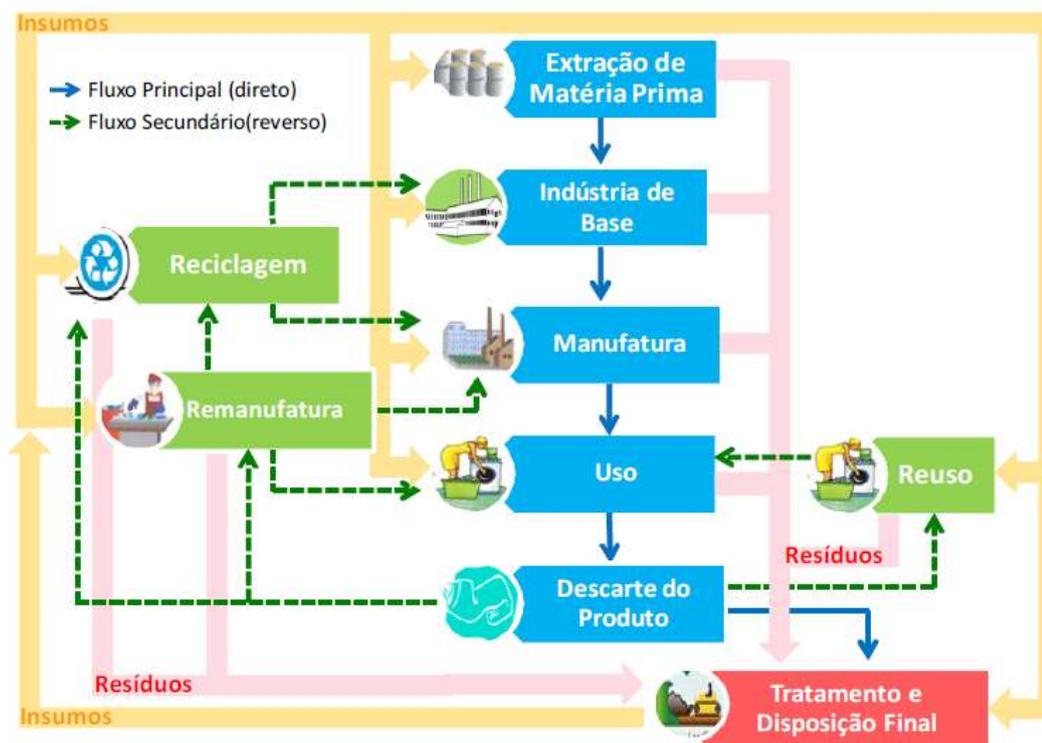


Figura 1. Visão de ciclo de vida de um produto hipotético, destacando o ciclo de material, das matérias-primas à disposição final. Fonte: ROZENFELD e FORCELLINI, 2009.

Dentro dessa nova configuração, as empresa passaram, inicialmente, a viver sob o conflito do desenvolvimento sustentável entre os sistemas econômico e natural, que vistos sob esta ótica, são excludentes. O grande desafio das organizações em manter e aumentar a competitividade e ao mesmo tempo atender às pressões e aos interesses dos *stakeholders* ficou ainda mais complexo com a inclusão da variável ambiental (LAVORATO, 2003).

Para Amaral (2003), as empresas contemporâneas não devem somente pensar em cumprir as leis ambientais a que estão submetidas. Elas devem, na medida do possível, serem proativas e planejarem suas atividades de uma maneira sustentável. A sociedade também espera que as empresas não só protejam o meio ambiente, como também levem em consideração a comunidade afetada direta ou indiretamente por suas atividades,

produtos e serviços. Para esse autor, trabalhar com conceitos de desenvolvimento sustentável é diferente do “*business as usual*”, pois demanda das empresas a capacitação dos empregados, dos contratados e da comunidade; a participação em projetos sociais e ambientais da região em que a organização está operando; além das tarefas cotidianas de proteção e conservação ambiental inerentes às atividades da empresa. Ainda, a empresa deve se manter lucrativa e agregar valor à economia do país no qual a organização está desenvolvendo seus negócios.

Dessa forma, a gestão ambiental se afirma como um aspecto essencial da governança corporativa, uma vez que o mercado financeiro tem valorizado empresas que integram à sua gestão as melhores práticas socioambientais, agregando valor e segurança a seus ativos e promovendo maior retorno aos acionistas. Assim, lucro e gestão ambiental não são mais conceitos excludentes, porém complementares. Por outro lado, as empresas que não têm uma política de responsabilidade socioambiental baseada em conformidade, qualidade e segurança, enfrentam desperdícios de materiais, água e energia, passivos ambientais e limitações ao crescimento dos negócios (SILVA et al., 2009; SARMENTO et al., 2007).

Portanto, métodos de avaliação da sustentabilidade representam um papel fundamental no sucesso de uma política de responsabilidade socioambiental, visto que elas indicam os pontos fracos e fortes das empresas em relação ao seu desempenho econômico, social e ambiental. A partir das informações de desempenho obtidas, podem-se, então, tomar decisões direcionadas à sustentabilidade.

1.1 Tema e Objetivos

Como pode ser observado pelo exposto acima, métodos de avaliação da sustentabilidade e, especialmente, indicadores e métricas, que são parte integrante desses métodos, necessitam ser desenvolvidos e aprimorados com o intuito de permitir que empresas e organizações possam se beneficiar de sua utilização. Métodos e indicadores para avaliação de sustentabilidade são, portanto, o tema dessa dissertação.

Como objetivo geral, esse trabalho visa explorar o tema sustentabilidade ambiental no âmbito do desenvolvimento de produtos e nos processos produtivos. Como objetivos específicos, procura (i) realizar uma revisão da literatura, buscando reunir e organizar

os principais conceitos, princípios, metodologias e ferramentas que abordam os aspectos ecológicos durante o processo de desenvolvimento de produtos; (ii) avaliar, quantitativamente, o impacto do uso dos recursos hídricos nos processos produtivos, mais especificamente, no novo contexto energético brasileiro dos biocombustíveis e (iii) a partir dos resultados encontrados em (ii), comparar a intensidade do uso dos recursos hídricos por diferentes biocombustíveis através de suas respectivas Pegadas Hídricas¹ em âmbito nacional.

1.2 Justificativa

O tema abordado por essa dissertação é relevante, na medida em que o mercado atual tem exigido que as empresas apresentem um equilíbrio entre os resultados econômicos obtidos e as posturas ambientais e sociais por elas adotadas. Vale notar que, atualmente, os conceitos de sustentabilidade vêm sendo incorporados pelas empresas junto às suas estratégias de negócio, não apenas por exigências regulamentais, mas com o intuito de gerar inovação, criar valor e principalmente conquistar vantagens competitivas (ESTY; WINSTON, 2009).

Do ponto de vista acadêmico, os objetivos se justificam pela incipiência da discussão a respeito dos impactos do uso dos recursos hídricos e a sustentabilidade dos processos produtivos no setor dos biocombustíveis. A utilização de metodologias e métricas, nesse sentido, é fundamental para que se reconheça a intensidade da utilização de água em toda a cadeia produtiva de um produto industrializado, e se possa dar o mesmo tratamento que recebem os demais fluxos de materiais e energia em uma avaliação de ciclo de vida.

Como exposto anteriormente, métodos de avaliação da sustentabilidade representam um papel fundamental no sucesso uma política de responsabilidade socioambiental. Dessa forma, a partir de uma perspectiva profissional, o presente trabalho se justifica ao

¹ A Pegada Hídrica de um produto, seja uma commodity, um bem ou um serviço, é igual ao volume de água doce utilizado para a produção daquele bem no local onde foi utilizado. Os resultados geralmente são indicados em m³/ano ou m³/capita/ano.

possibilitar que se aponte, em relação aos recursos hídricos, onde podem ocorrer melhorias, pois o que não pode ser claramente medido é difícil melhorar ou atingir (BÖHRINGER e JOCHEM, 2007).

1.3 Método

Quanto a sua natureza, essa pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, onde se objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Os métodos quantitativos apresentados podem ser empregados em empresas de diversos setores produtivos para avaliar a intensidade da utilização dos recursos hídricos durante o ciclo de vida de seus produtos.

Do ponto de vista da abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como pesquisa qualitativa e quantitativa. A base da pesquisa qualitativa é a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas. A pesquisa quantitativa, por sua vez, considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-los e analisá-los (SILVA; MENEZES, 2005). Nesse trabalho, a abordagem qualitativa foi utilizada na construção dos referenciais teóricos e nas entrevistas realizadas. Paralelamente, a abordagem quantitativa foi usada na elaboração e aplicação dos métodos para a avaliação do conteúdo de água virtual² e pegada hídrica de biocombustíveis.

Do ponto de vista de seus objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolveu o levantamento do estado da arte em relação aos conceitos, métodos e ferramentas que incorporam o tema da sustentabilidade aos processos produtivos e

² O cálculo do conteúdo de água virtual presente em um determinado produto agrícola se dá pelo somatório da evapotranspiração diária de uma determinada cultura (em mm/dia), durante todo o seu período de crescimento. Soma-se a este valor, quando ocorrer, o consumo de água realizado durante o processamento ou refino industrial.

entrevistas com pessoas que puderam contribuir com o problema pesquisado, como diretores e gerentes de produção.

Quanto à caracterização dos procedimentos do método de trabalho, utilizou-se de um estudo de caso em uma empresa produtora de biodiesel localizada no norte do estado do Rio Grande do Sul, envolvendo o estudo profundo e exaustivo de um objeto de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento. Também se fez uso de uma pesquisa bibliográfica, com a finalidade de permitir uma caracterização suficientemente abrangente do universo estudado (GIL, 1991).

O desenvolvimento dessa dissertação ocorreu a partir de cinco etapas. A primeira etapa envolveu um estudo teórico sobre sustentabilidade, buscando identificar os métodos e ferramentas que abordam os aspectos socioambientais durante o processo de desenvolvimento de produtos, o qual resultou na elaboração do primeiro artigo que compõe esta dissertação.

Após a observação de que a Análise do Ciclo de Vida era um tema emergente na literatura encontrada, procurou-se identificar pontos relacionados a esse assunto onde a discussão acadêmica ainda era prematura. Percebeu-se uma carência de estudos relacionados ao uso e quantificação dos recursos hídricos nos processos produtivos.

Consequentemente, um novo estudo teórico envolvendo água virtual e pegada hídrica foi realizado. Conjuntamente, procurou-se por empresas no setor químico ou farmacêutico para a realização de um estudo de caso, o qual acabou ocorrendo em uma empresa produtora de biodiesel.

A partir dos dados obtidos na literatura e no estudo de caso, foi realizada a redação do segundo artigo que compõe essa dissertação.

Para a confecção do terceiro e último artigo, foram utilizados os dados obtidos anteriormente e em outros estudos de caso encontrados na literatura, juntamente com estatísticas do Governo Federal com o intuito de estimar a pegada hídrica dos biocombustíveis no território nacional.

Por fim, a última etapa envolveu a redação desta dissertação e suas conclusões.

1.4 Delimitações do trabalho

O estudo de caso realizado neste trabalho envolveu apenas uma empresa e limitou-se, parcialmente, a análise dos dados obtidos a partir de entrevistas realizadas durante a pesquisa. Portanto, generalizações dos resultados encontrados devem ser feitas com reservas.

Embora a metodologia testada possa ser aplicada em outros produtos e processos, isso fugiria do escopo deste trabalho e, dessa forma, não será abordado. Para tal, certamente será necessário a realização de adaptações ao método, principalmente para produtos que não utilizem como matéria-prima insumos de origem vegetal ou animal, ficando entre as sugestões para trabalhos futuros.

Algumas suposições necessitaram ser feitas no decorrer dos artigos para que a aplicação dos procedimentos de cálculo pudesse ser viabilizada. Essas suposições são esclarecidas no corpo dos respectivos artigos. Portanto, os resultados encontrados são válidos à luz das suposições enunciadas.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, justificando a importância da sustentabilidade no setor produtivo. Este capítulo também apresenta os objetivos, o método de trabalho, a estrutura e as limitações do estudo.

O capítulo seguinte apresenta um artigo contendo o estado da arte sobre sustentabilidade e seus conceitos, métodos e ferramentas. Enquanto principal resultado, este artigo fornece uma revisão da literatura com o objetivo de introduzir o tema proposto.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo que compõe esta dissertação. Neste artigo é apresentado um método para a avaliação do volume de água utilizado durante o ciclo de vida de um biocombustível. A aplicação do método é ilustrada através de um estudo de caso realizado em uma empresa produtora de biodiesel localizada norte do estado do Rio Grande do Sul.

O quarto capítulo apresenta o terceiro artigo, abordando uma comparação entre os volumes de água consumidos durante o ciclo de vida do etanol e biodiesel no Brasil. Os resultados são baseados em dados obtidos das vinte maiores usinas produtoras desses combustíveis no país.

O quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido, esclarecendo as limitações da pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

A inserção de aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos: conceitos, metodologias e ferramentas

Armando Resende Neto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
armando.neto@ufrgs.br

José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
ribeiro@producao.ufrgs.br

1 Introdução

Desenvolvimento sustentável tem se tornado um dos termos mais populares na agenda de empresas e governos. Do relatório Brundtland de 1987 a 15ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – COP15 – em 2009, o tema tem recebido crescente atenção uma vez que os atuais padrões de consumo e produção são claramente insustentáveis dos pontos de vista social, econômico e ambiental.

De acordo com aquele relatório, a atividade industrial é fundamental para as economias contemporâneas e um indispensável motor para o crescimento das nações. Com o acelerado processo de globalização e livre comércio, as sociedades se organizaram de tal forma que muitas das necessidades humanas básicas, como alimentação e saúde, só podem ser supridas através de bens e serviços providos pela indústria (WCED, 1987).

Esta atividade industrial impacta diretamente os recursos naturais durante o ciclo de vida dos produtos deles derivados, desde a extração e exploração de matérias-primas, consumo de energia para a sua transformação em produtos, ao uso e eventual descarte pelos consumidores finais. Estes impactos, geralmente negativos, são resultados de processos geradores de poluição e resíduos, bem como da degradação e depleção dos recursos naturais (GUIMARÃES, 2006).

Visando a eliminação ou compensação destes impactos, a partir da perspectiva da Engenharia de Produção, as três principais dimensões de sustentabilidade – ambiental, social e econômica – podem ser abordadas por meio do aumento da ecoeficiência, pelo

desenvolvimento que estimule o trabalho humano e pela criação de modelos de negócio que promovam a sustentabilidade (SELINGER; MERTINS, 2007). Portanto, produtos e serviços devem ser desenvolvidos de forma a contemplar as demandas ambientais, sociais e econômicas geradas durante todo seu ciclo de vida.

Para Baumann et al. (2002), estas demandas são resultado das decisões tomadas durante as várias etapas do desenvolvimento de um produto. Muitos de seus atributos ambientais, por exemplo, podem ser corrigidos ou melhorados conforme o projeto é desenvolvido e se aproxima da linha de produção. Faz-se necessária, portanto, a aplicação de metodologias e ferramentas que possam auxiliar a atividade projetual na análise das possíveis consequências ambientais em cada fase do processo de desenvolvimento de um produto.

Inúmeros trabalhos que discorrem sobre o tema proposto são encontrados na literatura. Entre eles, podem-se citar algumas abordagens seguidamente referenciadas como o Ecodesign, *QFD for Environment*, Avaliação do Ciclo de Vida e Análise de Efeitos Ambientais. Uma classificação para trabalhos, porém, é pouco discutida entre os autores (BAUMANN et al., 2002). Desta forma, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão da literatura, buscando reunir e organizar os principais conceitos, princípios, metodologias e ferramentas que abordam os aspectos socioambientais durante o processo de desenvolvimento de produtos, com o intuito de identificar as propostas existentes, suas possíveis aplicações e lacunas.

O foco detalhado desta revisão será a Avaliação do Ciclo de Vida, pois será utilizada como plano de fundo para a construção dos demais artigos que compõe essa dissertação.

Vale notar que, atualmente, os conceitos de sustentabilidade vêm sendo incorporado pelas empresas também às suas estratégias de negócio, não apenas por exigências regulamentais, mas com o intuito de gerar inovação, criar valor e principalmente conquistar vantagens competitivas (ESTY; WINSTON, 2009).

Este texto está organizado conforme segue. A próxima seção apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para a busca e organização dos modelos e

ferramentas identificados na literatura, os quais são apresentados na seção de Referencial Teórico. Na seção seguinte, Resultados e Discussão, é apresentada uma classificação das abordagens existentes e suas possíveis aplicações e limitações. Por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

2 Procedimentos Metodológicos

Este trabalho se apóia em uma revisão bibliográfica, que pode ser classificada pela sua natureza aplicada, de abordagem qualitativa, com o objetivo amplo de explorar e mapear o estado da arte referente a inserção de aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos e nos processos produtivos. O estudo foi realizado a partir de artigos localizados através das bases de dados ISI Web of Knowledge, Scopus, Science Direct e SciELO cruzando os termos “*sustainability*”, “*tools*”, “*life cycle*”, “*environment*”, “*ecodesign*”, “*design for environment*”, “*product development*”, “*industrial ecology*” e “*cleaner production*” e seus equivalentes em português. A busca não foi limitada por data. Trabalhos publicados nos principais congressos brasileiros de Engenharia de Produção dos anos de 2007 a 2009 também foram consultados. Foram utilizados ainda, artigos e outras referências encontrados a partir das referências dos artigos obtidos nas bases de dados. A forma de organização do material coletado e sua justificativa são apresentadas na próxima seção.

3 Referencial Teórico

Nos últimos anos, a discussão acadêmica a respeito de crescimento sustentável tem aumentado consideravelmente. No contexto de desenvolvimento de produtos, diversos conceitos, metodologias e ferramentas foram apresentados buscando auxiliar o projetista a incorporar e mensurar as demandas e os impactos ambientais criados durante o ciclo de vida dos produtos. Baumann et al. (2002) sugeriram uma classificação para os trabalhos que tratam deste tema, a partir de uma perspectiva da Engenharia. Segundo esses autores, os trabalhos podem ser divididos em: “*frameworks*, diretrizes e *checklists*; ferramentas para ranqueamento; *softwares* e outros sistemas inteligentes; ferramentas analíticas; e ferramentas organizacionais”.

Esta seção apresenta uma classificação dos trabalhos de forma análoga ao Ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) utilizado na melhoria de processos. Visando analisar a literatura correspondente às atividades de planejamento (*Plan*), operacionalização (*Do*) e avaliação (*Check*), o levantamento do estado da arte está organizado em três classificações principais: (i) *frameworks* ou princípios, conceitos e paradigmas que guiam o pensamento projetual; (ii) métodos concebidos com o intuito de operacionalizar os princípios abordados no primeiro item e (iii) métodos utilizados para medir e avaliar o efeito e impacto ambiental dos produtos desde o projeto ao destino final.

3.1 *Frameworks*

Nesta primeira classificação, de maneira análoga à fase inicial do ciclo PDCA, se enquadram os trabalhos que abordam estruturas conceituais, princípios e paradigmas criados para guiar o projetista a incorporar, de uma maneira geral, os aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos. A seguir são apresentados as metodologias mais comumente citadas na literatura.

3.1.1 Ecodesign. Segundo Glavič et al. (2007), Ecodesign, ou *Design for Environment*, pode ser entendido como o processo de desenvolvimento de produto que contabilize o ciclo de vida completo de um produto e considere os aspectos ambientais em todas as etapas de um processo, procurando obter produtos com o menor impacto ambiental possível durante seu ciclo de vida. Pode-se dizer que estes processos buscam, em última análise, a aplicação do conceito de ecoeficiência ao desenvolvimento de produtos, minimizando os impactos ambientais e a intensidade do uso de recursos a um nível capaz de permitir a recuperação dos sistemas naturais dos quais estes recursos foram extraídos. O Ecodesign, de acordo com Hill (1993), está baseada em oito princípios, os quais visam: (i) manufatura sem a geração de resíduos perigosos, (ii) uso de tecnologias limpas, (iii) redução das emissões químicas, (iv) redução do consumo de energia do produto, (v) uso de materiais recicláveis e não-perigosos, (vi) uso de materiais reciclados e reuso de componentes, (vii) projeto visando a desmontagem e (viii) reuso do produto ou reciclagem ao final do ciclo de vida. Estes princípios devem ser buscados juntamente com outras prioridades e objetivos tradicionais consideradas durante o desenvolvimento de um produto, como durabilidade, qualidade, ergonomia e custos, por exemplo.

3.1.2 Projetos para X. De forma similar à metodologia *Design for Environment*, outros *Designs for X* – ou Projetos para X – relacionados à sustentabilidade podem ser encontrados na literatura. Entre eles estão Projeto para Desmontagem, Projeto para Remanufatura e Projeto para Reciclagem. Estas metodologias estão focadas em estratégias para o fim do ciclo de vida, no qual um produto não mais satisfaz as necessidades do usuário, seja por falha ou desgaste ou por uma mudança nas preferências e hábitos do consumidor. Entre estas estratégias estão, em ordem crescente de impacto ambiental: o reuso direto, sistema produto serviço, recondicionamento, remanufatura, reciclagem e descarte. O Projeto para Desmontagem busca, já nas fases iniciais de planejamento, possibilitar que um produto seja facilmente desmontado e suas partes reutilizadas, remanufaturadas ou recicladas ao final de sua vida útil. Esta abordagem pode ser vista como precursora ou paralela à remanufatura e reciclagem, as quais têm por objetivo criar um ciclo fechado de materiais em uma cadeia produtiva (Hauschild, 2005).

Por definição, o processo de remanufatura consiste na coleta de um produto ou componente usado, verificação de sua condição e reposição de peças quebradas, gastas ou obsoletas por peças novas ou recondicionadas, mantendo a identidade e funcionalidade original do produto. De acordo com Zwolinski et al. (2006), a remanufatura reduz o uso de matérias-primas e energia necessários para a fabricação de um novo produto. Do ponto de vista econômico, é uma estratégia interessante, pois preserva o valor agregado durante as fases de projeto e fabricação. Ambientalmente, amplia a vida útil de um produto e uma menor quantidade de material é necessária para atender uma mesma demanda do usuário. Pigosso et al. (2010) discutem alguns métodos de ecodesign com ênfase em estratégias para o fim do ciclo de vida e, em especial, na remanufatura. Os métodos apresentados incluem, geralmente, mais de uma estratégia para o fim do produto, já que nem todos os componentes podem ser reutilizados ou remanufaturados. Para esses autores, a reciclagem é um processo focado especificamente na recuperação de materiais e deve ser prevista e utilizada apenas quando todas as demais alternativas não sejam economicamente viáveis.

3.1.3 The Natural Step. A organização não governamental sueca The Natural Step propõe um *framework* que visa auxiliar as organizações a integrar o desenvolvimento sustentável ao planejamento estratégico, sendo um complemento às ferramentas e metodologias de sustentabilidade, como a avaliação do ciclo de vida ou os sistemas de gestão ambiental. Embora não atenda diretamente as questões projetuais, seus conceitos podem também ser aplicados ao desenvolvimento de produtos. Baseia-se em uma avaliação integrada da situação atual em que se pretende atuar e na determinação da visão futura de sucesso por meio de uma metodologia chamada *backcasting*. Este *framework* consiste em três componentes: (i) o funil, em uma metáfora para o problema da não-sustentabilidade, isto é, o declínio na capacidade da biosfera em manter os atuais padrões de produção e consumo (Figura 1); (ii) as quatro condições naturais do sistema para uma sociedade sustentável, como a diminuição da extração de substâncias da crosta terrestre e o uso justo e eficiente dos recursos para o suprimento das necessidades humanas básicas e (iii) estratégias para a implementação. Um maior aprofundamento desta abordagem pode ser encontrado em Robèrt (2000) e TNS (2010).

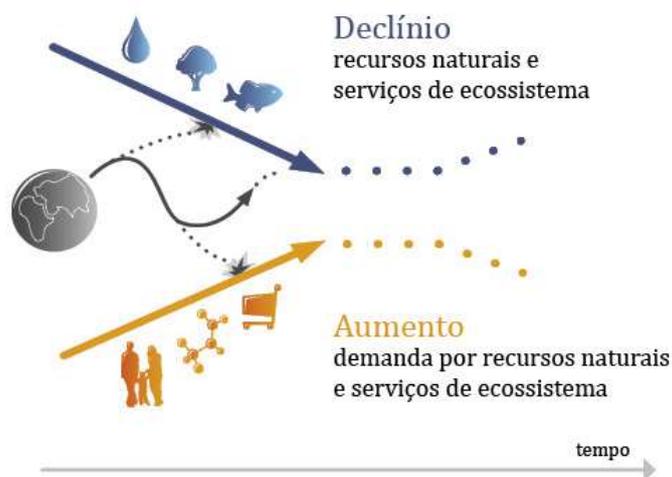


Figura 1. O funil, fundamento do The Natural Step. Adaptado de TNS (2010).

3.1.4 Ecologia Industrial. De uma maneira similar ao The Natural Step, a Ecologia Industrial propõe linhas gerais a serem seguidas no desenvolvimento de produtos e processos. Estes princípios requerem que um sistema industrial seja visto não como algo isolado de seu ambiente, mas em sintonia com ele, buscando identificar, entender e modificar seus elos econômicos e materiais a fim de reduzir a retirada de energia e matérias primas das reservas naturais e o descarte de resíduos no meio-ambiente (GIANNETTI; ALMEIDA, 2006). Ehrenfeld (1997) propõe um *framework* para o

desenvolvimento de produtos e processos baseados em quatro princípios gerais, a partir dos conceitos da Ecologia Industrial: (i) controle das “rotas metabólicas” dos processos industriais e do uso de material; (ii) criação de ciclos fechados em ecossistemas industriais; (iii) desmaterialização e (iv) sistematização dos padrões de uso energético. Diferentemente dos princípios da Produção Mais Limpa ou da Prevenção da Poluição, a Ecologia Industrial busca, por sua visão sistêmica, um uso mais eficiente dos serviços de ecossistema.

3.1.5 ZERI. O acrônimo ZERI, do inglês, *Zero Emission Research Initiative*, descreve um esforço de pesquisa e geração de iniciativas sobre o tema “emissão zero”. Proposto pela Universidade das Nações Unidas, em 1994, representa o entendimento de que todo e qualquer resíduo de um processo deverá constituir-se em insumo de outro processo, num encadeamento capaz de agregar valor em todas as etapas e trocas. Da mesma forma que a Ecologia Industrial, seus autores discutem que o escopo da Produção Mais Limpa não deve permanecer dentro dos limites de cada empresa, pois deste modo, nunca se chegará a emissão zero de forma economicamente viável. É necessária a formação de *clusters* de indústrias para assegurar que os conceitos de Produção Mais Limpa se estendam de uma forma sistêmica, mimetizando a hierarquia natural dos ecossistemas na esfera antropogênica (PAULI, 1997; SEIFFERT; LOCH, 2005; KUEHR, 2007).

3.1.6 Química Verde. Diversos trabalhos e correntes de pensamento também contribuem, em suas respectivas áreas de atuação, para a questão da sustentabilidade em produtos, serviços e processos. Entre elas, pode-se destacar a Química Verde, uma iniciativa da Agência de Proteção Ambiental estadunidense em virtude da grande quantidade de resíduos oriundos dos diferentes segmentos da indústria química, como refino de petróleo e farmacêutico. Dados da literatura sugerem que para cada quilograma de um fármaco produzido sejam gerados de 25 a 100 quilogramas de resíduos (TUCKER, 2006; SHELDON, 2007). Buscando solucionar desafios como este, a Química Verde, também conhecida por Química Limpa, propõe o uso eficiente de matérias primas – preferencialmente renováveis, eliminação da produção de resíduos e evitar o uso de reagentes tóxicos e perigosos, assim como solventes do processo de manufatura e na aplicação de produtos químicos. Esta filosofia está baseada em doze princípios que guiam o projeto, produção e uso de produtos e processos químicos (SILVA et al., 2005).

3.2 Métodos de Operacionalização

De acordo com Lindahl (2005), pode se perceber uma tendência para um rápido desenvolvimento de métodos e ferramentas de Ecodesign, visto o número considerável de artigos publicados nos últimos anos que abordam o tema. Neste contexto, são discutidos, a seguir, os métodos de operacionalização academicamente mais relevantes. Estes métodos têm por objetivo integrar os frameworks abordados acima ao processo de desenvolvimento de produto.

3.2.1 Guias Gerais e Checklists. As ferramentas de linhas gerais e *checklists* estão entre as primeiras a serem adotadas em uma empresa que inicia uma abordagem de Ecodesign, uma vez que os projetistas já as utilizam regularmente como suporte às tomadas de decisão (KNIGHT; JENKINS, 2009). Elas são capazes de fornecer um amplo apoio ao processo de desenvolvimento de produtos e também podem auxiliar em questões pontuais em determinadas etapas do PDP, como por exemplo, na seleção sustentável de materiais (LJUNGBERG, 2007).

Nesta categoria, podem-se destacar as *Dez Regras de Ouro*. Luttrupp e Lagerstedt (2006) sugerem uma versão genérica deste conjunto de coordenadas utilizado em empresas e no meio acadêmico: (1) não utilize substâncias tóxicas e utilize ciclos fechados quando uma substância tóxica é necessária; (2) minimize o consumo de energia e recursos na fase de produção e transporte; (3) use características estruturais e materiais de alta qualidade para minimizar o peso dos produtos; (4) minimize o consumo de energia e recursos na fase de uso, especialmente em produtos cujo impacto ambiental negativo é significativo durante esta fase; (5) estimule o conserto e a introdução de melhorias (*upgrades*), especialmente para produtos sistema-dependentes; (6) promova uma longa vida útil, especialmente em produtos cujo impacto ambiental é significativo fora desta fase; (7) invista em materiais de melhor qualidade, tratamento de superfícies ou arranjos estruturais para proteger o produto de sujidades, corrosão e desgaste; (8) facilite a introdução de melhorias, reparos e a reciclagem através de rotulagem, módulos, pontos de quebra e manuais; (9) promova a introdução de melhorias, reparos e reciclagem através do uso de materiais simples, reciclados e em pequeno número e não utilize materiais compostos ou ligas metálicas; e (10) use o menor número de

elementos de fixação possível e utilize parafusos, adesivos ou soldas de acordo com o cenário de ciclo de vida.

Guias Gerais como as Dez Regras de Ouro podem funcionar como um ponto de partida na criação de *Checklists* para atender demandas específicas de uma empresa ou de um determinado tipo de produto. Em um estudo de caso, Vezzoli e Sciamia (2006) relatam um passo a passo na criação de *checklists* e manuais a partir de métodos gerais de Ecodesign, visando a implementação de uma abordagem de Ciclo de Vida nos projetos de uma empresa produtora de máquinas automáticas para a venda de bebidas e lanches.

3.2.2 Quality Function Deployment for Environment (QFDE). Esta ferramenta é utilizada para incorporação de aspectos ambientais (voz do consumidor ambiental e métricas ambientais de engenharia) no QFD com a finalidade de atender de forma simultânea os requisitos ambientais e tradicionais de qualidade durante as fases iniciais de desenvolvimento de um produto. As modificações propostas por Masui et al. (2001) incluem a realização do QDF em quatro etapas. De maneira análoga ao QFD tradicional, as primeiras duas etapas identificam os componentes principais que devem ser priorizados no projeto do produto quando requisitos ambientais e tradicionais são considerados. As fases III e IV foram concebidas para que os projetistas pudessem verificar a possibilidade de melhorias para cada componente e avaliar os efeitos destas mudanças.

Rahimi e Weidner (2002) também propõem modificações ao QFD de forma a acrescentar preocupações sustentáveis a esta ferramenta. A primeira modificação inclui a incorporação da voz do consumidor ambiental ao QFD através da Matriz de Avaliação de Produto Ambientalmente Responsável. A segunda modificação diz respeito à forma de execução da ferramenta. Para esses autores, quando executado em sua forma tradicional, o QFD não permite a avaliação e comparação de alternativas de projeto em níveis inferiores contra os requisitos de níveis superiores, como os requisitos do produto ou do consumidor. Isto ocorre porque a execução das matrizes é realizada de forma sequencial, em uma única direção. Para superar esta limitação, os autores propõem uma redefinição na sequência tradicional das Casas da Qualidade com o objetivo de incluir a estruturação dos objetivos e alternativas de projeto em uma

hierarquia de decisão multi-objetiva. Deste modo, uma tomada de decisão mais sustentável entre as diversas alternativas de projeto é facilitada.

3.3 Métodos de Avaliação

Segundo Chehebe (2002), todo produto, independente de sua composição, provoca um determinado impacto no meio ambiente, seja em função de seu processo produtivo, das matérias-primas que consome ou devido ao seu uso e descarte. Esse impacto deve ser considerado nas inúmeras decisões feitas por empresas, indivíduos, administração pública e órgãos reguladores. Informações quali e quantitativas sobre o desempenho ambiental dos diferentes sistemas de produção se fazem portanto, necessárias. Por esta razão, inúmeras ferramentas e indicadores para avaliação e comparação dos impactos provocados foram desenvolvidos a partir da década de 70 (FINNDEVEN, 2009). Avaliação do ciclo de vida, análise dos efeitos ambientais, balanço de massa, energia, fator x e pegada ecológica são alguns exemplos dessas ferramentas. Nessa seção será dada ênfase à avaliação do ciclo de vida (ACV) devido à sua maior utilização frente aos demais métodos.

3.3.1 Avaliação do Ciclo de Vida. Este método de avaliação, também citado como “do berço ao túmulo”, considera os aspectos ambientais e potenciais impactos de um produto ou serviço durante toda a sua vida – da produção e aquisição de matérias primas, manufatura, uso e descarte (ver Figura 2). É o método mais difundido entre pesquisadores e empresas para a avaliação de impactos ambientais de produtos, processos e serviços, assim como na definição de políticas públicas ambientais por parte de governos e agências regulatórias (ARVANITOYANNIS, 2008). De acordo com a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental – SETAC, a ACV é assim definida:

Processo para avaliar as demandas ambientais associadas a um produto ou atividade através da identificação e quantificação da energia e materiais usados e resíduos lançados ao meio-ambiente; para avaliar o impacto do uso desses materiais, energia e descartes ao meio-ambiente; e para identificar e avaliar oportunidades para a realização de melhorias segundo a ótica ambiental. A avaliação inclui todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade, contemplando a extração e processamento de matérias-primas; produção; transporte e distribuição; uso, reuso e manutenção; reciclagem; e decarte final (SETAC, 2010).

Uma ACV típica é composta por quatro fases: (i) determinação do objetivo e escopo da ACV; (ii) inventário do ciclo de vida (ICV); (iii) avaliação do impacto do ciclo de vida

(AICV); e (iv) interpretação, produção de relatórios e revisão crítica da ACV (ABNT, 2006). Sua estrutura é regulamentada no Brasil, através das normas da série NBR ISO 14040:2006. A norma 14040, em particular, especifica a estrutura geral, princípios e requisitos para conduzir e relatar estudos de avaliação do ciclo de vida, não incluindo porém, as técnicas de avaliação em detalhes. Um breve detalhamento dos objetivos de cada uma das etapas e suas normas é apresentado a seguir (IBICT, 2009; HAUSCHILD, 2005).

Objetivos e Escopo. Nesta primeira fase, o objetivo e escopo da análise são bem definidos para assegurar que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo estabelecido. A função a ser desempenhada pelo sistema-produto é meticulosamente descrita em termos qualitativos e quantificadas através de uma unidade funcional, que define o fluxo de referência de produtos, isto é, provê um valor de referência pelos quais os dados de entrada e saída são normalizados (ABELE, 2005).



Figura 2. Ciclo de vida típico de um produto – do berço ao túmulo.
Fonte: Adaptado de Embalagem Sustentável (2010).

Análise do Inventário do Ciclo de Vida. Na etapa seguinte, também normatizada pela NBR ISO 14041, informações de entrada (materiais, energia, etc) e saída (resíduos, emissões,

etc) para todos os processos dentro dos limites do sistema são coletadas e compiladas em um inventário, apresentado os impactos associados a uma unidade funcional.

Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida. A terceira fase do estudo, especificada pela norma NBR ISO 14042, visa interpretar os impactos ambientais do sistema sob análise nas denominadas “áreas de proteção” da AICV: saúde humana, meio ambiente - natural e antropogênico - e recursos naturais (FINNVEDEN et al., 2009). O procedimento de AICV se dá em quatro passos e é ilustrado pela Figura 3.

- (i) Seleção das categorias de impacto e classificação. Nesta etapa, cada uma das emissões do inventário é avaliada em função de sua contribuição para as categorias definidas, como por exemplo, aquecimento global ou eutrofização de corpos d’água;
- (ii) Caracterização. Na sequência, o impacto individual de cada emissão é modelado de acordo com seu mecanismo de ação sobre as áreas de proteção e expresso em uma unidade comum às demais contribuições para que os valores possam ser agregados e totalizados;
- (iii) Normalização. Nesta etapa, as diferentes categorias de impacto para uma mesma emissão sejam trazidas a uma escala comum para que possam ser confrontadas. A normalização permite que se relacionem os impactos desta emissão em relação à poluição total, por exemplo; e
- (iv) Ponderação. Na etapa anterior, a compreensão dos resultados é aprimorada, porém, nenhum julgamento final pode ser feito uma vez que nem todos os impactos são considerados com a mesma importância. Neste último passo, os diferentes impactos são ranqueados de acordo com sua importância relativa (HAUSCHILD et al., 2005; CHEHEBE, 2002).

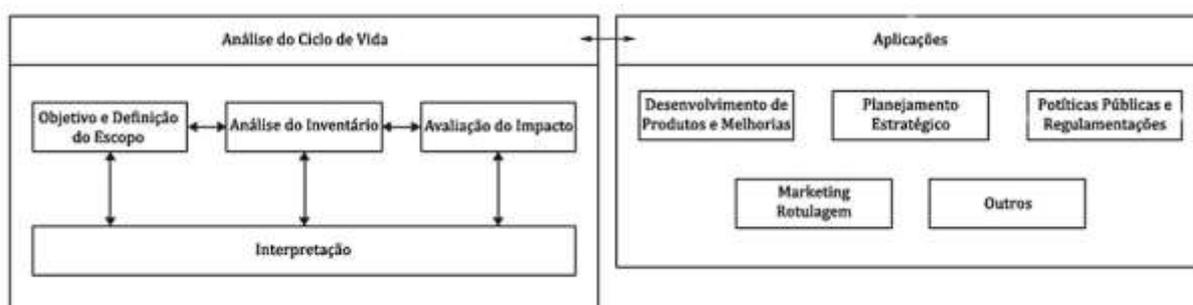


Figura 3. Fases e aplicações de uma ACV. Fonte: NBR ISO 14040.

Interpretação do ciclo de vida. Esta fase, normatizada pela NBR ISO 14043, define um procedimento sistemático para identificar, qualificar, conferir e avaliar as informações dos resultados do inventário do ciclo de vida ou avaliação do inventário do ciclo de vida, facilitando a interpretação do ciclo de vida para criar uma base onde as conclusões e recomendações serão materializadas no Relatório Final. A interpretação pode também sugerir que uma nova iteração seja realizada com o objetivo de revisão ou alteração do escopo, da coleta de dados para o inventário e da avaliação de impacto, permitindo que as incertezas sejam reduzidas. A Figura 3 apresenta as quatro fases de uma ACV e suas interrelações.

Por se tratar de uma análise que requer uma grande quantidade de dados – oriundos de inúmeros processos – para sua execução, ferramentas computacionais robustas se fazem necessárias para manipular o volume de informação gerado no estudo. Rodrigues et al. (2008) apresentam uma descrição dos principais softwares citados na literatura sobre ACV. A principal contribuição desses programas se dá na fase de análise do inventário, o que permite um processamento de dados mais ágil e imparcial, garantindo assim, uma maior confiabilidade dos relatórios finais.

A produção dos inventários é uma das fases mais trabalhosas da ACV, já que dados específicos dos inúmeros setores produtivos são por vezes escassos. Além disso, informações disponíveis em um determinado país não são válidas em outras regiões do globo devido a diferentes matrizes energéticas, sistemas de transporte e origem das matérias primas, por exemplo (FINNVEDEN, 2008). Para solucionar esse desafio, diversas nações tem construído bancos de inventários nacionais visando adequar as informações à realidade local.

A limitação acima exposta, juntamente com a carência de pessoal adequadamente capacitado são duas das principais razões para a baixa difusão da ACV em países em processo de industrialização. No Brasil, os estudos e aplicações sobre ACV estão em fase inicial de desenvolvimento. Desde 2002, a Associação Brasileira de Ciclo de Vida busca desenvolver um banco de dados nacional com os inventários de materiais, produtos e processos produtivos mais relevantes ao país, além de capacitar equipes de diversos setores visando a ampliação do ICV brasileiro (MACHADO; CAVENAGUI, 2009).

Visando abreviar a complexidade de uma análise completa do ciclo de vida de um sistema-produto, métodos alternativos têm sido propostos para simplificar e reduzir a quantidade de recursos necessários para a realização de uma ACV, principalmente nas fases iniciais de projeto, quando alternativas conceituais são propostas e avaliadas.

Sousa e Wallace (2006) desenvolveram um sistema de classificação automático de produtos para auxiliar os projetistas a prever o desempenho ambiental de seus produtos ainda em fase conceitual. Gonzales (2000; 2004) e Curzon (2007) relatam os esforços de uma indústria farmacêutica no desenvolvimento de uma metodologia abreviada de ACV para uso nos estágios iniciais de pesquisa e desenvolvimento. De maneira similar a Sousa e Wallace, os autores lançam mão de ferramentas como a análise de componentes principais e hierarquia de clusters para agrupar materiais com perfis de impacto similares, com o intuito de prever o desempenho ambiental das rotas sintéticas sob análise.

Arvanitoyannis (2008) apresenta uma extensa revisão com 29 estudos de casos de ACV em sistemas de produção de alimentos. Para uma discussão mais profunda sobre os avanços metodológicos e limitações dessas ferramentas, recomenda-se a leitura de Finnveden (2008).

4 Discussão

As principais fases do processo de desenvolvimento de produtos (PDP), de acordo com Rozenfeld et al. (2006), estão representadas na Figura 4. Durante cada uma dessas fases, diversos aspectos como requisitos técnicos, ergonômicos, econômicos e ambientais do produto são levados em consideração. O produto final é, portanto, resultado de um *trade-off* entre os diversos requisitos estabelecidos em cada fase. Desta maneira, o potencial para melhorias do desempenho ambiental de um sistema-produto é maior nas fases iniciais do PDP, quando as soluções conceituais para o atendimento desses requisitos ainda são discutidas (NIELSEN; WENZEL, 2002).

Hauschild et al. (2004) atentam para o fato de que, embora os métodos de avaliação ambiental sejam válidos e extensamente utilizados, por vezes podem falhar ao não

observarem os impactos originados pelo produto que podem sofrer influência de outros, gerando cumulatividade, ou então se projetando no tempo, assim como podem falhar na otimização de seu desempenho ambiental quando vistos, justamente, de uma perspectiva de ciclo de vida. Ocorre que, seguidamente, busca-se aperfeiçoar o projeto do ponto de vista da reciclagem ou desmontagem, por exemplo, quando na realidade, o fator de maior impacto pode estar relacionado ao consumo de energia necessário para operar o produto. Portanto, o foco e as demandas apresentadas durante o desenvolvimento de um produto devem ser baseados no entendimento do impacto de todo seu ciclo de vida.

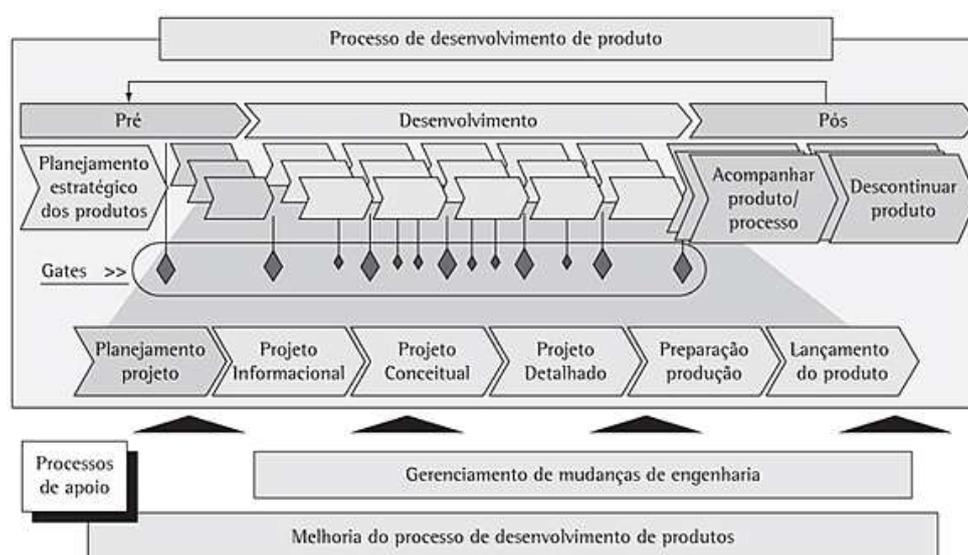


Figura 4. O modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produto.
Fonte: ROZENFELD, 2006

Diversos trabalhos apontam para os fatores de sucesso e obstáculos na implementação do Ecodesign, entre os quais se pode citar o espaço existente entre os proponentes do Ecodesign e aqueles que têm por função a sua operacionalização. É sugerido que uma variedade de fatores sociológicos, psicológicos, emocionais e até mesmo intangíveis, possuem um papel importante na implementação do ecodesign, especialmente nas primeiras etapas do PDP, nas quais a disseminação de informações é fundamental (BOKS, 2006).

As abordagens, conceitos, metodologias e ferramentas apresentadas na seção anterior têm por objetivo principal atender às demandas ambientais oriundas de processos e

produtos. Sustentabilidade, todavia, só pode ser atingida se houver um equilíbrio entre suas três dimensões: ecológica, econômica e social.

A sustentabilidade econômica de um sistema-produto ou serviço é, em última análise, a razão pela sua existência. Ferramentas que atendam a esta dimensão da sustentabilidade, a partir de uma perspectiva de ciclo de vida estão disponíveis na literatura e vem sendo usadas há muitos anos, porém fogem do escopo deste trabalho. Korpi e Ala-Risku (2008) apresentam uma análise sistemática sobre aplicações da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida. Silva e Amaral (2008) discorrem a respeito dos custos relacionados à prevenção e manutenção da qualidade ambiental nos processos produtivos.

Já a discussão a respeito da dimensão social de produtos, processos e empresas tem ganhado importância nos últimos anos. Diferentemente de uma análise ambiental de ciclo de vida, onde a unidade fundamental do sistema-produto é o processo produtivo, uma análise social de ciclo de vida tem como centro a empresa e seus respectivos impactos frente aos *stakeholders*. Dreyer et al. (2006) sugerem uma quarta área de proteção denominada “Dignidade Humana e Bem-Estar”. Impactos sobre esta área podem ser negativos como em uma análise ambiental – exploração de mão-de-obra, trabalho infantil, discriminação, etc – e também positivos – criação de postos de trabalho, injeção de capital em uma comunidade, etc. Esses impactos devem ser evitados ou promovidos, conforme causem danos ou tragam benefícios aos empregados, comunidade local e à sociedade (HAUSCHILD et al., 2008).

5 Conclusão

Atualmente, a sustentabilidade ambiental oferece importantes oportunidades para o setor produtivo na geração de valor e inovação, visto que a sociedade revela crescente conscientização para este tema. O presente trabalho revisou os principais conceitos, métodos e ferramentas ligados à inclusão de valores ambientalmente sustentáveis no projeto de produtos e em seu ciclo de vida.

Os *frameworks*, como Produção Mais Limpa, Ecodesign, *The Natural Step* e Ecologia Industrial, propõem aos projetistas um novo paradigma ao sugerirem uma nova

abordagem de pensamento projetual que inclua em suas decisões os futuros impactos ambientais provocados pelos produtos do berço ao túmulo.

As ferramentas como QFDE, As Dez Regras de Ouro e Análise de Efeitos Ambientais são capazes de trazer ao nível operacional as ideias e valores propostos nos *frameworks*. Inúmeras ferramentas e metodologias estão disponíveis na literatura e vêm sendo incorporada na rotina das empresas. Não há ainda, porém, um consenso ou padronização no uso destas práticas durante o desenvolvimento de produtos, uma vez que este processo ainda está em consolidação.

Uma das áreas na qual houve maior avanço talvez tenha sido nas métricas e mecanismos de avaliação do desempenho ambiental dos processos produtivos. A Análise do Ciclo de Vida de produtos e serviços tem ganhado grande repercussão na literatura especializada, pois possibilita aos gestores uma tomada de decisão com maior segurança, já permite analisar, com dados quantitativos, todos os processos envolvidos na manufatura de um produto.

Ferramentas e métricas de sustentabilidade são tanto melhores e mais eficientes quanto mais adequadas ao contexto em que se aplicam. Assim, o melhor seria a elaboração dessas ferramentas a partir do desdobramento dos princípios e conceitos de sustentabilidade ao invés do uso de sistemas que, embora já consolidados pela literatura, nem sempre se adequam à realidade dos processos ou sistemas que se desejam tornar “sustentáveis”. Por outro lado, deve-se avaliar também o custo do desenvolvimento de métricas perante a adaptação ou simplesmente a adoção das métricas de modelos já existentes.

A construção de uma sociedade baseada em valores sustentáveis é um grande desafio a ser vencido. Um dos primeiros passos pode ser dado pela indústria de bens de consumo através da inclusão e multiplicação em seus processos, produtos e *stakeholders* das dimensões de sustentabilidade econômica, social e ambiental.

Referências

ABNT. *Norma Técnica NBR ISO 14040:2006*. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=21726>>. Acesso em: 10/12/2009.

ARVANITOYANNIS, I. ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines In: _____. *Waste Management for the Food Industries*. Burlington, Elsevier Academic Press, 2008. Cap. 3, p. 97-132.

BAUMANN, H.; BOONS, F.; BRAGD, A. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 10, p. 409-425, 2002.

BOKS, C. The soft side of ecodesign. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 1346-1356, 2006.

CHEHEBE, J. R. B. *Análise do ciclo de vida de produtos: uma ferramenta gerencial da ISO 14000*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

EHRENFELD, J.R. Industrial ecology: a framework for product and process design. *Journal of Cleaner Production*, v. 5, n. 1-2, p. 87-95, 1997.

EMBALAGEM SUSTENTÁVEL. Disponível em: <<http://embalagensustentavel.com.br/wp-content/uploads/2010/01/ciclo-vida.gif>>. Acesso em: 10/11/2010.

ESTY, D.; WINSTON, A. *O Verde que Vale Ouro*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FINNVEDEN et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, v. 91, p. 1-21, 2008.

GIANNETTI, B.F.; ALMEIDA, C.M.V.B. *Ecologia industrial: conceitos, ferramentas e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

GLAVIČ, P.; LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, p. 1875-1885, 2007.

GUIMARÃES, L.B. A Ecologia no Projeto de Produto: Design Sustentável. In: GUIMARÃES, L.B., *Ergonomia de Produto*. Porto Alegre: FEENG, 2006.

HAUSCHILD, M.Z.; JESWIET, J.; ALTING, L. Design for environment - Do we get the focus right? *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 1-4, 2004.

HILL, B. Industry's integration of environmental product design. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. *Anais*, p. 64-68, 1993.

IBICT. *Série ISO - Avaliação do Ciclo de Vida*. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/normas>>. Acesso em: 05/11/2009.

KNIGHT, P.; JENKINS, J. Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, p. 549-558, 2009.

KORPI, E.; ALA-RISKU, T. Life cycle costing: a review of published case studies, *Managerial Auditing Journal*, v. 23, n. 3, p. 240-261, 2008.

KUEHR, R. Towards a sustainable society: United Nations University's Zero Emissions Approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, p. 1198-1204, 2007.

LINDAHL, M. Designer's utilization of and requirements on Design for Environment (DfE) methods and tools. *Proceedings of the fourth international symposium on environmentally conscious design and inverse manufacturing*, p. 224-231, 2005.

LJUNGBERG, L. Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, v. 28, p. 446-479, 2007.

LUTTROP, C.; LAGERSTEDT, J. Ecodesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 1396-1408, 2006.

PAULI, G. Zero emissions: the ultimate goal of cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, v. 5, n. 1-2, p. 109-113, 1997.

PIGOSSO, D.C.A.; ZANETTE, E.T.; GUERELE FILHO, A.; OMETTO, A.R.; ROZENFELD, H. Ecodesign methods focused on remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, p. 21-31, 2010.

ROBÉRT, K-H. Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable developments, and to each other? *Journal of Cleaner Production*, v. 8, p. 243-254, 2000.

SEIFFERT, M.E.; LOCH, C. Systemic thinking in environmental management: support for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 13, p. 1197-1202, 2005.

SELINGER, G.; MERTINS, K. Sustainability in Production Engineering. In: 4th BMBF Forum For Sustainability. *Apresentação*. Leipzig, 2007. Disponível em: <<http://www.fona.de/en/5068>>. Acesso em 10/12/2009.

SETAC. *Life Cycle Assessment (LCA)*. Disponível em: <<http://www.setac.org/node/32>>. Acesso em 05/01/2010.

SHELDON, R. The E Factor: fifteen years on. *Green Chemistry*, v. 9, n. 12, p. 1273-1283, 2007.

SILVA, F.M.; LACERDA, P.S.B.; JONES JUNIOR, J. Desenvolvimento sustentável e química verde. *Química Nova*, vol. 28, n. 1, pp. 103-110, 2005.

SILVA, P.R.S.; AMARAL, F.G.A. Análise de Custos Ambientais em Processos Industriais. *Produto & Produção*, vol. 9, n. 2, p. 91-105, 2008.

TNS – The Natural Step. *Our approach*. Estocolmo, 2010. Disponível em: <<http://www.thenaturalstep.org/en/our-approach>>. Acesso em 04/01/2010.

TUCKER, J. Green Chemistry, a Pharmaceutical Perspective. *Organic Process Research & Development*, v. 10, p. 315-319, 2006.

WCED - World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>. Acesso em 10/12/2009.

ZWOLINSKI, P.; LOPES-ONTIVEROS, M.A. BRISSAUD, D. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 1333-1345, 2006.

Avaliação do conteúdo de água virtual no ciclo de vida do biodiesel: estudo exploratório em uma empresa produtora do sul do Brasil

Armando Resende Neto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
armando.neto@ufrgs.br

José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
ribeiro@producao.ufrgs.br

1 Introdução

A crescente avidez global por energia, as incertezas relacionadas à indústria petrolífera e suas reservas finitas, somadas ao preocupante aquecimento global e seus efeitos no clima e no modelo social em que vivemos resulta na busca por novas fontes de energia alternativas ao petróleo e seus derivados (YANG; SONG, 2008).

Entre as alternativas que se apresentam como solução para aliviar esse impasse estão os biocombustíveis. Diversos países já os produzem e comercializam em grande escala, entre os quais se destacam o etanol a base de amido de milho nos Estados Unidos, ou elaborado a partir da cana-de-açúcar no Brasil, e o biodiesel fabricado a partir do óleo de colza, majoritariamente na Alemanha e França (SOLOMON, 2010).

No Brasil, a demanda crescente por etanol para a frota doméstica é resultado de incentivos governamentais à produção e utilização desse combustível. Iniciado com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), ainda na década de 70, com o objetivo de estimular a substituição da gasolina por álcool e, em consequência, reduzir a dependência do país em relação à importação de petróleo. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2010), em seu último Balanço Energético Nacional, o país produziu no ano de 2009 mais de 26 milhões de metros cúbicos de etanol.

Substitutos nacionais para o óleo diesel também já eram um tema de interesse do governo ainda no tempo da implantação do Proálcool. Porém, o desenvolvimento do setor de biodiesel é bastante recente. Em 2004, o país apresentou o Programa Nacional de Produção do Biodiesel (PNPB), cujas diretrizes centrais são: (i) sustentabilidade e promoção de inclusão social; (ii) garantia de preços competitivos, qualidade e

suprimento do produto; e (iii) utilização de diferentes fontes oleaginosas cultivadas nas diversas regiões do país (FERRAZ FILHO, 2009; BRASIL, 2011). Em 2010, passados apenas seis anos após a implantação do programa, 2.396.955 m³ de biodiesel foram produzidos no país (ANP, 2011).

À primeira vista, os problemas da dependência do petróleo e seus fatores políticos parecem poder ser resolvidos com a produção de biocombustíveis em larga escala, que ainda trazem outros benefícios ecológicos e sociais. Ecologicamente, os biocombustíveis conseguem diminuir os impactos climáticos relacionados à emissão de dióxido de carbono, pois grande parte do CO₂ produzida pela sua queima é removida da atmosfera com o crescimento das culturas utilizadas na própria produção dos biocombustíveis, em um ciclo virtuoso. Socialmente, são fonte de trabalho e renda para pequenos e grandes empresários agrícolas.

Os aspectos positivos acima citados escondem, porém, sérios problemas e desafios a serem vencidos. A demanda por grandes quantidades de terra para o plantio das culturas utilizadas como matéria-prima dos biocombustíveis, por exemplo, apresenta um potencial risco de conflito com a produção e o preço dos alimentos, além de provocar importante perda de biodiversidade na transformação de áreas de floresta ou outros biomas em áreas agrícolas (PETROU; PAPPIS, 2009).

A crescente substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis pode também intensificar ainda mais a demanda por recursos hídricos, uma vez que grandes quantidades de água se fazem necessárias para a produção das matérias-primas de origem vegetal. Essas culturas agrícolas consomem, geralmente, diversas ordens de magnitude mais água do que as fontes de energia tradicionais em seu processo produtivo. Igualmente, a poluição dos aquíferos e cursos d'água é exacerbada pela lixiviação de fertilizantes, pesticidas e sedimentos (GOPALAKRISHNAN et al., 2009; FINGERMAN et al, 2010).

Dessa forma, o tema deste artigo é o impacto do uso dos recursos hídricos nesse novo contexto energético. Mais especificamente, para a necessidade de informações detalhadas sobre a demanda de água relacionada à produção de biocombustíveis. Uma abordagem possível é chamada Água Virtual e diz respeito ao consumo total – direto e indireto – de água durante o ciclo de vida de bens ou serviços.

O presente artigo apresenta um estudo de caso e tem por objetivo avaliar, de forma quantitativa, o conteúdo de água virtual presente no biodiesel produzido por uma empresa localizada no sul do Brasil, a partir de dados coletados nas circunstâncias da produção, isto é, sem que se faça uso de estimativas ou médias históricas.

Esse texto está organizado conforme segue. A próxima seção apresenta um breve Referencial Teórico sobre biocombustíveis, avaliação do ciclo de vida e água virtual. Na sequência, são descritos os Procedimentos Metodológicos utilizados para a coleta e processamento dos dados obtidos. A seção seguinte apresenta os resultados e as reflexões sobre os achados e o método de avaliação. Por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

2 Referencial Teórico

A seguir são apresentadas as definições e bases teóricas sobre as quais se estende esse trabalho.

2.1 Avaliação do Ciclo de Vida

Esse método de análise de impactos ambientais, também frequentemente citado como “do berço ao túmulo”, considera os aspectos ambientais e potenciais impactos de um produto ou serviço durante toda a sua vida – da produção e aquisição de matérias primas, manufatura, uso e descarte. É o método mais difundido entre pesquisadores e empresas para a avaliação de impactos ambientais de produtos, processos e serviços, assim como na definição de políticas públicas ambientais por parte de governos e agências regulatórias (ARVANITOYANNIS, 2008). De acordo com a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental – SETAC, a ACV é assim definida:

Processo para avaliar as demandas ambientais associadas a um produto ou atividade através da identificação e quantificação da energia e materiais usados e resíduos lançados ao meio ambiente; para avaliar o impacto do uso desses materiais, energia e descartes ao meio ambiente; e para identificar e avaliar oportunidades para a realização de melhorias segundo a ótica ambiental. A avaliação inclui todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade, contemplando a extração e processamento de matérias-primas; produção; transporte e distribuição; uso, reuso e manutenção; reciclagem; e descarte final (SETAC, 2011).

Uma ACV típica é composta por quatro fases: (i) determinação do objetivo e escopo da ACV; (ii) inventário do ciclo de vida (ICV); (iii) avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV); e (iv) interpretação, produção de relatórios e revisão crítica da ACV (ABNT, 2006). Sua estrutura é regulamentada no Brasil, através das normas da série NBR ISO 14040:2006. A norma 14040, em particular, especifica a estrutura geral, princípios e requisitos para conduzir e relatar estudos de avaliação do ciclo de vida, não incluindo, porém, as técnicas de avaliação em detalhes. (IBICT, 2009; HAUSCHILD, 2005).

A produção dos inventários é uma das fases mais trabalhosas da ACV, já que dados específicos dos inúmeros setores produtivos envolvidos no processo são por vezes escassos. Além disso, informações disponíveis em um determinado país não são válidas em outras regiões do globo devido a diferentes matrizes energéticas, sistemas de transporte e origem das matérias primas, por exemplo (FINNVEDEN, 2008). Para solucionar esse desafio, diversas nações têm construído bancos de inventários nacionais visando adequar as informações à realidade local. Desde 2002, a Associação Brasileira de Ciclo de Vida busca desenvolver um banco de dados nacional com os inventários de materiais, produtos e processos produtivos mais relevantes ao país, além de capacitar equipes de diversos setores visando à ampliação do ICV brasileiro (MACHADO; CAVENAGUI, 2009).

2.2 Água Virtual

Água potável é um recurso precioso e cada vez mais escasso. Os ecossistemas dependem de sua disponibilidade, assim como é igualmente indispensável para os seres humanos e suas atividades (MILÀ I CANALS et al., 2009). Com uma população mundial projetada em 8 bilhões de pessoas em 2025, a demanda por água potável para agricultura deverá dobrar até essa data (DAES, 2008; ROCKSTROM et al., 2006). Assim, a implantação de métricas para o uso dos recursos hídricos nos processos produtivos é de grande importância para avaliar os impactos, atribuir responsabilidades e ainda auxiliar no desenvolvimento de soluções para minimizar o consumo de água por empresas e indivíduos.

Uma das abordagens comumente citada na literatura é a que diz respeito ao conteúdo de Água Virtual presente em um produto ou serviço. Esse conceito foi primeiramente definido por A. J. Allan, no início da década de 1990. A repercussão da ideia, porém, só

passou a ser mais expressiva quando o trabalho de Hoekstra e Hung (2002), sobre a identificação e quantificação dos fluxos de comércio de água virtual entre as nações, foi publicado.

Para Carmo et al. (2007), essa concepção remete à quantidade de água que está embutida em certos produtos, principalmente nas *commodities* agrícolas, enquanto matéria prima intrínseca desses produtos. Em outras palavras, toda água envolvida no processo de produção de um bem agrícola ou industrial é denominada água virtual. Normalmente, o conteúdo de água “real” presente fisicamente nos produtos, é negligenciável em comparação com o conteúdo de água virtual.

Esse conteúdo pode ainda ser classificado de acordo com sua origem, como segue. “Água verde” se refere à água proveniente da chuva ou umidade do solo, que evapora durante a produção, principalmente durante os estágios de crescimento das culturas agrícolas. “Água azul” está relacionada às águas de superfície ou subterrâneas utilizadas para irrigação ou outros fins e que são consumidas pela evapotranspiração³ dos vegetais ou nos processos de produção. “Água cinza” é aquela que se tornou poluída durante o processo produtivo, e é definida como a quantidade de água necessária para diluir a poluição a níveis aceitáveis estabelecidos nos padrões de qualidade e potabilidade (WICHELNS, 2010; HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2007; HOEKSTRA et al, 2011).

Outra importante definição diz respeito à extração e ao consumo d’água. Alguns autores como KING e WEBBER (2008), preferem classificar o uso dos recursos hídricos entre “consumidos” e “captados, porém não consumidos”. Uma quantidade de água pode ser classificada como consumida quando é retirada das águas de superfície ou subterrâneas e não retorna ao ecossistema para uso futuro em seu ciclo hidrológico, como na

³ Evapotranspiração é a perda de água do solo por evaporação e a perda de água da planta por transpiração. Esses dois processos ocorrem concomitantemente e, devido à sua necessidade de mensuração (ou estimação), denominou-se evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração é normalmente expressa em milímetros (mm) por unidade de tempo. Essa taxa representa a quantidade de água perdida de um solo cultivado em unidades de profundidade de água. A unidade de tempo pode ser hora, dia, mês, década ou até mesmo um ciclo inteiro da cultura.

evapotranspiração das plantas ou na incorporação direta aos produtos. Água captada, todavia, diz respeito à quantidade de água retirada de um ecossistema e que, após o uso, retorna ao meio-ambiente para ser utilizada novamente para outros propósitos, como, por exemplo, na água retirada de um rio, utilizada para propósitos de resfriamento e devolvida ao mesmo rio de forma aquecida. Outro exemplo ainda mais pontual é a água utilizada para geração de energia em usinas hidroelétricas, na qual apenas passa através dos geradores, sem ser consumida (FINGERMAN et al, 2010).

O cálculo do conteúdo de água virtual presente em um determinado produto agrícola se dá pelo somatório da evapotranspiração diária de uma determinada cultura (em mm/dia) durante todo o seu período de crescimento. Soma-se a este valor, quando ocorrer, o consumo de água realizado durante o processamento ou refino industrial.

2.3 Biocombustíveis

Os biocombustíveis são, em última análise, resultado da capacidade dos organismos fotossintéticos de transformar CO₂ em biomassa. A partir dela se extraem as principais matérias-primas utilizadas para a produção desses combustíveis: açúcares e gorduras. Etanol produzido a partir de amido de milho ou sacarose de cana de açúcar e biodiesel elaborado a partir de óleos vegetais são os principais biocombustíveis comercializados em escala mundial. Sabidamente, sua principal vantagem está na capacidade de substituir os combustíveis fósseis (REIJNDERS; HUIBREGTS, 2009).

O processo de produção de biodiesel inclui as etapas de transesterificação, purificação e evaporação. Em princípio, qualquer fonte de triglicerídeos pode ser utilizada como matéria-prima, porém as mais comumente empregadas no Brasil são os óleos vegetais de soja, colza, mamona e girassol. A principal reação química do processo é apresentada na Figura 1.

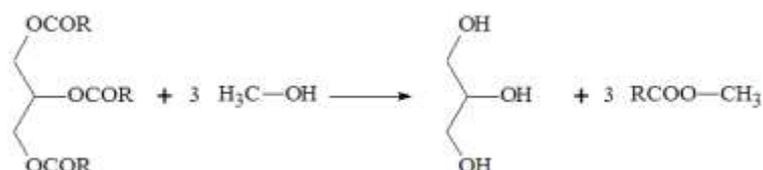


Figura 1. Reação de transesterificação de um óleo vegetal a ésteres metílicos (biodiesel).

De acordo com Petrou e Pappis (2009), em um processo de produção de biodiesel típico, para cada tonelada de matéria-prima (óleo vegetal) e 135 kg de metanol são obtidos 946

kg de ésteres metílicos, 89 kg de glicerina e 23 kg de ácidos graxos livres. Os últimos dois, importantes subprodutos com valor comercial. O biodiesel obtido por essa reação é biodegradável, não tóxico e possui uma eficiência energética 20 a 30% maior que a gasolina, em virtude da maior compressão em que operam os motores a diesel (SOLOMON, 2010).

Para Ketola e Salmi (2010), embora apresente vantagens ambientais em relação aos combustíveis fósseis, os avanços obtidos pela produção e consumo de biodiesel ainda são limitados. A Tabela 1 resume as vantagens e desvantagens desse biocombustível a partir das três dimensões da sustentabilidade.

Tabela 1. Impactos ambientais, sociais e econômicos da produção e consumo de biodiesel.
Fonte: adaptado de Ketola e Salmi (2010).

<i>Impactos Ambientais</i>	<i>Impactos Sociais</i>	<i>Impactos Econômicos</i>
✓ Melhorias em relação aos combustíveis fósseis	✓ Criação de empregos	✓ Métodos de produção conhecidos
✓ Pouca poluição durante o uso	✓ Fomento à agricultura familiar (Brasil)	✓ Mais baratos no futuro do que os combustíveis fósseis
* Poluição gerada durante a produção	* Disputas entre pessoas (empresas x agricultores)	✓ Criação de empresas
* Danifica o solo	* Uso de alimentos para produção de combustível	* Altos custos de produção (colza)
* Perda de biodiversidade		* Ciclo de vida curto: será substituído por outras tecnologias mais sustentáveis

2.4 Avaliação do ciclo de vida, água virtual e biocombustíveis.

Durante a fase de Inventário do Ciclo de Vida, informações de entrada (materiais, energia, etc) e saída (resíduos, emissões, etc) para todos os processos dentro dos limites do sistema são coletadas e compiladas em um inventário, apresentado os impactos associados a uma unidade funcional. Porém, ao identificar os fluxos de energia e materiais utilizados no ciclo de vida de um produto, somente a quantidade de água utilizada diretamente no sistema produtivo é avaliada tradicionalmente por uma ACV. As análises falham ao identificar a fonte de origem da água, as condições em que ela sai do sistema ou ainda quando o uso é implícito (MILÀ I CANALS et al, 2009).

Essa deficiência é discutida por Bayart et al. (2010) ao propor uma abordagem para avaliar o uso de “água azul” no contexto da produção dos inventários, assim como os possíveis impactos na perda de qualidade da água e sua disponibilidade na etapa de avaliação dos impactos do ciclo de vida.

Dessa forma, ao estimar o conteúdo de água virtual presente no ciclo de vida de um biocombustível, o presente trabalho também busca contribuir com a produção de dados que podem ser utilizados na construção de inventários de produtos que fazem uso desses combustíveis em seu próprio ciclo de vida.

A representação esquemática do fluxo de água no ciclo de vida de um biocombustível ser visualizada na Figura 2.

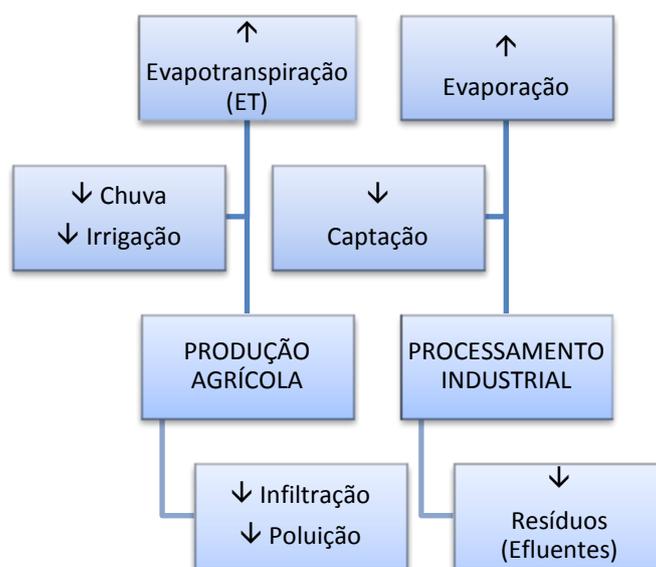


Figura 2. Representação esquemática do fluxo de água no ciclo de vida de um biocombustível.
Fonte: Adaptado de FINGERMAN et al. (2010).

3 Método de pesquisa

O estudo apresentado neste artigo compreendeu uma pesquisa aplicada, exploratória, com abordagem quantitativa. Exploratória por seu intuito de proporcionar maior familiaridade com o tema com vistas a torná-lo mais explícito. Quanto à caracterização do método de trabalho, utilizou-se de um estudo de caso associado a entrevistas e pesquisa bibliográfica, de maneira a permitir uma ampla e detalhada caracterização do universo estudado (GIL, 1991).

A pesquisa foi iniciada, porém, com o apoio de uma abordagem qualitativa. Foram recolhidos dados primários a partir de um questionário semiestruturado, respondido pelo diretor da empresa estudada e por seu gerente de produção. O questionário foi

preparado e aplicado para coletar as informações necessárias ao desenvolvimento da avaliação. Os seguintes tópicos foram abordados:

- (i) caracterização da empresa: perguntas sobre o mercado em que atua, relação com os fornecedores, número de funcionários, faturamento, escala de produção.
- (ii) processo produtivo: perguntas sobre as matérias-primas utilizadas, o processo de produção do biodiesel *per se*, consumo de água, produtos e subprodutos formados, resíduos, eficiência do processo, energia consumida, entre outras.

3.1 Caracterização da empresa

Voltada para a produção de biodiesel, com um investimento inicial de 40 milhões de reais para sua instalação, a empresa foi fundada em 2005 e está localizada no município de Passo Fundo, no norte do estado do Rio Grande do Sul. Sua localização é considerada estratégica por estar no centro de uma importante região produtora de grãos, além de contar com boa estrutura logística e incentivos municipais. A planta para a produção de biodiesel possui autorização para produzir mais de 160 milhões de litros por ano (ANP, 2009), utilizando sementes oleaginosas como fonte de matéria-prima. O óleo vegetal extraído da soja é a principal delas. Porém, devido ao maior teor de gorduras presente nas sementes de canola e girassol, a empresa desenvolve um projeto de implantação de culturas alternativas, estimulando seu plantio. A unidade de recebimento de grãos efetua a compra de soja e canola. Junto a essa unidade funciona o Departamento de Fomento, responsável pela interação com os agricultores. Com estreita relação com o agricultor familiar, do qual adquire em torno de 30% de sua matéria-prima, a empresa foi a uma das primeiras a receber o Selo de Combustível Social. Um dos subprodutos comercializados pela empresa é a glicerina, cuja produção equivale, aproximadamente, a 10% do volume de produção de biodiesel e é destinada à exportação.

3.2 Método de trabalho

Nesse estudo, o conteúdo de Água Virtual (AV) no ciclo de vida do biodiesel produzido pela empresa é avaliado em dois momentos: (i) produção da matéria-prima e (ii) transformação da matéria-prima em biodiesel.

Para o cálculo da AV referente à obtenção da principal matéria-prima utilizada no processo de produção de biodiesel, em m³/ton, utilizou-se uma modificação dos protocolos propostos por Gerbens-Leenes et al. (2009a, 2009b). Os seis passos são descritos a seguir.

Passo 1. Para o cálculo da AV estimada para os grãos de soja, utilizou-se o programa CROPWAT 8.0, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO. A Figura 3 apresenta a interface do programa e parte dos dados de entrada do sistema. Os valores apresentadas pelo software são resultado do modelo proposto por Penman-Monteith (1998) para estimar a evapotranspiração de uma determinada cultura agrícola e leva em consideração a altitude, latitude, temperatura do ar, umidade, radiação solar e a velocidade dos ventos no local do plantio (Eq. 1).

$$RHC(c) = 10 \times \sum_{d=1}^{pc} K_c(c) \times ET_0 \quad (1)$$

O Requisito Hídrico da Cultura (c) (RHD(c)) é o total acumulado da evapotranspiração da cultura (c) durante todo seu período de crescimento (pc). O fator 10 é aplicado para converter mm em m³/ha. ET₀ é a evapotranspiração de referência, em mm/dia, de uma superfície coberta por gramíneas com altura de 12 cm, sob nenhum estresse hídrico e que cobre totalmente o solo com sua sombra (FAO, 1998). K_c(c) é o coeficiente da cultura (c), o qual inclui os efeitos que diferenciam a evapotranspiração da cultura (c) da cultura de referência.

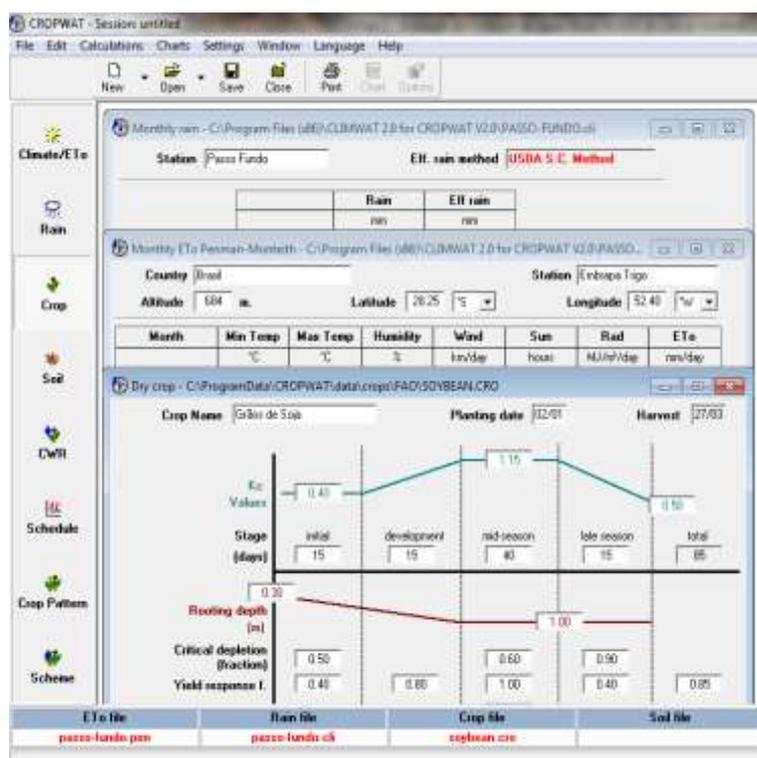


Figura 3. Interface do programa CROPWAT 8.0 e os respectivos dados de entrada.

O presente estudo levou em consideração o período de crescimento e maturação da soja – 85 dias – para o cálculo do total acumulado da evapotranspiração da cultura (ETc), em mm/dia, sob as condições meteorológicas ocorridas na safra de 2011, na região de Passo Fundo / RS.

Os dados meteorológicos foram obtidos através da estação meteorológica do Laboratório de Meteorologia Aplicada à Agricultura da Embrapa Trigo (EMBRAPA, 2011) e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados meteorológicos médios para o período de crescimento e maturação da safra de soja
Fonte: Embrapa Trigo (2011)

	Temp. Mínima Média	Temp. Máxima Média	Umidade Relativa Média	Precip. Total Mensal	Velocidade do Vento Média Mensal	Insolação Diária Média	Radiação Diária Média
Mês	°C	°C	%	mm	m/s	horas	MJ/m ² /dia
Novembro	13,5	26,9	65	60,0	3,1	8,6	23,9
Dezembro	16,1	27,9	70	194,4	3,6	8,2	23,9
Janeiro	18,7	29,5	78	150,4	2,8	7,3	22,2

Passo 2. Nessa etapa avalia-se o rendimento da safra em análise (em ton/ha). No presente estudo, o rendimento da safra local de soja, colhida em março de 2011, foi

estimado em 3.000 kg/ha pela Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER, 2011).

Passo 3. Calcula-se então, a AV da cultura de soja por unidade de massa, $AV_m(c)$ (m^3/ton). Para tanto, divide-se o Requisito Hídrico da Cultura (c) pelo Rendimento da Safra, conforme a Equação 2.

$$AV_m(c) = \frac{RCH(c)}{RS(c)} \quad (2)$$

onde $RS(c)$ é o Rendimento da Safra (c), em ton/ha.

Importante ressaltar que, nos três primeiros passos, é avaliado apenas o consumo direto de água relacionado à matéria-prima soja. Para o cálculo da quantidade de água virtual referente à transformação da matéria-prima em biodiesel, os dados necessários para os próximos passos foram fornecidos pela empresa estudada (Tabela 3, BSBIOS, 2011).

Tabela 3. Consumo de água e rendimento do processo de produção de biodiesel
Fonte: Elaborado pelos autores a partir do estudo de caso

Consumo Água Esmagamento	Fração Óleo / Massa Seca	Consumo Água Transesterificação	Rendimento Reação	Densidade Biodiesel
$8,8 \times 10^{-3} m^3/ton$ soja	0,18	$9,27 \times 10^{-2} m^3/ton$ biodiesel	0,98 – 0,99	0,881 g/L

Passo 4. Nessa etapa avalia-se o rendimento da produção de biocombustível em relação à quantidade de matéria-prima utilizada de acordo com a Equação 3.

$$RP_b(c) = FMS(c) \times f_{lipideos} \times r_{biodiesel} \quad (3)$$

onde $RP_b(c)$ é o rendimento da produção de biodiesel, $FMS(c)$ é a fração de massa seca da cultura (c), $f_{lipideos}$ é a fração de gorduras na massa seca da cultura (c) e $r_{biodiesel}$ é o rendimento da reação de transesterificação do óleo de soja em biodiesel. Nesse trabalho, os dados foram fornecidos pela empresa estudada.

Passo 5. Calcula-se a razão entre a $AV_m(c)$ e o valor obtido no passo 4. O resultado indicará, em m^3/ton , o conteúdo de água virtual por unidade de massa de biodiesel referente à matéria-prima soja, AV_s (Equação 4).

$$AV_s = \frac{AV_m(c)}{RP_b(c)} \quad (4)$$

Passo 6. Finalmente, soma-se ao valor encontrado no passo anterior à quantidade de água consumida durante a produção de biodiesel (m^3/ton), conforme a Equação 5.

$$AV_{total} = (AV_s + AV_p) \times d_{biodiesel} \quad (5)$$

onde, AV_{total} refere-se à água virtual total (em L/L), AV_p à água consumida na produção e $d_{biodiesel}$ é a densidade do biodiesel, em g/L.

4 Resultados e discussão

Alguns pressupostos necessitam ser estabelecidos na avaliação do conteúdo de água virtual do biodiesel para viabilizar a aplicação dos procedimentos de cálculo. Diversos autores como Solomon (2010), King e Webber (2008), Gerben-Leenes et al. (2009a,b), Velázquez et al. (2011) e Galan-del-Castilho e Velázquez (2010) também lançam mão de pressupostos em seus trabalhos, visto a incipiência do tema abordado. A saber:

- (i) o uso efetivo de água pela cultura estudada (soja) é igual ao requisito hídrico dessa cultura. Esse estudo utilizou dados obtidos sob as condições meteorológicas ocorridas na safra de 2011, na região de Passo Fundo / RS. Esses requisitos podem variar de uma safra para outra e de uma região para outra em virtude das condições climáticas e geológicas. O presente estudo, portanto, sobre-estima o consumo de água pelo plantio, uma vez que o volume de chuva precipitado sobre a cultura, na região e no período analisado, foi menor do que o teórico proposto pelo modelo da FAO, que não contempla eventuais estresses hídricos.
- (ii) o rendimento da safra foi estimado em função da área plantada. Porém, de acordo com a EMATER (2011) e agrônomos entrevistados, a produtividade efetiva é maior do que a estimada. Os valores também podem variar nas próximas colheitas em função do aumento da produtividade, o que, teoricamente, diminuiria o uso de água por unidade de massa do produto.
- (iii) embora alguns autores como King e Webber (2008) desconsiderem a evapotranspiração e o volume de precipitação das chuvas no cálculo do conteúdo de água virtual de biocombustíveis sob o argumento de que são fenômenos naturais e inerentes à cada região, esse trabalho considerou tais quantidades de “água verde” consumidas no processo, visto que o plantio de soja (ou outras culturas) tem por objetivo implícito a venda para a produção de biodiesel. Igualmente, a área de terra, e conseqüentemente os recursos hídricos, poderiam ser utilizados para outros propósitos, como para culturas com fins alimentícios.

- (iv) em alguns pontos na avaliação do ciclo de vida do biodiesel, o conteúdo de AV foi negligenciado. São eles: (a) o transporte da safra à refinaria, assim como o transporte do produto à distribuidora e por fim aos consumidores; (b) o conteúdo de AV referente à produção dos insumos agrícolas (ex.: fertilizantes e pesticidas) e demais matérias-primas necessárias à reação de transesterificação do biodiesel (ex.: metanol). (c) Também não foi subtraída a quantidade de AV referente aos subprodutos formados na mesma reação e comercializados pela empresa (ex.: glicerina). Isso se justifica pelas seguintes razões: (a) de acordo com Velázquez et al. (2011), Dominguez-Faus et al. (2009) e Elcock (2010) o volume de água virtual relacionado aos combustíveis fósseis utilizados no transporte é diversas ordens de magnitude menor do que o necessário para o desenvolvimento das culturas utilizadas na produção de biodiesel e pode, portanto, ser negligenciado. Além disso, esse estudo considera que deve ser avaliado o fluxo de água consumida nas diversas etapas produtivas e não os fluxos físicos ocorridos ao longo da cadeia produtiva; (b) o desenvolvimento de uma metodologia completa, de modo similar à Avaliação do Ciclo de Vida tornaria a análise excessivamente complexa, já que muitos dados ainda não são disponíveis e deveriam ser estimados, acrescentando, assim, incertezas nos valores encontrados (GEERBER-LEENES, 2009). Para Milà i Canals (2009), uma metodologia de análise que inclua todas as variáveis possíveis ainda não foi descrita na literatura pesquisada. Tal metodologia, de qualquer forma, excederia o escopo dessa pesquisa, delimitado pela etapa agrícola (plantio, maturação e colheita) e o processamento industrial. (c) Ainda, o conteúdo de carbono relativo ao reagente químico metanol, utilizado na produção de biodiesel, é igual, estequiometricamente, ao conteúdo de carbono na glicerina produzida no processo, compensando de certa forma o conteúdo de AV entre matérias-primas e subprodutos.
- (v) grande parte da literatura analisada apresenta o conteúdo de água virtual dos biocombustíveis em função da quantidade de energia por eles produzidos. A unidade de energia empregada pelo Sistema Internacional de medidas é o Joule; para volume, Litro e para massa, grama. Entretanto, ainda não há consenso entre as unidades utilizadas pelos pesquisadores, entre elas: galões para volume; libras para massa e BTUs, milhas ou quilômetros rodados, volume ou massa de CO₂ produzido, Wh e calorias para energia, sendo as últimas oriundas de diferentes métodos de análise (FINGERMAN et al., 2010). O presente texto irá apresentar os resultados “um passo atrás”, em litros de água consumida por litro de biodiesel produzido, pois dessa maneira torna-se possível estabelecer comparações mais precisas entre os valores apresentados e os dados encontrados na literatura.

Dessa forma, pode-se sugerir que os valores apresentados a seguir seguem uma abordagem conservadora.

4.1 Resultados observados

A Tabela 4 apresenta os volumes de evapotranspiração e de chuva para a cultura de soja, na região de Passo Fundo, para a safra de 2011.

Tabela 4. Volumes de evapotranspiração e chuva acumulados no período de crescimento de maturação da cultura de soja na região de Passo Fundo para a safra de 2011. Fonte: CROPWAT, 2011

<i>Mês</i>	<i>Período</i>	<i>Estágio</i>	<i>Kc</i>	<i>ETc</i>	<i>ETc</i>	<i>Vol. Chuva</i>
				<i>mm/dia</i>	<i>mm/período</i>	
Novembro	05 – 15	Inicial	0,40	1,91	11,5	5,5
Novembro	15 – 25	Desenvolvimento	0,41	2,18	21,8	18,1
Novembro	25 – 05	Desenvolvimento	0,73	3,95	39,5	26,9
Dezembro	05 – 15	Médio	1,14	6,09	60,9	38,9
Dezembro	15 – 25	Médio	1,17	6,30	63,0	49,3
Dezembro	25 – 05	Médio	1,17	6,13	67,5	45,6
Janeiro	05 – 15	Médio	1,17	5,96	59,6	38,8
Janeiro	15 – 25	Tardio	1,05	5,18	51,8	35,8
Janeiro	25 – 30	Tardio	0,66	3,00	24,0	28,9
				<i>TOTAL</i>	<i>399,5</i>	<i>287,9</i>

O conteúdo de água virtual por unidade de massa de biodiesel referente à matéria-prima soja, AV_s , foi calculado em 8.163,92 m³/ton. Já o conteúdo de água virtual por unidade de massa de biodiesel referente ao processamento industrial, AV_p , foi estimado em 0,10 m³/ton, totalizando, dessa forma, o conteúdo de água virtual por unidade de massa de biodiesel em 8.164 m³/ton ou 7.192 litros de água por litro de biodiesel.

O processamento industrial utiliza uma grande quantidade de água durante o esmagamento dos grãos de soja e a esterificação do óleo. Esse volume é de aproximadamente 60 metros cúbicos diários. Esse valor, porém, se torna diversas vezes menor quando relativizado em função do volume de biodiesel produzido ou ainda em comparação com o volume de água utilizado no desenvolvimento da soja.

Os valores encontrados estão em concordância com aqueles apresentados pela literatura. Gerbens-Leenes et al. (2009) reportam um volume de 13.676 litros de água para cada litro de biodiesel produzido a partir de soja. Valores de mesma ordem foram encontrados para o produto elaborado a partir de colza. Para Yang, Zhou e Liu (2009), são necessários 15.630 litros de água para a produção de um litro de biodiesel na China. Siebert e Döll (2010) apontam um volume entre 9.962 e 12.995 litros de água consumidos na produção de cada litro de biodiesel, como média mundial, se utilizados

os mesmos critérios de produtividade industrial do presente estudo. Já Galan-del-Castillo e Velázquez (2010) estimam entre 1.310 e 4.430 litros de água o volume consumido para produzir um litro de biodiesel na Espanha, a partir de uma mistura de oleaginosas (colza, soja, girassol) de origem doméstica e importadas.

Tamanha diferença está intimamente relacionada ao tipo de grão utilizado e sua produtividade nas diferentes regiões do globo. A Tabela 5 apresenta a produtividade de soja e colza, em 2009, em seis países produtores, de acordo com a FAO (2011).

Tabela 5. Produtividade média, em Kg/ha, das safras de soja e colza no ano de 2009.
Fonte: FAOSTAT, 2011

<i>País</i>	<i>Produtividade (Kg/ha)</i>	
	<i>Soja</i>	<i>Colza</i>
Brasil	2.618	1.800
Canadá	2.535	1.937
China	1.648	1.875
França	2.513	3.771
Alemanha	1.000	4.287
Estados Unidos	2.958	2.030

A variação de produtividade entre os diversos países serve como um indicador, inversamente proporcional, do volume de água consumida na produção de biodiesel.

São escassos os dados encontrados na literatura para permitir uma comparação mais ampla dos resultados. Observa-se, contudo, que os valores encontrados vão ao encontro dos valores estimados em pesquisas internacionais e podem, assim, contribuir com mais argumentos para o debate a respeito da sustentabilidade dos biocombustíveis.

5 Conclusão

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2011), 55% dos municípios brasileiros podem apresentar um déficit no abastecimento de água até 2015, caso não sejam investidos R\$ 22 bilhões para adequação dos sistemas produtores e prospecção de novos mananciais. Ainda assim, segundo Hoekstra, a utilização racional da água nos processos produtivos pode ser uma vantagem competitiva para o Brasil. O país deverá atrair a atenção internacional, nos próximos anos, por ser um grande exportador de

itens que necessitam de muita água para sua produção, como as *commodities* agrícolas. (EXAME, 2011).

São justamente essas *commodities* agrícolas as matérias-primas para a elaboração de biocombustíveis. Eles são a primeira tentativa para encontrar um substituto menos poluente para os combustíveis fósseis. Isso já se tornou uma realidade no lado do consumidor, porém, ainda não completamente durante sua produção, já que poluem relativamente menos ao serem queimados, mas são intensos utilizadores de água e energia e fonte de poluição em outras etapas de seu ciclo de vida.

Fica evidente que um crescimento no consumo de biocombustíveis levará a um aumento na utilização dos recursos hídricos. Porém, esse fato ainda parece ser ignorado nos inúmeros países que estimulam a produção desses combustíveis. Como no Brasil, que há vários anos adiciona álcool à gasolina (atualmente essa adição é de 25%) e, desde 2010, tornou obrigatória a adição de 5% de biodiesel ao diesel comum.

Neste contexto, esse trabalho buscou avaliar a quantidade de água consumida durante a produção de biodiesel por uma empresa localizada no sul do país. Para isso, utilizou-se do método mais comumente citado na literatura e endossado pela FAO/ONU, assim como de dados obtidos durante o estudo de caso.

Influenciado pelas condições climáticas e geológicas da região produtora dos grãos de soja e somado ao volume de água consumido durante o processo de fabricação de biodiesel, mais de 7 mil litros de água se fazem necessário para obter cada litro desse combustível.

Ao estimar o conteúdo de água virtual presente no ciclo de vida do biocombustível analisado, o presente trabalho também buscou contribuir com a produção de dados que poderão ser utilizados na construção de inventários de produtos que fazem uso de biodiesel em seu próprio ciclo de vida. Outra contribuição possível visa à economia de recursos naturais, já que dados quantitativos são necessários para permitir comparações e eventuais tomadas de decisão cujo objetivo resulta, em última análise, no aumento de produtividade e redução de custos para as empresas.

A dificuldade de obtenção de dados o mais fidedignos possível à realidade relativos ao conteúdo de água virtual em um produto pouco processado, como no caso do biodiesel,

permite perceber a complexidade dessa avaliação para um produto mais industrializado, ou que utilize diversas matérias-primas em sua composição. Há, portanto, necessidade de maior desenvolvimento do conceito de água virtual e em seu método de avaliação para permitir, por exemplo, uma padronização da quantificação de água consumida na elaboração de um determinado produto. Assim, declarações ambientais ou relatórios corporativos de sustentabilidade podem fornecer ao consumidor subsídios para a escolha por produtos e empresas mais sustentáveis.

Referências

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em 18/04/2011.

ARVANITOYANNIS, I. ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines, In: _____. *Waste Management for the Food Industries*. Burlington, Elsevier Academic Press, 2008. Cap. 3, p. 97-132.

BAYART, J-B. et al. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *Int. J. Life Cycle Assess*, v. 15, p. 439-453, 2010.

DAES. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas. *World Population Prospects: The 2008 Revision*, Disponível em: <<http://esa.un.org/unpp>>. Acesso em: 20/03/2011.

DOMINGUEZ-FAUS et al. The Water Footprint of Biofuels: A Drink or Drive Issue? *Environ. Sci. Technol.*, v. 43, p. 3005-3010, 2009.

EMATER. *Informativo Conjuntural 1.127*. Disponível em <www.emater.tche.br>. Acesso em 18/04/2011.

EMBRAPA TRIGO. Informações Meteorológicas. Disponível em <<http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/app/principal/agromet.php>>. Acesso em 18/04/2011.

FAO. Disponível em <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 18/04/2011.

FINGERMAN, K. R. et al. Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*, v. 5, p. 1-7, 2010.

GALAN-DEL-CASTILLO, E.; VELAZQUEZ, E. From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain. *Energy Policy*, v. 38, p. 1345-1352, 2010.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; van der MEER, T. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, v. 68, p. 1052-1060, 2009a.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; van der MEER, T. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 25, p. 10219-10223, 2009.

GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.

GOPALAKRISHNAN, G. et al. Biofuels, Land and Water: A System Approach to Sustainability. *Environ. Sci. Technol.*, v. 43, p. 6094-6100, 2009.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprint of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resource Management*, v. 21, p. 35-48, 2007.

HOEKSTRA, A. Y. et al. *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. Londres: Earthscan, 2011.

KETOLA, T.; SALMI, T. Sustainability life cycle comparison of biofuels: sewage the saviour? *Management of Environmental Quality*, v. 21, n. 6, p. 796-811, 2010.

KING, C.; WEBBER, M. E. Water Intensity of Transportation. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 21, p. 7866-7872, 2008.

MILÀ I CANALS, L. et al. Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I – inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *Int. J. Life Cycle Assess.*, v. 14, p. 28-42, 2009.

MME. *Balanço Energético Anual*. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em 18/04/2011.

PETROU, E.; PAPPIS, C. Biofuels: A Survey of Pros and Cons. *Energy & Fuels*, v. 23, p. 1055-1066, 2009.

REIJNDERS, L.; HUIBREGTS, M. A. J. Transport Biofuels: Their Characteristics, Production and Costs, In: _____. *Biofuels for Road Transport*. Springer, 2009. Cap. 1, p. 1-48.

SOLOMON, B. Biofuels and sustainability. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1185, p. 119-134, 2010.

VELÁZQUES, E.; MADRID, C.; BELTRAN, M. J. Rethinking the Concepts of Virtual Water and Water Footprint in Relation to the Production-Consumption Binomial and the Water-Energy Nexus. *Water Resource Management*, v. 25, n. 2, p. 743-761, 2011.

WICHELNS, D. Virtual Water: A Helpful Perspective but not a Sufficient Policy Criterion. *Water Resource Management*, v. 24, p. 2203-2219, 2010.

YANG, Q. Z.; SONG, B. Sustainability Assessment of Biofuels as Alternative Energy Resources. *Sustainable Energy Technologies. IEEE International Conference on*, p. 1001-1006, 2008.

Bioenergia e água: uma comparação entre as Pegadas Hídricas do etanol e biodiesel produzidos no Brasil

Armando Resende Neto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
armando.neto@ufrgs.br

José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS
ribeiro@producao.ufrgs.br

1 Introdução

A expansão dos biocombustíveis se deve, em grande parte, ao desejo de uma menor utilização do petróleo. Isso ocorre em virtude da flutuação do preço do petróleo e da dependência dos países produtores desse combustível, cuja situação político-social é instável. Além disso, a produção de biocombustível é estimulada pela preocupação com as mudanças climáticas e a necessária redução dos gases causadores do efeito estufa, pois essas novas fontes energéticas possuem um potencial considerável para mitigar as concentrações de CO₂ atmosférico emitidas por seu uso (MEIJERINK et al., 2008).

Mudanças costumam trazer reflexões e novos questionamentos. A produção de biomassa para a elaboração de combustíveis visando à substituição, ao menos parcial, dos combustíveis fósseis levanta algumas questões importantes. Entre elas, a competição com a produção de alimentos, a preservação de ecossistemas e da diversidade biológica, a busca por uma melhor inserção social nos processos produtivos, como no plantio e na colheita, a sua viabilidade econômica e, ainda, a necessidade de desenvolvimento científico e tecnológico no setor (CEBDS, 2008).

Outra crítica bastante contundente, porém menos frequente, diz respeito ao intensivo uso de água na produção dos biocombustíveis (GIAMPETRO et al., 1997; BERNDES, 2002; GERBENS-LEENES et al., 2009).

Água doce é essencial para a manutenção da vida na Terra, não apenas em relação às necessidades humanas mais básicas, como para a alimentação, mas também para a saúde do meio ambiente. Um importante desafio que se aproxima é conseguir prover a

essas necessidades e ainda garantir que a extração de água não afete os ecossistemas aquáticos. De acordo com a ONU, a humanidade já utiliza cerca de 25% da evapotranspiração terrestre total e aproximadamente metade das águas de superfície disponíveis (DAES, 2008).

No presente ritmo do aumento populacional, há uma preocupação com a limitação da disponibilidade de água para alimentação e produção de fibras para gerações futuras em diversas regiões e países. Normalmente, as mudanças climáticas são relacionadas às emissões de gases do efeito estufa, como o CO₂, CH₄ e N₂O proveniente da queima de energia fóssil. Uma mudança para o consumo de energia “neutra” em CO₂, como a biomassa é, dessa forma, estimulada por políticas governamentais e empresas.

Atualmente, a produção de biomassa para alimentação e fibras pela agricultura já consome cerca de 86% do total de água doce utilizada, frequentemente entrando em conflito com outros usos, como a atividade industrial e o abastecimento urbano. Assim, uma mudança da energia fóssil para energia obtida através da biomassa acarreta em um aumento ainda maior da pressão sobre os recursos hídricos. Além disso, novas áreas de terra para a agricultura são cada vez mais escassas. Portanto, todo aumento de produção deverá vir das áreas agrícolas já existentes, o que requer uma intensificação da sustentabilidade dos processos produtivos com o aumento da eficiência do uso da terra e das águas (GERBENS-LEENES et al., 2008).

Apesar do fato de o Brasil contar com grande quantidade de terras aráveis e abundantes recursos hídricos superficiais e subterrâneos, o debate acerca do consumo de água na produção de etanol e biodiesel no país não pode ser postergado. Assim, o presente texto irá tratar do impacto do uso dos recursos hídricos nesse novo contexto energético. Mais especificamente, esse artigo contribui para prover informações sobre a demanda de água relacionada à produção de biocombustíveis. Essas informações são importantes para construção de índices de sustentabilidade.

O presente artigo é resultado de uma análise da literatura e de um conjunto de dados obtidos de fontes oficiais. O objetivo específico deste trabalho é avaliar, de forma quantitativa, a Pegada Hídrica do etanol e do biodiesel produzidos no Brasil.

Esse texto está organizado conforme segue. A próxima seção apresenta um conciso Referencial Teórico sobre bioenergia, biocombustíveis, água virtual e pegada hídrica. Na

sequencia, são descritos os Procedimentos Metodológicos utilizados para a coleta e processamento dos dados obtidos. A seção seguinte apresenta os resultados e as reflexões sobre os achados e o método de avaliação. Por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

2 Referencial teórico

2.1 Água Virtual

O capital natural, uma metáfora para os recursos naturais, como ar, água, terra e os habitats, quando vistos como meios de produção, é essencial, não apenas para a vida na Terra, mas também para o suprimento das necessidades humanas, como a produção de biomassa (COSTANZA et al., 1997).

A disponibilidade de água doce é um pré-requisito para o crescimento da biomassa. Assim, quando a agricultura se direciona para a produção de grãos e espécies com fins energéticos, mais água se faz necessária, desviando seu uso da alimentação e abastecimento humano. A utilização de bioenergia em substituição às fontes fósseis gera, portanto, a necessidade de informações detalhadas sobre os requisitos hídricos necessários para esse novo propósito, para garantir, entre outros fins, a segurança alimentar.

Nesse sentido, uma das abordagens comumente citada na literatura é a que diz respeito ao conteúdo de Água Virtual presente em um produto ou serviço. Esse conceito foi primeiramente definido por A. J. Allan, no início da década de 1990. Para Carmo et al. (2007), essa concepção remete à quantidade de água que está embutida em certos produtos, principalmente nas *commodities* agrícolas, enquanto matéria prima intrínseca desses produtos. Em outras palavras, toda água envolvida no processo de produção de um bem agrícola ou industrial é denominada água virtual. Normalmente, o conteúdo de água “real” presente fisicamente nos produtos é negligenciável em comparação com o conteúdo de água virtual.

Esse conteúdo pode ainda ser classificado de acordo com sua origem, como segue. “Água verde” se refere à água proveniente da chuva ou umidade do solo, que evapora durante a produção, principalmente durante os estágios de crescimento das culturas agrícolas.

“Água azul” está relacionada às águas de superfície ou subterrâneas utilizadas para irrigação ou outros fins e que são consumidas pela evapotranspiração dos vegetais ou nos processos de produção. “Água cinza” é aquela que se tornou poluída durante o processo produtivo, e é definida como a quantidade de água necessária para diluir a poluição a níveis aceitáveis estabelecidos em padrões de qualidade e potabilidade (WICHELNS, 2010; HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2007; HOEKSTRA et al, 2011).

O cálculo do conteúdo de água virtual presente em um determinado produto agrícola se dá pelo somatório da evapotranspiração diária de uma determinada cultura (em mm/dia), durante todo o seu período de crescimento. Soma-se a este valor, quando ocorrer, o consumo de água realizado durante o processamento ou refino industrial.

2.2 Pegada Hídrica

Segundo Hoekstra (2008), a água doce tem se tornado um recurso global em função do crescente comércio internacional de *commodities* cuja produção faz uso intenso de água, como grãos, gado, fibras e bioenergia. Como resultado, o uso dos recursos hídricos está espacialmente desconectado do local de consumo.

Uma ferramenta que analisa os requisitos hídricos de culturas agrícolas, assim como do fluxo internacional de água virtual é a Pegada Hídrica (PH). Define-se pelo total anual de água utilizado na produção de bens e serviços relacionados a certo padrão de consumo. A PH de um produto, seja uma *commodity*, um bem ou um serviço, é igual ao volume de água doce utilizado para a produção daquele bem no local onde foi utilizado, dentro e/ou fora do território nacional. Os resultados geralmente são indicados em m³/ano ou m³/capita/ano. Os principais fluxos mundiais de água virtual estão relacionados à utilização de soja (11%), trigo (9%), arroz (6%) e algodão (4%) (HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2008).

De acordo com Velázquez et al. (2010), embora frequentemente utilizados como sinônimos, os conceitos de Água Virtual e Pegada Hídrica apresentam uma diferença fundamental, pois permitem identificar os responsáveis pelo “consumo” de água, sejam eles os produtores ou os consumidores finais. Água virtual é definida como um indicador físico da quantidade de água necessária para *produzir* bens e serviços, e a Pegada Hídrica indica a quantidade de água necessária para produzir os bens e serviços que serão *consumidos* por um país ou indivíduo. Assim, a água virtual se consolida como um

indicador a partir de um ponto de vista da produção, enquanto a Pegada Hídrica é um indicador com uma perspectiva do consumo.

2.3 Biocombustíveis

A definição da FAO (2006, 2009) para biomassa diz respeito aos materiais de origem orgânica, como culturas agrícolas e produtos silvícolas, resíduos e subprodutos agrícolas, estrume, material de origem microbiana e resíduos domésticos e industriais. É utilizada para alimentação ou ração animal (ex.: trigo, milho e açúcar), como material (ex.: algodão, madeira e papel) ou com propósitos energéticos (ex.: amido, açúcar, óleo de mamona). A primeira geração de biocombustíveis utiliza tecnologias convencionais de obtenção, como a fermentação de carboidratos, no caso do etanol, e o processamento de óleos vegetais para a elaboração de biodiesel.

A produção e o uso do etanol combustível no Brasil teve início na década de 1970, com o objetivo de estimular a substituição da gasolina por álcool e, em consequência, reduzir a dependência do país em relação à importação de petróleo. De acordo com Rodríguez (2010), o Proálcool constitui o mais importante programa de combustível comercial renovável implantado no mundo até hoje. Décadas de investimento dos setores público e privado em agroenergia tem posicionado o país como o líder mundial na produção eficiente de biocombustíveis. Para esse autor, não existe combustível baseado em agricultura que possa hoje concorrer com o etanol brasileiro derivado da cana de açúcar, o qual é competitivo mesmo com a cotação do petróleo em valores tão baixos quanto US\$ 50 o barril (REIJNDERS e HUIBREGTS, 2009)

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2010), em seu último Balanço Energético Nacional, o país produziu no ano de 2009 mais de 26 milhões de metros cúbicos de etanol.

Com o lançamento do Programa Nacional de Produção do Biodiesel (PNPB), em 2004, o debate acerca do uso desse biocombustível passou efetivamente a integrar as políticas públicas (BRASIL, 2005). Em 2008 o óleo diesel comercializado no Brasil continha, por força de lei, 2% de biodiesel, em uma mistura conhecida por B2. Esse percentual se elevaria gradualmente até 5%, a partir de 2013. A previsão inicial do governo foi superada ao antecipar esse percentual já em janeiro de 2010, demonstrando o sucesso do programa e o aumento da demanda por biodiesel (GOLLO et al, 2010). Naquele

mesmo ano, 2.396.955 m³ de biodiesel foram produzidos no país (ANP, 2011). Entre as diretrizes do PNPB estão: (i) sustentabilidade e promoção de inclusão social; (ii) garantia de preços competitivos, qualidade e suprimento do produto; e (iii) utilização de diferentes fontes oleaginosas cultivadas nas diversas regiões do país (FERRAZ FILHO, 2009; BRASIL, 2011).

2.4 Bioenergia

A origem da energia derivada da biomassa está no processo universal de fotossíntese que armazena a energia solar em ligações químicas. Embora a eficiência desse processo varie entre as diversas espécies vegetais, existe uma relação linear entre a quantidade de radiação recebida e o total de biomassa sobre o solo, em condições naturais de água e nutrientes (Goudriaan et al., 2001).

Como molécula de reserva energética e base para todas as outras moléculas orgânicas, a glicose é utilizada por todas as plantas no desenvolvimento e manutenção de seus tecidos. Além dos carboidratos, como a glicose, outros principais compostos orgânicos de origem vegetais são as proteínas, lipídios, ligninas e os ácidos orgânicos. A quantidade de energia armazenada nas diversas moléculas orgânicas varia em função da quantidade de glicose utilizada em sua produção. Sendo assim, a quantidade de energia obtida pela queima de uma determinada biomassa é resultado de sua composição intrínseca (Nelson e Cox, 2008).

Açúcares, amido e óleo podem ser processados diretamente em biocombustíveis. Porém, uma grande fração dos vegetais é composta por celulose e derivados. Atualmente, essa fração tem sido utilizada para obtenção de calor (em caldeiras, por exemplo) e para a produção de eletricidade através de sua queima. Espera-se que essas frações celulósicas se tornem uma fonte importante para a produção dos chamados biocombustíveis de segunda geração, como o etanol a partir do bagaço da cana-de-açúcar e do milho. Dessa forma, o volume de biocombustível obtido por uma mesma quantidade de matéria-prima vegetal deve aumentar consideravelmente. A Figura 1 apresenta as diferentes formas de energia obtidas a partir da biomassa.

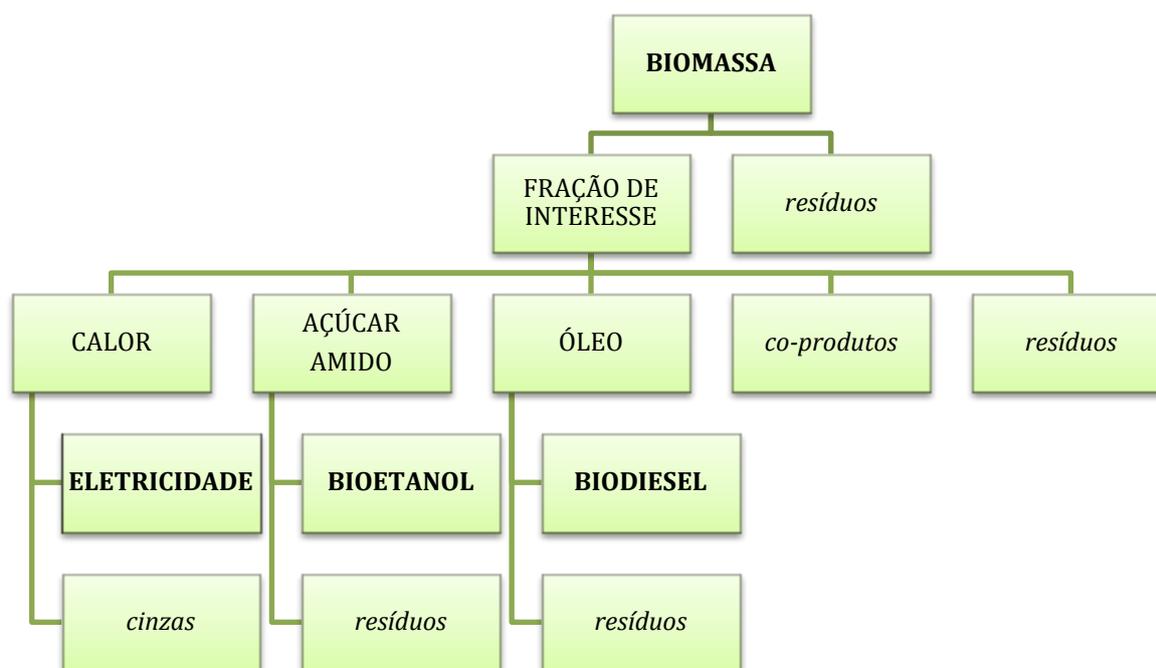


FIGURA 1. Da biomassa à bioenergia de primeira geração.
Fonte: adaptado de Gerbens-Leenes et al. (2009a)

Ao estimar a Pegada Hídrica do etanol e biodiesel brasileiros, o presente trabalho também busca contribuir com a produção de dados que podem ser utilizados na construção do inventário nacional e de produtos que fazem uso desses combustíveis em seu próprio ciclo de vida.

3 Procedimentos metodológicos

O estudo apresentado neste artigo compreendeu uma pesquisa aplicada, exploratória, com abordagem quantitativa. Exploratória por seu intuito de proporcionar maior familiaridade com o tema com vistas a torná-lo mais explícito. Quanto à caracterização do método de trabalho, utilizou-se de uma pesquisa bibliográfica e dados obtidos de um estudo de caso, de maneira a permitir uma ampla e detalhada caracterização do universo estudado (GIL, 1991).

Para o cálculo da Pegada Hídrica, deve-se primeiramente avaliar o conteúdo de Água Virtual (AV) presente no ciclo de vida do biodiesel e etanol produzidos no Brasil. Essa avaliação é realizada em dois momentos: (i) produção da matéria-prima e (ii) transformação da matéria-prima em combustível.

Para o cálculo da AV referente à obtenção das principais matérias-primas utilizadas nos processos de produção de biodiesel e etanol, em m³/ton, utilizou-se uma modificação

dos protocolos propostos por Gerbens-Leenes et al. (2009a, 2009b). Os passos são descritos a seguir.

Passo 1. Para o cálculo da AV estimada para os grãos de soja e para a cana-de-açúcar, utilizou-se o programa CROPWAT 8.0, desenvolvido pela FAO para estimar a evapotranspiração de uma determinada cultura agrícola (Eq. 1).

$$RHC(c) = 10 \times \sum_{d=1}^{pc} K_c(c) \times ET_0 \quad (1)$$

O Requisito Hídrico da Cultura c (RHD(c)) é o total acumulado da evapotranspiração da cultura c durante todo seu período de crescimento (pc). O fator 10 é aplicado para converter mm em m^3/ha . ET_0 é a evapotranspiração de referência, em mm/dia, de uma superfície coberta por gramíneas, sob nenhum estresse hídrico (FAO, 1998). $K_c(c)$ é o coeficiente da cultura c , o qual inclui os efeitos que diferenciam a evapotranspiração da cultura c da cultura de referência.

O presente estudo levou em consideração o período de crescimento e maturação da soja e da cana-de-açúcar, 85 e 365 dias, respectivamente, para o cálculo do total acumulado da evapotranspiração da cultura (ET c), em mm/dia, sob condições meteorológicas históricas, nas regiões das dez principais empresas produtoras de biodiesel e etanol do país, em volume de produção.

Os dados meteorológicos foram obtidos através da base de dados CLIMWAT 2.0, desenvolvida pelo Grupo Agrometeorológico da FAO e representam as médias históricas para as estações meteorológicas analisadas (2006).

Passo 2. Nessa etapa avalia-se o rendimento da safra em análise (em ton/ha). No presente estudo, o rendimento da safra foi estimado como a produtividade média brasileira do período entre 2007 a 2009, de acordo com as estatísticas disponíveis na base de dados FAOSTAT (2011). Os dados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Produtividade média brasileira para as safras de soja e cana-de-açúcar entre os anos de 2007 a 2009. Fonte: FAOSTAT (2011)

<i>Cultura</i>	<i>Ano</i>	<i>Produtividade Anual (ton/ha)</i>	<i>Produtividade Média (ton/ha)</i>
----------------	------------	---	---

Soja	2007	2,81	2,75
	2008	2,81	
	2009	2,62	
Cana-de-açúcar	2007	77,63	79,04
	2008	79,27	
	2009	80,23	

Passo 3. Calcula-se então, a AV da cultura por unidade de massa, $AV_m(c)$ (m^3/ton). Para tanto, divide-se o Requisito Hídrico da Cultura (c) pelo Rendimento da Safra, conforme a Equação 2.

$$AV_m(c) = \frac{RCH(c)}{RS(c)} \quad (2)$$

onde $RS(c)$ é o Rendimento da Safra (c), em ton/ha .

Importante ressaltar que, nos três primeiros passos, é avaliado apenas o consumo direto de água relacionado à matéria-prima. Para o cálculo da quantidade de água virtual referente à transformação da matéria-prima em biodiesel e etanol, os dados necessários para os próximos passos foram obtidos de um estudo de caso (artigo submetido à Revista X) e da União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA, 2011). Os valores relativos ao biodiesel são apresentados na Tabela 2. Para o etanol, esse valor é estimado em $1,52 m^3$ para cada tonelada de cana processada.

TABELA 2. Consumo de água e rendimento do processo de produção de biodiesel

Consumo Água Esmagamento	Fração Óleo / Massa Seca	Consumo Água Transesterificação	Rendimento Reação	Densidade Biodiesel
$8,8 \times 10^{-3} m^3/ton$ soja	0,18	$9,27 \times 10^{-2} m^3/ton$ biodiesel	0,98 - 0,99	0,881 g/L

Passo 4. Nessa etapa avalia-se o rendimento da produção de biodiesel em relação à quantidade de matéria-prima utilizada de acordo com a Equação 3.

$$RP_b(c) = FMS(c) \times f_{lipideos} \times r_{biodiesel} \quad (3)$$

onde $RP_b(c)$ é o rendimento da produção de biodiesel, $FMS(c)$ é a fração de massa seca da cultura (c), $f_{lipideos}$ é a fração de gorduras na massa seca da cultura (c) e $r_{biodiesel}$ é o rendimento da reação de transesterificação do óleo de soja em biodiesel. Os dados foram fornecidos pela empresa estudada.

Para o etanol, utilizou-se a média do rendimento da produção de 36 usinas de processamento de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Para cada tonelada de matéria-prima são elaborados 63,6 Kg de etanol (aproximadamente 80 litros).

Passo 5. Calcula-se a razão entre a $AV_m(c)$ e o valor obtido no passo 4. O resultado indicará, em m^3/ton , o conteúdo de água virtual por unidade de massa de biodiesel e etanol referente à matéria-prima, AV_{mp} (Equação 4).

$$AV_{mp} = \frac{AV_m(c)}{RP_b(c)} \quad (4)$$

Passo 6. Soma-se ao valor encontrado no passo anterior à quantidade de água consumida durante a produção do biocombustível (m^3/ton), conforme a Equação 5.

$$AV_{total} = (AV_{mp} + AV_p) \times d_{biocombustível} \quad (5)$$

onde, AV_{total} refere-se à água virtual total (em L/L), AV_p à água consumida na produção e $d_{biocombustível}$ é a densidade do biodiesel e etanol, em g/L.

Passo 7. Finalmente, o produto entre AV_{total} e o volume do biocombustível produzido no país fornece a *Pegada Hídrica*, em m^3 , do total anual de água utilizado para a produção de etanol e biodiesel no Brasil (MME, 2011). Este valor pode ser ainda relativizado em função da população, permitindo avaliar o consumo anual de água *per capita* no setor de biocombustíveis, conforme Equação 6.

$$PH = \frac{AV_{total} \times \text{Volume Anual Produzido}}{\text{População}} \quad (6)$$

4 Resultados e discussão

Alguns pressupostos e considerações necessitam ser estabelecidos na avaliação do conteúdo de água virtual do biodiesel para viabilizar a aplicação dos procedimentos de cálculo. A saber:

- (i) o uso efetivo de água pela cultura estudada é igual ao requisito hídrico dessa cultura. Esses requisitos podem variar de uma safra para outra e de uma região para outra em virtude das condições edafoclimáticas. O presente estudo, portanto, sobre-estima o consumo de água pelo plantio, uma vez que o

volume de chuva precipitado sobre a cultura, na região e no período analisado, pode ter sido menor do que o teórico proposto pelo modelo da FAO, que não contempla eventuais estresses hídricos.

- (ii) o rendimento médio da safra foi estimado pela FAO. Porém, de acordo com a Secretaria de Meio-Ambiente do Estado de São Paulo (2011), a produtividade efetiva é maior do que a estimada (em torno de 86 ton/ha). Os valores também podem variar nas próximas colheitas em função do aumento da produtividade, o que, teoricamente, diminuiria o uso de água por unidade de massa do produto.
- (iii) embora alguns autores como King e Webber (2008) desconsiderem a evapotranspiração e o volume de precipitação das chuvas no cálculo do conteúdo de água virtual de biocombustíveis sob o argumento de que são fenômenos naturais e inerentes à cada região, esse trabalho considerou tais quantidades de “água verde” consumidas no processo, visto que o plantio de soja (ou outras culturas) tem por objetivo implícito a venda para a produção de biodiesel e etanol. Igualmente, a área de terra, e conseqüentemente os recursos hídricos, poderiam ser utilizados para outros propósitos, como para culturas com fins alimentícios.
- (iv) em alguns pontos da avaliação do ciclo de vida dos biocombustíveis, o conteúdo de AV foi negligenciado. São eles: (a) o transporte da safra à refinaria, assim como o transporte do produto à distribuidora e por fim aos consumidores; (b) o conteúdo de AV referente à produção dos insumos agrícolas (ex.: fertilizantes e pesticidas) (c) Também não foi subtraída a quantidade de AV referente aos co-produtos formados e comercializados pela empresa (ex.: açúcar e glicerina). Isso se justifica pelas seguintes razões: (a) de acordo com Velázquez et al. (2011), Dominguez-Faus et al. (2009) e Elcock (2010) o volume de água virtual relacionado aos combustíveis fósseis utilizado no transporte é diversas ordens de magnitude menor do que o necessário para o desenvolvimento das culturas utilizadas na produção de biodiesel e pode, portanto, ser negligenciado. Além disso, esse estudo considera que deve ser avaliado o fluxo de água consumida nas diversas etapas produtivas e não os fluxos físicos ocorridos no processo; (b) o desenvolvimento de uma metodologia completa, de modo similar à Avaliação do Ciclo de Vida tornaria a análise excessivamente complexa, já que muitos dados ainda não são disponíveis e deveriam ser estimados, acrescentando, assim, incertezas nos valores encontrados (GEERBER-LEENES, 2009). Para Milà i Canals (2009), uma metodologia de análise que inclua todas as variáveis possíveis ainda não foi descrita na literatura pesquisada. Tal metodologia, de qualquer forma, excederia o escopo dessa pesquisa, delimitado pela etapa agrícola (plantio, maturação e colheita) e o processamento industrial.
- (v) de acordo com a Agência Nacional do Petróleo e Biocombustíveis, 84% do biodiesel produzido no país utilizou a soja como matéria-prima, no mês de

março de 2011. Outros 12% foram elaborados a partir de gordura bovina. Esse estudo não considerou em suas análises o conteúdo de água virtual relativo à produção de biodiesel de origem animal.

- (vi) as 10 maiores usinas de etanol do país produziram, em 2009, o equivalente a 11% do total nacional. Entretanto, uma extrapolação é justificável pelo fato de que 86% desse combustível foi elaborado no estado de São Paulo e em regiões próximas às analisadas (UNICA, 2011). Já para o biodiesel, as 10 maiores empresas representaram, em 2009, 60% da produção total (ANP, 2011). A empresa JBS produziu, naquele ano, 120 mil m³ de biodiesel, sendo elencada na 7^a posição entre as maiores produtoras. Entretanto, essa empresa utiliza gordura bovina como matéria-prima e, por essa razão, não foi incluída do estudo.
- (vii) os últimos dados consolidados para o etanol brasileiro são relativos ao ano de 2009. Embora as estatísticas para o mercado de biodiesel referentes ao ano de 2010 já estivessem disponíveis durante a realização desse artigo, e demonstrassem um crescimento considerável do setor, para fins de comparação foram utilizados os dados referentes ao ano anterior.

Diversos autores como Solomon (2010), King e Webber (2008), Gerben-Leenes et al. (2009a,b), Velázquez et al. (2011) e Galan-del-Castilho e Velázquez (2010) também lançam mão de pressupostos em seus trabalhos, visto a incipiência do tema abordado. Assim, pode-se sugerir que os valores apresentados a seguir seguem uma abordagem conservadora.

Resultados observados

A Tabela 3 apresenta os volumes de evapotranspiração das culturas de cana-de-açúcar e soja nas regiões das dez maiores empresas produtoras de biocombustível, para a safra 2009.

TABELA 3. Volume de evapotranspiração das culturas de soja e cana-de-açúcar e produção anual das de maiores empresas do setor, em 2009. FONTE: Elaborado pelos autores a partir de ANP, UNICA e CLIMWAT.

Combustível	Usina	Localização	Produção Anual (m ³)	ET _c (mm)
Etanol	São Martinho	Pradópolis, SP	411.991	1337
	Renuca	Promissão, SP	347.298	1333
	Da Barra	Barra Bonita, SP	315.804	1105
	Colorado	Orlândia, SP	276.936	1166
	São José	Macatuba, SP	247.661	1333
	Santa Elisa	Sertãozinho, SP	246.591	1337
	Vale do Rosário	Morro Agudo, SP	245.257	1166
	Barra Grande	Lençóis Paulista, SP	231.413	1105
	Moreno	Monte Aprazível, SP	227.021	1542
	Moema	Orindiúva, SP	222.860	1487
Biodiesel	Oleoplan	Veranópolis, RS	173.079	264

Adm	Rondonópolis, MT	165.941	264
Granol	Anápolis, GO	130.383	279
Caramuru	São Simão, GO	118.543	314
Granol	Cachoeira do Sul, RS	117.186	315
Bsbios	Passo Fundo, RS	109.134	328
Fiagril	Lucas do Rio Verde, MT	88.923	255
Biocapital	Charqueada, SP	81.987	286
Brasil Ecodiesel	Rosário do Sul, RS	54.788	423
Petrobras	Quixadá, CE	42.459	382

A evapotranspiração média das culturas nas regiões analisadas foi de 1.287 mm para a cana-de-açúcar e de 297 mm para a soja, ponderadas pelo volume de produção das empresas.

O conteúdo de água virtual total (matérias-primas e processamento industrial) por unidade de massa de biodiesel e etanol, AV_{total} , foi calculado em 6.621 e 2.561 m³/ton, respectivamente, equivalente a 5.833 e 2.021 L/L.

Considerando o ano de 2009, o país consumiu 14,0 km³ de água na produção de biodiesel e outros 52,8 km³ na produção de etanol, totalizando 66,8 km³, o que representa uma média nacional de, aproximadamente, 350 m³ de água *per capita* para o setor de biocombustíveis.

Os valores encontrados vão ao encontro daqueles estimados na literatura. A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os dados do presente estudo e os valores encontrados por outros pesquisadores.

TABELA 4. Comparação entre os conteúdos de água virtual do biodiesel e etanol, em L/L.

Combustível	Água Virtual	Autor	Água Virtual	Diferença Percentual
Biodiesel	5.833	Gerbens-Leenes et al. (2009)	13.676	+ 135%
		Yang, Zhou e Liu (2009)	15.630	+ 168%
		Siebert e Döll (2010)	9.962 a 12.995	+ 71 a + 122%
		Galan-del-Castillo e Velázquez (2010)	1.310 a 4.430	- 77 a - 24%
Etanol	2.021	Gerbens-Leenes et al. (2009)	2.516	+ 24%
		Scholten (2009)	2.856	+ 41%
		van Linden et al. (2010)	1.932	- 4%
		de Fraiture et al. (2008)	3.046	+ 51%

A maior diferença entre os estudos está relacionada à produção de biodiesel. Os valores apontam para o consumo de água em diferentes regiões do globo. Apenas os trabalhos de Gerbens-Leenes et al. (2009) e Siebert e Döll (2010) se referem a uma média mundial. Os outros estudos são regionais e incluem os aspectos edafoclimáticos de cada país. Yang, Zhou e Liu (2009) apresentam as estatísticas referentes à China, enquanto Galan-del-Castillo e Velázquez (2010) trazem os valores encontrados na produção de biodiesel

na Espanha. Ainda, a matéria-prima reportada pelos estudos também varia, incluindo colza, soja e girassol, além de outros óleos vegetais.

Em relação ao etanol, os dados apresentam uma maior concordância, pois se referem ao álcool combustível produzido a partir da cana-de-açúcar. Além disso, os dados apresentados não refletem variações anuais, com exceção de van Linden et al. (2010), o qual apresenta os valores referentes a 2005. O trabalho de Fraiture et al. (2008), utiliza uma outra metodologia, denominada WATERSIM, para o cálculo da evapotranspiração, e dessa forma, seus achados diferem da metodologia padrão empregada pelos demais autores.

Quando comparado com o etanol produzido por outras fontes, a diferença no consumo de água se torna significativa. Segundo Scholten (2009), o etanol elaborado a partir de amido de milho, majoritariamente nos Estados Unidos, consome 1.249 litros de água para cada litro do combustível. Embora o conteúdo de água virtual seja menor em relação ao elaborado a partir de cana-de-açúcar, a produtividade por hectare do etanol a base de amido de milho (3.100 L/ha) é a metade da produção brasileira (6.300 L/ha).

A produção de biodiesel, a partir de um hectare de soja é de, aproximadamente, 510 litros. Esse representa apenas 8% da quantidade de etanol produzida a partir da mesma área de cana-de-açúcar. Isso é devido, em parte, à baixa concentração de óleo na semente de soja (18% da massa seca). Essa é uma das principais críticas em relação ao biodiesel de soja, já que a produtividade de outras espécies oleaginosas é diversas vezes superior à da leguminosa. A cultura da mamona, por exemplo, produz cerca de 700 litros de óleo por hectare, enquanto a palmeira de dendê é capaz de produzir mais de 5 mil litros na mesma área (KOHLHEPP, 2010). De acordo com um estudo preparado pelo Fundo para o Desenvolvimento Internacional da OPEP, o Brasil apresenta um potencial para o cultivo de 9 milhões de hectares de dendê e outros 21 milhões de hectares para a produção de colza, a qual contém cerca de 40% de óleo em sua semente (FISCHER et al., 2009).

Conclusões

No atual cenário de produção de biocombustíveis, dois fatores têm potencial para serem forças motrizes: o preço do barril do petróleo e a evolução tecnológica. O primeiro por permitir que se apresentem como produtos substitutos a dependência de petróleo, e o segundo por viabilizar a redução dos custos de produção e o aumento da produtividade.

O aumento da produção de etanol e biodiesel, no Brasil, certamente trará impactos sobre os recursos hídricos, seja pelo aumento da área plantada, pelo uso de agrotóxicos e pesticidas ou ainda pela utilização de grandes volumes de água nas usinas produtoras. Para van Lienden et al. (2010), a Pegada Hídrica dos biocombustíveis no Brasil será da ordem de 126 km³, no ano de 2030.

Meijerink et al. (2008) sugerem que esses efeitos sejam incluídos nas atuais políticas públicas para o setor e que se sejam estimulados a coleção e análise de informações quantitativas de seus impactos, uma vez que essas informações ainda são bastante limitadas. No Brasil, esses efeitos deveriam ser considerados de acordo com a Lei 9.433/1997 – Política Nacional dos Recursos Hídricos, no contextos das bacias hidrográficas e políticas públicas regionais para a implantação de métricas de sustentabilidade relacionadas ao uso de recursos hídricos para a produção de biocombustíveis.

Nesse contexto, esse trabalho buscou avaliar a quantidade de água consumida durante a produção de biodiesel e etanol no Brasil, no ano de 2009. Para isso, utilizou-se do método mais comumente citado na literatura e endossado pela FAO/ONU, assim como de dados obtidos do governo brasileiro e outras fontes oficiais.

Em 2009, o consumo de água para a produção de biocombustíveis totalizou 66,8 km³, sendo 14,0 km³ referentes à produção de biodiesel e outros 52,8 km³ à produção de etanol. Esses dados sugerem um consumo médio de 350 m³ de água *per capita* para o setor naquele ano, ou 2.350 litros de água para cada litro de biocombustível.

Ao estimar o conteúdo de água virtual presente no ciclo de vida dos dois principais biocombustíveis brasileiros, o presente trabalho também buscou contribuir com a produção de dados que poderão ser utilizados na construção de inventários de produtos

que fazem uso de biodiesel e etanol em seu próprio ciclo de vida, ampliando assim o escopo deste trabalho.

Assim, a implantação de métricas para o uso dos recursos hídricos nos processos produtivos é de grande importância para avaliar os impactos, atribuir responsabilidades e ainda auxiliar no desenvolvimento de soluções para minimizar o consumo de água por empresas e indivíduos.

O caminho que os biocombustíveis irão percorrer é de difícil previsão. Muitas dúvidas e críticas ainda pairam sobre sua sustentabilidade. Dessa forma, é preciso acelerar a transformação da matriz energética brasileira e mundial, de modo que se explore mais de fontes renováveis e sustentáveis de energia, como a solar e eólica, que são naturalmente oferecidas pelo ambiente e não emitem gases causadores do efeito estufa. É preciso também, evitar que as crescentes captações de recursos hídricos para a produção de biocombustíveis não interfiram na segurança hídrica necessária para o abastecimento das usinas hidroelétricas, que são a principal fonte de eletricidade no Brasil, o que também depende da regulamentação de políticas públicas em níveis regionais e municipais, de acordo com a Política Nacional dos Recursos Hídricos.

Referências

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em 18/04/2011.

BERNDES, G. Bioenergy and water – the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change*, v. 12, p. 253-271, 2002.

BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em 19/04/2011.

CEBDS. Biocombustíveis e Mudanças Climáticas – Interfaces e Potencialidades. Disponível em <http://www.cebds.org.br/cebds/mc-publicacoes_files/Biocombustivel_portugues.pdf>. Acesso em: 18/04/2011.

CARMO, R. et al. Água virtual, escassez e gestão: o Brasil como grande exportador de água. *Ambiente & Sociedade*, v. X, n, I, p. 83-96, 2007.

COSTANZA, R. et al. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital.". *Nature* 387: 253–260. doi:10.1038/387253a0.

DAES. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas. *World Population Prospects: The 2008 Revision*, Disponível em: <<http://esa.un.org/unpp>>. Acesso em: 20/03/2011.

FAO. *Introducing the International Bio-Energy Platform*. Roma: 2006

FAO. T12: Biomass. In: _____, *Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables*. Roma: 2009

FAOSTAT. Disponível em <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 18/04/2011.

FERRAZ FILHO. *O setor de biocombustíveis no Brasil*. Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior. 2009.

FINGERMAN, K. R. et al. Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*, v. 5, p. 1-7, 2010.

FRAITURE, C.; GIORDANO, M. LIAO, Y. Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. *Water Policy*, v. 10, s. 1, p. 67-81, 2008.

GALAN-DEL-CASTILLO, E.; VELAZQUEZ, E. From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain. *Energy Policy*, v. 38, p. 1345-1352, 2010.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; van der MEER, T. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 25, p. 10219-10223, 2009.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; van der MEER, T. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*, v. 68, p. 1052-1060, 2009a

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.

GOLLO, S. S. et al. Configuração da cadeia produtiva do biodiesel, a partir da matéria-prima soja, no rio grande do sul. *Apresentação Oral*. Disponível em <<http://www.sober.org.br/palestra/15/917.pdf>>. Acesso em 18/04/2011.

GOUDRIAAN, J., GROOT, J.J.R. AND UITHOL, P.W.J. Productivity of Agro-ecosystems, In: JACQUES R.; BERNARD S.; HAROLD A. *Terrestrial global productivity*, p. 301-313, Elsevier Academic Press, 2001.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprint of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resource Management*, v. 21, p. 35-48, 2007.

HOEKSTRA, A.Y. AND CHAPAGAIN, A.K. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.

KING, C.; WEBBER, M. E. Water Intensity of Transportation. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 21, p. 7866-7872, 2008.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

MEIJERINK et al. Biofuels and water: an exploration. *Strategy & Policy Brief*, v.1. 2008

NELSON, D. L.; COX. M. M. W. H. *Lehninger Principles of Biochemistry*. 5a ed. Freeman. 2008.

REIJNDERS, L.; HUIBREGTS, M. A. J. Transport Biofuels: Their Characteristics, Production and Costs, In: _____. *Biofuels for Road Transport*. Springer, 2009. Cap. 1, p. 1-48.

RODRÍGUEZ. 2010.

SCHOLTEN. 2009.

SIEBERT, S.; DÖLL, P. Quantifying blue and green virtual water contentes in global crop production as well as potential production losses without irrigation. *Journal of Hydrology*, v. 384, p. 198-217, 2010.

VAN LIENDEN, A.; GERBENS-LEENES, P.; HOEKSTRA, A.; VAN DER MEER, T. Biofuel scenarios in a water perspective: the global blue and green water footprint of road transport in 2030. *UNESCO/IHE Research Report Series No. 43*, 2010.

VELÁZQUES, E.; MADRID, C.; BELTRAN, M. J. Rethinking the Concepts of Virtual Water and Water Footprint in Relation to the Production-Consumption Binomial and the Water-Energy Nexus. *Water Resource Management*, v. 25, n. 2, p. 743-761, 2011.

UNICA, 2011. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 18/04/2011.

WICHELNS, D. Virtual Water: A Helpful Perspective but not a Sufficient Policy Criterion. *Water Resource Management*, v. 24, p. 2203-2219, 2010.

WORLDWATCH INSTITUTE. *Biofuels for Transport*. Global Potential and implications for Sustainable Energy and Agriculture. Londres: Earthscan, 2007

YANG, ZHOU E LIU. Land and water requirements of biofuels and implications for food supply and the environment in China. *Energy Policy*, v. 37, p. 1876-1885, 2009.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema da sustentabilidade ambiental oferece, atualmente, importantes oportunidades para o setor produtivo na geração de valor e inovação, visto que a sociedade revela crescente conscientização para essa questão. Dessa forma, as empresas têm buscado implantar políticas de responsabilidade socioambiental baseadas, entre outros aspectos, em conformidade, qualidade e segurança, com o objetivo de evitar desperdícios de materiais, água e energia, reduzindo os passivos ambientais e fomentando o crescimento dos negócios.

Métodos de avaliação da sustentabilidade representam um papel fundamental no sucesso de uma política de responsabilidade socioambiental. Para Lozano (2006) esses métodos têm dois propósitos gerais. O primeiro é avaliar o estado atual do progresso das organizações em direção à sustentabilidade, sejam empresas, governos ou organizações da sociedade civil. O outro propósito é comunicar aos *stakeholders* os esforços e o progresso na busca por prosperidade financeira, qualidade ambiental e equidade social. Consumidores, fornecedores e investidores buscam, cada vez mais, os instrumentos de comunicação, avaliação e prestação de contas para tomada de suas respectivas decisões.

Com o intuito de contribuir para a discussão a respeito do tema acima mencionado, o presente trabalho revisou os principais conceitos, métodos e ferramentas ligados à inclusão de valores ambientalmente sustentáveis no projeto de produtos e em seu ciclo de vida. Além disso, buscou, com a aplicação de um método cada vez mais aceito na literatura, investigar o impacto do setor de biocombustíveis sobre os recursos hídricos no Brasil.

De acordo com a IEA (2010), o setor de transporte é responsável por aproximadamente 19% do uso global de energia e 22% das emissões de dióxido de carbono relacionadas ao uso de energia e é provável que isso se mantenha no futuro próximo. Assim, a indústria de biocombustíveis tem sido promovida por políticas públicas em diversos países visando à diminuição da dependência de petróleo e a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

Porém, como exposto pela presente dissertação, pode-se observar que os biocombustíveis utilizam grandes volumes de água durante sua elaboração, principalmente durante o crescimento das culturas agrícolas que são as principais matérias-primas dessas fontes energéticas. Dessa forma, a Água Virtual é um conceito útil para ilustrar o consumo de água em produtos que fazem uso intensivo desse recurso durante seu ciclo de vida, como as *commodities* agrícolas e conseqüentemente os biocombustíveis.

Como a responsabilidade ambiental é um tema relativamente novo na sociedade contemporânea, assim como os possíveis desdobramentos da eco-eficiência e do desenvolvimento sustentável, erros e acertos serão naturais até que se chegue a um consenso científico e empresarial que realmente privilegie o meio ambiente, apesar do crescimento populacional e da intensificação da cultura de consumo.

O uso excessivo de recursos naturais para produção parece não ter limites, acarretando em aumento da poluição do ar, rios, mares, desmatamentos e perda da biodiversidade. Apesar do crescimento e do desenvolvimento terem gerado uma qualidade de vida melhor na maioria dos países, não se pode esquecer que os recursos naturais são limitados e, em muitos casos, não renováveis. É preciso romper com velhos paradigmas que acreditam que a natureza é imune à presença do homem e que o crescimento econômico deva ser voltado apenas para resultados de curto prazo, o que vai de encontro ao principal conceito de sustentabilidade, o de *ser capaz de atender às necessidades das atuais gerações sem comprometer os direitos das futuras gerações*.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- (i) expansão e aprimoramento do método de Pegada Hídrica para utilização em produtos e bens mais processados ou que utilizem diversas matérias-primas em sua elaboração, como roupas, alimentos, medicamentos e produtos químicos;
- (ii) analisar, separadamente, os impactos dos usos de “água verde” e “água azul” sobre os recursos hídricos, principalmente em culturas agrícolas que façam

uso de sistemas de irrigação e em processos industriais que necessitem de captação de grandes volumes de água, como na indústria de papel e celulose;

- (iii) desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade que incluam o consumo de água direto e de água virtual da mesma forma como já são incluídos os fluxos de energia e materiais.

REFERÊNCIAS

AMARAL, S. P. *Estabelecimento de indicadores e modelo de relatório de sustentabilidade ambiental, social e econômica: uma proposta para a indústria de petróleo brasileira*. Tese de Doutorado em Planejamento Energético e Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

BAUMANN, H.; BOONS, F.; BRAGD, A. Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 10, p. 409-425, 2002.

BÖHRINGER, C.; JOCHEM, P. E. P. Measuring the immeasurable – A survey of sustainability indices. *Ecological economics*, v. 63, p. 1-8, 2007.

ESTY, D.; WINSTON, A. *O Verde que Vale Ouro*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.

GUELERE FILHO, A.; PIGOSSO, D.C.A., ROZENFELD, H. “A Proposal of a Framework for Product Life-Cycle Management (PLM) in the Context of Product-Service Systems (PSS)”. *15th Life Cycle Engineering Conference LCE*, 2008.

NIELSEN, P.H.; WENZEL, H. Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 10, p. 247-257, 2002.

ROZENFELD, H; FORCELLINI, F. *Gestão Do Ciclo De Vida De Produtos Inovadores E Sustentáveis*. Sessão Dirigida. ENEGEP, 2009.

SARMENTO, M.; DURÃO, D.; DUARTE, M. Evaluation of company effectiveness in implementing environmental strategies for a sustainable development. *Energy*, v. 32, p. 920-926, 2007.

SELINGER, G.; MERTINS, K. Sustainability in Production Engineering. In: 4th BMBF Forum For Sustainability. *Apresentação*. Leipzig, 2007. Disponível em: <<http://www.fona.de/en/5068>>. Acesso em 10/12/2009.

SILVA et al. Gestão ambiental e sustentabilidade: diferencial competitivo na estratégia produtiva das empresas. *Anais do XXIX Encontro Nacional De Engenharia De Produção*, 2009.

SILVA E. L.; MENEZES, E. M. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. 4ª. Edição. Florianópolis: UFSC, 2005

WWF – Brasil. *O que é desenvolvimento sustentável?*, 2011. Disponível em <http://www.wwf.org.br/informacoes/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel>. Acesso em 18/04/2011.